

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЗОЗУЛЯК ОКСАНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 664.691:677.021.122.2:631.11

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ВІБРОВІДЦЕНТРОВОГО ЕЛЕКТРООСМОТИЧНОГО
ЗНЕВОЛОЖЕННЯ ВИСОКОВОЛОГОЇ СИРОВИНИ ПЕРЕРОБНИХ І
ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

181 «Харчові технології»
18 «Виробництво та технології»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник
ПАЛАМАРЧУК Ігор Павлович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Зозуляк О. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів віброцентрового електроосмотичного зневоложення високовологої сировини переробних і харчових виробництв.
Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 181 «Харчові технології». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2024.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної проблеми недостатньої техніко-технологічної ефективності процесів та обладнання для видалення вільної та умовно-зв'язаної вологи за умов забезпечення структурної цілісності сировини та максимального збереження її вихідних властивостей, що вирішується за рахунок використання комбінованих фізико-механічних та тепломасообмінних технологічних засобів за інтенсифікації даних процесів через застосування вібраційних, відцентрових, електроосмотичних, фільтраційних та комбінованих фізико-механічних чинників, які забезпечують мінімізацію енерго- та матеріаловитрат. Для вирішення представленої проблеми були висунуті наступні гіпотези:

- фізична: збільшення рушійної сили за зневоложення за рахунок вібромеханічної активації продукції та створення у робочій зоні електроосмотичного тиску;

- технологічні: зменшення енерго-та матеріаловитрат за рахунок комбінування декількох типів фізико-механічного та технологічного впливу, а саме відцентрового, фільтраційного, вібраційного, електроосмотичного; створення найбільш сприятливих умов технологічної обробки різної за своїми властивостями продукції за рахунок вибору необхідного типу комбінованої фізико-механічної дії на сировину;

- конструктивна: застосування в одній установці фільтруючої центрифуги, механічного віброзбудувача та апаратури для реалізації

електроосмотичного ефекту, що дозволяє на певних етапах обробки заданої продукції створити умови перетікання вільної вологи, псевдозрідження та підвищеного тиску.

Концептуальна гіпотеза роботи полягає у створенні у межах технологічного середовища під час реалізації окремих стадій обробки локального стискання сировини за вібровідцентрового впливу для мінімізації структурних пошкоджень продукції, забезпечення умов для проходження електричного струму та ефективної реалізації електроосмотичного ефекту у процесі зневоднення; а на другій стадії – створення псевдозрідженого шару технологічної маси, що супроводжується підвищенням площин поверхонь тепломасообміну при контакті продукції з конвективним потоком енергоносія за рахунок неперервної зміни точок рівноваги часток сировини та оновлення контактних поверхонь в умовах вібраційного впливу, варіювання інтервалів температур та вологовмісту у шарах технологічних середовищ при дії означених силових факторів, які функціонують окремо або комплексно, забезпечуючи реалізацію представлених вище технологічних ефектів.

Поставлені задачі вирішено шляхом розробки ефективної комбінованої дії фізико-механічних процесів для зневоднення різної за своїми властивостями продукції, що було реалізовано за допомогою спроектованого вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача. Для практичної реалізації такої системи заходів використано технологічні схеми виробництва пектину з сушеного жому цукрового буряка та лінію зневоложення і переробки харчового насіння баштанних культур, у межах яких обґрунтовано робочі режими на основі проведених експериментальних та теоретичних досліджень.

Наявні методи зневоложення, які базуються на принципах фільтраційного відокремлення рідкої фази з наступним сушінням, мають ряд недоліків, що пов'язано зі значними витратами енергії на тепломасообмінні процеси. Тому, актуальним є пошук перспективних метод зневоложення

вологонасичених сумішей, що забезпечують енергоефективність процесу сушіння за рахунок прямого підведення теплової енергії.

Розробляючи та проєктуючи технологічне оснащення для зневоложення, проведено аналіз та основні тенденції розвитку процесів та обладнання для сушіння високовологої сировини та їх практичну реалізацію. Проаналізовано перспективні процеси зневоложення сипких та зв'язно-сипких мас, їх конструктивне забезпечення, зокрема за здійснення відцентрового, вібраційного, електроосмотичного видалення вільної вологи. Творче опрацювання літературних джерел дозволило здобувачці обґрунтувати способи інтенсифікації процесу та можливості ефективного поєднання представлених механічних та фізико-механічних технологічних дій. На основі аналізу фізико-механічних властивостей об'єкта обробки було виявлено граничні параметри для тепломасообмінних, фізико-механічних та механічних дій на сировину та обґрунтовано ефективність комплексної поетапної дії таких чинників як вібрація, центрифугування, електроосмотичне відтискування та конвективне сушіння для різного типу продукції.

Розроблено план наукових досліджень для визначення та обґрунтування режимних параметрів досліджуваних фізико-механічних та тепломасообмінних процесів, визначено методики проведення експериментальних досліджень, вибір критеріїв та послідовність оцінки основних параметрів досліджуваних процесів та характеристик коливальної системи.

Проаналізовано конструктивно-технологічні схеми реалізації досліджуваних процесів, на основі яких спроєктовано схему вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача та складено математичну модель. Під час математичного моделювання досліджуваного процесу зневоложення продукції було проаналізовано основні фактори впливу, на основі яких складено загальний вигляд критеріального рівняння процесу масообміну за використання теорії аналізу розмірностей.

Для теоретичного обґрунтування режимних параметрів коливальної системи зневоложувача було складено рівняння руху виконавчих органів вібромашини з дебалансним приводом за застосування методів Лагранжа та їх розрахунку у математичному середовищі MathCAD, що дало змогу визначити кінематичні, силові та енергетичні параметри віброприводу. Отримані закономірності зміни основних параметрів віброзбуджувача машини дозволили обґрунтувати ефективні його робочі режими, які становлять: кутова швидкість приводного валу $\omega = 80 \div 110$ рад/с, амплітуда коливань робочого контейнера $A = 1,8 \div 2$ мм за витрати потужності на процес $N = 150 \div 220$ Вт. Теоретичне дослідження електроосмотичної дифузії рідини за допомогою розробленої схеми зневоложувача дозволили отримати залежності для електрокінетичних, гідродинамічних та силових параметрів процесу, приріст рушійної сили, за рахунок електроосмотичного ефекту, становив у середньому 120 Н.

Експериментальні дослідження дозволили обґрунтувати режими обробки за здійснення операцій вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача пектиномісткої сировини та харчового насіння баштанних культур, а також оцінити основні параметри коливальної системи. Час обробки для досягнення потрібної вологості, за застосування вказаного комбінованого технологічного впливу, виявився вдвічі меншим, ніж для фільтраційного сушіння у нерухомому шарі. Енерговитрати на видалення 1 кг води знизився у 2,7 рази порівняно з традиційним конвективним сушінням, що є, як правило, руйнівним для термолабільних дисперсних систем.

Реалізація електроосмотичного ефекту в умовах розробленої машини дали можливість визначити такі характеристики силового поля: залежність швидкості зневоложення від асиметрії напівперіодів змінного струму, залежність зневоложення від густини струму, залежність швидкості зневоложення від частоти змінного струму, залежність швидкості

вологовидалення від асиметрії напівперіодів струму за різної форми струму, залежність швидкості зневоложення від віброприскорення.

Проведені дослідження дозволили визначити оптимальні параметри процесу зневоложення термолабільних матеріалів за застосування електроосмотичного ефекту: віброприскорення $A\omega^2 = 38 \text{ м/с}^2$; асиметрія амплітуд змінного струму $A+/A = 7,5 \text{ мм/мм}$; середнє значення густини струму $i = 5 \text{ мА/см}^2$; частота змінного струму $F = 24 \text{ Гц}$; ефективна форма струму – трикутна (пилкоподібна); координати установки віброзбуджувача щодо корпусу установки складають 270° .

На основі порівняльного аналізу теоретичних та експериментальних досліджень було отримано основні параметри процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини, що дозволило обґрунтувати робочі режими їх здійснення та перевірити адекватність математичної моделі для відповідного діапазону, що становили в межах $5,8 \div 9,1 \%$ відхилення.

Дослідження процесу зневоложення проводились за загальною методикою, яка передбачала вимірювання вологості харчового насіння та пектиномісткої сировини в залежності від часу обробки. Харчове насіння з початковою вологістю 62% та пектиномістка сировина – 78% подавались через завантажувальний пристрій і займали $3/4$ її об'єму. Інтенсивність вологовидалення контролювалась по різниці відносної вологості сушильного агента на вході та виході з сушильної камери, за досягнення значення вологості насіння близько $9\text{--}10 \%$, пектиномісткої сировини – 16% .

Графо-аналітичні методи оцінки досліджуваного процесу тепло масообміну та динаміки руху виконавчих органів сушарки дозволили отримати залежності основних кінематичних, силових та енергетичних параметрів досліджуваної коливальної системи та визначити ефективні режими її експлуатації. На основі теорії розмірностей та отриманих експериментальних даних досліджуваного процесу графоаналітичним

способом було визначено критеріальне рівняння досліджуваної схеми зневоложення, що враховує параметри тепломасообміну, вібромеханічні та електроосмотичні характеристики.

Представлена оцінка спроектованої вібромашини на основі техніко-економічного та функціонально-вартісного аналізу, параметрів конкурентоспроможності машин у порівнянні з наявними фізико-механічними зневоложувачами та сушарками виявила високий рейтинг розробленої установки. На основі результатів регресійного аналізу експериментальних даних було проведено оптимізацію параметрів процесу зневоложення пектиномісткої сировини за такими критеріями оцінки як напруга електричного поля, віброприскорення, коефіцієнт завантаження робочої ємкості. Проведені дослідження дали можливість розробити робочу документацію для виготовлення вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача та схему адаптивного регулювання параметрів процесу вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложення, що дозволяє адекватно реагувати на зміну фізико-механічної дії під час обробки високовологої сировини за мінімізації енерговитрат.

Ефективність представлених експериментальних та теоретичних досліджень доведено під час впровадження розробленого обладнання на ТОВ «Компанія «Технопром-Продукт», м. Вінниця. Дослідження якісних показників харчового насіння гарбузів, які проведено в умовах Лабораторії якості кормів і сировини Інституту кормів та сільського господарства поділля НААН, підтвердили відповідність стандартам обробленої продукції за хімічним складом у натуральній та абсолютно сухій речовині.

Комплексна техніко-економічна оцінка розроблених технології та обладнання щодо вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення високовологої сировини переробних і харчових виробництв дозволила отримати тижневий економічний ефект у межах 3585,68 грн.

Ключові слова: вібровідцентрове вологовидалення, електроосмотичний ефект, мікроконтролерна система, віброприскорення, параметри змінного струму, високовологе насіння, низькочастотні коливання, харчове насіння, баштанні культури, пектиномістка сировина, коливальна система, жом, конвективний тепломасообмін, сушіння.

ANNOTATION

Zozuliak O. V. Substantiation of constructive-technological parameters of vibrocentric electroosmotic dehumidification of high-moisture raw materials of processing and food productions. Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty 181 «Food Technologies». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of insufficient technical and technological efficiency of processes and equipment for removing free and conditionally bound moisture under the conditions of ensuring the structural integrity of raw materials and maximum preservation of its original properties, which is solved by using combined physical, mechanical and heat and mass transfer technological means for intensifying these processes through the use of vibration, centrifugal, electro-osmotic, filtration and combined physical and mechanical means. The following hypotheses were put forward to solve the problem presented:

- physical: increasing the driving force for dewatering by vibro-mechanical activation of the product and creating electro-osmotic pressure in the working area;
- technological: reduction of energy and material consumption by combining several types of physical, mechanical and technological effects, namely centrifugal, filtration, vibration, electro-osmotic; creation of the most favorable conditions for technological processing of products with different properties by selecting the required type of combined physical and mechanical effects on raw materials;

- constructive: the use of a filter centrifuge, mechanical vibration exciter and equipment for the realization of the electro-osmotic effect in one unit, which allows for the creation of conditions for the flow of free moisture, fluidization and increased pressure at certain stages of processing a given product.

The conceptual hypothesis of the work is to create within the technological environment during the implementation of individual stages of processing local compression of raw materials under vibration-centrifugal action to minimize structural damage to products, provide conditions for the passage of electric current and the effective implementation of the electroosmotic effect in the process of dehydration; and at the second stage - to create a fluidized layer of technological mass, accompanied by an increase in the surfaces of heat and mass transfer when products come into contact with convective flow.

The set tasks were solved by developing an effective combined action of physical and mechanical processes for dehydrating products of different properties, which was realized by means of the designed vibration-centrifugal electro-osmotic dehydrator. For the practical implementation of such a system of measures, technological schemes for the production of pectin from dried sugar beet pulp and a line for dehydrating and processing food seeds of melons were used, within which operating modes were substantiated on the basis of experimental and theoretical studies.

Existing dehydration methods based on the principles of filtration separation of the liquid phase followed by drying have a number of disadvantages due to the significant energy consumption for heat and mass transfer processes. Therefore, it is relevant to search for promising methods of dehydrating moisture-saturated mixtures that ensure the energy efficiency of the drying process through direct heat supply.

When developing and designing technological equipment for dehydration, the main trends in the development of processes and equipment for drying high-moisture raw materials and their practical implementation were analyzed. Promising

processes of dehydration of bulk and viscous bulk materials, their design support, in particular for the implementation of centrifugal, vibration, electro-osmotic removal of free moisture, are analyzed. The creative study of literary sources allowed the applicant to substantiate the ways of intensifying the process and the possibilities of an effective combination of the presented mechanical and physical-mechanical technological actions. Based on the analysis of the physical and mechanical properties of the object of processing, the limit parameters for heat and mass transfer, physical and mechanical effects on raw materials were identified and the effectiveness of the complex stepwise action of such factors as vibration, centrifugation, electro-osmotic squeezing and convective drying for different types of products was substantiated.

A research plan has been developed to determine and substantiate the operating parameters of the studied physical, mechanical, and heat and mass transfer processes, as well as to determine the methods of experimental research, the choice of criteria, and the sequence of evaluation of the main parameters of the studied processes and characteristics of the oscillatory system.

The constructive and technological schemes for the implementation of the studied processes have been analyzed, on the basis of which a scheme of a vibration-centrifugal electro-osmotic dehydrator has been designed and a mathematical model has been developed. During the mathematical modeling of the studied process of dehydration of products, the main factors of influence were analyzed, on the basis of which a general form of the criterion equation of the mass transfer process was drawn up using the theory of dimensional analysis.

For the theoretical substantiation of the mode parameters of the oscillatory system of the dehumidifier, the equations of motion of the executive bodies of the vibration machine with an unbalanced drive were compiled using Lagrange's methods and their calculation in the MathCAD mathematical environment, which made it possible to determine the kinematic, power, and energy parameters of the vibration drive. The obtained regularities of changes in the main parameters of the

machine's vibration exciter made it possible to substantiate its effective operating modes, which are: angular velocity of the drive shaft $\omega = 80 \div 110$ rad/s, vibration amplitude of the working container $A = 1,8 \div 2$ mm for power consumption for the process $N = 150 \div 220$ W. The theoretical study of electroosmotic diffusion of liquid using the developed dehumidifier scheme allowed us to obtain dependences for the electrokinetic, hydrodynamic and power parameters of the process, the increase in driving force due to the electroosmotic effect was on average 120 H.

Experimental studies have made it possible to substantiate the processing modes during the operations of a vibration-centrifugal electroosmotic dehydrator of pectin-containing raw materials and food seeds of melons and gourds, as well as to estimate the main parameters of the oscillating system. The processing time to achieve the desired moisture content, when using this combined technological effect, turned out to be half that of filtration drying in a fixed bed. Energy consumption for the removal of 1 kg of moisture decreased by 2.7 times compared to traditional convective drying, which is usually destructive for thermolabile dispersed systems.

The implementation of the electroosmotic effect under the conditions of the developed machine made it possible to determine the following characteristics of the force field: the dependence of the dehydration rate on the asymmetry of alternating current half-periods, the dependence of dehydration on current density, the dependence of the dehydration rate on alternating current frequency, the dependence of the dehydration rate on the asymmetry of alternating current half-periods at different current shapes, and the dependence of the dehydration rate on vibration acceleration.

The studies made it possible to determine the optimal parameters of the process of dehydration of thermolabile materials using the electroosmotic effect: vibration acceleration $A\omega^2 - 38$ m/s²; asymmetry of alternating current amplitudes $A+/A - 7,5$ mm/mm; average value of current density $i - 5$ mA/sm²; frequency of alternating current $F - 24$ Hz; the effective current waveform is triangular

(sawtooth); the coordinates of the vibration exciter installation relative to the installation corps are 270° .

Based on a comparative analysis of theoretical and experimental studies, the main parameters of the process of vibration-centrifugal electro-osmotic dehydration of food gourds and pectin-containing raw materials were obtained, which made it possible to substantiate the operating modes of their implementation and to verify the adequacy of the mathematical model for the corresponding range, which were within $5.8 \div 9,1$ % the deviation.

The study of the dehydration process was carried out according to a general methodology that involved measuring the moisture content of food seeds and pectin-containing raw materials depending on the processing time. Food seeds with an initial moisture content of 62 % and pectin-containing raw materials with a moisture content of 78 % were fed through the loading device and occupied $3/4$ of its volume. The intensity of moisture removal was controlled by the difference in the relative humidity of the drying agent at the inlet and outlet of the drying chamber, when the moisture content of seeds reached about 9–10 %, and that of pectin-containing raw materials – 16 %.

Graph-analytical methods for assessing the studied process of heat and mass transfer and the dynamics of movement of the dryer's actuators made it possible to obtain the dependences of the main kinematic, power, and energy parameters of the studied oscillatory system and determine the effective modes of its operation. Based on the theory of dimensions and the obtained experimental data of the studied process, the criterion equation of the studied dehydration scheme was determined by graph-analytical method, taking into account the parameters of heat and mass transfer, vibromechanical and electroosmotic characteristics.

The presented evaluation of the designed vibrating machine on the basis of technical, economic, functional, and cost analysis, as well as the parameters of machine competitiveness in comparison with existing physical and mechanical dehydrators and dryers, revealed a high rating of the developed installation. Based

on the results of the regression analysis of experimental data, the parameters of the process of dehydration of pectin-containing raw materials were optimized according to such evaluation criteria as electric field voltage, vibration acceleration, and the loading factor of the working capacity. The studies made it possible to develop working documentation for the manufacture of a vibration centrifugal electro-osmotic dehydrator and a scheme for adaptive control of the parameters of the vibration filtration-osmotic dehydration process, which allows for an adequate response to changes in physical and mechanical effects during the processing of high-moisture raw materials while minimizing energy consumption.

The effectiveness of the presented experimental and theoretical studies has been proved during the implementation of the developed equipment at LLC «Company «Tekhnoprom-Produkt», Vinnytsia. The study of the quality indicators of pumpkin seeds, which was conducted in the Laboratory of Feed and Raw Materials Quality of the Institute of Feed and Agriculture of Podillya NAAS, confirmed compliance with the standards of processed products in terms of chemical composition in natural and absolutely dry matter.

A comprehensive technical and economic assessment of the developed technology and equipment for vibration-centrifugal electro-osmotic dehydration of high-moisture raw materials of processing and food production allowed to obtain a weekly economic effect of 3585.68 UAH.

Keywords: vibrocentric electroosmotic dehumidification, pumpkin seeds, pectinist raw oscillating system, vibrocentric moisture removal, electroosmotic effect, microcontroller system, vibration acceleration, alternating current parameters, high-moisture seeds, low-frequency oscillations.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Стаття у науковому виданні,
включеному до міжнародних наукометричних баз даних
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

1. Palamarchuk I., **Zozulyak O.**, Mushtruk M., Petrychenko I., Slobodyanyuk N., Domin Í., Udodov S., Semenova O., Karpovych I., Blishch R. The intensification of dehydration process of pectin-containing raw materials. *Potravinarstvo*. 2022. Vol. 16. P. 15–26. *(Zozulyak O. проведено експериментальні дослідження для визначення технологічних параметрів, що характеризують інтенсифікацію процесу вібровідцентрового електроосмотичного вологовидалення харчової сировини. Palamarchuk I. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Mushtruk M. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Petrychenko I. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів. Slobodyanyuk N. сформульовано актуальність досліджень з урахуванням усіх виявлених узгоджень і відмінностей у масиві наукової літератури).*

Статті у наукових виданнях,

включених до Переліку наукових фахових видань України

2. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А. Обґрунтування конструктивної схеми вібраційної фільтраційно-осмотичної сушарки. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2011. Вип. 9. С. 173–182. *(Зозуляк О. В. розроблено технологічні характеристики фільтраційно-осмотичної сушарки та проведено експериментальні дослідження. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Зозуляк І. А. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

3. Паламарчук І. П., Цуркан О. О., **Зозуляк О. В.**, Герасімов О. О. Інтенсифікація процесів зневоложення насіння за рахунок використання вібраційного та електро-осмотичного ефектів. Вібрації в техніці та технологіях. 2012. № 1 (65). С. 110–115. *(Зозуляк О. В. розроблено сушарку*

з використанням електроосмотичного ефекту. Паламарчук І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Цуркан О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Герасімовим О. О. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).

4. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Герасімов О. О. Дослідження швидкісних характеристик вібраційно-осмотичного процесу зневоложення. Галузеве машинобудування, будівництво. 2012. Вип. 2 (32). Т. 1. С. 200–207. (Зозуляк О. В. виконано дослідження швидкісних характеристик вібраційно-осмотичного процесу зневоложення. Паламарчук І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Зозуляк І. А. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Герасімовим О. О. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).

5. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Герасімов О. О. Експериментальне обґрунтування основних параметрів вібраційного фільтраційно-осмотичного сушіння. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2012. Вип. 10. Т. 1 (58). С. 157–163. (Зозуляк О. В. виконано експериментальні дослідження з визначення основних технологічних параметрів сушарки. Паламарчук І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Герасімовим О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).

6. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Герасімов О. О. Розроблення комплексу вимірювання та автоматичного регулювання параметрів

вібраційно-осмотичного сушіння. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2012. Вип. 46. С. 159–165. *(Зозуляк О. В. висвітлено основні елементи розробленого вимірювального комплексу для дослідження основних параметрів вібрації, проведено пошук літературних джерел відповідно до тематики досліджень авторів. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Герасимовим О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

7. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Герасимов О. О. Визначення енергетичних та кінематичних параметрів процесу вібраційного конвективно-фільтраційного зневоложення за допомогою мікроконтролера та комп'ютера. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2013. Вип. 12 (75). С. 120–128. *(Зозуляк О. В. виконано необхідні експериментальні дослідження для оцінки енергетичних характеристик процесу сушіння. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Герасимовим О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

8. Янович В. П., **Зозуляк О. В.**, Качур Я. Ю. Визначення оптимальних робочих параметрів вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача жому. Вібрації в техніці та технологіях. 2014. № 1 (73). С. 122–126. *(Зозуляк О. В. виконано необхідні експериментальні дослідження для основних робочих режимів процесу сушіння. Янович В. П. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Качур Я. Ю. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).*

9. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Липовий І. Г. Розробка математичної моделі процесу вібровідцентрового сушіння кератиномісткої сировини.

Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2014. Вип. 45. Т. 2. С. 124–129. *(Зозуляк О. В. приведено теоретичне обґрунтування основних робочих параметрів вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложувача, представлено розрахункову схему і закони руху цієї системи у вигляді рівнянь Лагранжа. Паламарчук І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Липовим І. Г. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

10. Palamarchuk I., **Zozulyak O.**, Palamarchuk V. Hydrodynamic and diffusive parameters electroosmotic drying of pectin containing raw materials. Ukrainian Journal of Food Science. 2014. Vol. 2. Iss. 2. P. 318–325. *(Zozulyak O. визначено рівняння сили електроосмотичної дифузії, основні закономірності електроосмотичного кінетичного процесу руху рідкої фази, залежності основних параметрів електродинаміки осмотичного масоперенесення. Palamarchuk I. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Palamarchuk V. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

11. **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Чубик Р. В. Вібровідцентрова електроосмотична сушарка для зневоложення високовологої сировини. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2015. № 2 (90). С. 52–56. *(Зозуляк О. В. представлено загальний вигляд та конструкторське рішення вібровідцентрової електроосмотичної сушарки для зневоложення високовологої сировини. Зозуляк І. А. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Чубик Р. В. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).*

12. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Чубик Р. В. Електромеханічна модель адаптивної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки. Вісник Харківського національного технічного університету

сільського господарства імені Петра Василенка. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. 2015. Вип. 166. С. 226–235. *(Зозуляк О. В. розроблено рішення регулювання параметрів вібровідцентрової електроосмотичної сушарки для зневоложення. Паламарчук І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Зозуляк І. А. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Чубик Р. В. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).*

13. Palamarchuk I., **Zozuliak O.**, Zozuliak I., Novgorodska N. Modeling of vibrocentrifugical electric osmotical dehydrating of with high humidity. Engineering, Energy, Transport AIC. 2017. No. 3 (98). P. 112–118. *(Zozuliak O. використано II теорію подібності та теорію розмірностей, складено критеріальне рівняння масообміну для досліджуваного процесу. Palamarchuk I. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Zozuliak I. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Novgorodska N. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).*

14. Паламарчук І. П., Слободянюк Н. М., **Зозуляк О. В.**, Іволга А. Р. Оцінка вібраційних і електротехнічних параметрів процесу зневоложення високовологих та рідких дисперсних систем переробних і харчових виробництв. Тваринництво та технології харчових продуктів. 2020. № 1. С. 67–76. *(Зозуляк О. В. обґрунтовано збільшення рушійної сили процесу зневоложення насіння гарбуза та іншої високовологої сільськогосподарської сировини шляхом центрифугування за обертання ротора, створення електроосмотичного ефекту за ефективних умов для однобічної дифузії,*

процесу фільтрування середовища через перфорації ротора. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Слободянюк Н. М. проведено розрахунок залежностей швидкості зневоднення від асиметрії напівперіодів змінного струму, густини струму, частоти змінного струму, асиметрії напівперіодів електричного струму за різної форми зміни параметрів напруги та віброприскорення. Іволгою А. Р. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).

Стаття у науковому виданні іншої держави

15. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Герасимов О. А. Разработка системы управления процессом сушки сыпучего сырья в конвективно-фильтрационной виброцентробежной машине. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2013. Vol. 15. № 4. С. 212–219. *(Зозуляк О. В. розглянуто і розроблено схеми системи автоматичного регулювання і вимірювання енергетичних і просторових параметрів вібраційних тепломасо-обмінних процесів. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Герасимовим О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

Патенти України на корисну модель

16. Паламарчук І. П., Янович В. П., Зозуляк І. А., **Зозуляк О. В.** Вібровідцентрова сушарка: патент на корисну модель № 80873 Україна, МПК F26B 17/30. Заявник та патентовласник Вінницький національний аграрний університет; u 2013 00049; заявлено 02.01.2013; опубліковано 10.06.2013. 4 с. *(Зозуляк О. В. розроблено конструктивну схему вібровідцентрової сушарки для зневоложення високовологої сировини, проведено випробування. Зозуляк І. А. підготовлено патентну заявку. Паламарчуком І. П. розроблено загальну концепцію ідеї та основні технічні рішення вібровідцентрової сушарки. Янович В. П. здійснено патентний пошук та попередній аналіз*

наявних технологій, визначено ключові технічні вимоги та характеристики пристроїв).

17. **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Болонний В. Т., Чубик Р. В. Адаптивна вібровідцентрова електроосмотична сушарка: патент на корисну модель № 107157 Україна, МПК F26B 17/30. Заявник та патентовласник Зозуляк Оксана Володимирівна; у 2015 11239; заявлено 16.11.2015; опубліковано 25.05.2016. 4 с. *(Зозуляк О. В. розроблено схему регулювання параметрів вібровідцентрової сушарки для зневоложення високовологої сировини, проведено випробування. Зозуляк І. А. підготовлено патентну заявку. Болонним В. Т. взято участь у проєктуванні прототипу та вивченні ефективності роботи сушарки, створенні технічної документації. Чубик Р. В. здійснено патентний пошук та попередній аналіз наявних технологій, визначено ключові технічні вимоги та характеристики пристроїв).*

18. **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Болонний В. Т., Чубик Р. В. Вібровідцентрова електроосмотична сушарка: патент на корисну модель № 107156 Україна, МПК F26B 17/30. Заявник та патентовласник Зозуляк Оксана Володимирівна; у 2015 11238; заявлено 16.11.2015; опубліковано 25.05.2016. 4 с. *(Зозуляк О. В. розроблено конструктивну схему вібровідцентрової сушарки для зневоложення високовологої сировини, проведено випробування. Зозуляк І. А. підготовлено патентну заявку. Болонним В. Т. взято участь у проєктуванні прототипу та вивченні ефективності роботи сушарки, створенні технічної документації. Чубик Р. В. здійснено патентний пошук та попередній аналіз наявних технологій, визначено ключові технічні вимоги та характеристики пристроїв).*

Тези наукових доповідей

19. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.** Обґрунтування енергоощадного процесу вібраційного електроосмотичного сушіння високовологої сировини.

Енергія. Бізнес. Комфорт: регіональна науково-практична конференція, м. Одеса, 19 грудня 2012 року: тези доповіді. Одеса, 2012. С. 35–36. *(Зозуляк О. В. запропоновано напрями енергоефективності процесу зневоложення високовологої сировини за застосування вібровідцентрової та електроосмотичної дії, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків).*

20. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.** Обґрунтування конструкцій та режимних параметрів процесу вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложення. Сучасні проблеми землеробської механіки: XIII Міжнародна наукова конференція, м. Вінниця, 17–19 жовтня 2012 року: тези доповіді. Вінниця, 2012. С. 91–93. *(Зозуляк О. В. запропоновано загальний вигляд та конструкторське рішення вібровідцентрової електроосмотичної сушарки для зневоложення високовологої сировини, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації; особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків).*

21. Зозуляк О. В. Обґрунтування параметрів електроосмотичної дії при вібровідцентровому зневоложенні високовологих дисперсних матеріалів. Актуальні проблеми харчової промисловості: Всеукраїнська науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 08–09 жовтня 2013 року: тези доповіді. Тернопіль, 2013. С. 82–83.

22. **Зозуляк О. В.**, Лапа О. Ю. Розробка системи керування процесом сушіння сипкої сировини у конвективно-фільтраційній вібровідцентровій машині. Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 25–26 квітня 2013 року: тези доповіді. Вінниця, 2013. С. 9–10. *(Зозуляк О. В. розроблено систему регулювання параметрами вібровідцентрової електро-*

осмотичної сушарки для зневоложення високовологої сировини, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Лапою О. Ю. проведено науковий літературний пошук, систематизовано інформацію, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації).

23. **Зозуляк О. В.**, Бондарчук Є. В. Математичне моделювання процесу вібраційного фільтраційно-відцентрового зневоложення. Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 25–26 квітня 2013 року: тези доповіді. Вінниця, 2013. С. 23. *(Зозуляк О. В. проведено математичне моделювання процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення високовологої сировини, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Бондарчук Є. В. проведено науковий літературний пошук, систематизовано інформацію, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації).*

24. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.** Обґрунтування роботи енергоощадного електроосмотичного зневоложувача. Енергія. Бізнес. Комфорт: Науково-практична конференція, м. Одеса, 20 листопада 2014 року: тези доповіді. Одеса, 2014. С. 56–57. *(Зозуляк О. В. проведено дослідження для визначення технологічних параметрів оцінки енергоефективності розробленої вібровідцентрової електроосмотичної сушарки, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків).*

25. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.** Визначення основних параметрів електро-осмотичної технологічної дії у процесі зневоложення пектиномісткої сировини. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023: III Міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 1–3 червня 2023 року: тези доповіді. Вінниця, 2023. С. 332. *(Зозуляк О. В. проведено*

дослідження для оцінки основних різновидів технологічної дії розробленого процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків).

26. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Fu Yuanxia. Проектування конструкції вібровідцентрового рушійного органу машини для видалення вологи із харчової сировини. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 509–512. (Зозуляк О. В. спроектовано конструкцію вібровідцентрової сушарки для зневоложення високовологої сировини, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків. Fu Yuanxia проведено науковий літературний пошук, систематизовано інформацію, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації).

27. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Fu Yuanxia. Розробка конструктивно-технологічної схеми вібраційного зневоложувача насіння баштанних культур. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України: м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 512–515. (Зозуляк О. В. розроблено технологічні аспекти процесу вібровідцентрового зневоложення насіння баштанних культур. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків. Fu Yuanxia проведено науковий літературний

пошук, систематизовано інформацію, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації).

28. Зозуляк О. В. Вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач. Інноваційні рішення, актуальні проблеми та виклики у галузі харчових технологій: I Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Ірпінь, 05 жовтня 2023 року: тези доповіді. Ірпінь, 2023. С. 119–120.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ВІБРООСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖЕННЯ ПРОДУКТІВ ПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ.....	29
1.1. Закономірності технологій зневоложення сировини харчових та інших переробних виробництв.....	29
1.2. Аналіз фізико-механічних властивостей сировини, що зневоложується.....	32
1.2.1. Буряковий жом.....	32
1.2.2. Насіння баштанних культур.....	38
1.3. Оцінка конструктивно-технологічних характеристик досліджуваних методів зневоложення.....	42
1.3.1. Відцентрове фільтрування.....	42
1.3.2. Вібраційне зневоложення.....	45
1.3.3. Зневоложення за допомогою електромагнітного поля.....	48
1.3.4. Контактне та безконтактне електроосмотичне зневоложення	51
1.4. Обґрунтування конструктивної схеми вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложувача.....	58
1.4.1. Аналіз конструктивних схем зневоложувачів відцентрової дії.....	58
1.4.2. Техніка та технології для зневоложення бурякового жому...	61
1.4.3. Техніка та технології для зневоложення харчового насіння баштанних.....	69
1.4.4. Обґрунтування принципової схеми вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача.....	72
1.5. Висновки до 1 розділу.....	74
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ....	75

2.1. Програма експериментальних досліджень та оснащення для її реалізації.....	75
2.1.1. Програма експериментальних досліджень.....	75
2.1.2. Дослідна модель вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача.....	76
2.1.3. Експериментальне оснащення для оцінки силових та енергетичних характеристик процесу, що досліджується.....	78
2.1.4. Вимірювальне оснащення для оцінки масових характеристик досліджуваної сировини.....	80
2.2. Методика вимірювання параметрів вібрації.....	83
2.3. Методика визначення параметрів процесу зневоложення.....	86
2.3.1. Методика визначення вологості насіння.....	86
2.3.2. Методика визначення площі поверхні насінини.....	88
2.3.3. Методика обробки узагальнення чисел подібності процесу тепло масообміну.....	88
2.4. Обробка результатів досліджень.....	92
2.5. Висновки до 2 розділу.....	95
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОГО ФІЛЬТРАЦІЙНО-ОСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖЕННЯ.....	96
3.1. Динаміка руху виконавчих органів розробленої машини.....	96
3.1.1. Розробка розрахункової схеми.....	96
3.1.2 Кінематичний аналіз системи.....	98
3.1.3. Силовий аналіз системи.....	99
3.1.4. Складання рівнянь Лагранжа для досліджуваної системи.....	101
3.2. Математичне моделювання процесу масоперенесення за електроосмотичної дії на продукцію.....	107
3.2.1. Аналіз теоретичних засад електроосмосу при вологоперенесенні.....	107

3.2.2. Визначення електрокінетичного потенціалу у процесі вологоперенесення для однорідного нескінченно протяжного капіляра...	110
3.2.3. Визначення основних параметрів електроосмотичної дифузії.....	116
3.2.3.1 Відносна щільність електричного заряду на внутрішній поверхні порожнини матеріалу.....	116
3.2.3.2. Гідродинаміка електроосмотичного кінематичного процесу.....	118
3.2.3.3. Основні параметри електрогідродинаміки досліджуваного осмотичного масоперенесення.....	119
3.2.3.4. Сила електрокінетичного тиску на дифузійну рідину.....	122
3.3. Теоретичні засади фільтраційного зневоложення.....	123
3.4. Висновки до 3 розділу.....	124
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ	
ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОВІДЦЕНТРОВОГО	
ЕЛЕКТРООСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖЕННЯ.....	126
4.1. Оцінка амплітудно-частотних характеристик процесу.....	126
4.2. Оцінка кінетики процесу зневоложення.....	130
4.3. Оцінка техніко-економічних характеристик процесу.....	139
4.4. Визначення степеневих коефіцієнтів критеріального рівняння досліджуваного процесу тепло масообміну.....	142
4.5. Оптимізація параметрів процесу зневоложення.....	148
4.6. Перевірка адекватності математичної моделі.....	151
4.7. Дослідження якісних показників.....	152
4.8. Висновки до 4 розділу.....	154
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА	
РІВНЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНІКИ НА	
КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНІСТЬ.....	156
5.1. Розрахунок основних техніко-економічних параметрів.....	156

5.2. Визначення конкурентоспроможності розробленого вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача.....	158
5.3. Розробка промислового вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача.....	165
5.3.1. Конструктивно-технологічна реалізація вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача.....	165
5.3.2. Розробка адаптивної схеми керування процесом вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення.....	170
5.4. Висновки до 5 розділу.....	181
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	182
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	184
ДОДАТКИ.....	202

ВСТУП

Актуальність теми. Процес зневоложення є одним із найбільш складних та енергоємних процесів переробних і харчових виробництв, що значно підвищує собівартість продукції, тому набуває актуальності пошук інноваційних технологічних та конструктивних рішень при розробці сушильних систем, зокрема, застосовуючи механічні та фізико-механічні способи обробки як засіб підвищення рушійної сили процесу зневоложення.

Окрім того, процеси зневоложення пов'язані із загальним завданням підвищенням зберігання плодоовочевої та іншої сільськогосподарської продукції, для чого в останні десятиліття були створені численні технології сушіння різних продуктів (доведення їх до такої вологості, при якій вміст у них цукру починає грати роль консерванту). Дані технології знаходять все більш широке застосування [1, 2, 3], спостерігається формування сушильної галузі промисловості і збільшення виробництва сушених овочів та фруктів.

При будь-якому масштабі використання сушильних технологій важливою є реалізація низки техніко-економічних параметрів, таких як мінімально можлива енергоємність процесу, необхідна однорідність сушіння, мінімальний час виходу на задану вологість та інші характеристики зневоложення. Ці параметри можуть бути забезпечені комплексним підходом до вибору найбільш придатних до даної конкретної ситуації базових фізичних процесів, та спрямовані на максимально ефективно видалення вільної вологи, відповідних їм технологій сушіння і, нарешті, за рахунок створення устаткування, на якому зазначені процеси і технології можуть бути реалізовані при мінімізації енерго- та матеріаловитрат стосовно до обробки заданого типу сировини [4].

Представлена наукова робота базується на фундаментальних працях, теоретичних та експериментальних дослідженнях таких перспективних напрямів, як використання вібраційних ефектів та комбінації сучасних фізико-механічних та теплофізичних процесів тепломасообміну при реалізації

процесів зневоложення. Ефективність реалізації, високий потенціал та перспективи безперервного вдосконалення спостерігається саме від творчого поєднання означених галузей, про що свідчать роботи відомих вібротехнологів та конструкторів: Бабічева А.П., Берника П.С., Блехмана І.І., Гончаревича І.Ф., Джанелідзе Г.Ю., Денісова П.Д., Заїки П.М., Іскович-Лотоцького Р.Д., Карташова І.Н., Кузьо І.В., Ланця О.С., Надутого В.П., Назаренка І.І., Овчинникова П.Ф., Опірського Б.Я., Паламарчука І.П., Повідайла В.А., Потураєва В.Н., Політова І.В., Сергієва А.П., Сіліна Р.І., Тіщенко Л.М., Фролова А.Г., Франчука В.П., Ярошевича М.П. та ін. так і визнаних засновників технологій та обладнання для реалізації процесу сушіння: Бодрова В.С., Бурдо О.Г., Гапонюка І.І., Гінзбурга А.С., Гришина М.О., Жидко В.І., Зав'ялова В.Л., Красникова В.В., Котова Б.І., Ликова О.В., Малина Н.І., Окуня Г.К., Птіцина С.Д., Погорілого Л.В., Резчикова В.А., Снежкіна Ю.Ф., Сорочинського В.Ф., Станкевича Г.М., Уколова В.С., Філоненка Г.К., Чижикова А. Г. та інших.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно з «Державною цільовою програмою «Розвиток українського села до 2015 р.»; пов'язана з тематичним планом НДДКР Національного наукового центру «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» на 2012-2016 рр. за темою «Інтенсифікація процесів харчових, фармацевтичних та мікробіологічних виробництв шляхом механічної та теплофізичної технологічної дії» (Державний реєстраційний номер 0112U006704), держбюджетної НДР «Розроблення промислових моделей та обґрунтування робочих режимів тепломасообмінного обладнання з вібраційним інтенсифікатором процесів сушіння та екстрагування» 2016-2017р. ID:47373 15.09.2015. (00020-1).

При використанні робіт з означених тематик були розроблені дослідні моделі процесів фізико-механічного зневоложення, теоретично та експериментально обґрунтовані основні параметри робочих режимів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є інтенсифікація процесів видалення вільної вологи при обробці баштанної та пектиномісткої сировини при максимальному збереженні якісних характеристик за рахунок оцінки закономірностей комбінованої дії досліджуваних фізико-механічних процесів, розробки дослідної та експериментально-промислової моделі вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

- обґрунтувати актуальність проблеми та визначити ефективність застосування комбінованої вібромеханічної та фізико-механічної дії в технологічних схемах зневоложення при виробництві харчового насіння баштанних та пектиномісткої продукції;

- обґрунтувати та розробити технологічну схему, її дослідну та експериментальні моделі вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача, розробити та скомплектувати необхідне експериментально-вимірвальне оснащення;

- розробити математичні моделі процесів вібровідцентрового, фільтруючого та електроосмотичного зневоложення рослинної сировини та обґрунтувати необхідні параметри оцінки досліджуваних процесів;

- провести обробку експериментальних даних при багатофакторному плануванні та оптимізувати параметри розроблених процесів та обладнання;

- визначити теоретичні та експериментальні залежності для основних конструктивних, технологічних та режимних параметрів досліджуваної вібромеханічної системи, перевірити адекватність математичної моделі;

- визначити основні техніко-економічні параметри розроблених процесів та обладнання, оцінити їх за показниками конкурентоспроможності та рівнем техніки;

- розробити рекомендації для застосування проєктованих технологічних та конструктивних розробок в промисловості, здійснити виробничі промислові

випробування та впровадити їх в умовах сучасного переробного та харчового виробництва.

Об'єкт дослідження: електроосмотичне відтискування вологи, вібровідцентрове зневоложення пектиномісткої сировини та харчового насіння баштанних культур.

Предмет дослідження: вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач, закономірності зміни конструктивно-технологічних параметрів комбінованої вібровідцентрової фізико-механічної дії.

Методи дослідження: теоретичні дослідження виконані методами математичного, фізичного моделювання, теорії подібності та зневоложення, проведення експерименту з математично-статистичною обробкою результатів. Експерименти здійснювались на розроблених установках для зневоложення, обладнаних сучасними методами керування та вимірювання. Для аналітичного дослідження використовувалось програмне забезпечення Matlab, MathCad 15, Excel. Адекватність отриманих експериментальних результатів підтверджена методами статистичного аналізу в програмному середовищі Statistika 10.0.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше:

- визначені основні кінематичні, силові та енергетичні параметри вібровідцентрового приводного механізму зневоложувача на основі розробленої математичної моделі руху виконавчих органів установки при обробці високовологої сипкої маси;

- визначені основні електротехнічні параметри та рушійна сила при використанні електроосмотичного ефекту зневоложувача на основі розробленої математичної моделі процесу електроосмотичного зневоложення сипкої технологічної маси за комбінованої вібромеханічної силової дії;

- розроблена критеріальна залежність, що враховує параметри фільтруючого центрифугування, вібраційної дії, тепломасообміну та процесу електроосмотичного зневоложення;

- визначено силові, енергетичні й амплітудно-частотні характеристики

розробленої коливальної системи при зневоложенні сипкої сировини за комбінованого вібромеханічного та електроосмотичного впливу.

Набуло подальшого розвитку:

- оцінка тепломасообмінних та механічних характеристик досліджуваного процесу при використанні узагальнених чисел подібності процесу зневоложення в залежності від конструктивних та технологічних параметрів зневоложувача;

- аналіз динаміки руху складових вібровідцентрової схеми механічної коливальної системи.

Практичне значення одержаних результатів. Розробка та обґрунтування режимних параметрів зневоложення високовологої сировини, що дозволило зменшити енерговитрати та тривалість обробки. Розроблена адаптивна схема керування параметрами досліджуваного процесу зневоложення у коливній системі з керованим синхронним дебалансним віброзбуджувачем.

Розроблена технічна документація, виготовлена та впроваджена у виробництво експериментально-промислова модель вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача на базі ТОВ «Компанія «Технопром-Продукт», м. Вінниця

Новизну запропонованих технічних та технологічних рішень підтверджено 3 патентами України на корисну модель.

Отримані результати використовуються в навчальному процесі для студентів зі спеціальностей «Харчові технології» зокрема за такими дисциплінами як: «Процеси та апарати харчових виробництв», «Технологічне обладнання харчових виробництв» та «Машини та обладнання для переробки та зберігання сільськогосподарської продукції».

Особистий внесок здобувача. Основна частина теоретичних та експериментальних досліджень здобувачем виконані особисто. Автором проаналізовано науково-технічну та патентну літературу з технології

зневоложення високоволової сировини [5]. Розроблено методики математичної обробки отриманих результатів [6, 7]. Проведено планування багатофакторного експерименту [8]. Розробка промислового вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача [9, 10].

Сформульовано основні положення та висновки. Постановка завдань, обговорення та обґрунтування результатів досліджень і математичного опису процесів проводились сумісно з науковим керівником д.т.н., професором Паламарчуком І.П. у наукових працях, які виконані у співавторстві.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на XIV Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних виробництв» (м. Одеса, 2012); XIII Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Вінниця, 2012); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Полтава, 2012); Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах» (м. Вінниця, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи напрямку розвитку технології машинобудування і матеріалообробки» (м. Ростов-на-Дону, 2013); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (м. Одеса, 2013); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Харків, 2013); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Енерготехнології- 3» (м. Львів, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоощадні машини та технології» (м. Київ, 2013); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми харчової промисловості» (м. Тернопіль, 2013); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Земля України – потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави» (м. Вінниця, 2014); XIV Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових і хімічних

виробництв» (м. Одеса, 2014); V Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (м. Одеса, 2015); XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні напрямки технологій та механізації процесів переробних і харчових виробництв» (м. Харків, 2015); III Міжнародна Науково-технічна конференція "Перспективи розвитку машинобудування та транспорту ПМРТ – 2023" (м. Віниця, 2023); XII Науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2023); I Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційні рішення, актуальні проблеми та виклики у галузі харчових технологій» (м. Ірпінь, 2023).

Публікації.

За результатами наукових досліджень опубліковано 29 наукових праці, із яких 11 статей у фахових журналах України та збірниках наукових праць; 2 статті у міжнародних наукових виданнях, одна із яких опублікована у виданні з науково-метричною базою «Scopus»; 2 статті були видані у інших наукових виданнях України; 11 тез доповідей на конференціях та 3 патента України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 240 сторінки, у тому числі 6 додатків на 38 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 201 сторінки, містить 91 рисуноків, 15 таблиць. Список використаних джерел нараховує 164 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ

ВІБРООСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖЕННЯ ПРОДУКТІВ

ПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ

1.1. Закономірності технологій зневоложення сировини харчових та інших переробних виробництв

Більшість харчових продуктів є вологими матеріалами, що містять значну кількість води, тобто являють собою колоїдні тіла, а за структурою – капілярно-пористі матеріали, в яких вода перебуває в різному зв'язку із сухим скелетом матеріалу, пори якого можуть бути заповнені водою, водяною парою і повітрям.

Звичайно волога в матеріалі розподілена нерівномірно, тому розрізняють середню концентрацію вологи в матеріалі ω або ж концентрацію у даній точці.

Процес сушіння значною мірою залежить від характеру зв'язку вологи з матеріалом. На основі класифікації П.О. Ребіндера [11], яку широко застосовують у сушильній техніці, була розроблена класифікація способів зневоложення матеріалу, що відображає хімічний, фізико-хімічний, фізико-механічний їх тип (рис. 1.1), із яких відзначаємо досліджувані процеси, що становлять основу розробленого технологічного впливу на продукцію.

Хімічний зв'язок води з матеріалом є найміцнішим, для порушення якого потрібне прокалювання або хімічний вплив. Фізико-хімічний зв'язок може бути зруйнований за допомогою сушіння та сорбції. Цій формі зв'язку відповідають адсорбційно зв'язана волога і волога, що утримується осмотично.

Адсорбційно зв'язана волога утримується молекулярним силовим полем на поверхні колоїдних частинок. Колоїдні матеріали характеризуються значною дисперсністю частинок, умовний радіус яких становить 0,1...0,001 мкм. Внаслідок такої дисперсності колоїдні тіла мають величезну внутрішню

поверхню, а отже, і значну вільну поверхневу енергію, завдяки якій відбувається адсорбційне зв'язування води. Для видалення адсорбційної вологи вона має бути перетворена у пару, після чого починається її переміщення до зовнішньої поверхні тіла.

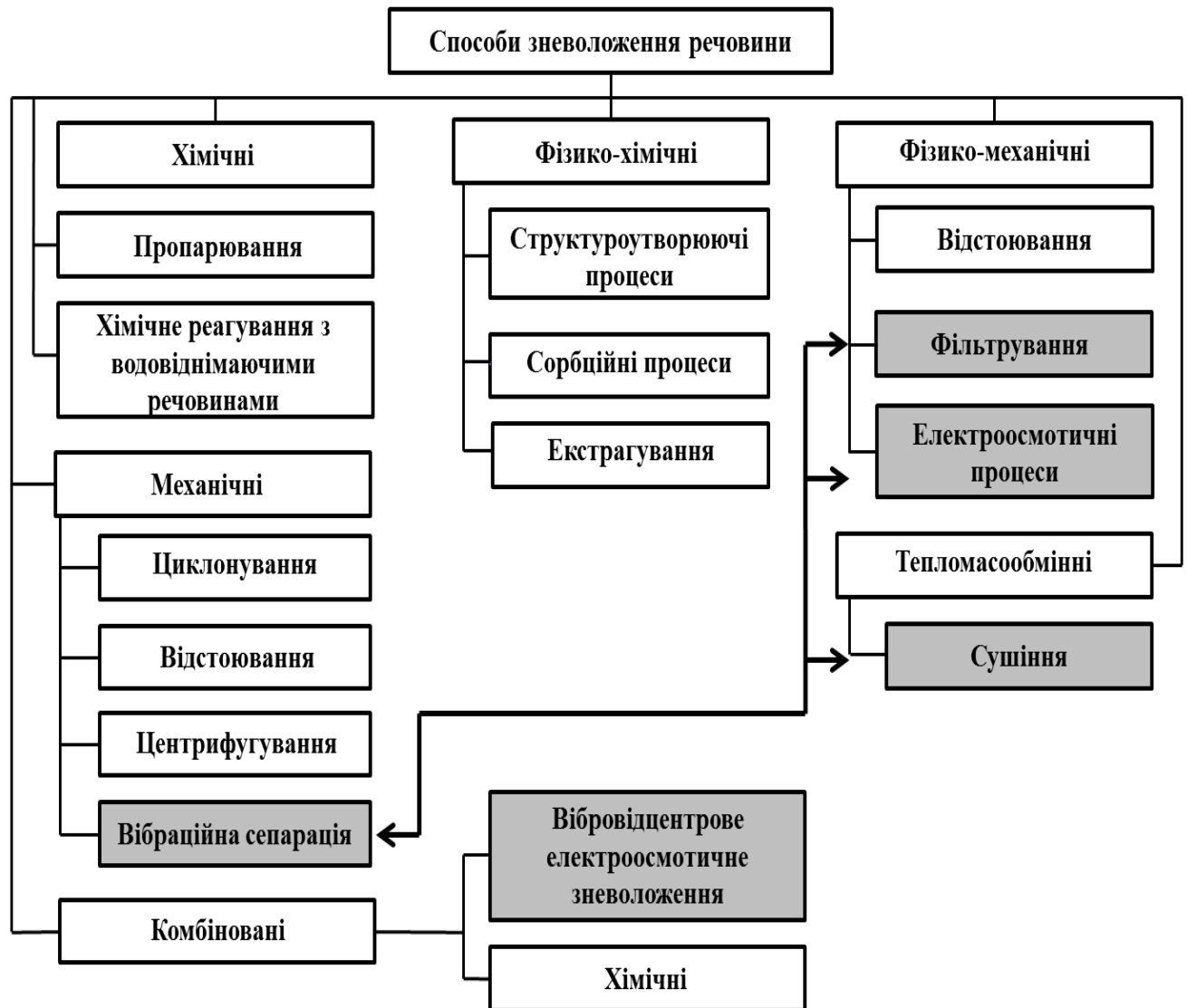


Рис. 1.1. Класифікація способів зневоложення матеріалу

Осмотичний зв'язок найсильніше виражений у розчинах. Природа цього зв'язку виражається в тому, що тиск пари над розчином менший від тиску пари над чистим розчинником. Осмотичним зв'язком утримується волога набухання і структурна волога. До цієї групи може бути віднесена волога, що міститься в

клітинах рослинних тканин.

Волога змочування і волога макрокапілярів (пор), середній радіус яких перевищує 5-10 см, має дуже слабкий зв'язок з матеріалом і може бути видалена механічним способом, зокрема відтискуванням. Волога мікрокапілярів, радіус яких менше ніж 5-10 см, на відміну від вологи макрокапілярів заповнює будь-які мікропори не тільки при безпосередньому зіткненні води з ними, а й завдяки сорбції із вологого повітря.

Вологий матеріал може не тільки віддавати вологу внаслідок випаровування в навколишнє середовище, а й за певних умов поглинати її з цього середовища. Якщо парціальний тиск пари біля поверхні матеріалу більший за парціальний тиск у навколишньому повітрі, то буде відбуватись випаровування, якщо менший, то матеріал буде зволожуватись. Якщо ці тиски зрівнюються, то встановиться рівновага і перехід вологи припиниться. Вологість матеріалу в цьому усталеному стані називають рівноважною вологістю. Очевидно, що рівноважна вологість є функцією парціального тиску водяної пари при заданій температурі. Змінюючи парціальний тиск пари при незмінній температурі, можна одержати ряд значень рівноважної вологості і нанести криву лінію – ізотерму сорбції вологи [12].

Можна вважати, що вологість становить найважливішу характеристику для всіх життєвих процесів насіння. Так, як життєдіяльність і дихання сухого насіння при зберіганні відбувається уповільнено (майже призупиняється), зберігаючи при цьому посівні якості. Відомо, що насіння після визрівання містить велику кількість води, яка являє собою клітинний сік, що містить в собі різні розчинні речовини, головним чином цукри, органічні кислоти та ін [13]. Слабозв'язана волога заповнює капілярну систему шкірястих покривів насіння. У процесі сушіння така волога видалається в першу чергу. Волога, яка входить до складу протоплазми, де вона пов'язана з молекулами високомолекулярних (білкових) сполук є достатньо міцною, що збільшує тривалість сушіння і витрати енергії на її випаровування [14].

1.2. Аналіз фізико-механічних властивостей сировини, що зневоложується

1.2.1. Буряковий жом

Найбільш доцільним способом консервування жому є його сушіння. При висушуванні жому відбувається коагуляція колоїдних сполук, деформація клітинних оболонок і зменшення початкового об'єму матеріалу. Кінцева вологість сушеного жому зазвичай становить 12-14 %.

При вологості менше 10 % жом набуває ламкості, легко кришиться і стирається в сушарці і транспортних пристроях, утворюючи багато дрібних частинок і пилу. Пересушений жом погано гранулюється. При вологості більше 14 % у жомі, в процесі зберігання, можуть розвиватися мікроорганізми, що знижують якість жому і призводять до його псування.

Сушений жом являє собою сипучу масу часток неправильної витягнутої форми, яка обумовлена конфігурацією бурякової стружки. Частинки сушеного жому можуть бути пилоподібними і у вигляді стружки довжиною 20-70 мм.

За дисперсності сушений жом можна віднести до грубодисперсних порошків, в яких площа зіткнення частинок фактично займає незначну частку їх поверхні, в результаті чого вони слабо взаємодіють один з одним. Найбільш дрібні пилоподібні частки схильні до злипання. Ці ознаки характеризують сушений буряковий жом як капілярно-пористе колоїдне тіло, що містить адсорбційно-зв'язану вологу. При цьому залежно від значення відносної вологості навколишнього повітря сушений жом може віддавати або поглинати вологу до досягнення рівноважного стану. Кількість сушеного жому становить 5 % до маси буряків [15].

Буряковий жом і являє собою складну систему як за своєю природою, так і за структурою. Сушка бурякового жому характеризується сукупністю процесів перенесення тепла і вологи, що супроводжуються фізико-хімічними та структурно-механічними змінами. Тому для правильної організації процесу сушіння необхідно знання властивостей жому, що характеризують ці зміни [16].

В даний час накопичено багато інформації з жому як об'єкту сушки [17, 18, 19, 20, 21, 22]. А.К. Найдьоновим [23]. були досліджені ізотерми сорбції жому при температурі навколишнього повітря 20 °С, в результаті яких автор дійшов висновку, що висушування жому до вологості нижче 13 % недоцільно, оскільки при зберіганні в складах (при температурі 20 °С і відносній вологості повітря 50 %) він буде поглинати вологу до 13,2 %.

М.Г. Парфенопуло [19] дослідивши ізотерми десорбції жому в інтервалі відносної вологості повітря 0 ... 90 % і при температурах 25, 50, 70 і 90 °С. Отримав залежність, що описує ці ізотерми :

$$\lg\left[\frac{20\varphi}{\lg(100-\varphi)}\right] = \frac{W_p^c}{\alpha + bW_p^c} \quad (1.1)$$

де W_p^c - рівноважна вологість матеріалу, %;

φ - відносна вологість повітря, %;

a, b - постійні для даного матеріалу коефіцієнти.

Аналіз ізотерм десорбції показав, що між окремими формами зв'язку води з матеріалом відсутні різко виражені переходи. З цього зроблено висновок, що жом легко піддається сушінню, та не вимагає значних додаткових витрат на подолання енергії зв'язку матеріалу з водою при сушінні до кінцевої вологості 12 ... 13 % [19].

Щільність і насипна маса, що характеризують фізичні властивості бурякового жому, досліджені в роботах Найдьонова та Парфенопуло [23, 19]. Як впливає з цих робіт, із зменшенням вологості від $W_c = 50 \dots 60$ % до $W_c = 12 \dots 13$ % щільність частинок жому збільшується в 1,3 рази, насипна маса зменшується приблизно в 1,5 ... 2 рази, усадка частинок може досягати 70 ... 80%.

М.Г. Парфенопуло [19] були досліджені теплофізичні властивості бурякового жому (коефіцієнти тепло- і температуропровідності, теплоємність в інтервалі зміни вологості і температури матеріалу: $W_c = 0 \dots 60$ %; $t = 10 \dots 90$ °С, а також массообмінні властивості (коефіцієнти термовологопровідності і потенціалопровідності) жому в інтервалі: $W_c = 0 \dots 30$ %). Результати досліджень

наведені в роботах [19, 20].

Дисперсний склад є однією з найважливіших характеристик матеріалів, який визначає їх фізико-хімічні властивості, технологічні якості, область практичного застосування.

В.Д. Орловим [24] були проведені дослідження з визначення швидкості витання частинок бурякового жому вологістю 12 ...13 % і кута природного укусу.

Н.Є. Карауловим [17, 18], при дослідженні процесу пресування збагаченого бурякового жому, методом зрізу матеріалу були отримані залежності напруги зсуву від нормальної напруги при різній вологості і температурі бурякового жому.

Представлені дослідження дозволили сформувані основні характеристики досліджуваного об'єкту обробки у таблицях 1.1, 1.2.

Буряковий жом (сирий і сушений) відповідно до існуючої номенклатури та класифікації вторинних матеріальних ресурсів цукрової промисловості відноситься до побічної продукції цукрового виробництва (сюди ж відноситься меляса і рафінадна патока) та являє собою мікростружку товщиною не більше 2 мм з вологістю близько 90 %, з якої дифузійним способом вилучено основну кількість цукру і деяка частина мінеральних і органічних речовин [25].

У сухому жомі також міститься (у %): целюлози - 22-25, геміцелюлози 21-23, азотистих речовин 1,8-2,5 золи 0,8-1,3 цукру 0,15-0,2. Крім того, у свіжому сирому жомі є вітамін С і такі дефіцитні в харчуванні амінокислоти, як лізин і треонін. Співвідношення в жомі таких компонентів, як пектин, крохмаль, білки, целюлоза і сахароза, обумовлюють різну величину рівноважного вологовмісту рослинного матеріалу.

При однаковому вологовмісті найбільшу енергію зв'язку вологи з матеріалом має пектин, меншу - крохмаль, целюлоза і найменшу - сахароза. Вміст цих компонентів у рослинній сировині робить вирішальний вплив на тривалість сушіння, витрати теплоти і енергії [26].

Таблиця 1.1

Хімічний склад сушеного жому, % до маси

Показники	Сушка димовими газами		Сушка паром	
	натурального жому	сухих речовин	натурального жому	сухих речовин
Вода	12,0	-	12,0	-
Сухі речовини	88,0	100,0	88,0	100,0
Сира клітковина (на масу сухих речовин)	17,6	20,0	20,5	23,3
Безазотні екстрактивні речовини (на масу сухих речовин)	61,2	69,5	59,3	67,4
Зола (на масу сухих речовин)	5,6	6,4	4,0	4,5
Азотисті речовини (на масу сухих речовин)	3,6	4,1	4,2	8

Таблиця 1.2

Хімічний склад жому різних видів

Показники	Жом %			
	свіжий	пресований	кислий (із жомових ям)	сушений
Суха речовина	6,0-9,0	14-20	11-15	86-93
Вода	91-94	80-86	85-89	7-14
Сирий протеїн	1,2-1,5	1,7-1,9	1,3-2,6	7-9
Сира клітковина	3,5-4,5	5,0-7,0	2,8-4,2	19-23
Безазотні екстрактивні речовини	4,3-6,5	8,5-10,0	2,7-5,8	55-65
Зола	0,6-1,0	1,1-1,4	0,7-1,8	2,4-4,3
Жир	0,4-0,7	0,6-0,9	0,7-1,0	0,3-0,5
К-ть кормових одиниць в 100 кг жому	6-9	15-20	9-11	90-95

На сьогоднішній день характер нецукрів жому обумовлює основний напрямок його використання - згодовування худобі в різних видах. За поживністю жом займає середнє положення між такими традиційними кормами як овес і лугове сіно, лише трохи поступаючись їм за вмістом азотистих речовин. Він містить в 1,5 рази більше безазотистих, легко засвоюваних сполук, ніж сіно і майже стільки ж, скільки овес. Буряковий жом за своєю структурою є складним колоїдним капілярно-пористим тілом. Після видалення цукру в дифузійному апараті гарячою водою бурякова стружка зберігає клітинну будову. Всередині клітини і міжклітинний простір в результаті процесу дифузії заповнений слабким розчином цукру - 0,2 %.

При механічному видаленні вологи з сирого жому її можна розподілити таким чином (у % до маси вологи в сирому жомі):

- не видаляється механічно (адсорбційна внутрішньоклітинна, капілярна) 20,0;
- видаляється механічно легко (волога змочування) 23,5;
- видаляється механічно з помірними витратами енергії 45,0;
- видаляється механічно з підвищеними витратами енергії 11,5.

Після механічного видалення вологи вміст її розподіляється приблизно таким чином (у %):

- волога легко видаляється 9-14;
- волога, що видаляється з помірними витратами енергії 18-20;
- волога, що видаляється з підвищеними витратами енергії 25-35.

Виробництво бурякового пектину доцільно організовувати на цукрових заводах або в безпосередній близькості від них. У цьому випадку в період переробки буряка пектинове виробництво може працювати на надзвичайно дешевому буряковому жомі. У решту частину року буде використовуватися висушений жом [27][28].

У свіжому жомі міститься близько 19 мг/кг вітаміну С. У сухому жомі знайдені наступні вітаміни (мг/кг): В1 - 0,55, В2 - 0,20, В6 - 0,18, С - 5,0,

пантотенова кислота - 0,21 і біотин - 0,001. У жомі виявлено два ферменти - протопектіназа і пектиназа; містяться мінеральні речовини, незначна кількість жиру, а також дві форми стерину, пов'язані з рослинними стеринами або фітостерини. З сирого жому було виділено до 8,7 % пальмітинової кислоти, 36,1 - олеїнової і 18,6 % ерукової кислоти, пов'язаних з гліцериновими залишками. З бурякового жому виробляється також пектиновий клей. Спосіб отримання клею заснований на переведенні в розчин нерозчинних у холодній воді пектинових речовин, що містяться в жомі. Вихід клею становить 2,5-3 % до маси свіжого жому. Одним з найбільш перспективних напрямів використання бурякового жому є виробництво харчових волокон. За визначенням Trowell і Vurcitt, які є одними з перших дослідників харчових волокон, «харчове волокно - це залишки рослинних клітин, що здатні протистояти гідролізу та здійснюються травними ферментами людини» (1986 р.), що можна класифікувати за формою [29, 30].

Традиційно з бурякового жому вироблялися лише неосвітлені харчові волокна, які використовувалися при виробництві обмеженого числа харчових продуктів. Їх органолептичні показники не задовольняли вимогливого споживача. Однак протягом останнього десятиліття років були розроблені сучасні технології отримання освітлених харчових волокон з бурякового жому, які містять велику кількість пектинових речовин і можуть застосовуватися в якості добавки при виробництві широкого асортименту продуктів харчування. Освітлені харчові волокна з бурякового жому характеризуються меншою мікробною складовою, на відміну від неосвітлених. У них відсутні цвілі, сліди мезофіла, як результат стерилізуючої дії освітлювача.

Крім того, харчові волокна з бурякового жому володіють нижчою вологоутримуючою здатністю, оскільки містять до 10 % гідратопектіна. Дана властивість дозволяє використовувати бурякові харчові волокна для виробництва біологічно активних харчових добавок профілактичного харчування [29, 30].

Основна кількість бурякового жому за кордоном, як і в нашій країні,

використовують на корм худобі (рис. 1.2).

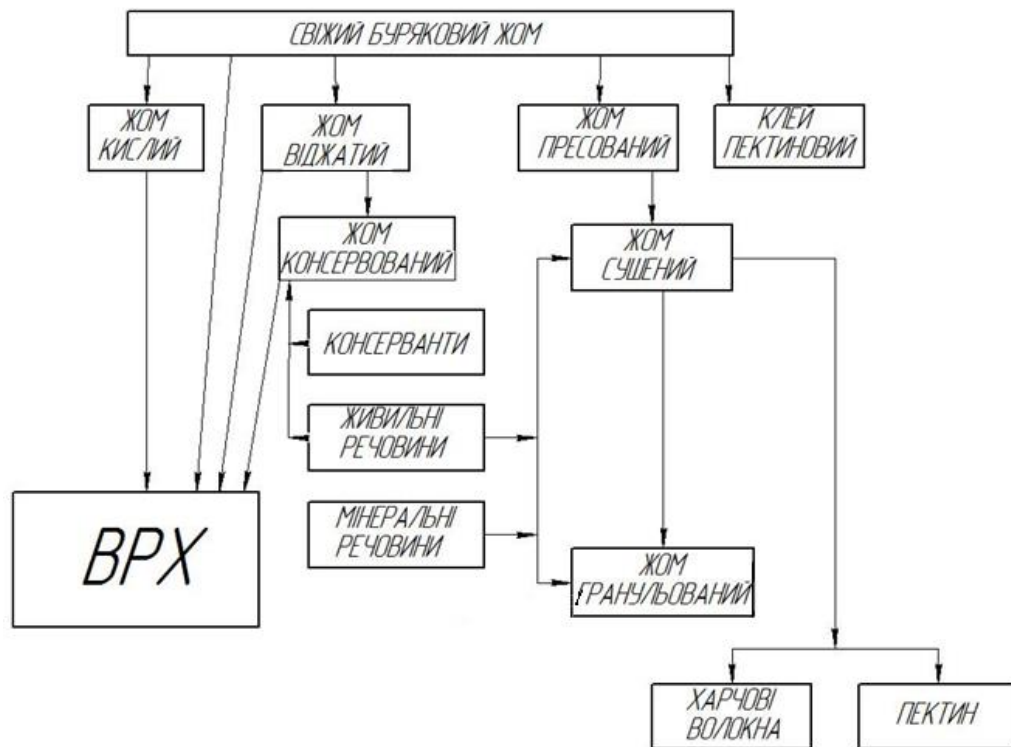


Рис. 1.2. Схема використання бурякового жому

В Італії розроблений спосіб використання сушеного бурякового жому для виготовлення паперу.

1.2.2. Насіння баштанних культур

Серед овочевих культур в харчуванні особливе місце займає гарбуз. У гарбузі містяться солі калію, фосфору, заліза, міді, цинку, вітаміни С, В, В1, В2, В6, Е, каротин та інші біологічно активні речовини (БАР). Він широко використовується для харчових і кормових цілей, є сировиною для консервної, кондитерської та вітамінної промисловості [31, 32]. Це корисна культура за харчовою цінністю, але її споживання залишається на низькому рівні.

Плоди гарбуза складаються з м'якоті, плаценти, насіння і шкірки, співвідношення яких за масою приблизно наступне: м'якоть – 70 %, плацента – 15 %; насіння – 5 %; шкірка – 10 %. У харчовій галузі м'якоть гарбуза в основному використовується для приготування купажованих соків, дитячого

харчування, гарбузового порошку та інших продуктів.

Насіння гарбуза вживають як самостійний продукт. З нього виробляють олію, муку, яка є білкововітамінним комплексом [33].

Висушене насіння гарбуза містить: білки - 30 %; жири - 49 %; вуглеводи - 10,5 %; клітковина - 1,7 %.

Приблизно 75 % жирів в насінні гарбуза складають моно і полі ненасичені жири. Насіння гарбуза багате мінералами марганцю і магнію. Марганець бере участь у численних обмінних процесах, захищає клітини від окислювального пошкодження, в той час як магній важливий для здоров'я кісток, серця і судин.

Крім того, гарбузове насіння є хорошим джерелом фосфору, заліза, міді, вітаміну К і цинку. Насіння в менших кількостях містить кальцій, калій, селен, фолієву кислоту і ніацин, вітаміни групи В, Е, РР.

Завдяки унікальному поєднанню амінокислот, вітамінів, мікроелементів та інших корисних речовин насіння гарбуза допомагає у лікуванні багатьох захворювань.

Вживання насіння гарбуза гарно впливає на діяльність серцевого м'яза, а гарбузова олія сприяє зміцненню кровеносних артерій.

Олія з насіння гарбуза за своїм складом є однією з найбагатших за цінними компонентами серед продукції рослинного походження [33].

Використання гарбуза може бути комплексним: шкірка - сільське господарство; насіння і плацента - харчова та медична галузі; м'якоть - харчова та медична галузь, біотехнології, косметологія [34].

До основних властивостей насіння відносяться фізико-механічні, гідромеханічні, теплофізичні, гігроскопічні, морфологічні, масоперенесення.

До основних фізико-механічних властивостей насіння відносяться розмірні характеристики, вологість, щільність, об'ємна маса, коефіцієнт форми, порозність, еквівалентний діаметр, питома активна поверхня, індекс форми, швидкість витання, що характеризують сипучі властивості: коефіцієнти динамічного, статичного тертя, кут природного укусу і орієнтація насіння в шарі.

Таблиця 1.3

Основні властивості кондиційних по вологості насіння баштанних культур

Показники	Гарбуз	Кабачок	Кавун	Диня
Розміри, мм:				
довжина	18	13	6,2	5,6
ширина	7,0	6,0	4,3	3,8
товщина	3,0	2,2	1,5	1,4
Еквівалентний діаметр, мм	7,4	5,6	3,4	3,0
Індекс форми	1,8	1,8	1,5	2,1
Щільність, т/м ³	0,83	1,0	0,98	0,95
Маса 1000 насіння, г	195	120	45	36
Об'ємна маса, т/м ³	0,31	0,47	0,45	0,43
Питома маса оболонки по відношенню до маси насіння	0,26	-	0,43	0,29
Порозність шару	0,53	0,50	0,48	0,52

Таблиця 1.4

Характеристика насіння баштанних культур в залежності від їх вологості

Вологість насіння, %	Щільність, т/м ³	Об'ємна маса, кг/м ³	Швидкість виносу, м/с	Питома активна поверхня, м ² /м ³	Еквівалентний діаметр, мм
Кавун					
10	0,81	450	5,5	1830	3,4
20	0,93	480	5,6	1850	3,5
40	0,101	590	5,9	1680	3,7
55	0,104	780	6,8	500	4,2
Гарбуз					
10	0,71	310	-	-	7,4
20	0,76	360	-	-	7,4
40	-	440	-	-	7,4
55	0,85	540	-	-	8,1
Диня					
10	0,88	430	4,9	1960	3,0
20	0,91	460	5,1	1900	3,1
40	0,102	600	5,6	1820	3,5

Основні властивості кондиційних за вологістю насіння баштанних культур, встановленими Н.М. Ткаченко, Ф.А. Ткаченко, А.В. Голубковичем представлені у табл. 1.3, 1.4 [35].

Серед основних теплофізичних властивостей насіння, що є об'єктом обробки, можна визначити теплоємність, температуро- і теплопровідність, зміну вологості насіння, які дозволяють науково обґрунтувати раціональні режими сушіння.

Низький коефіцієнт теплопровідності ускладнює висушування шару насіння з обмеженою порозністю. Через високу порозність шару коефіцієнт теплопровідності насінневої маси низький [14]. Тому визначальними чинниками, які зумовлюють необхідність і глибину зневоложення, служать вихідні величини вологості насіння і порозності шару. Зниження вологості і підвищення порозності дозволяють скоротити витрати знергії на подальшу сушку, яка є однією з дорогих виробничих операцій, а також істотно прискорити її процес, спростити вибір і обслуговування сушарки.

Від вологості, а також форми, розміру насіння, характеру і стану їх поверхні, наявності домішок, стану поверхні, по якій переміщається маса насінневої маси, залежить її сипучість, яку необхідно враховувати при конструюванні сушарок.

Від сипучості насіння залежить вибір кутів нахилу площин тих частин сушильного апарату, за якими мають скочуватися насіння. Збільшення вологості насіння, як правило, призводить до зниження або повної втрати сипучості насінневої маси [14], [36]. Кут природного укосу також визначає ступінь сипучості матеріалу [37].

Від порозності насіння залежить опір насінневого шару при продуванні його агентом сушіння або повітрям, так як свіжовиділене насіння, що надходить на сушіння, утримує у міжнасінневих порожнинах і на поверхні насіння вільну вологу, що викликає низьку порозність [14].

1.3. Оцінка конструктивно-технологічних характеристик досліджуваних методів зневоложення

Достатньо ефективним методом видалення вільної вологи є застосування механічних та фізико механічних технологічних дій, що представлені на рисунках 1.3, 1.4.

1.3.1. Відцентрове фільтрування

Видалення поверхневої вологи в полі відцентрованих сил потребує застосування складного і вартісного обладнання – центрифуг, зокрема є необхідність у використанні - вібраційних. З фізичної точки зору цей процес полягає в проходженні рідини через дисперсний осад, в ущільненні його, а також у видаленні з нього рідини, що утримується в місцях зіткнення часток на їх поверхні.

Використання відцентрової фільтрації найефективніше в тих випадках, коли необхідно отримати продукт з найменшою вологістю і коли потрібне промивання осаду [38], що має місце для обробки суспензій, крупно-, середньо- і дрібнозернистої твердої фази, яку утворює несильно стиснутий осад.

У результаті такої обробки виходить сухіший осад, ніж при осаджувальному центрифугуванні, причому вологість осаду тим менша, чим нижча його дисперсність.

Якщо для дрібнозернистих матеріалів вологість осаду, отриманого після центрифугування, часто складає величину порядку 5-40 %, то для середньозернистих і грубозернистих матеріалів ця вологість може бути рівною 0,5-5 %. Відцентрова фільтрація зазвичай здійснюється в нешвидкісних центрифугах у періодичному режимі. Для обробки високодисперсних матеріалів цей процес майже не застосовується.

У результаті відцентрової фільтрації двох різних матеріалів у абсолютно однакових умовах часто виявляється різний вміст у них рідкої фази, що пояснюється їх різною вологоутримуючою здатністю [38].

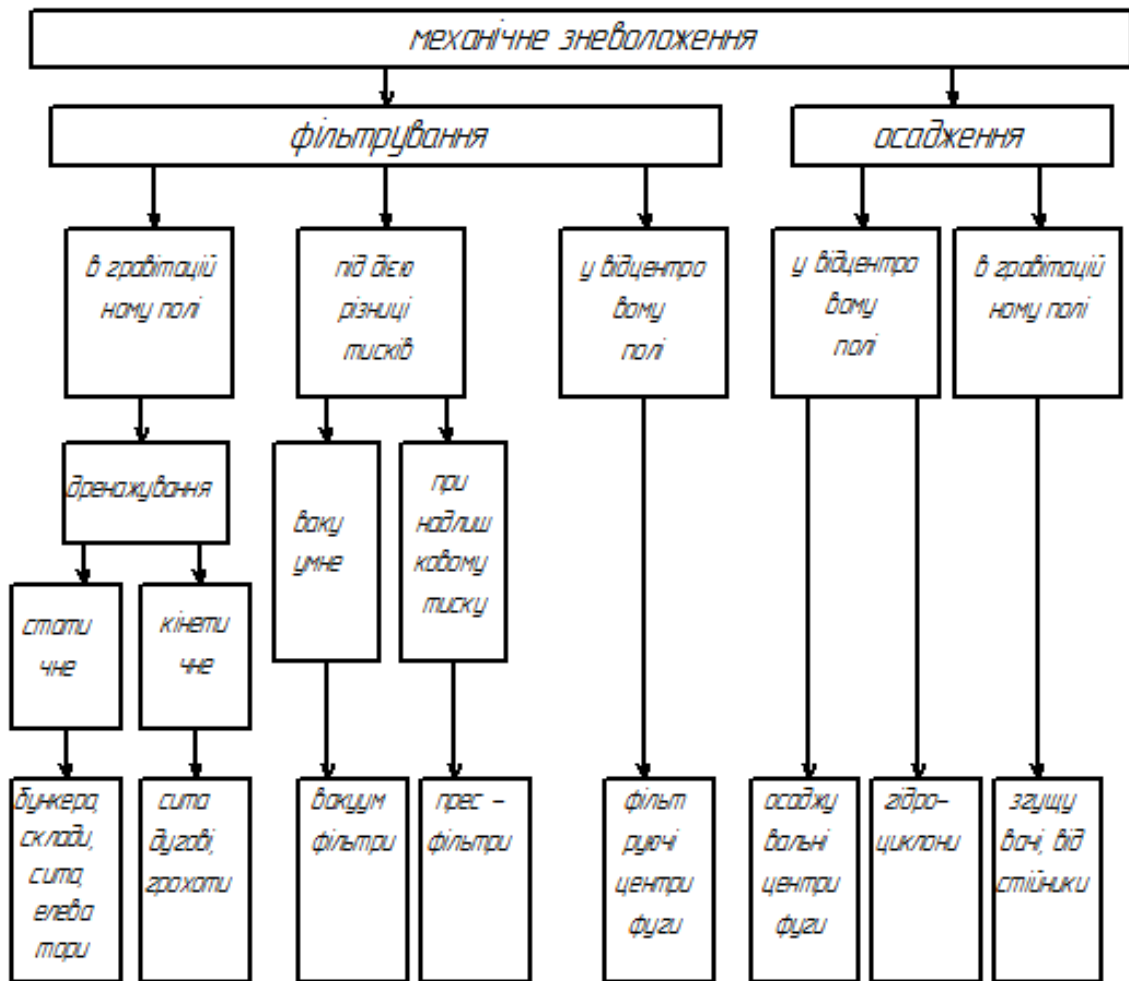


Рис. 1.3. Класифікація способів механічного зневоложення

Структура утворюваного осаду, а отже і опір проходження матеріалу, залежить від властивостей твердої та рідкої фаз, а також умов процесу фільтрування. Перш за все, структура визначається гідродинамічними факторами - пористістю осаду, розмірами твердих частинок, з яких він складається, а також їх сферичністю [39]; фізико-хімічними факторами - ступенем коагуляції або пептизації твердих частинок, вмістом у матеріалі колоїдних домішок, що закупорюють пори, величиною електрокінетичного потенціалу, що виникає на межі розділення твердої та рідинної фаз у присутності іонів і зменшує ефективний переріз пор [40]. Внаслідок сумісного впливу гідродинамічних та фізико-хімічних факторів, визначення структури та опору осаду вкрай ускладнюється [41].

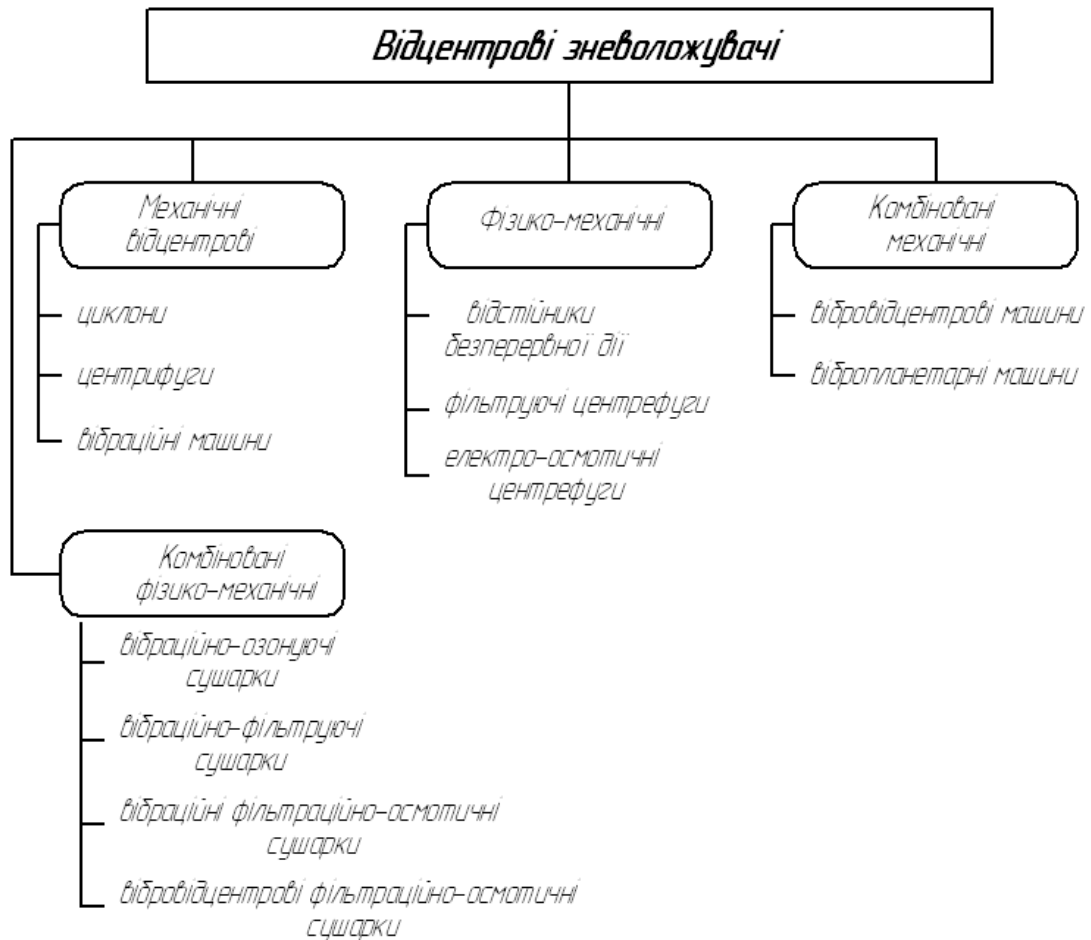


Рис. 1.4. Класифікація відцентрових зневоложувачів

Вплив фізико-хімічних факторів, тісно зв'язаних з поверхневими явищами на межі розділу фаз матеріалу, особливо помітно виявляється при невеликих розмірах твердих частинок (10 - 20 мкм). Такі частинки в процесі фільтрування стискаються у більшій мірі. Однак при цьому слід розрізняти ступінь стискання осаду і ступінь деформування твердих частинок, оскільки недеформовані частинки можуть стискатись за рахунок їх більш рівномірного та щільного укладання. В міру збільшення розмірів частинок посилюється відносний вплив гідродинамічних факторів [42].

Серед усіх робочих параметрів процесу фільтрування в найбільшій мірі на його протікання впливають перепад тисків на фільтрувальному елементі та температура матеріалу. Від останньої залежить в'язкість рідинної фази, а отже й здатність цієї фази проходити через шар осаду та пори фільтрувального елемента.

Таким чином, до макрофакторів [41], процесів статичного фільтрування, слід віднести такі зміни, як площа поверхні фільтрувального елемента, різниця тисків на ньому, товщина шару осаду та в'язкість матеріалу. Вплив даних параметрів можна досить точно визначити за допомогою відповідних приладів. Основними мікрофакторами є: розміри пор у шарі осаду та у фільтрувальному елементі, товщина подвійного електричного шару на поверхні твердих частинок. В даний момент визначити вплив мікрофакторів за допомогою приладів досить проблематично, тому для їх кількісної оцінки застосовують аналітичні методи [43, 44].

1.3.2. Вібраційне зневоложення

На сьогоднішній день вібраційні технології дедалі ширше використовуються в технологічних процесах переробного та харчового виробництва. Завдяки таким чинникам як підвищення продуктивності обладнання, скорочення виробничого циклу і покращення якості готового продукту [45, 46, 47]; інтенсифікації таких процесів, як транспортування і дозування матеріалів, розділення сумішей на фракції, подрібнення і ущільнення, фільтрування, гранулювання, формування, сушіння, тощо [48, 49, 50, 51, 52]. При цьому параметри вібраційного впливу на оброблювані матеріали та середовища легко піддаються регулюванню завдяки зміні частоти та амплітуді коливань, забезпечуючи його найбільш ефективні режими [49], [53].

У харчовій та переробній промисловості вібраційні технології використовуються під час транспортування, проціджування та одночасної механічної очистки спиртових, хлібопекарських, пивних, кормових та ін. дріжджів [51], [54, 55]; у технологічних процесах виготовлення сухого молока для його сушіння та відсіювання; під час сортування ягід для швидкої заморозки; в процесах розморожування риби та інших морепродуктів [56, 57] тощо.

Відомі також роботи, в яких розглянуто застосування вібраційних

технологій в цукровому виробництві. Так, у роботі Харина В.М. [58] йдеться про інтенсифікацію процесу кристалізації цукру завдяки підвищенню процесу тепловіддачі, швидкість якого в різних частотних режимах зростає від 2,5 до 9 разів. У роботі Казакова К.В. [59] згадується про зміни реологічних властивостей жому цукрового буряка під час накладання знакозмінних динамічних навантажень, що полягають у зменшенні його в'язкості з підвищенням швидкості зсуву частинок в середовищі, що, відповідно, сприяє збільшенню швидкості переміщення вологи у пористих та капілярних структурах, визначаючи ефективність процесів вібраційного зневоложення.

Прикладом нецілеспрямованого використання вібраційного навантаження для зневоложення рослинної маси є процес її транспортування автотранспортом до кінцевого споживача. Під час перевезення рослинна маса піддається постійному струшуванню. Цей процес можна розділити на два етапи: імпульсний вплив з боку кузова автомобіля та інерційний вплив, що зумовлений силою власного тяжіння під час повернення у вихідне положення. Результатом цього процесу є суттєве зниження вологості рослинної маси, яку отримує споживач. Але зневоложення таким чином має і свої недоліки, а саме: по-перше, споживач купує вторинний продукт високої вологості, витрачаючи кошти і на воду, яка втрачається під час перевезення, а по-друге, вода, яка видалається під час транспортування, забруднює навколишнє середовище, оскільки містить у собі органічні кислоти, білки та інші сполуки [60].

У вібраційних сушарках або зневоложувачах накладення вібраційної дії на перфоровані решітки, похилі лотки, додаткові перетинки, а також різні виконавчі органи машини забезпечує рівномірне стійке кипіння в умовах псевдозрідженого шару продукції [16].

Рівномірність кипіння або зрідження такого шару залежить від властивостей матеріалу, який обробляється. Для сипких матеріалів, що мають мале тертя між частинками і не схильних до агрегування, як вібрація, виконавчих елементів так і продувка теплоносієм можуть створювати

вищезазначену структуру шару [61][62]; у якому можна значно знижувати швидкість проходження сушильного агента та відповідно енерговитрат на реалізацію процесу.

Для деяких продуктів створити однорідний киплячий шар тільки шляхом продувки теплоносія важко, тому комбінований вплив сушильного агента створюють рівномірним зрідженням шару. До таких продуктів слід віднести буряковий жом, оскільки він володіє полідисперсністю і високою вологістю, що сприяє агрегуванню частинок.

В даний час накопичений досить великий досвід з використання вібраційних сушарок в процесі сушіння харчових продуктів [16].

А.С. Гінзбургом і В.І. Сирєдовим [63] проведено дослідження процесу сушіння цукру-піску у віброзрідженому шарі з кондуктивним підведенням тепла. Частоти вібрації змінювалася від 20 до 80 Гц та амплітуди - від 0,5 до 2,5 мм. Було встановлено, що видалення вологи відбувається в основному в період постійної швидкості сушіння. На інтенсивність даного сушіння в більшій мірі впливає амплітуда коливань при оптимальній частоті вібрації 40...60 Гц.

А.П. Рисін і З.А. Кац [64] провели дослідження процесу сушіння картоплі і овочів у віброкиплячому шарі при конвективно-радіаційному підведенні теплоти, що забезпечило вирівнювання вологості по перерізу зразка за рахунок ефективної термовологопровідності.

У роботах О.П. Калиновської [65] зазначається, що віброкиплячий шар створює умови, за яких збільшується загальна поверхня сипучої маси матеріалу, що знаходиться в контакт з сушильним агентом, в результаті чого відбувається інтенсивне видалення вологи та спостерігається збільшення швидкості сушіння.

М.Г. Парфенопуло [66] при дослідженні процесу зневоложення бурякового жому використовував вібрацію в другому періоді сушіння, що дозволило скоротити загальну тривалість процесу теплової обробки продукції на 40 ... 45 %.

Області застосування вібраційних технологічних машин у процесах розділення неоднорідних систем харчових і переробних виробництв представлені на рисунку 1.5 [67].

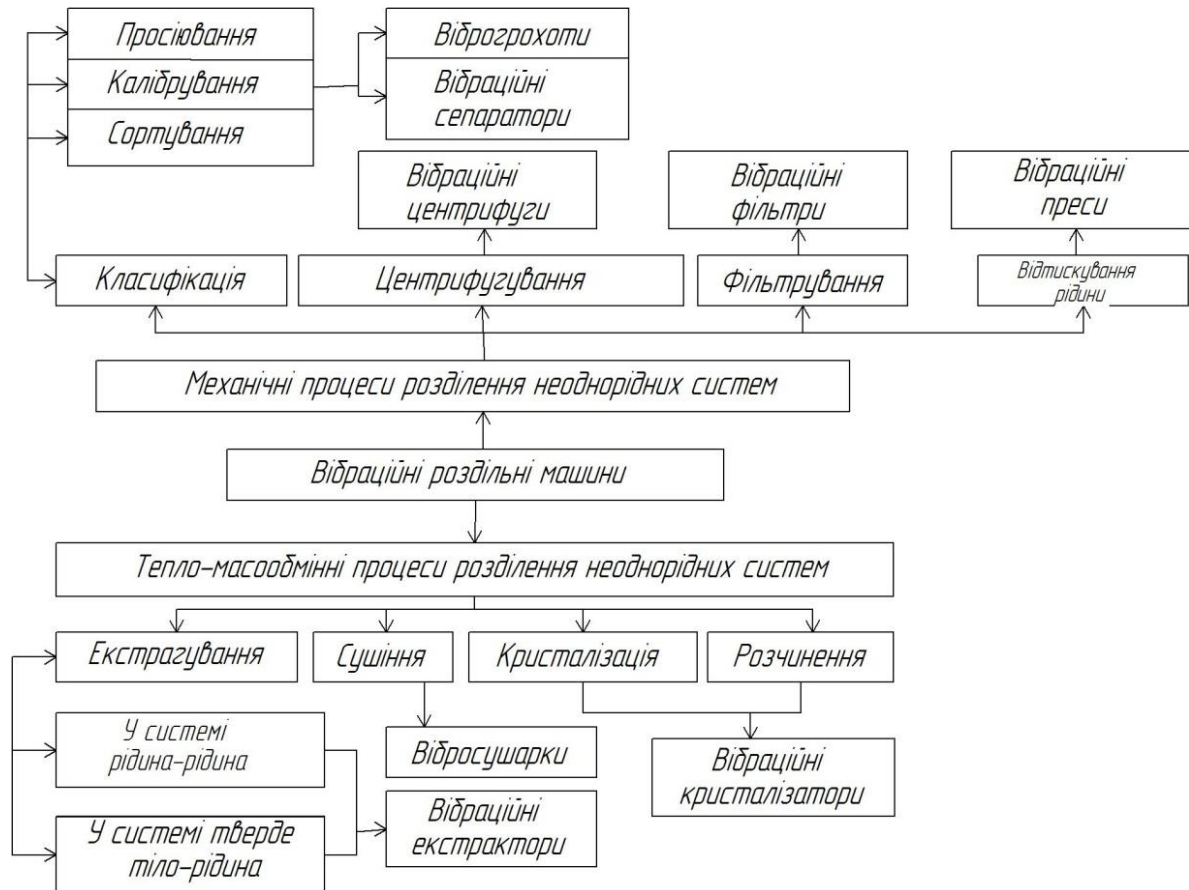


Рис. 1.5. Області застосування вібраційних технологічних машин у процесах розділення неоднорідних систем харчових і переробних виробництв [67].

1.3.3. Зневоложення за допомогою електромагнітного поля

Можна вважати, що при сушінні насіння струмом високої частоти температура продукту підвищується за рахунок діелектричного нагрівання речовини в змінному електромагнітному полі, тобто молекули насіння починають здійснювати коливальні рухи, що не збігається з частотою зміни променів, у результаті чого продукція нагрівається. При цьому нагрів відбувається одночасно в кожній частині насінини із середини та інтенсифікується з підвищенням частоти коливань [68].

Ще одним електрофізичним спеціальним методом сушіння, є інфрачервоне нагрівання насіння, для якого характерним є більш рівномірна обробка продукції. Сушіння насіння в цьому випадку досягається за рахунок поглинання масою насіння оптичного випромінювання з довжинами хвиль від 0,78 мкм до 1 мм, які випускаються металевими, керамічними і газорозрядними випромінювачами [69].

В даний час досліджуються шляхи використання не тільки інфрачервоного впливу на біооб'єкт, а й здійснюється пошук інших прихованих можливостей електромагнетизму. При цьому електротехнології вступають в тісний контакт з іншими областями науки: біофізикою, біохімією, електрохімією тощо. Використання в технологіях сушіння та зберігання насіння низько енергетичних променів є однією з останніх розробок, що дозволяє надалі істотно знизити енерговитрати на сушіння і запобігти псуванню продукції [70, 71, 72], зокрема при зберіганні.

В даний час використання електроосмосу в переробних і харчових виробництвах все ширше починають застосовувати в переробному сільськогосподарському виробництві не тільки для запуску механізмів, а також як безпосередній технологічний агент (як при електроосмосі) при обробці насіння, води, сільськогосподарської продукції, для приготування кормів та інших енергоактивних або енергонасичених домішок.

В дисперсних системах, які знаходяться в полі постійного струму, виникає явище електроосмосу, що застосовують для регулювання водного режиму землі в теплицях: вода під впливом електричного струму переміщується від анода до катода в значній кількості, для закріплення плавунів і пониження рівня ґрунтових вод. При обробці дисперсних систем електроосмосом можливе не тільки її зневоложення, але і знезараження.

Осмотичне зневоложення отримало багато уваги в останні роки в якості ефективного методу при первинній переробці фруктів та овочів при таких чинниках як простота, порівняно невисокі енерговитрати при максимальному

збереженні первісних характеристик: кольору, аромату, текстури і поживного складу. Цей процес може бути здійснений при низькій або кімнатній температурі. Він має потенційні переваги для переробної промисловості для підтримки якості. В технологічному плані процес включає теплообмінну обробку шматочків фруктів у два етапи, видалення води з використанням осмотичного агента і подальше зневоложення в сушарці [73].

В процесі електроосмотичної обробки заряджений шар рідини під дією сил зовнішнього поля буде переміщатися в бік протилежно зарядженого джерела, захоплюючи за собою за рахунок внутрішнього тертя шари незарядженої рідини, викликаючи рух рідини відносно твердої фази [74].

У результаті досліджень даного процесу в умовах високодисперсних твердих фаз з вмістом твердої речовини 10 %, коли, здавалося б, повинен спостерігатися електрофорез, у міру збільшення концентрації дисперсійного середовища вплив електроосмоса різко зростає і досягає максимуму при концентрації твердої фази 13 %. Вода під впливом електричного струму переміщається у ґрунті від анода до катода в значних кількостях; при цьому істотно підвищується температура середовища, що дозволяє здійснити його електротермічну стерилізацію. Питомі витрати на електроенергію в такому процесі в 1,32-1,7 рази менше, ніж при знезараженні паром. Електроосмотичне ущільнення економічно вигідно для дисперсійних середовищ з пластичною і текучою консистенцією, особливо із зростанням дисперсності. Обробка постійним струмом свіжого гною повністю знищує кишкові бактерії - лактозопозитивні E.Coli і Cokki і більше половини життєздатних мікробів; виявляє стимулюючу дію на мікробні клітини в газоподібному середовищі при $E = 0,1-0,15$ кВ/м, а в рідкій $E = 50-250$ В/м. При короткочасному впливі виникає іонізація поверхневих компонентів клітинної стінки, що активує адаптивні ферменти і спонукає клітину до інтенсифікації своєї життєдіяльності, тобто постійний електричний струм виконує роль своєрідного каталізатора.

Для насіння ярої пшениці, що електризувалося постійним струмом при витраті електрики 50-400 Кл/л і використанні мідних електродів, підвищується схожість, прискорюється ріст і розвиток рослини, збільшується врожай зерна на 13-41 %.

Застосування електроосмоса для зневоложення пружно-пластичних мас у поєднанні з електротермообробкою змінним струмом дозволило встановити, що витрати електроенергії не перевищують 60-75 кВт-год/м, ефективність порівняно з парою в 2-2,5 рази більше [75].

1.3.4. Контактне та безконтактне електроосмотичне зневоложення

Відомий апарат для реалізації достатньо глибокого електроосмотичного зневоложення матеріалів [76], який має циліндричний корпус, бічна поверхня якого дренована і є катодом, а анод розташований всередині корпусу 1. (рис 1.6)

Апарат складається з корпусу, який виконаний із електропровідного матеріалу з дренованою бічною поверхнею 1 і дном 2; кришки 3 з прикріпленими до неї анодом у вигляді електропровідних стержнів 4, які розташовані на однаковій відстані один від одного; кожуха 5 з патрубком 6 для виведення виділеної рідини; шарніру 7.

Більш досконалим можна вважати апарат (рис.1.7) [77], який складається із діелектричного корпусу 1, перфорованого металічного циліндра-катода 2, анодів 3, виконаних у вигляді стержнів і закріплених на кришці 4, встановлених у простір між анодом і катодом діелектричних пористих пластин 5, зливного патрубка 6 у днищі корпусу 1. Діелектричні пластини 5 виконані із матеріалу з високим значенням коефіцієнта діелектричної проникності.

Розміщення пластин пористого діелектричного матеріалу, який має відносну діелектричну проникність вищу, ніж ділянка зневодненого матеріалу в просторі між електродами, дещо покращує енергетичні параметри процесу,

але призводить до зменшення ефективного об'єму реактора і додаткових матеріальних затрат, що в результаті знижує пропускну здатність та економічні показники процесу вологовидалення.

У 2006 році був розроблений пристрій для електроосмотичного зневоложення вологих дисперсних матеріалів [78], переважно для тонко подрібненої кісткової тканини (рис. 1.8). Пристрій включає корпус, який є анодом, транспортуючий механізм, який є катодом, і вакуумну камеру. Корпус установки виконаний у формі труби з коаксіально розташованою усередині перфорованою трубою, в ємності якої міститься шнековий механізм, що спирається на електроізолюючу вставку. На хвостовику пристрою встановлений катодний ковзний струмознімач.

На рисунку 1.9 зображено пристрій для зневоложення пастоподібного матеріалу за допомогою електроосмосу [79]. Матеріал, що піддається обробці, через патрубок для підведення матеріалу потрапляє у циліндричний корпус 5, звідки повільно переміщається шнеком до патрубку 6 для відведення обробленого матеріалу. Під дією електроосмосу рідина з пасти рухається у напрямку до катода і за допомогою невеликого розрідження відсмоктується з порожнистого валу. Фільтрувальна тканина перешкоджає винесенню частинок осаду через патрубок 7.

Наведений аналітичний огляд існуючого обладнання для електроосмотичного зневоложення матеріалів свідчить, що основними напрямками подальшого вдосконалення є мінімізація впливу поляризації електродів та ліквідація застійних статичних зон в об'ємі реактора, що можна досягти накладанням вібраційного поля, яке утворює псевдотекучий або псевдокиплячий шар матеріалу забезпеченням асиметричної форми та оптимальної частоти струму та інших чинників.

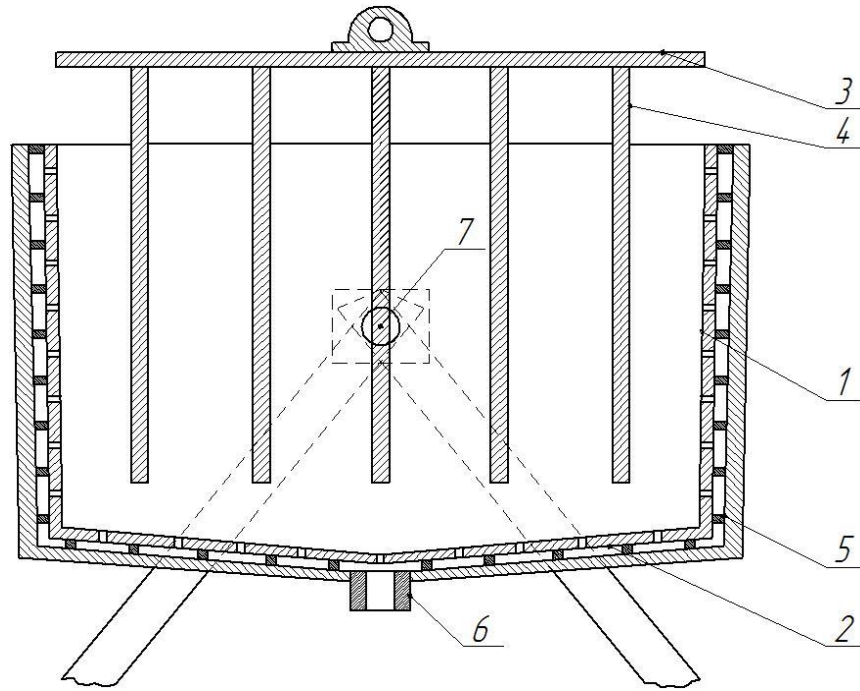


Рис. 1.6. Апарат для електроосмотичного зневоложення матеріалів

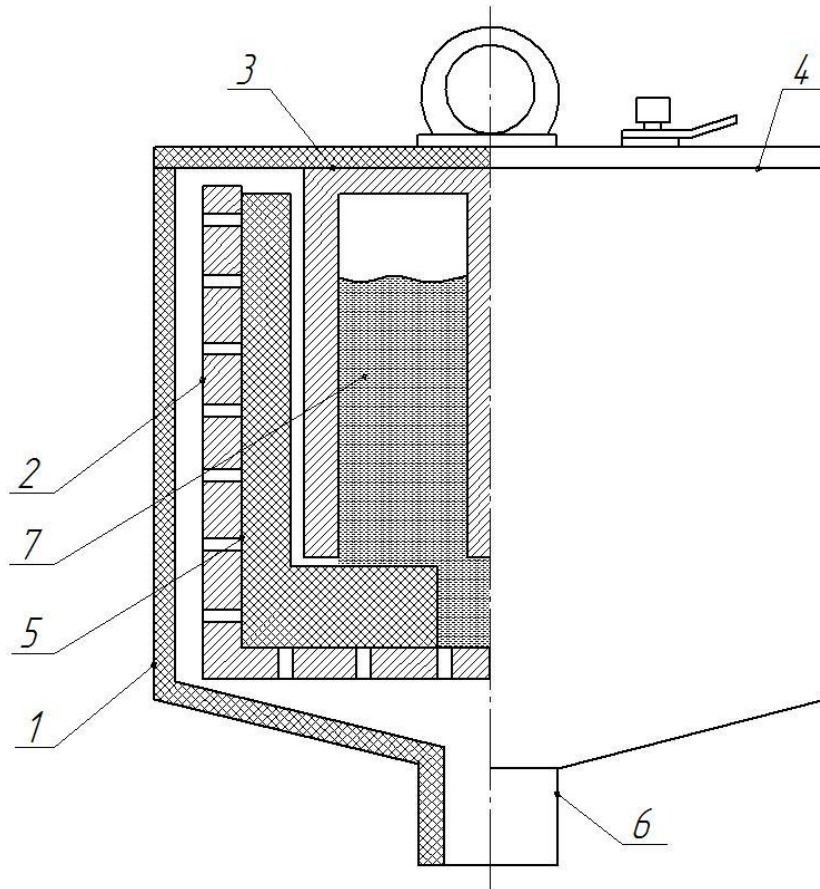


Рис. 1.7. Загальний вигляд апарата для електроосмотичного зневоложення матеріалів

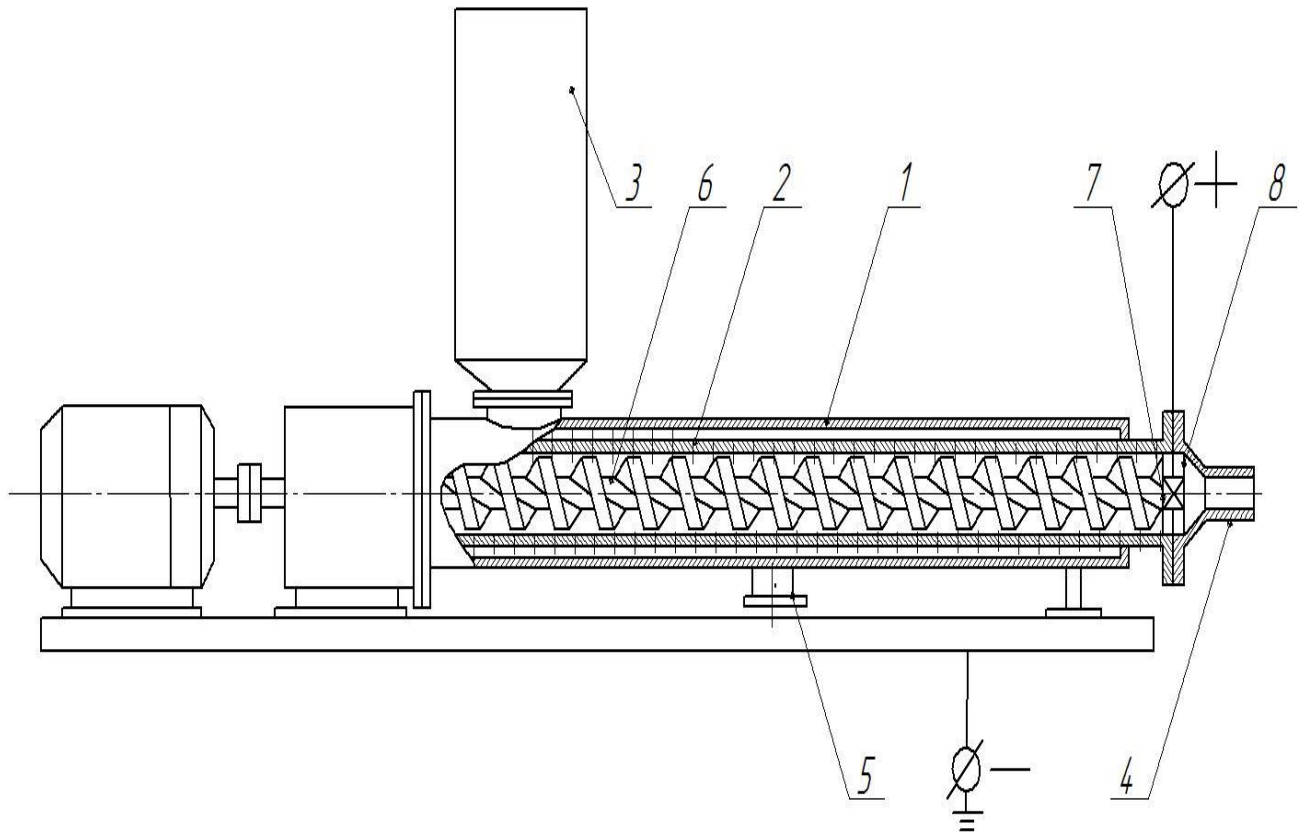


Рис. 1.8. Пристрій для електроосмотичного зневоложення матеріалів

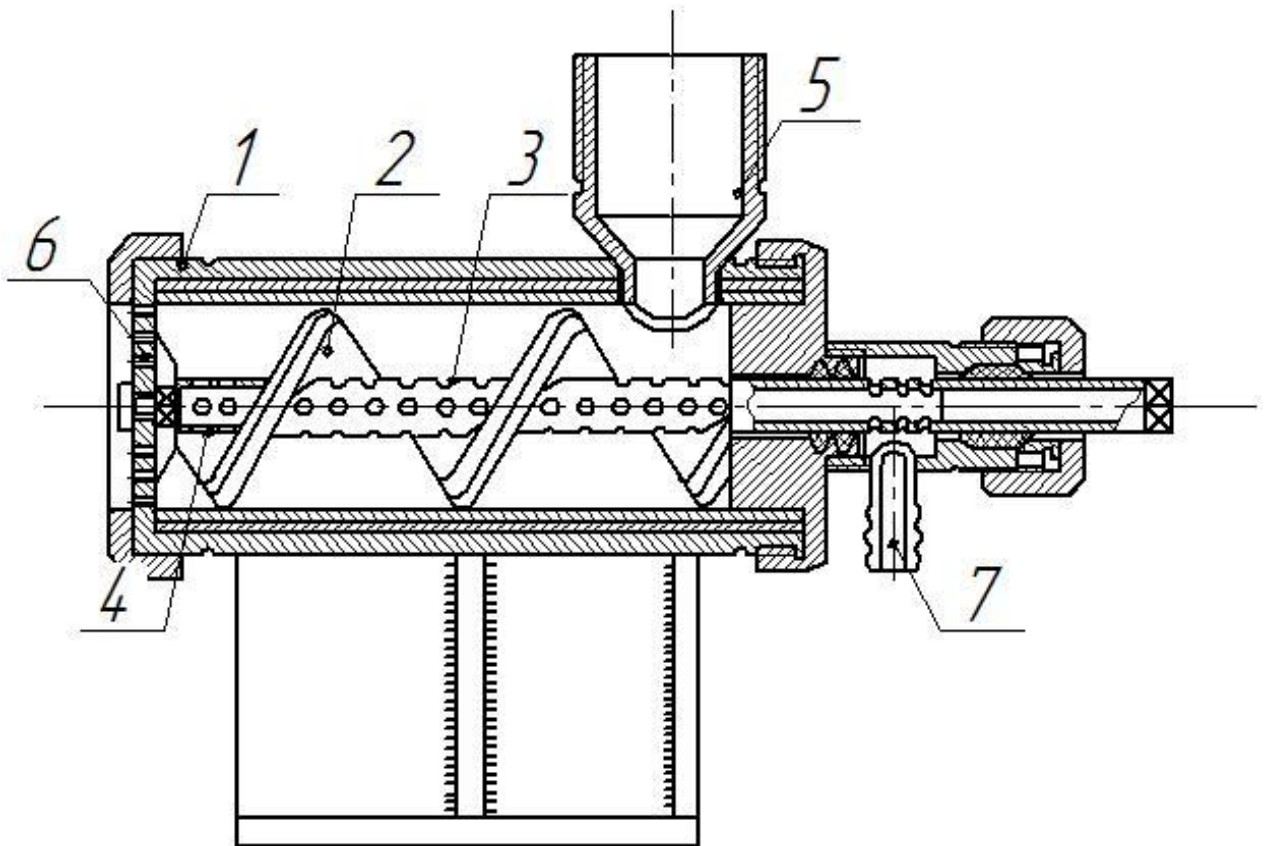


Рис. 1.9 Електроосмотичний зневоложувач пастоподібного матеріалу

Інтенсивний рух часток матеріалу в міжелектродному просторі змінює положення молекул води та активує їх взаємодію із зовнішнім електричним полем.

Спосіб сушіння матеріалів шляхом їх зарядки електричним потенціалом без контакту з електродами і обдування сушильним агентом, представлений у роботі [80] та полягає у тому, що сушильний агент перед подачею в сушильну камеру насичують іонами одного знака в апараті з короноюючим і заземленим електродами, а об'єкт сушіння – матеріал заряджають електричним потенціалом. Далі відбувається іонізація сушильного агента з наданням йому електричного потенціалу, протилежного чи однакового з матеріалом продукції знака, що дозволяє змінювати інтенсивність процесу сушіння в 2 - 5 разів.

У роботі [81] представлений спосіб сушіння матеріалів, за якого продукції додатково надається обертальний або обертово-поступальний рух. При цьому іонізацію сушильного агента можна здійснювати як однойменним, так і протилежним за знаком електричним потенціалом. У сушильну камеру 6 установки на металеву підставку 9 встановлюють продукт 7. Потім включають вентилятор 1, калорифер 3, джерело високої напруги, іонізатор 4 і електродвигун 10. Іонізований сушильний агент поступає в камеру 6, де здійснюється процес сушіння. Даний спосіб дозволяє інтенсифікувати процес сушіння виробів складної конфігурації та підвищити якість сушіння за рахунок рівномірної обробки (рис. 1.10).

Для скорочення енерговитрат при підготовці харчових продуктів до зберігання проводять їх обробку в полі коронного розряду з іонізованим повітрям у два етапи. На першому етапі при напруженості поля від 0,4...0,8 В/м, при експозиції від 42 до 1080 с, а потім при напруженості від 0,2...0,3 В/м, причому відношення тривалості першого етапу обробки до другого становить 0,1 – 0,3.

Зниження енерговитрат на обробку продуктів забезпечується за

рахунок того, що основна кількість мікроорганізмів гине в початковій стадії обробки, потім відбувається поступове зниження їх кількості за більш тривалий термін.

При роботі іншої установки [82] матеріал заряджають шляхом осадження на нього іонів з газового середовища через шар іонів, осаджених на матеріал, додатково пропускають дисипативний уніполярний електричний струм, однаковий за полярністю з іонним струмом. (рис. 1.11)

На електрод 3 установки і трубу 2 згідно зі схемою подають регульовану високу напругу від малопотужного джерела високої напруги 4. При цьому між трубою 2 і електродом 3 не повинно бути ні коронного, ні іскрового розрядів. У цих умовах за допомогою осцилографа 6 реєструють відсутність на зразку 5 іонного та електронного струму при включеному джерелі високої напруги 4. Для фіксування електронного струму поза зоною меж електронного проміжку необхідно за допомогою вентилятора 7 продувати іонізоване повітря.

При цьому іонізатор повинен забезпечувати іонізацію повітря без електронної складової дисипативного електричного струму, що можна проконтролювати шляхом реєстрації іонної складової за допомогою осцилографа 6 при включеному вентиляторі та вимкненому джерелі високої напруги 4. В якості об'єктів для зарядки використовують частки різних матеріалів заморожених харчових продуктів при температурі -10 - -15 °С.

При реалізації способу сушіння [83] на металевий зразок наносять шар оброблюваного матеріалу. Потім через зразок періодично пропускають імпульси уніполярного електричного струму. Тривалість імпульсів складає $0,001$ - 10 с, амплітуда напруги змінюється в інтервалі 10 - 2500 В та розбіжність імпульсів - в інтервалі $1,1$ - 100 . При такому способі час сушіння скорочується на 10 - 20% (рис. 1.12).

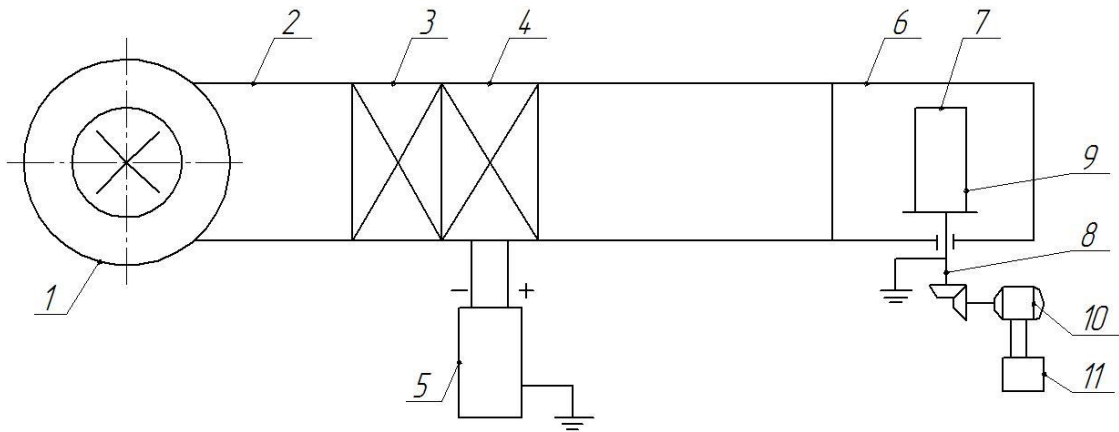


Рис. 1.10 Схема установки для сушіння матеріалів

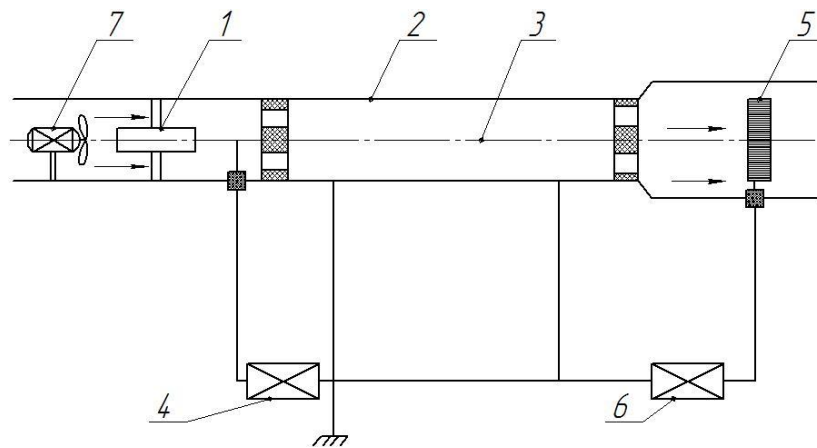


Рис. 1.11 Схема установки із зарядженням частинок матеріалу

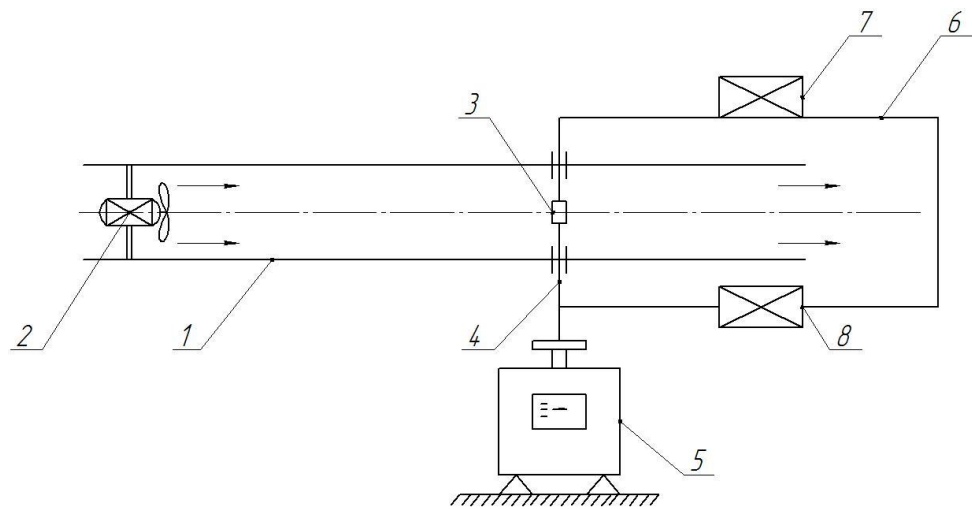


Рис. 1.12 Принципова схема пристрою для реалізації способу сушіння матеріалів

1.4. Обґрунтування конструктивної схеми вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложувача

1.4.1. Аналіз конструктивних схем зневоложувачів відцентрової дії

За результатами аналізу сучасних машин даного типу слід відзначити провідні фірми такі як: "АКИКО" (Китай), швейцарський концерн SULZER, ООО "ТИРИТ" (Франція).

Сушильна фармацевтична центрифуга CDR (Centrifuge - Dryer) швейцарського концерну SULZER (рис.1.13) об'єднує операції сепарації та контактного сушіння при зниженому тиску в одному робочому просторі [84].

Центрифуга з фільтруючим мішком і нижнім ножовим зніманням осаду (рис. 1.15) має як основні функції, тобто поділ рідини високої щільності і ножове знімання осаду, так і додаткові, що полягають у видаленні твердого осаду з фільтруючої тканини з барабана центрифуги. Використання PLD серії дозволяє запобігти змішування різних фаз розділеного продукту і виключає утворення шару твердого осаду на стінках барабана. [85].

Триколонна центрифуга із скребками та нижнім вивантаженням серії SGZ компанії АКИКО (Китай) (рис.1.14) використовується в хімічній та фармацевтичній промисловості та реалізовує процес відцентрового центрифугування [86].

Вертикальні центрифуги серії DEC/DECR ООО "ТИРИТ" (рис. 1.16) застосовуються для сепарації твердих частинок і рідини у фармацевтичній, хімічній і харчовій промисловості, виконуються у вибухозахищеному виконанні з можливістю створення в ній інертної атмосфери [87].

Вертикальні центрифуги серії KSA (рис. 1.18) використовуються у хімічній і фармацевтичній промисловості для сепарації твердих частинок і рідини. Центрифуги можуть працювати у середовищі інертного газу, що використовується для сепарації вибухонебезпечних матеріалів [88].



а



б

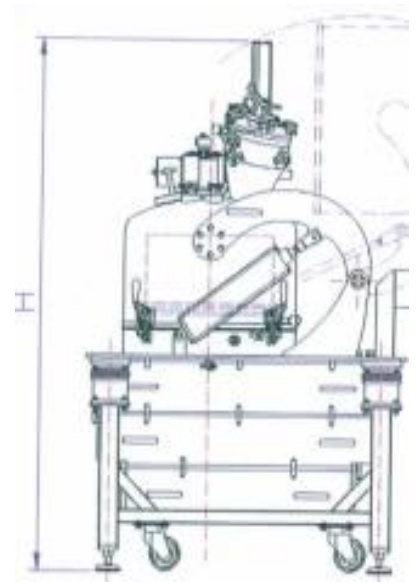
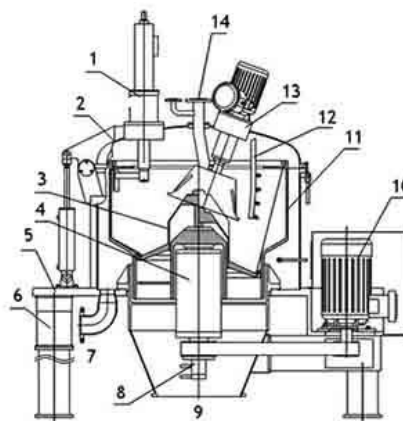


Рис. 1.13. Сушильна фармацевтична центрифуга CDR (а) та її принципова схема (б)



а



б

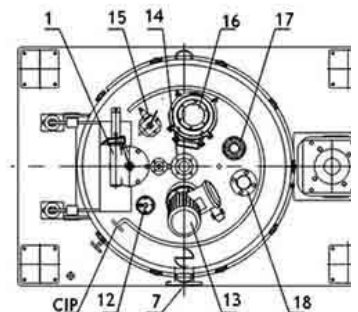


Рис. 1.14. Центрифуга з фільтруючим мішком і нижнім ножовим зніманням осаду(а) та її принципова схема (б): 1 - ніж (скребок); 2 - кришка; 3 - фільтруючий мішок; 4 - вал; 5 - каркас; 6 - амортизатор; 7 - злив рідини; 8 - пневматичний пристрій; 9 - розвантажувальний пристрій; 10 - мотор; 11 - барабан; 12 - промивальна труба; 13 - пристрій подачі; 14 - подає труба; 15 - датчик рівня кеку; 16 - оглядове скло; 17 - підсвічування оглядового скла; 18 - вентиляційний клапан

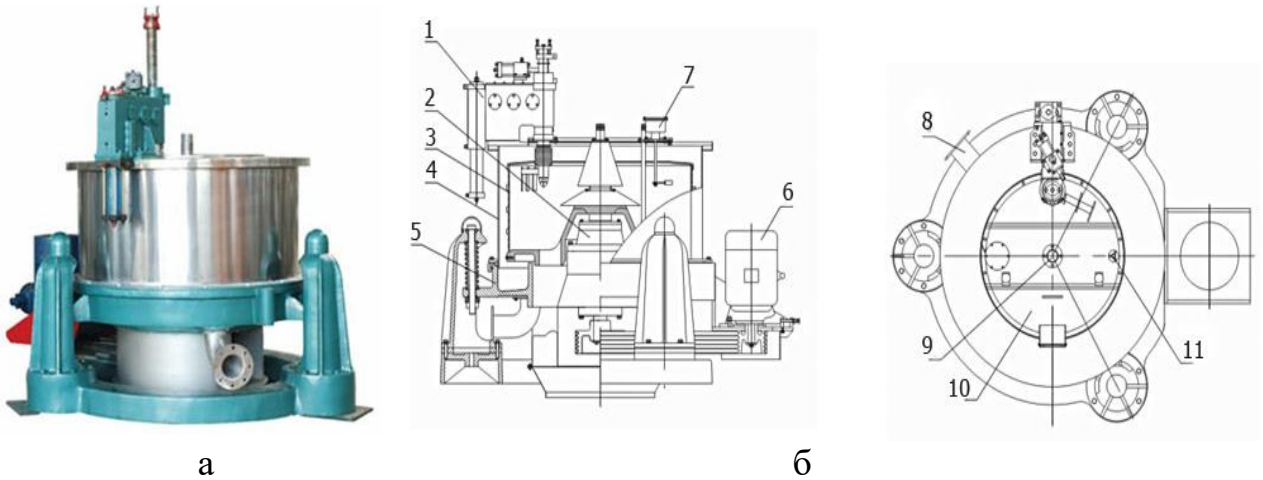


Рис. 1.15. Триколонна центрифуга зі скребками і нижнім вивантаженням (а) та її принципова схема (б): 1 - ніж (скребок); 2 - вал; 3 - барабан; 4 - корпус; 5 - станина; 6 - мотор; 7 - контроль рівня кеку; 8 - зливний отвір; 9 - труба подачі матеріалу; 10 - мала кришка; 11 - промивальна труба

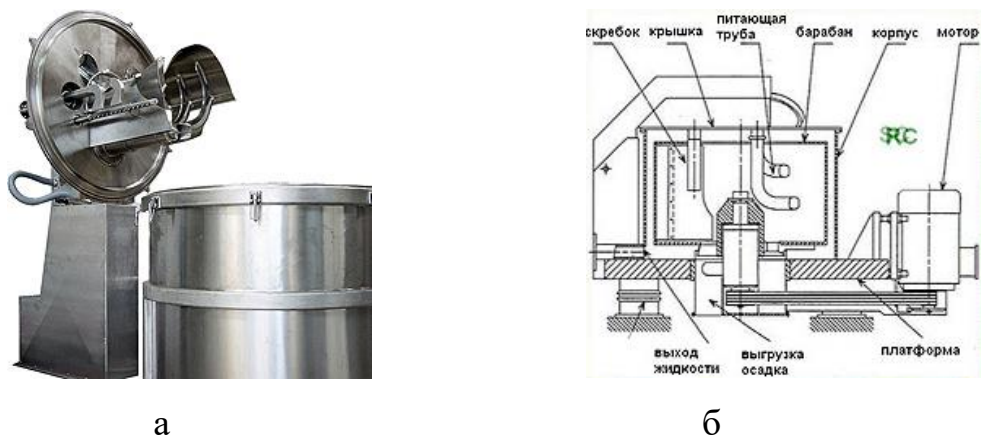


Рис.1.16. Вертикальна центрифуга серії DEC/DECR (а) та її принципова схема (б)



Рис. 1.17. Центрифуга вертикальна з верхнім розвантаженням KSA

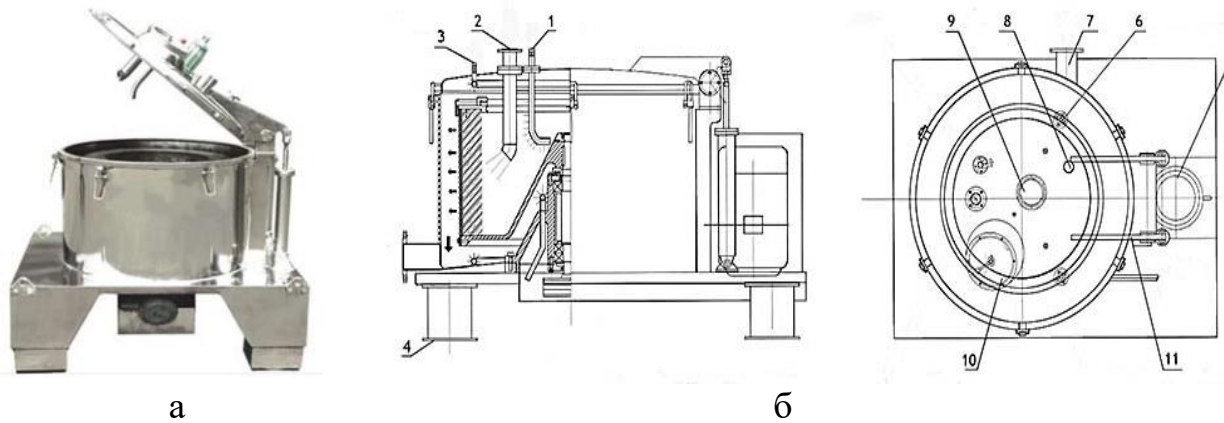


Рис. 1.18. Вертикальні центрифуги на платформі з верхнім вивантаженням серії PSB/PBZ (а) та її принципова схема (б): 1 - промивна труба; 2 - завантажувальна труба; 3 - вода для очищення; 4 - віброізоляційний пристрій; 5 - двигун; 6 - піддув інертного газу; 7 - зливна труба; 8 - вентиляційний отвір; 9 - підсвічування; 10 - оглядовий люк; 11 - поворотний механізм.

Центрифуга серії PSB/PBZ (рис. 1.17) має навісну кришку корпусу, завантажувальну і промивні труби, оглядовий отвір, підсвічування; автоматичну систему очищення, що виконується відповідно зі стандартами GMP. Вивантаження твердих частинок з мішка високоефективна при низьких витратах праці в таких галузях як фармацевтика, тонка хімія, харчова промисловість [89].

На основі проведеного аналізу вертикальне розташування центрифуги виявилось найбільш доцільним при конструюванні розробленої схеми фізико-механічного знеаоложувача.

1.4.2. Техніка та технології для зневоложення бурякового жому

Жомові сушарки, які застосовуються в харчовій промисловості можна поділити на контактні, в яких обігрів жому проводиться водяною парою через стінку, і конвективні, в яких тепло передається жому при безпосередньому зіткненні з теплоносієм [90]. Класифікація способів сушіння та сушильних установок при обробці жому представлена на рис. 1.19.

Парові (контактні) сушарки не знайшли широкого застосування через

велику металоємність і малу продуктивність, значні витрати теплоти. Хоча необхідно відзначити, що жом, висушений в парових сушарках, має достатньо високі технологічні якості [91][92].

На цукрових заводах найбільшого поширення набули барабанні сушарки прямої дії (прямоточні) [93, 94, 95], що відрізняються розмірами, формою і кількістю насадок, виконанням приводу і ущільнень, деякими іншими конструктивними особливостями. Серед особливостей таких апаратів можна відзначити надійність у роботі, можливість висушувати різні види сировини. Проте негативними є застосування в якості теплоносія димових газів, висока температура відпрацьованого сушильного агента, згорання дрібних частинок жому в процесі сушіння, значна питома металоємність [94], [96].

Для більш досконалих конструкцій барабанних сушарок, використовується протитечія і перехресний потік теплоносія і матеріалу, збільшується частка променистої складової у загальному теплообміні, скорочується час перебування матеріалу в барабані. До таких сушарок, наприклад, відносяться апарати фірм «Бюттнер» і «Буккау - Вольф» (Німеччина). В останніх незначний час контакту вологого жому з топковими газами сприяє його швидкому і рівномірному висушуванню [94].

У комбінованій сушарці для жому [97] (рис. 1.20) процес обробки розділений на дві стадії і проводиться в прямотечійному русі перегрітого парогазового потоку і матеріалу. В основу конструкції покладена ідея про те, що вільна і зв'язана волога повинна видалятися у різних робочих ємкостях при різних теплових режимах. Різні режими сушіння в обох сушарках дозволяють при високому вмісті вільної вологи висушувати термочутливі матеріали з малими коефіцієнтами вологоперенесення без погіршення якостей кінцевого продукту. Однак дана конструкція є складною і металоємною, має викиди в атмосферу відпрацьованого теплоносія з досить високою температурою ($t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Заслужують на увагу повітряні низькотемпературні сушильні

установки для жому, в яких використовується тепло вторинних енергоресурсів бурякоцукрових заводів (уфельних парів, конденсатів тощо), в яких відпрацьована теплота збирається в гарячій воді і прямує до сушильного апарату, що складається з конвеєрної сушарки з розвиненою поверхнею теплообміну (водяні калорифери). Зовнішнє повітря вентилятором подається в калорифери, де нагрівається до 65...75 °С, і далі в конвеєрну сушарку. У сушарці гаряче повітря, висушуючи жом, охолоджується до 40...42 °С і викидається в атмосферу. Такі установки отримали широке поширення в західних європейських країнах [98, 99, 100, 101, 102, 103].

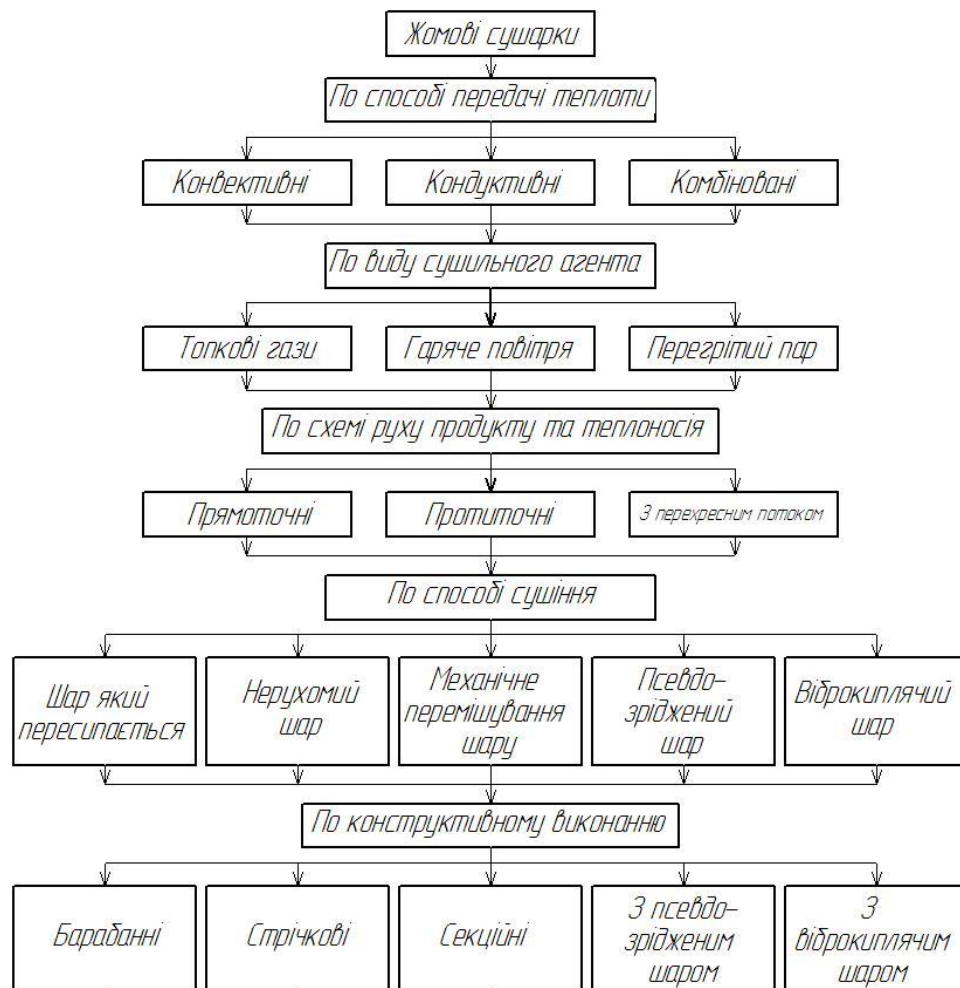


Рис. 1.19. Класифікація способів сушіння та сушильних установок при обробці жому

Сушарка (рис. 1.20) може експлуатуватися на відкритому повітрі та

характеризується порівняно складною конструкцією і значною металоємністю. В процесі обробки в атмосферу відбувається викид відпрацьованого сушильного агента з високою температурою 150 °С.

Останнім часом за кордоном широкого поширення набули високотемпературні сушильні установки з трипрохідним сушильним барабаном, в яких значною мірою вдосконалено традиційний метод сушіння. При обробці технологічні середовища (газоповітряна суміш і жом) проходять барабан за три ходи. Вивантаження жому й очищення відпрацьованих газів від жомового пилу здійснюються в одному пристрої – циклоні, що в цілому скорочує термін та покращує рівномірність зневоложення.

У ряді західних країн конвеєрні сушарки застосовуються з використанням вторинних енергетичних ресурсів, що зумовлює низьку початкову температуру сушильного агента, невисокий тепловий ККД порівняно з барабанними сушарками; заощаджений енергопотенціал дозволяє в додатковому теплообміннику нагріти повітря до 65...75 °С [104].

У промисловій низькотемпературній жомосушарці колонного типу фірми «Бабкок» (Німеччина) [104] жом завантажується зверху на поярусно розміщені сита з нержавіючої сталі. Завантаження установки жомом і вихід висушеного матеріалу в нижній частині здійснюється за допомогою шнеків з регульованою частотою обертання. Нагріте в калориферах повітря знизу подається в розподільну камеру і пройшовши через шар жому, видаляється з установки (рис. 1.21).

Також цією фірмою [104] розроблені стрічкові одноярусні і багатоярусні сушарки відповідно з верхнім і позонним підведенням сушильного агента, що характеризується простотою у виготовленні, ремонті та обслуговуванні, високою якістю готового продукту.

В апараті (рис. 1.22) здійснено принцип рециркуляції отриманого вторинної пари, а також принцип диференціації, завдяки якому більші частки жому знаходяться в апараті довше, ніж дрібні, що забезпечує рівномірне висушування всього жому.

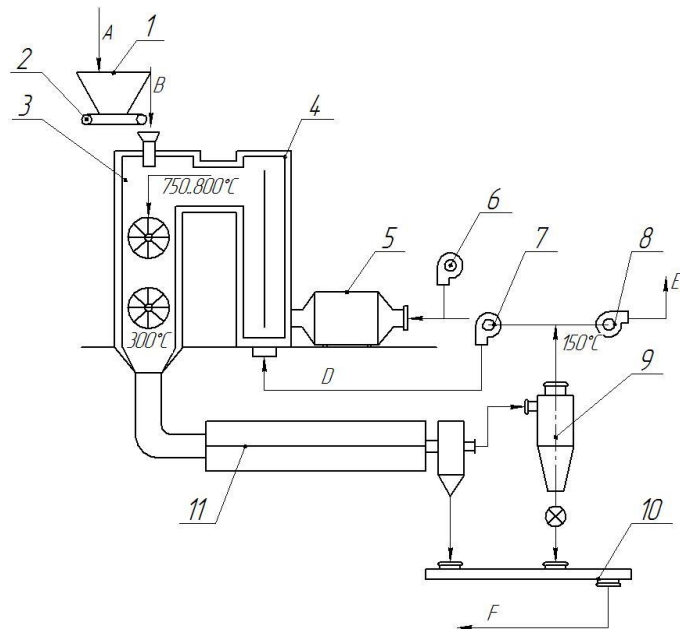


Рис. 1.20. Комбінована сушарка термочутливих матеріалів: 1 - прийомний бункер сировини; 2 - живильник; 3 - вертикальна сушарка; 4 - камера змішування; 5 - теплогенератор; 6, 7 - вентилятори; 8 - димосос; 9 - циклон; 10 - гвинтовий транспортер; 11 - барабанна сушарка (А - сировина, В - паливо, С - повітря, D - рециркуляція, Е - відпрацьовані газы, F - готовий продукт)

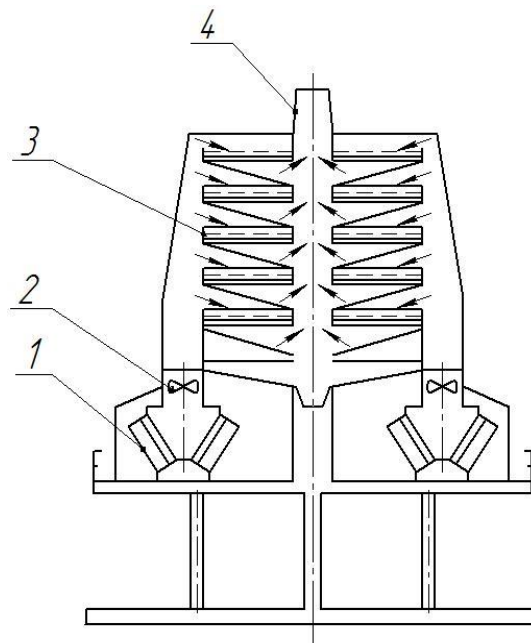


Рис. 1.21. Промислова низькотемпературна жомосушарка колонного типу фірми «Бабкок» (Німеччина): 1 – підігрівач повітря; 2 - вентилятор; 3 - газорозподільні решітки; 4 - канал відведення відпрацьованого повітря

За цим же принципом працює вітчизняна сушарка «Циклон», однак, в якості теплоносія використовується гаряче повітря [105].

Більш ефективним і економічним у порівнянні з високотемпературними барабанними сушарками є новий вид сушарок, що використовують в якості сушильного агента перегріту пару [106, 107]. Такі апарати порівняно недавно з'явилися в цукровій промисловості, але вже успішно працюють у ряді країн далекого зарубіжжя. Найбільш успішний апарат цього типу був розроблений в Данії [106] в даний час серійно випускається вже декількома фірмами (рис.1.23). Такі сушарки мають низку переваг порівняно з відомими, а саме екологічну чистоту проведення процесу; високу якість готового продукту; високу інтенсивність протікання процесу; значну економію енергії.

Розроблено спосіб триступеневого сушіння дисперсних матеріалів [108], який реалізовано у принциповій схемі установки (рис. 1.24).

Сушка жому, як тепломасообмінний процес, ускладнений біохімічними перетвореннями клітин матеріалу, що лежать в основі формування його властивостей та визначають терміни, умови зберігання, якісні показники, які, в свою чергу, лімітуються глибиною гідротермічного розкладання основних речовин - білків, жирів і вуглеводів. Виходячи з цього, враховуючи переваги і недоліки різних способів сушіння, а також специфічні властивості вологого жому, зокрема, схильність до грудкування, доцільним є висушування жому в активних гідродинамічних режимах, при комбінуванні фізико-механічних та інтенсивних механічних методів, в умовах псевдозрідженого шару.

Псевдозріджений (киплячий) шар володіє рядом унікальних властивостей, що забезпечують йому численні переваги: високі теплопровідність і тепловіддачу, низький внутрішньодифузійний опір при роботі з дисперсним матеріалом, ефективне використання робочого об'єму, простота конструкції апарату, легкість введення і виведення матеріалу, рівномірність зневоложення.

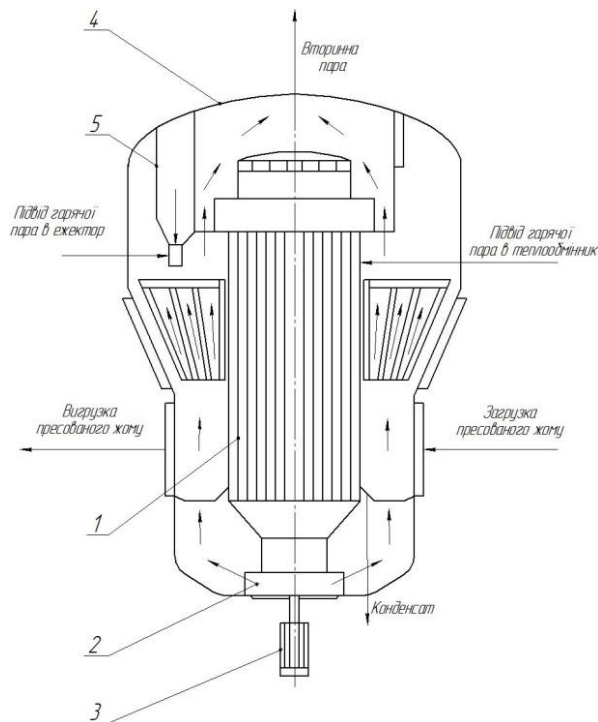


Рис. 1.22. Сушильна установка для жому: 1 - теплообмінник; 2 - вентилятор; 3 - електродвигун, 4 - циклон (для уловлювання частинок жому); 5 - ежектор (для відводу вловлених частинок в розвантажувальний сектор)

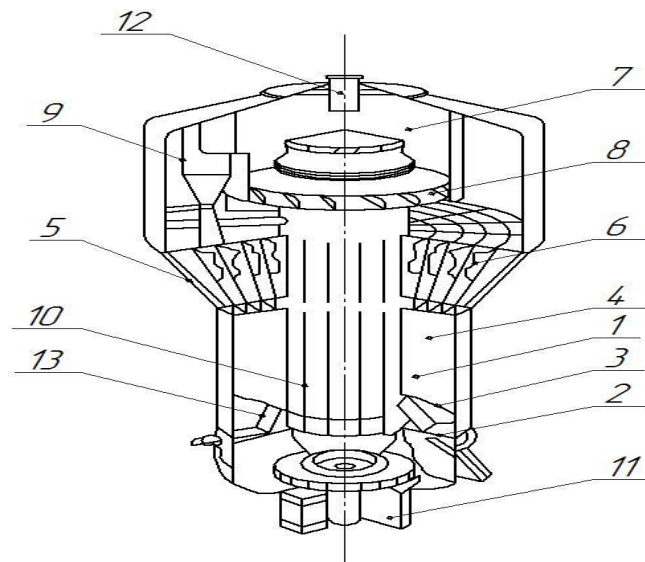


Рис. 1.23. Установка для сушки жому перегрітим паром фірми «Niго» (Данія): 1 - сушильна камера; 2 - перфороване днище; 3 - отвір; 4 - стінка камери; 5 - конічна частина; 6 - направляюча плита; 7 - центральна камера; 8 - направляюча лопатка; 9 - циклон; 10 - теплообмінник; 11 - вентилятор; 12 - труба; 13 - розвантажувальна камера

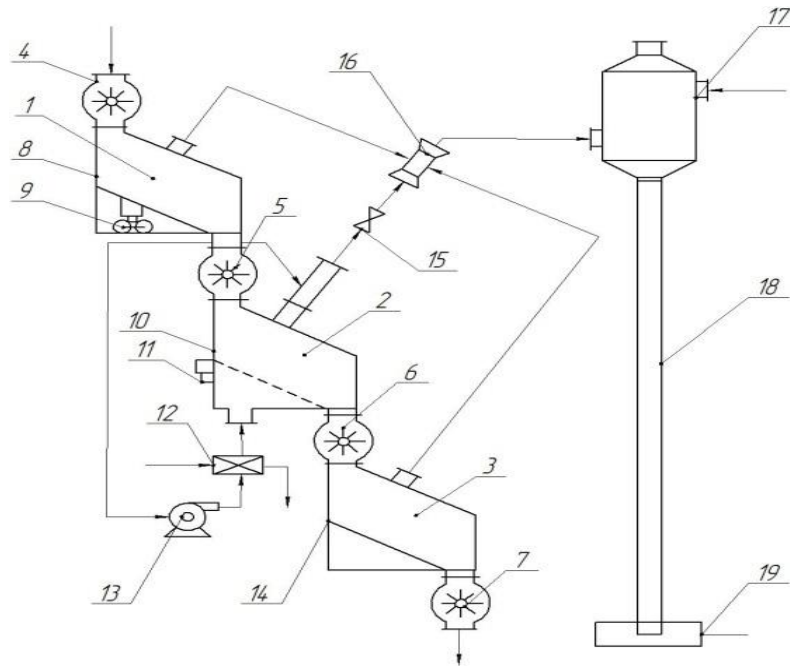


Рис. 1.24. Схема вакуумної установки із тріступеневим способом сушіння: 1 - камера попередньої вакуумного сушіння; 2 - камера сушки перегрітою паром; 3 - камера остаточної вакуумного сушіння; 4 - 7 - шлюзові затвори; 8, 12 - похила полку; 9, 11 - вібропривод; 10 - похила перфорована решітка; 13 - вентилятор; 14 - пароперегрівач; 15 - редукційний клапан; 16 - ежектор; 17 - конденсатор; 18 - барометрична труба; 19 - збірник барометрической води

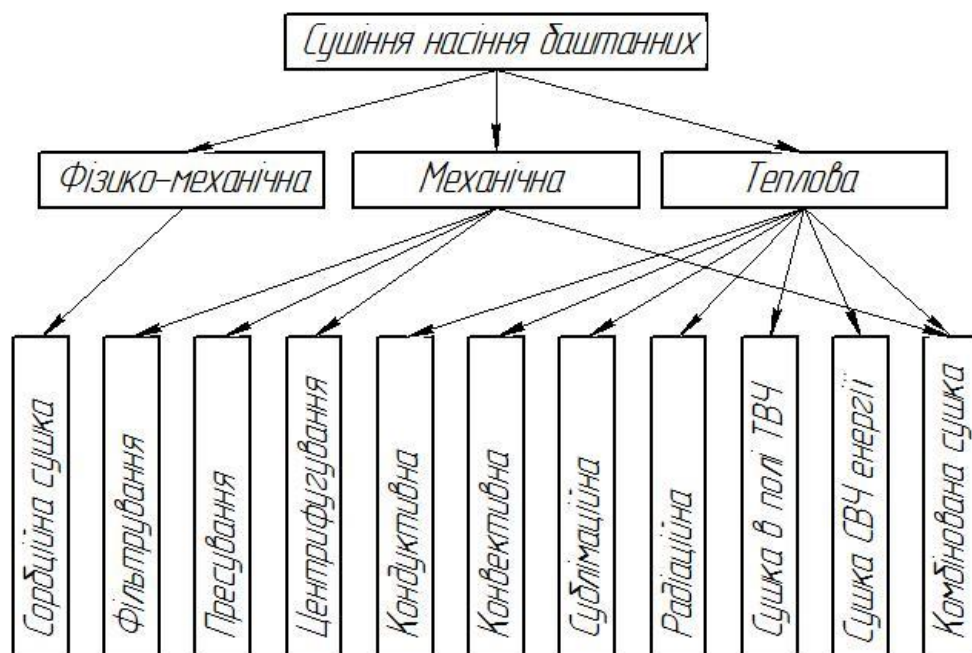


Рис.1.25. Класифікація способів, сушильного обладнання для сушіння високовологого насіння баштанних культур

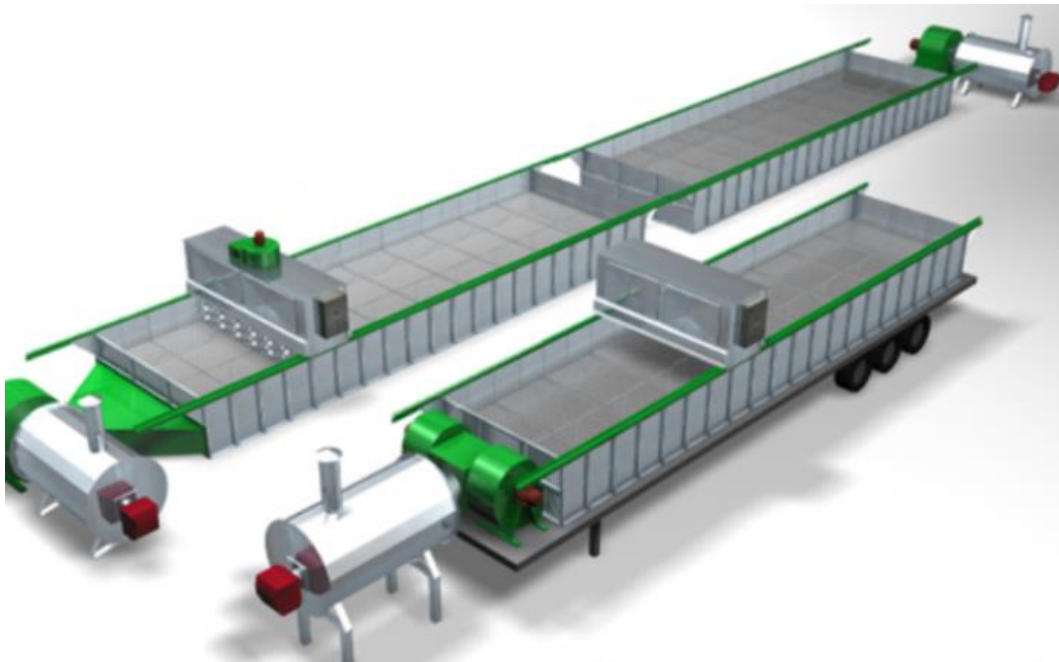


Рис.1.26. Сушарка для насіння баштанних фірми «Moty GmbH»

При цьому практично усувається комкування і прилипання матеріалу до внутрішніх частин сушильної камери [90].

1.4.3. Техніка та технології для зневоложення харчового насіння баштанних

В технології післязбиральної обробки важливу роль займає зневоложення високовологого харчового насіння баштанних культур до кондиційної вологості, що визначає якість оброблюваного продукту, як наслідок, властивості продукту [109, 110, 111]. Тому важливо вибрати та обґрунтувати спосіб зневоложення за якого забезпечуються високі якісні показники харчового насіння баштанних культур та конструктивно-технологічні параметри машини [112]. Класифікація способів, сушильного обладнання для сушіння високовологого насіння баштанних культур представлена на рис. 1.25.

У промисловій сушарці австрійської фірми «Moty GmbH» промите насіння гарбуза сушаться на плоскій сушарці з вертикальними шнековими мішалками. Сушильне устаткування забезпечує рівномірне сушіння

гарбузового насіння, також забезпечується збереження насіння від пошкоджень (рис.1.26) [113].

Для інтенсивного сушіння насіння також функціонують геліотеплові установки, що забезпечують максимальну швидкість теплоносія 0,4...0,5 м/с і температуру нагрівання його до 55 °С.

Обладнання від фірми MeNac, ОАО (рис. 1.27) забезпечує сушіння насіння овочевих і баштанних культур та передбачає автоматичне ворушіння насіння в процесі сушіння [114].

Відома установка для сушіння насіння баштанних культур у киплячому шарі (рис. 1.28) [115] містить циліндричний корпус з незалежним підведенням сушильного агента під газорозподільну решітку і ротор з радіально розташованими лопатями, що розподіляють киплячий шар на рівні секторні відсіки, перебуваючи в яких матеріал переміщається при обертанні ротора від завантажувального пристрою до місця перевантаження через секторні щілини в газорозподільних решітках. До недоліків цієї конструкції відносяться: складність конструктивного виконання газорозподільної решітки, неможливість позбутися від зони застою між обертовими роторами, складність управління лопатями розподільника потоку для забезпечення рівномірного потоку теплоносія по робочій камері, одноразове використання сушильного агента, одноступеневе сушіння насіння зі складністю застосування диференційованого режиму обробки.

Сушарка фірми «Romberger» (рис.1.29.) складається з двох основних складових частин: пальників з піччю для виробництва теплого повітря з вентилятором та сушильної рами, в якій на перфорованій решітці розміщується продукт для просушування [116].

Сушарка призначена тільки для періодичного сушіння. При цьому вироблене пальником тепле повітря піддувається під сушильною рамою та пронизує масу продукту.

Для запобігання підгоряння продукту і забезпечення рівномірного просушування продукту останній циклічно переміщується шнековою мішалкою.

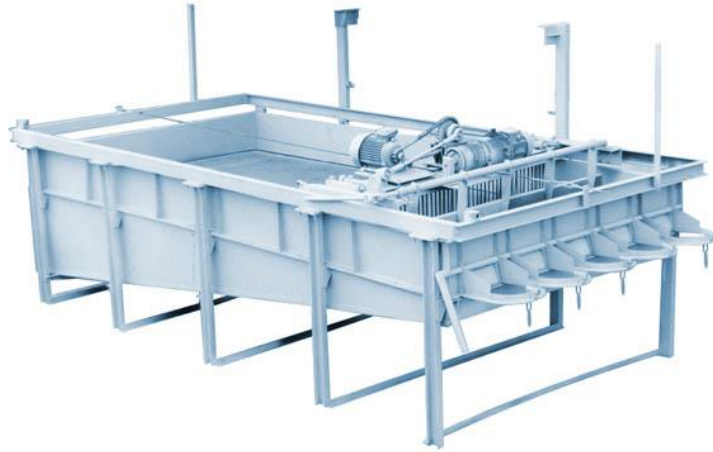


Рис. 1.27. Сушарка для насіння баштанних культур

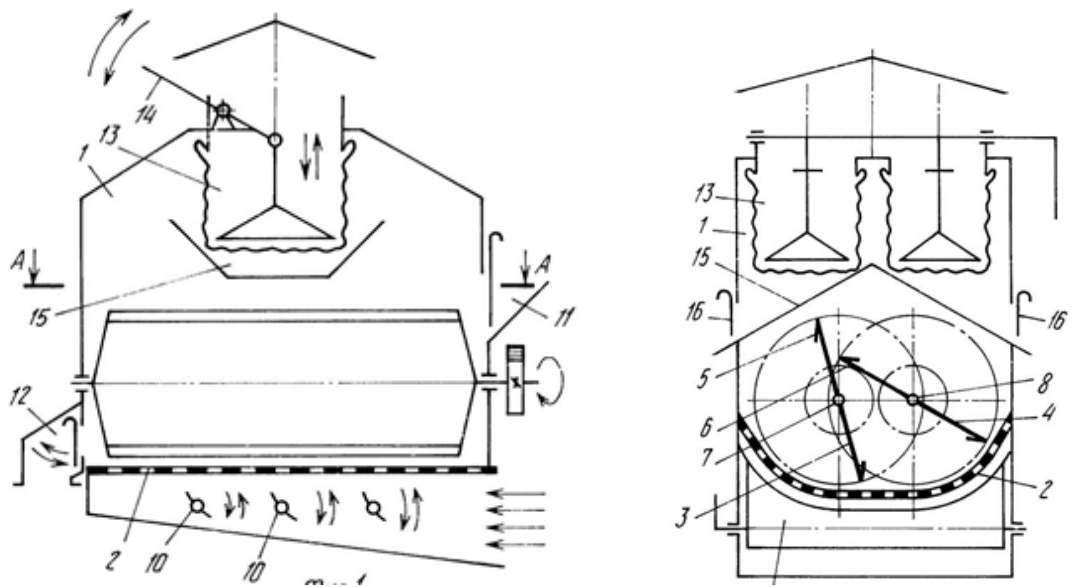


Рис. 1.28. Установка для сушіння сипучих матеріалів в киплячому шарі

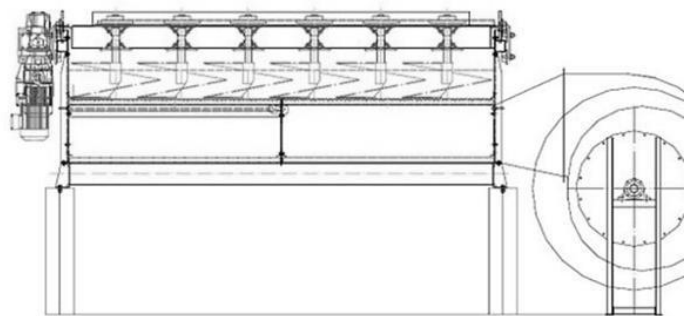


Рис. 1.29. Плоска сушарка фірми «Romberger»

Сушіння насіння баштанних культур інфрачервоними променями відбувається під дією спеціальних генераторів у вигляді спеціальних електричних ламп, керамічних та металевих панелей, що нагріваються електрострумом або газом. Інфрачервоні промені проникають у насінневий шар на глибину 10-15 мм, нагріваючи продукцію до гранично допустимої температури на протязі 1-2 хв., що може несприятливо позначитися на якості насіння баштанних культур, тому даний спосіб сушіння має обмежене застосування.

Окрім того, такі сушарки характеризуються низьким ККД і значною витратою електроенергії (1,5 кВт. год на 1 кг випареної вологи) [110, 111].

1.4.4. Обґрунтування принципової схеми вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача

Обґрунтування принципової схеми зневоложувача було проведено на основі накопиченої бази теоретичних та практичних знань та принципових схем установок для зневоложення високовологої сировини [117].

Експериментальний вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач складається з центрифуги 5 (рис. 1.30) яка за допомогою пружних елементів кріпиться до рами 1. Вібраційні коливання центрифуги надаються за допомогою дебалансного вібропривода 3, який приводиться до руху за допомогою електродвигуна 4. Ротор центрифуги 2 обертається двигуном 6. По периферії ротора розміщені електроди 10. Для підведення теплоагенту, який нагнітається компресором 9 та нагрівається в теплогенераторі 8, в корпусі центрифуги розміщений перфорований патрубок.

Експериментальний зневоложувач працює наступним чином.

У горловину подається високоволога сировина. Для вилучення вільної вологи розпочинається перший етап обробки – відцентрове центрифугування. При цьому за рахунок двигуна 6 здійснюється обертання контейнера 2, за рахунок відцентрової сили відбувається притискання сировини до

перфорованих стінок контейнера 2. Після видалення вільної вологи перфорофаний ротор центрифуги 2 зупиняється. Під дією відцентрових сил сировина на бічній поверхні ротора 2 утворює щільний, непроникний для повітря шар, для руйнування якого створюємо коливання контейнера при обертанні дебалансного валу 3. Після руйнування шару сировини за рахунок впливу вібрації у ротор 2 для досушування подається теплоносій, що нагнітається компресором 9 та підігрівається теплогенератором 8 і подається у контейнер через перфорований патрубок 7. Розпушений шар сировини підсушується теплим повітрям. Одночасно до корпусу перфорованого ротора 2 та до секції електродів 10 підводиться електричний струм, за рахунок проходження якого крізь шар сировини виникає ефект електроосмосу, який дозволяє інтенсифікувати дифузію вологи через напівпроникну мембрану. Вологе повітря видаляється через лоток 12, зневоложена сировина - через горловину.

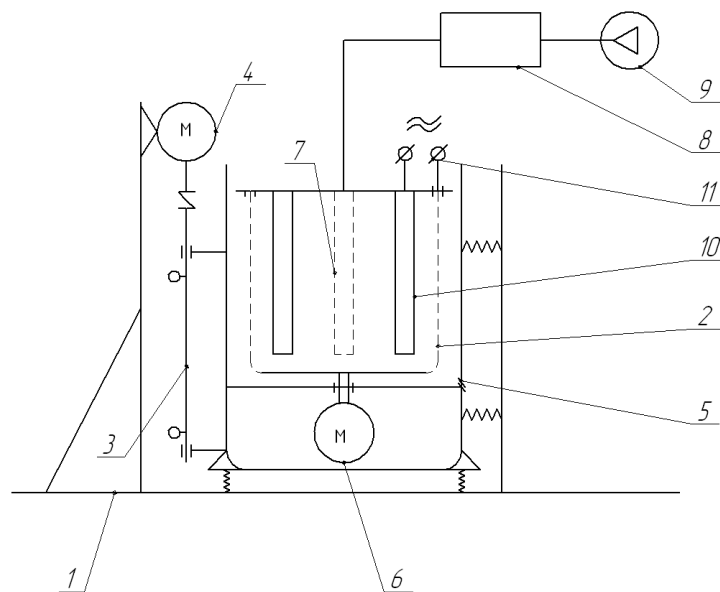


Рис. 1.30. Вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач

1 - рама; 2 - перфорований ротор центрифуги; 3 - вібропривод; 4 - електродвигун вібропривода; 5 - корпус центрифуги; 6 - електродвигун центрифуги; 7 - патрубок; 8 - теплогенератор; 9 - компресор; 10 - електроди; 11 - перетворювач напруги

1.5. Висновки до 1 розділу

1. Оцінка закономірностей процесів технологічного зневоложення харчових та переробних виробництв виявила різноманітність та складність обладнання для обробки різної за властивостями продукції, що дозволило розробити класифікацію об'єктів дослідження та перспективні напрямки досліджень.

2. На основі аналізу фізико-механічних властивостей об'єкта обробки були виявлені граничні параметри для тепломасообмінних, фізико-механічних та механічних дій на сировину та обґрунтовано ефективність комплексної поетапної дії таких чинників як вібрація, центрифугування, електроосмотичне відтискування та конвективне сушіння для різного типу продукції.

3. Поставлені технологічні задачі зневоложення досліджуваної сировини були реалізовані у розробці конструкційно-технологічної схеми вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача, що відзначається технологічною гнучкістю, енергоощадністю, мінімізацією силової дії при обробці сировини з різними фізико-механічними властивостями, можливості послідовного виконання представлених етапів зневоложення, найбільш ефективного видалення вільної вологи та створення максимально сприятливих умов при реалізації відповідно електроосмотичного відтискування, конвективного тепломасообміну, локального ущільнення та розпушування оброблюваної сировини.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ

2.1. Програма експериментальних досліджень та оснащення для її реалізації

2.1.1. Програма експериментальних досліджень

1. Підготовка необхідного обладнання для проведення експериментальних досліджень:

- розробка конструктивної схеми вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача;
- розробка дослідної моделі зневоложувача;
- формування та розробка експериментального та вимірювального оснащення для проведення досліджень.

2. Обґрунтування режимних параметрів розробленої установки для зневоложення харчової сировини:

- визначення амплітудно-частотних характеристик;
- визначення електроосмотичних характеристик;
- визначення витрат потужності на привод машини;
- визначення параметрів тепломасообміну.

3. Дослідження кінетики досліджуваного процесу зневоложення:

- оцінка параметрів кінетики сушіння харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини при різних способах вологовидалення;
- оцінка впливу напруженості електричного поля на кінетику сушіння харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини;
- оцінка впливу частоти електричного струму на кінетику сушіння харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини;
- оцінка впливу шпаруватості імпульсів на кінетику сушіння харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини;

- оцінка впливу температури харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини на час зневоложення;

- оцінка впливу вологості харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини на час зневоложення за зміни амплітуд коливань робочої ємкості та швидкостей повітряного потоку теплоносія.

4. Оцінка техніко-економічних характеристик процесу:

- вплив ступеня завантаження на кінематичні характеристики процесу зневоложення харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини;

- оцінка інтенсивності низькочастотного коливального режиму досліджуваної машини;

- оцінка енергетичних характеристик досліджуваного процесу зневоложення;

- функціонально-вартісний аналіз розробленого устаткування для зневоложення.

2.1.2. Дослідна модель вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача

У лабораторії автоматизації виробничих процесів Вінницького національного аграрного університету було розроблено і виготовлено експериментальний вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач (рис. 2.1) який містить станину, що встановлена на опорах та два основних структурних контури, які приводяться в рух електродвигунами.

Внутрішній контур вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача має у своєму складі підпружинений корпус з перфорованим ротором, що приводиться в обертний рух електродвигуном, патрубкі відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. Кришку з радіально розміщеними електродами навколо центрального перфорованого патрубка, що розташований співвісно із перфорованим ротором та знаходиться в центрі перфорованого ротора, який з'єднаний через проміжний

шланг із теплогенератором та компресором.



Рис. 2.1. Експериментальна модель вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача

Зовнішній контур вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача містить пружні елементи, приводний вал дебалансного віброприводу у якого є можливість змінювати ексцентриситет центра мас дебалансів за рахунок кута $\beta \pm \Delta_\beta$ між ними. Приводний вал через компенсуючу муфту приводиться в рух електродвигуном та через підшипниковий вузол і траверси жорстко приєднаний до підпружиненого корпусу.

Експериментальний вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач працює наступним чином. Вологий матеріал (сировину) завантажують у перфорований ротор. Вмикають електродвигун. За рахунок відцентрових сил, виникаючих при обертанні перфорованого ротора відбувається вилучення вільно-зв'язаної вологи через патрубок у підпружиненому корпусі та ущільнення оброблювального матеріалу відносно стінок ротора. Після відпрацювання заданого часу центрифугування $t_u(c)$

вимикається електродвигун привода центрифуги.

Наступним етапом технологічного процесу зневоложення сировини із різними фізико-хімічними властивостями є ввімкнення електродвигуна дебалансного привода, крутний момент якого через компенсуючу муфту передається на приводний вал з дебалансами, для створення силової незрівноваженості системи, яка дозволить за рахунок постійного перемішування та розпушування ущільненої сировини інтенсифікувати технологічний процес сушіння. Після чого у перфорований патрубок через проміжний шланг при допомозі компресора і теплогенератора нагнітається теплоагент. Одночасно до радіально розміщених електродів підводиться електричний струм зумовлюючи виникнення електроосмотичного ефекту та дифузійного видалення вологи з матеріалу через патрубок.

2.1.3. Експериментальне оснащення для оцінки силових та енергетичних характеристик процесу, що досліджується

Для виявлення якісної картини споживання енергії розробленого устаткування, оцінки амплітудно-частотних, кінетичних та якісних параметрів досліджуваних процесів було здійснено експериментальні дослідження на дослідній установці вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача.

Для оцінки енергетичних параметрів було використано безпроводний датчик реєстрації амплітудно-частотних характеристик з незалежним живленням на основі акселерометра LIS3DH компанії STM icroelectronics (рис. 2.2), який має наступні характеристики: ультранизьке енергоспоживання – 2 мкА; споживана напруга від 1,71 – 3,6 В; регульований діапазон вимірювання прискорення: $\pm 4g$; $\pm 8g$; $\pm 16g$; інтерфейс SPI/I2C для зчитування даних; вмонтований модуль самотестування; маса 1,5 г [118].

Після зупинки обладнання за допомогою програмного забезпечення та адаптивного шнура, отримані АЧХ інтерпретуються у вигляді графічних залежностей та цифрової матриці даних.

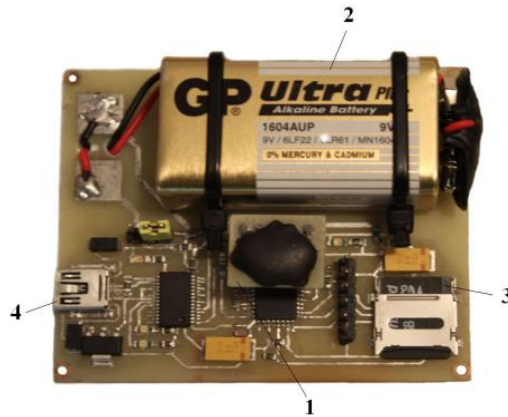


Рис. 2.2. Автономний акселерометр: 1 - акселерометр; 2 - батарея живлення; 3 - карта пам'яті; 4 - адаптивний мікропорт для зчитування даних

Програмне забезпечення дає змогу аналізувати віброприскорення, віброшвидкість, вібропереміщення та частоту створюваних коливань.

Для реєстрації частоти обертання приводного вала було використано безпроводний тахометр UNI-T UT372 (рис 2.3).

Для керування та зміни частоти обертання вала електродвигуна використовувався автотрансформатор АОСН-20-220-75 (рис. 2.4), який призначений для роботи зі змінним струмом. Він містить рухомий струмознімальний контакт у вигляді графітового ролика, що дозволяє плавно змінювати напругу від нуля до максимуму. Також обмотка згаданого автотрансформатора має декілька клем, завдяки яким можна отримувати різні характеристики струму на виході. Прилад можна застосовувати як стабілізатор – його підключення до установки запобігає стрибкам напруги в мережі.

Експлуатаційні характеристики лабораторного автотрансформатора АОСН-20-220-75 дають змогу в режимі реального часу знімати показники та аналізувати споживану потужність та кількість обертів електродвигуна.

Для визначення енергетичних характеристик досліджуваної машини використовувався електронний ватметр EMF-1 (рис. 2.5), який призначений для вимірювання споживаної потужності у мережі 220 В, 16 А (максимум) з підключенням через побутову розетку.

За допомогою цього приладу здійснювались заміри наступних

показників: напруга в мережі, частота та сила змінного струму, споживана потужність, коефіцієнт потужності, час роботи обладнання та сумарна спожита потужність за весь період роботи машини в кВт/год.

2.1.4. Вимірювальне оснащення для оцінки масових характеристик досліджуваної сировини

Для дослідження параметрів тепло-масоперенесення застосовувалися електронні лабораторні технічні ваги ВТА-60 (рис. 2.6), які призначені для визначення маси проб у виробничих та технічних аналізах у різних галузях переробного, харчового та фармацевтичного виробництва.



Рис. 2.3. Частотомір UNI-T UT372: 1 - лазерний зчитувач; 2 - цифровий індикатор; 3 - панель керування

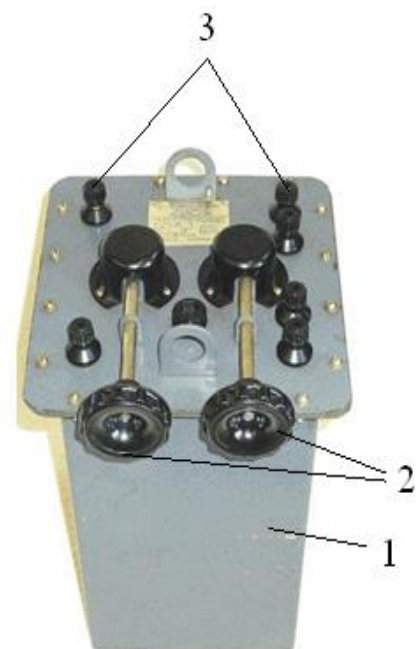


Рис. 2.4. Лабораторний автотрансформатор АОСН-20-220-75: 1 - зовнішній кожух; 2 - регулятори напруги; 3 - вхідні та вихідні клеми



Рис. 2.5. Електронний ватметр EMF-1: 1 - корпус ватметра; 2 - панель керування; 3 - індикаторний дисплей



Рис. 2.6. Електронні лабораторні технічні ваги ВТА-60: 1 - звішувальне деко; 2 - панель калібрування; 3 - індикаторний дисплей



Рис. 2.7. Загальний вигляд контролера температури «SPLIT»

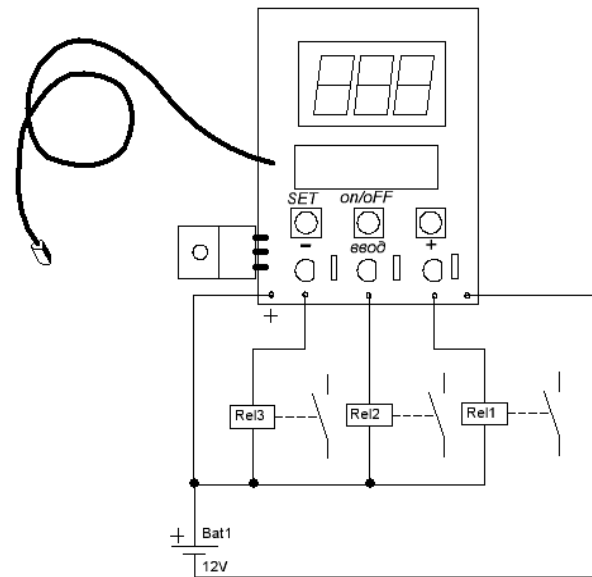


Рис. 2.8. Схема підключення контролера температури «SPLIT»



Рис. 2.9. Загальний вигляд вологоміра «Wile-55» для контролю вологості

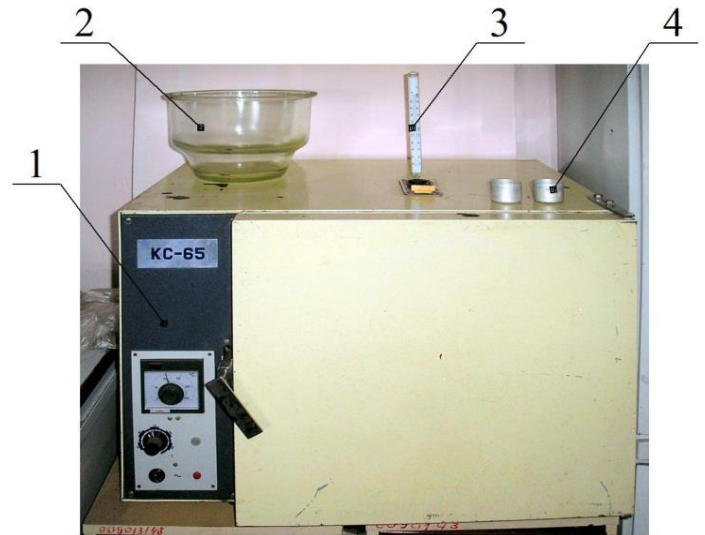


Рис. 2.10. Загальний вид обладнання для контролю вологості: 1 - шафа сушильна КС-65; 2 - ексикатор; 3 - термометр; 4 - бюкса

Температуру досліджуваної сировини до і після сушіння вимірювали сертифікованим термометром «Infrared Thermometr»; межі виміру 20...537 °С, похибка вимірювання $\pm 2,5$ °С;

Вимірювання температури досліджуваної сировини в робочій зоні здійснювалося за допомогою контролера температури «SPLIT» (рис. 2.7, 2.8); межі виміру 20...1000 °С, похибка вимірювання $\pm 3\%$.

Для вимірювання швидкості руху повітря у повітропроводі застосовувався ручний ареометр МС-13 ГОСТ 6376-74; межі виміру 1...20 м/с, поріг чутливості 0,8 м/с, похибка вимірювання $\pm 0,3$ м/с.

Для вимірювання тиску повітряного потоку в повітропроводі використовували багатомежовий мікроманометр з похилою трубкою ММН-240 ТУ-25-01-277-70.

Для реєстрації часу сушіння застосовувався секундомір СДСпр-1 ГОСТ

5272-72; похибка вимірювань $\pm 0,4$ с за 20 хвилин.

Для контролю вологості використовувався вологомір «Wile-55» (рис. 2.9) та сушильна шафа КС-65, ексікатор, термометр та бюкси (рис. 2.10).

2.2. Методика вимірювання параметрів вібрації

Кінематичні, силові та енергетичні параметри вібрації характеризують технологічні режими вібраційного поля. Кінематичні параметри характеризують закономірності руху виконавчих органів коливальної системи. Силові параметри вібрації зумовлюють закономірності технологічної дії на продукцію і визначають траєкторію руху складових коливальної системи [119]. Енергетичні параметри вібрації характеризують взаємоперетворення енергії, що споживається коливальною системою і виробляється під час експлуатації технологічної машини.

Силові параметри вібрації, з одного боку, характеризують виведення коливальної системи зі стану рівноваги (збурююча сила, момент та їх складові), а з іншої - набуває системою початкового стану (пружні сили). Статична чи силова невірноваженість виникає, внаслідок дії збурюючої сили. У механічних системах збурююча сила утворюється, здебільшого, внаслідок обертання інерційного елемента відносно головної осі інерції системи чи паралельно їй (силове віброзбудження), наявності ексцентричного механізму приводу виконавчих органів вібромашини (кінематичне віброзбудження), або комбінованим способом.

Величина збурюючої сили визначається за формулою:

$$F = m_0 r \omega^2 \quad (2.1)$$

де: m_0 - невірноважена маса (у випадку силового віброзбудження m_0 - маса інерційного елемента);

r - радіус інерції невірноваженої маси (у випадку силового віброзбудження r - відстань від центра ваги інерційного елемента до осі обертання);

ω - кутова швидкість приводного вала віброзбуджувача.

Моментна незрівноваженість має місце за наявності в коливальній системі неврівноваженого моменту. Такий збурюючий момент у механічних системах виникає також або силовим способом під час обертання інерційного елемента відносно осі, що не збігається з головною віссю інерції і не паралельна їй; або кінематичним способом, коли декілька ексцентрикових валів приводу виконавчих органів машини розташовуються таким чином, що в системі утворюється незрівноважений момент [120].

Величину такого моменту незрівноваженості можна представити виразом:

$$M = rS_m\omega^2 \quad (2.2)$$

де r - радіус-вектор центра мас однієї із симетричних складових незрівноваженої маси;

S_m - вектор статичного моменту (дисбалансу) однієї із симетричних складових незрівноваженої маси.

Величина пружних чи відновлюючих силових параметрів залежить від типу збурюючого фактора та коефіцієнта жорсткості пружного елемента:

$$F_{np} = k_f \Delta; \quad M_{np} = k_m \Theta, \quad (2.3)$$

де Δ - пружне переміщення в напрямку дії сили F_{np} ;

Θ - кут повороту пружного елемента під дією моменту M_{np} .

Сумарний коефіцієнт жорсткості паралельної групи пружних n -елементів становить:

$$k = \sum_{i=1}^n k_i \quad (2.4)$$

де k_i - коефіцієнти жорсткості складових елементів.

Сумарна піддатливість $1/k$ послідовної групи n - пружних елементів виражається як:

$$\frac{1}{k} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (2.5)$$

де $-1/k_i$ піддатливість складових елементів пружної системи.

Аналогічно сумарний коефіцієнт опору в паралельній групі n -демпферів визначається як:

$$b = \sum_{i=1}^n b_i \quad (2.6)$$

де b_i - коефіцієнт опору складових елементів; а для послідовної групи n -демпферів:

$$\frac{1}{b} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{b_i} \quad (2.7)$$

де $\frac{1}{b}$, $\frac{1}{b_i}$ - сумарна рухливість і рухливість складових демпферів.

За допомогою даних залежностей можна визначити приведені коефіцієнт пружності або приведені коефіцієнт опору, дія якого еквівалентна дії фактичного пружного елемента. Критерієм еквівалентності пружини може бути рівність потенційних енергій, що запасуються пружними елементами в умовах даних кінематичних зв'язків коливальної системи при переміщенні її виконавчих органів:

$$k_\phi \delta_\phi^2 = k_{np} \delta_{np}^2, \quad (2.8)$$

де k_ϕ , k_{np} - коефіцієнти пружності відповідно фактичного і приведеного пружного елемента;

δ_ϕ^2 , δ_{np}^2 - фактичне та приведене пружне переміщення.

$$b_\phi \delta_\phi^2 = b_{np} \delta_{np}^2, \quad (2.9)$$

де b_ϕ , b_{np} - коефіцієнти опору відповідно фактичного і приведеного демпферів.

До основних енергетичних параметрів вібрації можна віднести роботу внутрішніх та зовнішніх сил коливальної системи, а також складові потужності, що витрачаються на здійснення технологічного циклу.

Робота зовнішніх сил коливальної системи створюється віброзбуджувачем та витрачається на подолання сил опору системи і

забезпечення необхідних робочих режимів виконавчих органів машини. Внутрішні сили системи становлять сили реактивного і дисипативного опору.

Робота сил реактивного опору є роботою пружно-інерційних сил коливальної системи [121]. В алгебраїчному виразі кожна з цих складових має різні знаки, що постійно змінюються відповідно до коливального руху елементів вібраційної системи. У тому разі, коли розрахунок здійснюється для цілого числа повних коливань, обидві означені роботи виключаються із загального балансу енергії системи. Рівень накопичення енергії в системі та співвідношення між кінетичною енергією рухомої маси і потенційною енергією пружних елементів визначаються вертикальною складовою збурюючої сили. При цьому рівність амплітудних значень кінетичної і потенційної енергій реактивних елементів вказує на можливість роботи коливальної системи в резонансному режимі коливань.

Робота сил дисипативного опору є роботою сил тертя в коливальній системі і може бути представлена: у вигляді гістерезисних втрат енергії при деформуванні пружин; енергії, що розсівається у демпферах робочих органах і опорних вузлах вібромашини; енергії дисипації технологічного середовища; енергії, що витрачається на тертя в різних з'єднаннях, на подолання опору повітря та інших дисипативних опорах. Крім того, частина енергії зовнішнього джерела витрачається у різних проміжних передачах, з'єднувальних муфтах, у самому електродвигуні та інших механізмах вібраційної машини [122].

2.3. Методика визначення параметрів процесу зневоложення

2.3.1. Методика визначення вологості насіння

Вологість насіння визначають методом висушування у сушильній шафі згідно ГОСТ 12041-82 [123]. Для аналізу відбирають пробу масою приблизно 50 г., потім розмелюють на млинку, і совком або ложечкою з різних місць проби беруть виїмки для наважок по 5 г, які відважують у попередньо зважених бюксах.

Зерна висушують при температурі 130 °С протягом 40 хв. Після висушування насіння протягом зазначених строків бюкси виймають із шафи, закривають кришками і поміщають на 15-20 хв у ексикатор для охолодження, а потім зважують з точністю до 0,01 г.

Вологість насіння (у відсотках) дорівнює втраті вологи насінням, помноженій на 100 % і поділеній на величину наважки.

Аналіз вважається закінченим, якщо розбіжність між паралельними дослідями не перевищує 0,2 %, в іншому разі аналіз повторюють.

У дуже вологому насінні (понад 20 %) вологість визначають з попередніми підсушуванням. Для цього з проби насіння беруть наважку 20 г, поміщають у неглибоку чашку діаметром 8-10 см і підсушують у сушильній шафі при температурі 105 °С протягом 30 хв. Потім наважку охолоджують в ексикаторі та зважують.

Підсушене насіння розмелюють і далі проводять аналіз вже звичайним способом. Вологість насіння (X) розраховують за формулою [124]:

$$X = 100 - (B - b), \quad (2.10)$$

де B - 20-грамова наважка не подрібненого насіння після попереднього підсушування;

b - 5-грамова наважка після повторного висушування.

У зв'язку з тим, що вище зазначена методика вимірювання вологості тривала в часі, а в разі нашого експерименту потрібна велика кількість таких вимірів, то ми користувалися вологоміром «Wile-55» (рис. 2.9).

Даний вологомір вимірює вміст вологи в цільних зернах, насінні, і являє собою мікропроцесорний електронний прилад, який показує дані на дисплеї щодо процентного вмісту вологи в 16 різних типах зерна і насіння.

Виміри проводилися в такій послідовності:

- наповнювали вимірювальний циліндр насінням спочатку на одну чверть, акуратно струшували та продовжували заповнення «до країв»;
- повертали кришку вимірювального циліндра по різьбі за

годинниковою стрілкою до тих пір, поки центральний рухомий стрижень кришки не зрівняється з площиною кришки;

– здійснювали вимір.

Оскільки вологість насіння може відрізнятись в різних частинах партії, то здійснювали не менше п'яти вимірювань.

2.3.2. Методика визначення площі поверхні насінини

Площа поверхні насінини $F_{зep}$ визначали за виразом [125]:

$$F_{зep} = 4\pi R(l + 3R), \quad (2.11)$$

де R - приведений радіус насінини

$$R = \frac{5a + 6b}{60}, \quad (2.12)$$

де a - товщина насінини, $a = 3$ мм;

b - ширина насінини, $b = 7$ мм;

l - довжина насінини, $l = 18$ мм;

2.3.3. Методика обробки узагальнення чисел подібності процесу тепломасообміну

Використовуючи чисельні значення механічних та тепломасообмінних параметрів, що були отримані в результаті експериментальних досліджень, розраховуємо наступні характеристики досліджуваного процесу.

Модифіковане вібраційне число Рейнольдса отримуємо при застосуванні однотипних параметрів

$$Re_s = \frac{\rho d^2 f}{\mu} = \frac{d^2 f}{\nu} \quad (2.13)$$

де ρ_n - щільність продукції;

μ, ν - відповідно динамічна та кінетична в'язкість;

d - характерний розмір або діаметр насіння;

f - частота вібраційного руху.

Модифіковане вібраційне число Пекле для віброконвективного

ЗНЕВОЛОЖЕННЯ СТАНОВИТЬ

$$Pe_e = Re_e \cdot St_e \quad (2.14)$$

де $St_e = \frac{v}{D}$ – число Стентона;

де D - коефіцієнт дифузії: для вологи – повітря при 22 °С; $D = 0,216 \cdot 10^{-4}$ м²/с

Модифіковане вібраційне число Стентона можна представити у вигляді

$$St_e = \frac{\beta}{df} \quad (2.15)$$

де β - коефіцієнт масовіддачі.

$E = \frac{E_0}{E_1}$ - питома напруженість електричного поля

E_0 та E_1 - початкова та поточна електрона напруженість в умовах електроосмотичної активації руху вологи.

У разі $E_1 = 1$ $E = \frac{1}{E_1}$ - безрозмірна напруженість електроосмотичної дії

$$Re_e = \frac{d^2 f}{\nu} \quad (2.16)$$

$$E_1 = \frac{F_{oc}}{\tau} \quad (2.17)$$

де F_{oc} - сила осмотичного тиску;

τ - час обробки.

$$Re_e = \frac{v \cdot d_{II}}{\nu} \quad (2.18)$$

де v - швидкість конвективного потоку;

d_{II} - діаметр патрубку для подачі теплоносія.

Критерій Ейлера:

$$Eu = \frac{F_M}{\rho v_u^2} \quad (2.19)$$

де F_M - механічна відцентрова сила: $F_M = \frac{m \cdot v_u^2}{r}$

r - радіус центрифуги;

v_c - лінійна швидкість центрифуги.

Моделювання процесу методом «аналізу розмірностей» проводимо за використання другої теореми Федермана-Бекінгема, що дозволяє обробити отримані експериментальні дані у формі критеріального рівняння, яке складаємо наступним чином.

Факторний простір досліджуваного процесу складають параметри, представлені у таблиці 4.1.

На основі вищезазначеного, шукану критеріальну залежність можна представити функцією $\beta = f(\rho_{II}, f, d, v, D, F, E_1, v)$ яка складає степеневий ряд

$$\beta = A \cdot \rho^n \cdot f^m \cdot d^k \cdot D^q \cdot F_M^p \cdot E_1^r \cdot v^s \cdot v^l \quad (2.18)$$

Для представленого факторного простору число змінних 8 за трьома розмірностями та кількість безрозмірних компонентів за Π -теоревою становить $8-3=5$.

При використанні матриці, представленій у таблиці 2.2, складаємо наступну систему алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} n + p + r = 0 & (2.19) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -3n + k + 2l + 2q + p + r + s = 1 & (2.20) \end{cases}$$

$$\begin{cases} -m - l - q - 2p - 3r - s = -1 & (2.21) \end{cases}$$

Для представлених параметрів складаємо матрицю розмірностей досліджуваного степеневому ряду (табл.2.2).

Враховуючи рівняння (2.19) перетворюємо рівняння (2.20) до вигляду

$$-4n + k + 2l - 2q - s = 1 \quad (2.22)$$

В результаті додавання рівняння (2.20) та (2.21) отримуємо

$$-3n - m + k + l + q - p - 2r = 0 \quad (2.23)$$

Враховуючи рівняння (2.19) перетворюємо рівняння (2.23) до вигляду

$$-n - m + k + l + q + p = 0 \quad (2.24)$$

За допомогою отриманих рівнянь (2.19) ÷ (2.24) перетворюємо рівняння (2.18) до вигляду

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{df} &= \frac{1}{df} \cdot \left(\frac{d^2 f}{v}\right)^m \cdot \left(\frac{v}{d^2}\right)^m \cdot \left(\frac{F_m}{\rho v^2}\right)^p \cdot (\rho v^2)^p \cdot v^l \cdot \rho^n \cdot d^k \cdot D^q \cdot E_1^r \cdot v^s \Rightarrow \\ St_g &= Re_g^m \cdot Eu^p \cdot \left(\frac{v}{D}\right)^m \cdot \left(\frac{D}{d^2}\right)^m \cdot \frac{1}{df} \cdot v^l \cdot \rho^n \cdot d^k \cdot D^q \cdot E_1^r \cdot v^s \Rightarrow \\ St_g &= Re_g^m \cdot Eu^p \cdot Sc^m \cdot \left(\frac{vd^2}{v}\right) \cdot \left(\frac{v}{d}\right)^s \cdot \left(\frac{D}{d^2}\right)^m \cdot \frac{1}{df} \cdot v^l \cdot \rho^n \cdot d^k \cdot D^q \cdot E_1^r \Rightarrow \\ St_g &= Pe_g^m \cdot Eu^p \cdot Re_g^s \cdot v^{(s+l)} \cdot D^{(m+q)} \cdot f^{-1} \cdot \rho^n \cdot E_1^r \cdot d^{(k-s-2m-1)} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Таблиця 4.1

Основні параметри досліджуваного процесу віброконвентивного електроосмотичного зневоложення

№ п/п	Найменування		Розмірність
1	Частота вібраційної дії	f	c^{-1}
2	Щільність оброблюваної продукції	ρ_{II}	$кг \cdot м^{-3}$
3	Характерний розмір	d	$м$
4	Кінематична в'язкість	ν	$м^2 \cdot c^{-2}$
5	Коефіцієнт дифузії	D	$м^2 \cdot c^{-1}$
6	Механічна відцентрова сила	F_M	$кг \cdot м \cdot c^{-2}$
7	Напруженість електроосмотичної дії	E_1	$кг \cdot м \cdot c^{-3}$
8	Коефіцієнт масовіддачі	β	$м \cdot c^{-1}$
9	Характерна швидкість потоку	v	$м \cdot c^{-2}$

Таблиця 2.2

Матриця розмірностей досліджуваного степеневого ряду

Параметри		f	ρ	d	ν	D	F_M	E_1	v	β
m	кг		1				1	1		
L	м		-3	1	2	2	1	1	1	1
τ	с	-1			-1	-1	-2	-3	-1	-1
Степеневі коефіцієнти		m	n	k	l	q	p	r	s	

Рівняння (2.25) можна представити у вигляді наступних складових:

$$St_g = A \cdot Pe_g^m \cdot Eu^p \cdot Re_g^s \cdot E_1^r \quad (2.26)$$

де $A = \nu^{(s+1)} \cdot D^{(m+q)} \cdot f^{-1} \cdot \rho^n \cdot d^{(k-s-2m-1)}$ - постійна складова.

Для знаходження степеневих коефіцієнтів використовуємо експериментальну базу даних за результатами досліджень процесів зневоложення.

2.4. Обробка результатів досліджень

Під час отримання результатів експериментальних досліджень виникає потреба у перевірці достовірності результатів, а також адекватності теоретичних висновків і залежностей.

Достовірність результатів експериментальних досліджень оцінюємо за вірогідною ймовірністю P_n (надійністю) або ймовірністю того, що дійсне значення ймовірності величини потрапляє у вірогідний інтервал:

$$m = \pm t_\beta \sigma_m \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (2.32)$$

де t_β - гарантійний коефіцієнт Ст'юдента для довірчої вірогідності (ГОСТ 8.207-76); σ_m - середньоквадратичне відхилення (дисперсія) вимірів:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (2.33)$$

де N - кількість вимірів;

x_i - значення вимірюваної величини;

\bar{x} - середньоарифметичне значення вимірюваної величини:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.34)$$

Вірогідне значення вимірюваних величин, яке необхідне для кількості вимірів під час розподілу похибок, близькому до нормального [126], визначаємо за формулою:

$$N \geq \frac{1 + P_n + 2n_{cm}}{1 - P_n}, \quad (2.35)$$

де n_{cm} - число вимірів із грубими похибками, які відкидали.

Відповідно до рекомендацій [127], вірогідна ймовірність вибрана в інтервалі (0,8...0,9), тоді при $n_{cm} = 0$ маємо:

$$N \geq \frac{1 + (0.8...0.9)}{1 - (0.8...0.9)}. \quad (2.36)$$

У подальшому за N відомих вимірів визначається ймовірність P_n за умови, що похибка середнього значення не виходить за межі вірогідного інтервалу m . Для цього вираховуємо середньоарифметичне значення σ_o середньоквадратичного відхилення σ_m :

$$\sigma_o = \frac{\sigma_m}{N}, \quad (2.37)$$

З формули 2.37. визначаємо коефіцієнт Ст'юдента:

$$\alpha_{cm} = \frac{\mu}{\sigma_o}. \quad (2.38)$$

Після чого, за відомими α_{cm} та N визначаємо розрахункову вірогідну ймовірність P_{n1} . Якщо P_{n1} виявляється нижчою за необхідну, то визначаємо мінімальну кількість вимірів:

$$N_{\min} = \frac{k_B^2 t^2 \beta}{\Delta^2}, \quad (2.39)$$

де Δ - точність вимірів;

k_B - коефіцієнт варіацій, рівний:

$$k_B = \frac{\sigma_m}{\bar{x}}. \quad (2.40)$$

Перевірка адекватності теоретичних залежностей проводимо за допомогою відхилень, що вираховуються за теоретичними залежностями, значень шуканого параметра \hat{y} від експериментально встановлених та усереднених \bar{y} за числом повторень дослідів m .

Оцінку відхилень проводимо із використанням теорії Фішера, для чого розраховуємо екстремальне значення критерія Фішера f_e і порівнюємо із теоретичним f_m , яке приймається за необхідного рівня значущості. Якщо $f_e \leq f_m$, то теоретична залежність адекватна.

Значення критерія Фішера для експериментальних вимірів визначаємо за залежністю:

$$f_e = \frac{S_a}{S_b}, \quad (2.41)$$

де S_a - дисперсія адекватності, яка рівна (2.42).

$$S_a = \frac{m}{n-1} \sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y})^2, \quad (2.42)$$

де S_b дисперсія відтворюваності:

$$S_b = \frac{l}{N(m-l)} \sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \hat{y}), \quad (2.43)$$

де m - кількість паралельних дослідів;

l - кількість значущих коефіцієнтів теоретичної залежності.

Теоретичне значення критерія Фішера приймаємо за таблицею при відповідних ступенях вільності f_1 і f_2 та рівні значущості q (зазвичай $q = 0,05$), тоді:

$$f_1 = N - 1, \quad (2.44)$$

$$f_2 = N(m-1). \quad (2.45)$$

У випадку, якщо теоретичні розрахунки виявляться неадекватними, порівняно з даними експериментів, то необхідно переходити до більш складних, досліджуючи раніше прийняті під час складання теоретичних припущень.

Під час обробки експериментальних даних також були використані методи графічного зображення, які дають найбільш наочне уявлення про результати експерименту, дозволяють краще зрозуміти фізичну сутність досліджуваного процесу, виявити загальний характер функціональної

залежності досліджуваних перемінних величин, встановити наявність екстремумів функції. При цьому отримані точки на графіку з'єднуємо плавною лінією так, щоб вона по змозі проходила щонайближче до всіх екстремальних точок, оскільки більшість функцій мають плавний характер.

2.5. Висновки до 2 розділу

1. Згідно із розробленою програмою та методиками досліджень, які передбачають структуру, алгоритм теоретичних та експериментальних досліджень, була сформована вимірювальна технічна база, розроблена дослідна модель фізико-механічного зневоложувача, що дозволяє визначити оптимальні технологічні та конструкційні параметри розробленого обладнання та обґрунтувати робочі режими комплексу досліджуваних процесів зневоложення.

2. Розроблені методики визначення основних технологічних параметрів досліджуваної системи, а саме: при визначенні вологості, параметрів вібрації, електротехнічні властивості силового поля при реалізації електроосмотичного ефекту, температурні режими обробки.

3. Сформовано факторний простір досліджуваних процесів зневоложення та обґрунтовані критерії оцінки, що дозволяють розробити критеріальне рівняння тепломасообміну при використанні теореми Федермана-Бекінгема для отриманих результатів експериментів.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІБРАЦІЙНОГО ФІЛЬТРАЦІЙНО-ОСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖЕННЯ

3.1. Динаміка руху виконавчих органів розробленої машини

3.1.1. Розробка розрахункової схеми

Досліджувана технологічна система складається з таких узгоджено-функціональних блоків:

- механізму центрифугування та вібраційного ущільнення технічної маси;
- фільтрування та відокремлення отриманих фракцій;
- система електроосмотичного видалення рідини.

Система адаптивного регулювання параметрами вібромеханічної та теплофізичної дії

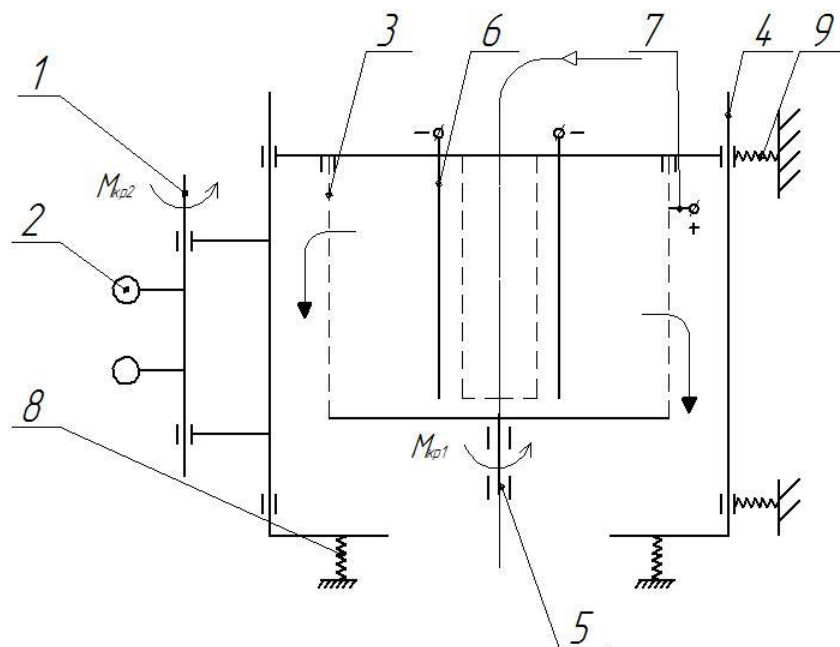


Рис. 3.1. Принципова схема розробленої машини: 1 - приводний вал вібробуджувача, 2 - дебаланс, 3 - контейнер, 4 - зовнішній корпус або віброплатформа, 5 - приводний вал центрифуги, 6, 7 - електроди, 8 - пружна опора, 9 - пружний елемент віброплатформи

У даній системі можна виділити три основні маси:

$$m_1 = m_{B_1} + m_{зоб} \xi_m + m_k; \quad (3.1)$$

$$m_2 = m_{B_2} + m_{деб};$$

$$m_3 = m_{зк};$$

де $m_{зоб}$ - маса завантаження;

m_{B_1} - маса віброзбуджувача;

$m_{деб}$ - маса дебаланса;

m_k - маса контейнера;

$m_{зк}$ - маса зовнішнього корпусу;

m_{B_2} - маса приводного вала центрифуги;

ξ_m - коефіцієнт приєднаної маси.

Система має 6 степенів вільності: x_1 – горизонтальне зміщення центра мас m_1 ; y_1 – вертикальне зміщення центра мас m_1 ; φ_1 – кутове обертання центра мас m_1 ; φ_2 – кутове обертання центра мас m_2 ; ψ_1 – кутове зміщення центра мас m_1 ; ψ_2 – кутове зміщення центра мас $(m_2 + m_3)$.

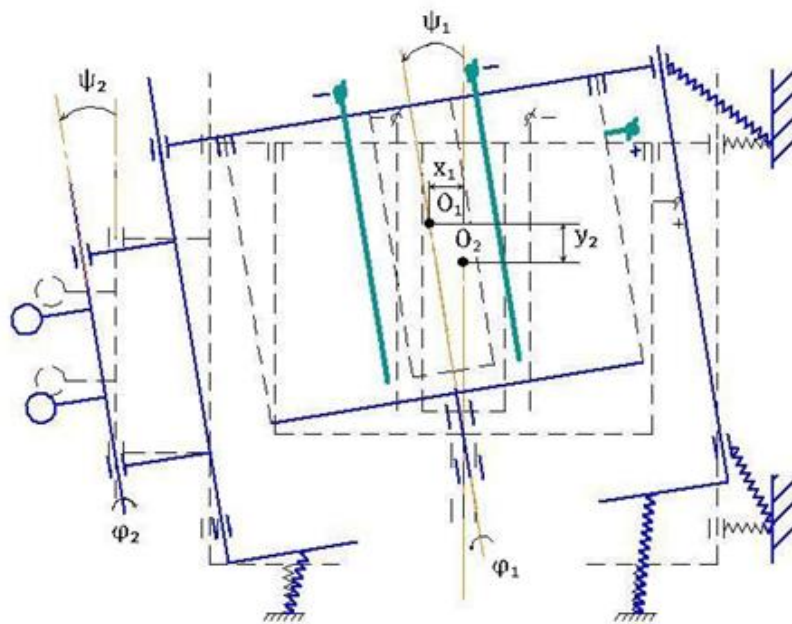


Рис. 3.2. Розрахункова схема розробленої машини: O_1, O_2 - положення центра мас контейнера

3.1.2. Кінематичний аналіз системи

Використовуючи вираз для кінетичної енергії рухомих мас і узагальнених сил, що діють в системі, складаємо рівняння Лагранжа II роду для кожної з ступенів вільності системи.

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (3.2)$$

$$T_1 = 0,5m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + 0,5(I_1\dot{\phi}_1^2 + I_2'\dot{\psi}_1^2) - \text{кінетична енергія маси } m_1 \text{ при роботі}$$

машини

де I_1 – момент інерції маси m_1 при кутовому обертанні зі швидкістю $\omega_1 = \dot{\phi}_1$;

I_2' – момент інерції маси m_1 при кутовому зміщенні на кут ψ_1 зі швидкістю

$$\dot{\psi}_1 = \omega_1' \quad (3.3)$$

$$T_2 = 0,5m_2(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + 0,5(I_2\dot{\phi}_2^2 + I_2'\dot{\psi}_2^2) - \text{кінетична енергія маси } m_2 \text{ при роботі}$$

машини

де I_2 – момент інерції маси m_1 при кутовому обертанні зі швидкістю $\omega_2 = \dot{\phi}_2$;

I_2' – момент інерції маси m_2 при кутовому зміщенні на кут ψ_2 зі швидкістю

$$\omega_2' = \dot{\psi}_2 \quad (3.4)$$

$$T_3 = 0,5m_3(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + 0,5I_3\dot{\psi}_2^2 - \text{кінематична енергія маси } m_3 \text{ при роботі}$$

машини

I_3 – момент інерції маси m_3 при кутовому зміщенні на кут ψ_2 зі швидкістю $\dot{\psi}_2$

Таким чином, загальна кінетична енергія рухомих мас системи становить

$$T = 0,5m_0(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + 0,5(I_1\dot{\phi}_1^2 + I_1'\dot{\psi}_1^2) + 0,5\dot{\phi}_2 I_2 + 0,5\dot{\psi}_2(I_2' + I_3), \quad (3.5)$$

де $m_0 = m_1 + m_2 + m_3$

Залежності для часткових похідних кінетичної енергії системи мають

вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_0 \dot{x}_1; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = m_0 \dot{y}_1; \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} = I_1 \dot{\phi}_1; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_2} = I_2 \dot{\phi}_2; \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_1} = I_1' \dot{\psi}_1; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_2} = (I_2' + I_3) \dot{\psi}_2; \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_1} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y_1} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \phi_1} = 0; \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \phi_2} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \psi_1} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \psi_2} = 0; \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_0 \ddot{x}_1; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) = m_0 \ddot{y}_1; \quad (3.11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} \right) = I_1 \ddot{\phi}_1; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_2} \right) = I_2 \ddot{\phi}_2; \quad (3.12)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_1} \right) = I_1' \ddot{\psi}_1; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_2} \right) = (I_2' + I_3) \ddot{\psi}_2; \quad (3.13)$$

3.1.3. Силовий аналіз системи

В досліджуваній системі діють такі силові фактори:

- змушуючи сила при обертанні приводного валу вібробуджувача:

$$F = m_{\text{деб}} l \dot{\phi}_2^2 = m_{\text{деб}} l \omega_2^2; \quad (3.14)$$

де l - ордината центра мас дебаланса

- сили ваги мас системи, відповідно:

$$G_1 = m_1 g; \quad G_2 = m_2 g; \quad G_3 = m_3 g; \quad (3.15)$$

- відцентрові сили, що виникають при обертанні приводного валу центрофуги з крутним моментом M_{KP_1} ;

- відцентрові сили, що виникають при обертанні приводного валу

віброзбуджувача з крутним моментом $M_{кр2}$;

- сили опору в опорних вузлах приводних валів системи з моментами відповідно $M_{оп1}, M_{оп2}$.

- сили осмотичного тиску у системі при проходженні електричного струму через шар продукції.

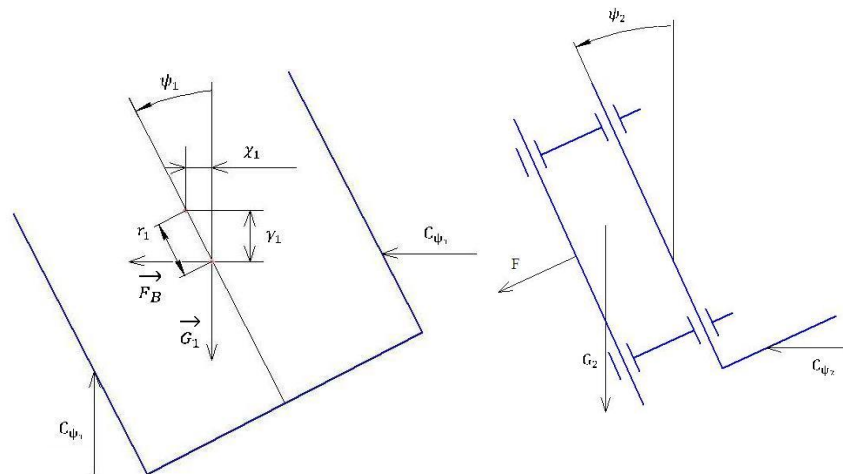


Рис. 3.3. Структурні елементи виконавчих органів машини

Вирази для узагальнених сил системи

$$Q_{x_1} = F \cos \varphi_2 - (x_1 - x_2) - x_1 + F_{осм} \cos \psi_1 + F_B \cos \varphi_1 \quad (3.16)$$

де C_{x_1}, C_{x_2} - жорсткості пружних елементів за напрямом ОХ;

$$F_B = \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{r} - \text{відцентрові сили при обертанні центрифуги за напрямом ОХ};$$

r - радіус приводного валу центрифуги

Таким чином,

$$Q_{x_1} = m_{доеб} I \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2 - (C_{x_1} + C_{x_2}) x_1 + F_{осм} \cos \psi_1 + \frac{m_1 x_1^2}{r} \cos \varphi_1 = \\ \cos \varphi_2 (m_{доеб} I \dot{\varphi}_2^2 + \frac{m_1 \dot{x}_1^2}{r}) \cos \varphi_1 + F_{осм} \cos \psi_1 - (C_{x_1} + C_{x_2}) x_1 \quad (3.17)$$

Аналогічно,

$$Q_{y_1} = \sin \varphi_2 m_{доеб} I \dot{\varphi}_2^2 + \frac{m_1 y_1^2}{r} \sin \varphi_1 + F_{осм} \sin \psi_1 - (C_{y_1} + C_{y_2}) y_1 + m_1 g \quad (3.19)$$

де C_{y_1}, C_{y_2} - жорсткості пружних елементів системи за напрямом ОУ

$$Q_{\varphi_1} = M_{KP_1} - M_{OP_1} - C_{\varphi} \varphi_1 \quad (3.20)$$

де C_{φ} - жорсткість пружних елементів при обертанні контейнера

$$Q_{\varphi_2} = M_{KP_2} - M_{OP_2} - C_{\varphi} \varphi_2 \quad (3.21)$$

$$Q_{\psi_1} = F_B \sin \psi_1 - m_1 g \cos \psi_1 - C_{\psi_1} r_1 \quad (3.22)$$

$$r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad (3.23)$$

$$G_1 = m_1 g \quad (3.24)$$

$$Q_{\psi_2} = F \sin \psi_2 - (m_2 + m_3) g \cos \psi_2 - C_{\varphi_2} r_1 \quad (3.25)$$

$$G_2 = (m_2 + m_3) g \quad (3.26)$$

3.1.4. Складання рівнянь Лагранжа для досліджуваної системи

Загальний вигляд рівнянь Лагранжа II роду для досліджуваної системи становить:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_1} = Q_{x_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial y_1} = Q_{y_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = Q_{\varphi_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = Q_{\varphi_2} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi_1} = Q_{\psi_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi_2} = Q_{\psi_2} \end{array} \right. \quad (3.27)$$

Враховуючи отримані вище залежності узагальнюючих сил та часткових похідних кінетичної енергії рухомих мас системи складають:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_0 \ddot{x}_1 = m_{\text{дсб}} I \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2 - (C_{x_1} + C_{x_2}) x_1 + F_{\text{осм}} \cos \psi_1 + \frac{m_1 \dot{x}_1^2 \cos \varphi_1}{r} \\ m_0 \ddot{y}_1 = m_{\text{дсб}} I \dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2 - (C_{y_1} + C_{y_2}) y_1 + F_{\text{осм}} \sin \psi_1 + \frac{m_1 \dot{x}_1^2 \sin \varphi_1}{r} + m_1 g \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 = M_{KP_1} - M_{OP_1} - C_{\varphi} \varphi_1 \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 = M_{KP_2} - M_{OP_2} - C_{\varphi} \varphi_2 \\ (I_2 + I_3) \ddot{\psi}_2 = m_{\text{дсб}} I \dot{\varphi}_2^2 \sin \psi_2 - (m_2 + m_3) g \cos \psi_2 - C_{\varphi_2} \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \\ I_1 \ddot{\psi}_1 = m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) \frac{\sin \psi_1}{r} - m_1 g \cos \psi_1 - C_{\psi_2} \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \end{array} \right. \quad (3.28)$$

Після певних математичних перетворень перших двох рівнянь системи, а також із врахуванням дисипативних сил у системі, отримуємо:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + \dot{x}_1 \left(\alpha_x - \frac{m_1}{m_0 r} \dot{x}_1 \cos \varphi_1 \right) + \frac{C_{x_1} + C_{x_2}}{m_0} x_1 &= F_{\text{осм}} \cos \psi_1 + m_{\text{дсб}} I \dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2 \\ \ddot{y}_1 + \dot{y}_1 \left(\alpha_y - \frac{m_1}{m_0 r} \dot{y}_1 \sin \varphi_1 \right) + \frac{C_{y_1} + C_{y_2}}{m_0} y_1 &= F_{\text{осм}} \sin \psi_1 + m_{\text{дсб}} I \dot{\varphi}_2^2 \sin \psi_2 + m_1 g \end{aligned} \quad (3.29)$$

де $k_x^2 = \frac{C_{x_1} + C_{x_2}}{m_0}$ - власна частота коливань системи

Розв'язуючи рівняння вільних коливань даної системи знаходимо, що

$$\begin{aligned} \alpha_x &= 2\sqrt{k_x^2 - \dot{\varphi}_2^2} = 2\sqrt{k_x^2 - \dot{\omega}_2^2} \\ \alpha_y &= 2\sqrt{k_y^2 - \dot{\varphi}_2^2} = 2\sqrt{k_y^2 - \dot{\omega}_2^2} \end{aligned} - \text{коефіцієнти дисипації відповідно до напрямів}$$

OX та OY

Вводимо припущення стосовно меж зміни зміщень ψ_1 та ψ_2 і використовуємо математичне середовище Math CAD знаходимо рівняння траєкторії руху центра мас контейнера $y_1 = f(t\omega)$, $y_1 = f(t\omega)$ швидкісні характеристики $\dot{x}_1 = f(t\omega)$, $\dot{y}_1 = f(t\omega)$

Тоді вираз для витрат енергії при роботі системи становить:

$$N = |F| \mathcal{G} = m_{\text{дсб}} \text{Im}_2 \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2} \quad (3.30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_1 + \alpha_x \dot{x}_1 + \frac{C_x}{m} x_1 = \frac{F}{m} \cos \omega_2 t \\ \ddot{y}_1 + \alpha_y \dot{y}_1 + \frac{C_y}{m} y_1 = \frac{F}{m} \sin \omega_2 t \\ \ddot{z}_1 + \alpha_z \dot{z}_1 + \frac{C_z}{m} z_1 = g \\ \ddot{\psi}_1 + \alpha_{\psi} \dot{\psi}_1 + \frac{C_{\psi}}{I^1} = \frac{C}{I^1} \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \end{array} \right. \quad (3.31)$$

де x_1, y_1 - зміщення центру мас і системи в горизонтальній площині;

z_1 - зміщення центру мас і системи у вертикальній площині;

ψ - кутовий зсув системи відносно горизонтальної осі;

$C_x, C_\gamma, C_z, C_\psi$ - жорсткості пружних елементів;

m - повна маса машини;

$F = m_g \cdot e \cdot \omega_2^2$ - сила, що викликає коливання системи;

ω_2 - кутова швидкість обертання вала 1;

e - ексцентриситет;

m_g - маса дебаланса;

I^1 - момент інерції корпусу і контейнера щодо осі 5.

$\alpha_x, \alpha_\gamma, \alpha_z, \alpha_\psi$ - коефіцієнти дисипації енергії системи.

Після деяких математичних перетворень знаходимо рівняння руху робочих органів системи.

$$\begin{cases} x_1 = \frac{m_g \cdot e \cdot \omega_2^2 \left(\frac{C_x}{m} - \omega_2^2 \right)}{m \cdot \left[\left(\frac{C_x}{m} - \omega_2^2 \right)^2 + \alpha_x^2 \cdot \omega_2^2 \right]} \sin \omega_2 t + \frac{m_g \cdot e \cdot \omega_2^3 \alpha_x}{m \cdot \left[\left(\frac{C_x}{m} - \omega_2^2 \right)^2 + \alpha_x^2 \cdot \omega_2^2 \right]} \sin \omega_2 t \\ \gamma_1 = \frac{m_g \cdot e \cdot \alpha_y \omega_2^3}{m \cdot \left[\left(\frac{C_y}{m} - \omega_2^2 \right)^2 + \alpha_y^2 \cdot \omega_2^2 \right]} \cos \omega_2 t + \frac{m_g \cdot e \cdot \omega_2^2 \left(\frac{C_y}{m} - \omega_2^2 \right)}{m \cdot \left[\left(\frac{C_y}{m} - \omega_2^2 \right)^2 + \alpha_y^2 \cdot \omega_2^2 \right]} \sin \omega_2 t \end{cases} \quad (3.32)$$

Використовуючи математичне середовище MathCAD знаходимо графічні залежності для основних кінематичних характеристик даної коливальної системи, а саме, траєкторії руху виконавчих органів машини, амплітуду коливань, віброшвидкість, віброприскорення та інтенсивність вібрації, які представлені на рисунках 3.4 – 3.14.

Дані залежності дозволяють обґрунтувати діапазон стійкої роботи віброзбуджувача у зарезонансному режимі (при $\omega > 50$ рад/с), область різкого підвищення енерговитрат на привід (при $\omega > 100$ рад/с), обґрунтовуючи таким чином ефективні параметри робочого режиму досліджуваного механічного віброзбуджувача.

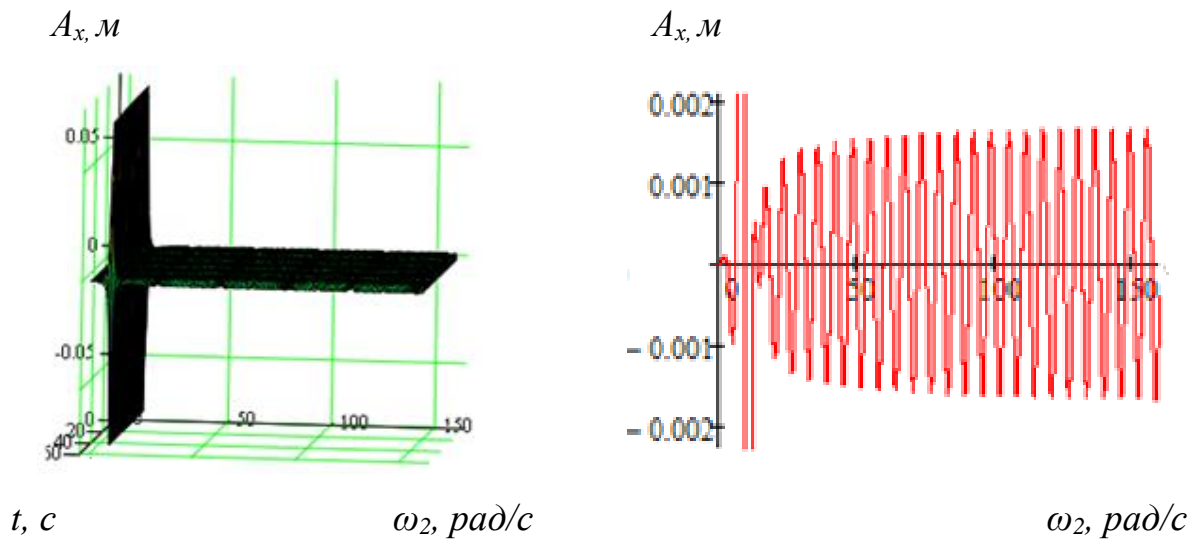


Рис. 3.4. Амплітуда коливань виконавчих органів машини по осі OX

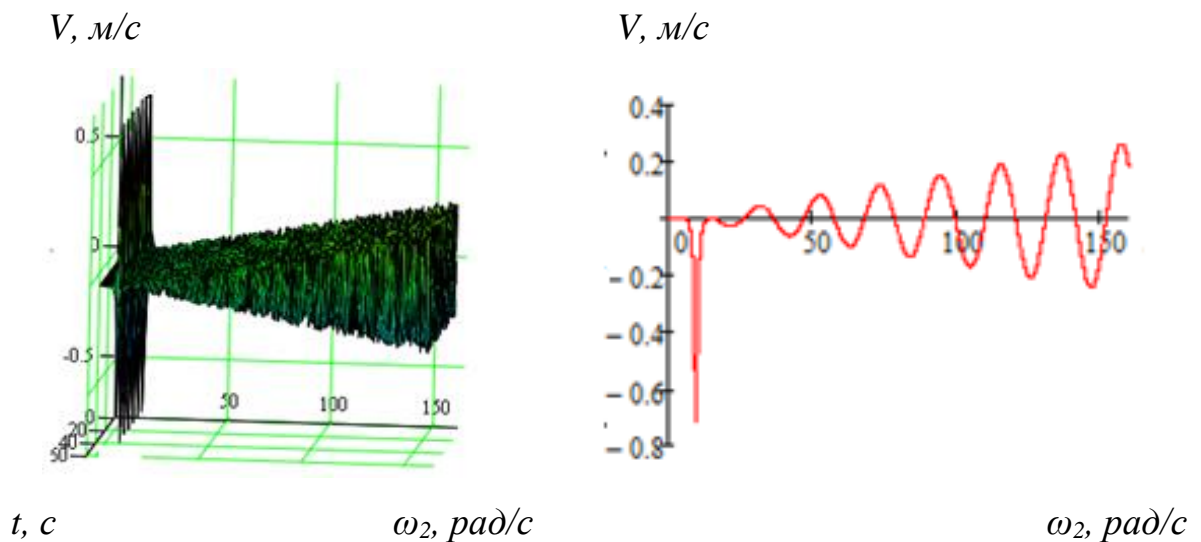


Рис. 3.5. Віброшвидкість руху виконавчих органів по осі OX

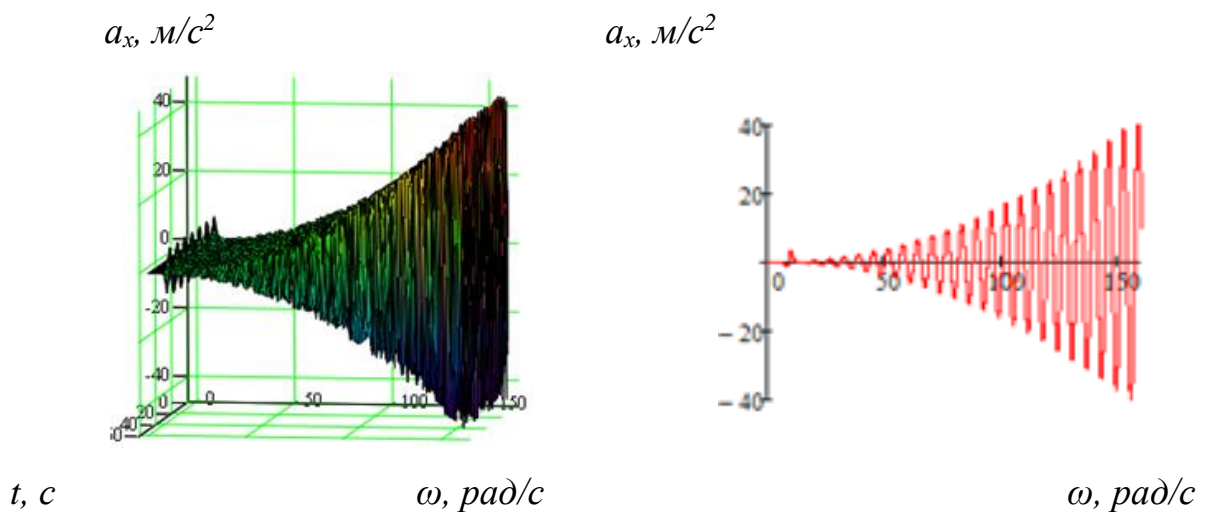


Рис. 3.6. Віброприскорення руху виконавчих органів по осі OX

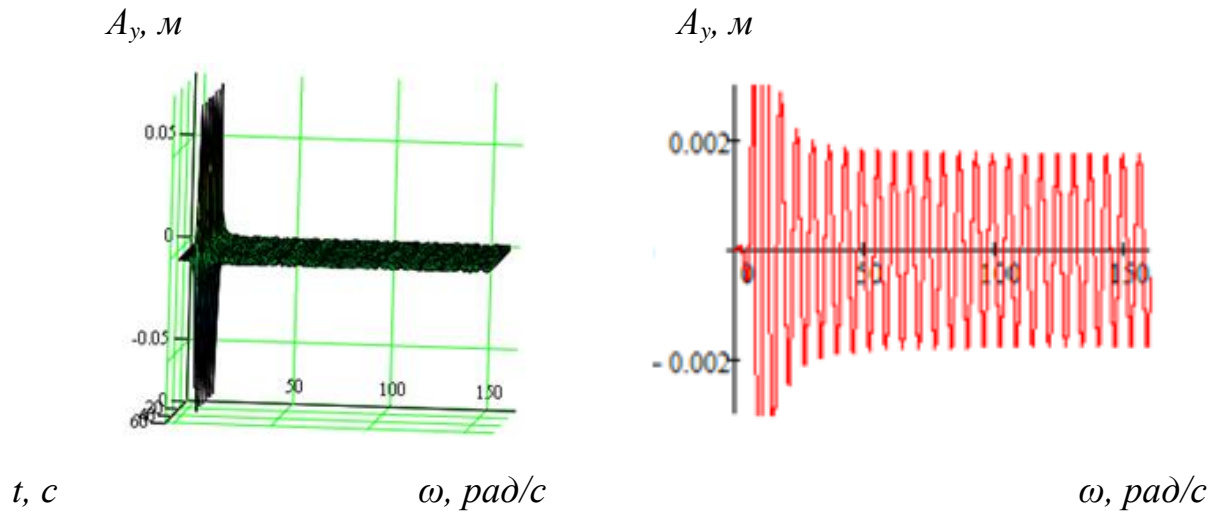


Рис. 3.7. Амплітуда коливань виконавчих органів машини по осі OY

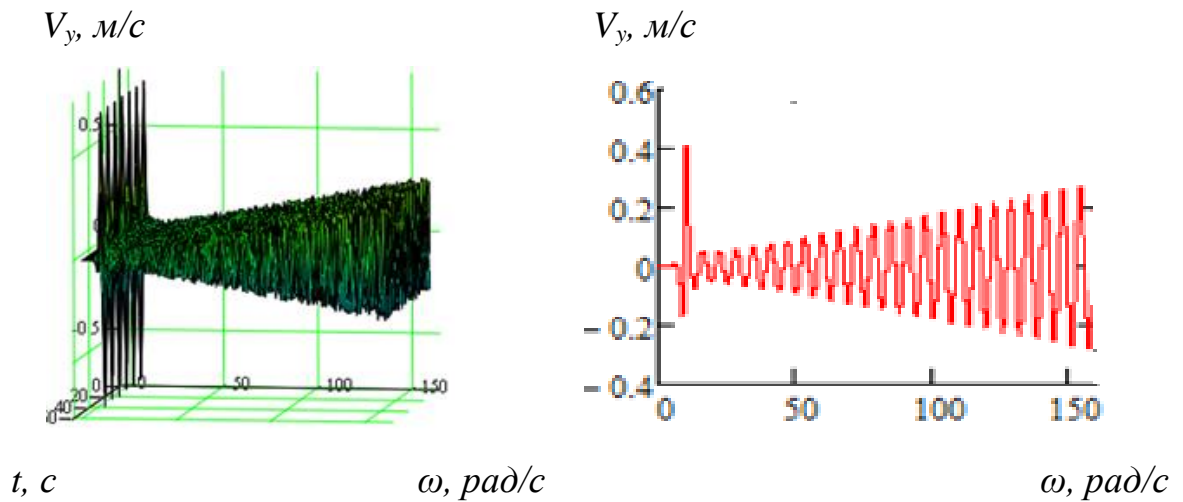


Рис. 3.8. Віброшвидкість руху виконавчих органів по осі OY

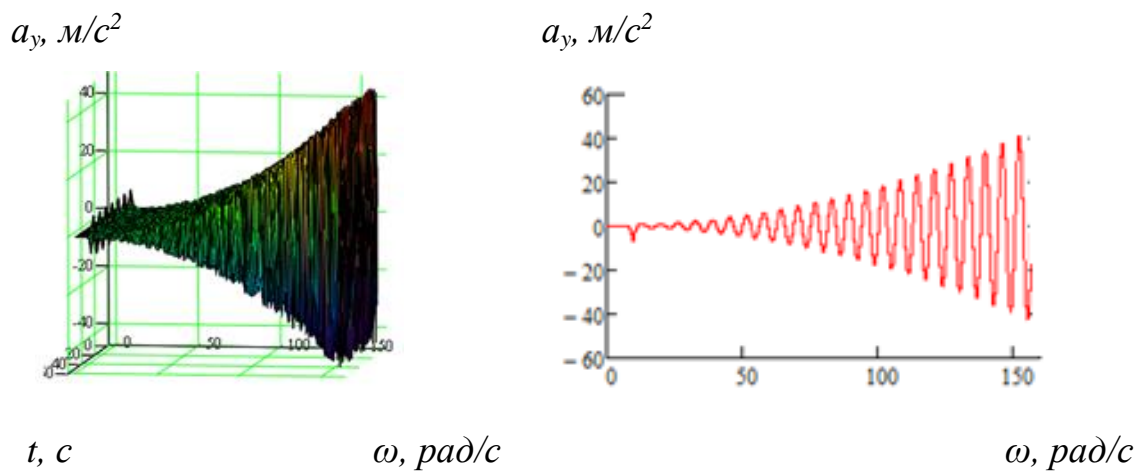


Рис. 3.9. Вібприскорення руху виконавчих органів по осі OY

$$\alpha = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = A \cdot \omega^2$$

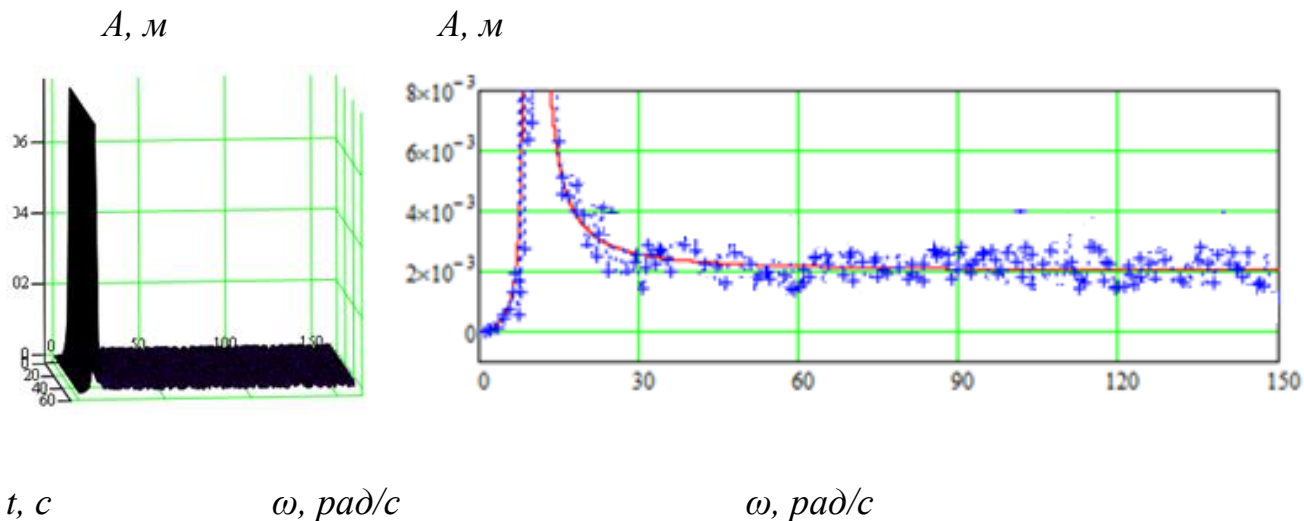


Рис. 3.10. Абсолютна амплітуда коливань виконавчих органів приводу

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

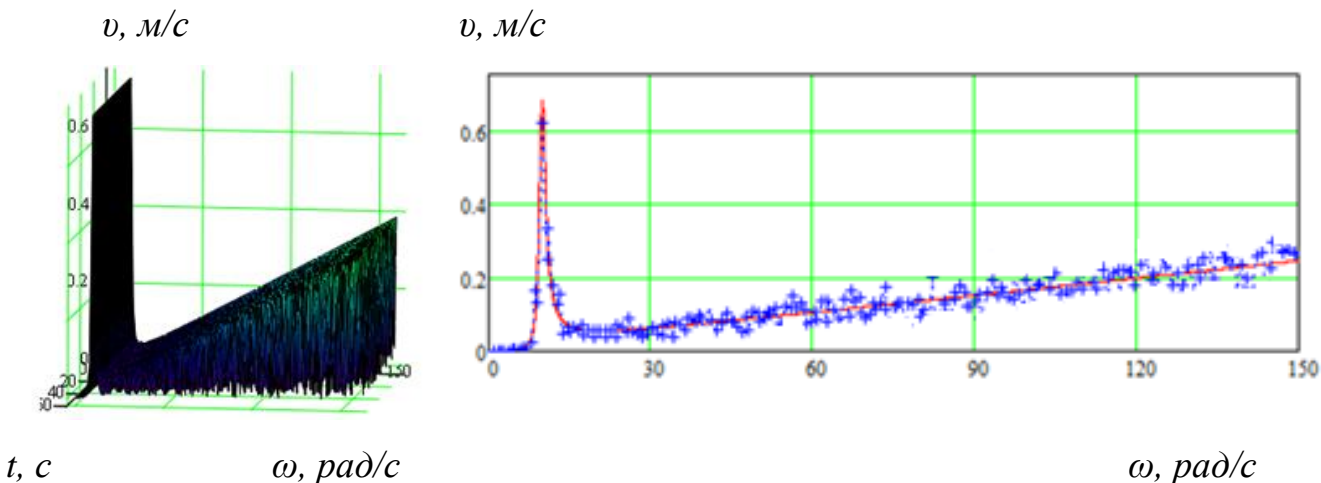


Рис. 3.11. Абсолютна вібропршвидкість $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = A \cdot \omega$

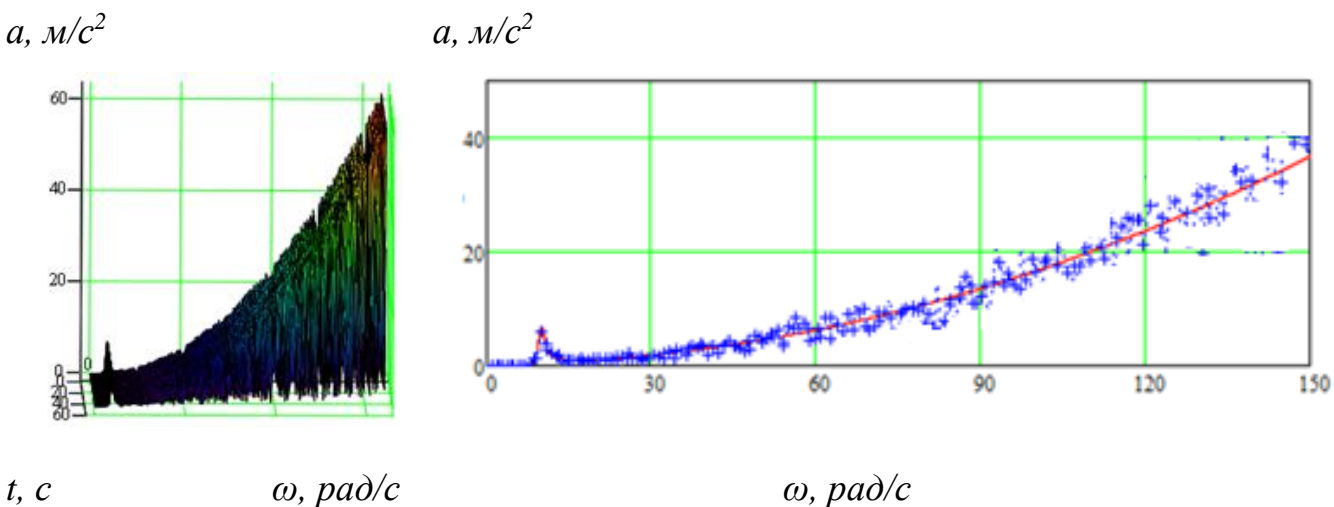


Рис. 3.12. Абсолютне віброприскорення $\alpha = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = A \cdot \omega^2$

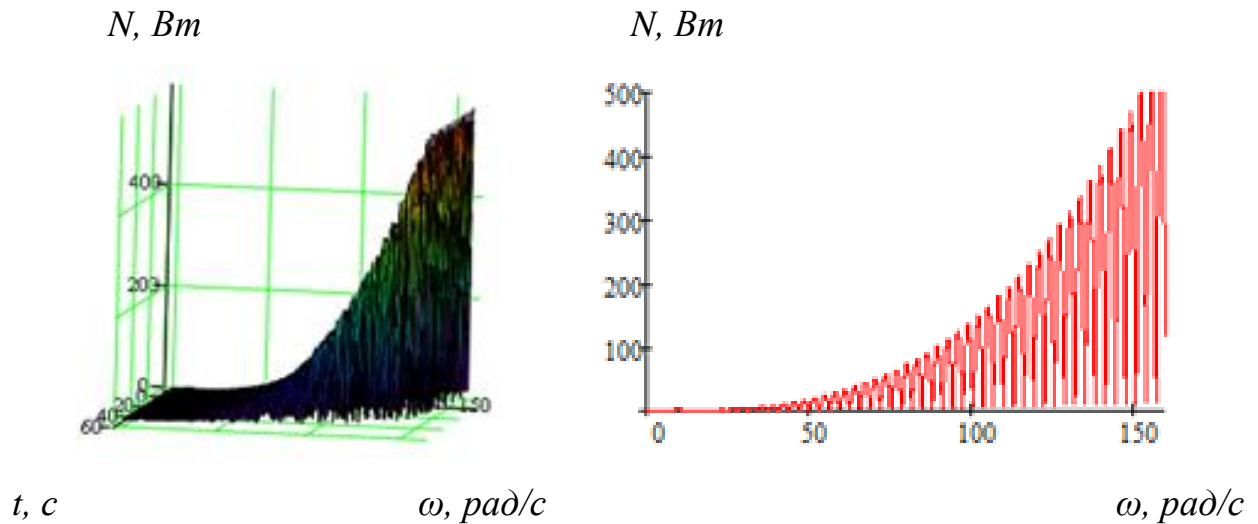


Рис. 3.13. Потужність приводного валу машини $N = F \cdot v$

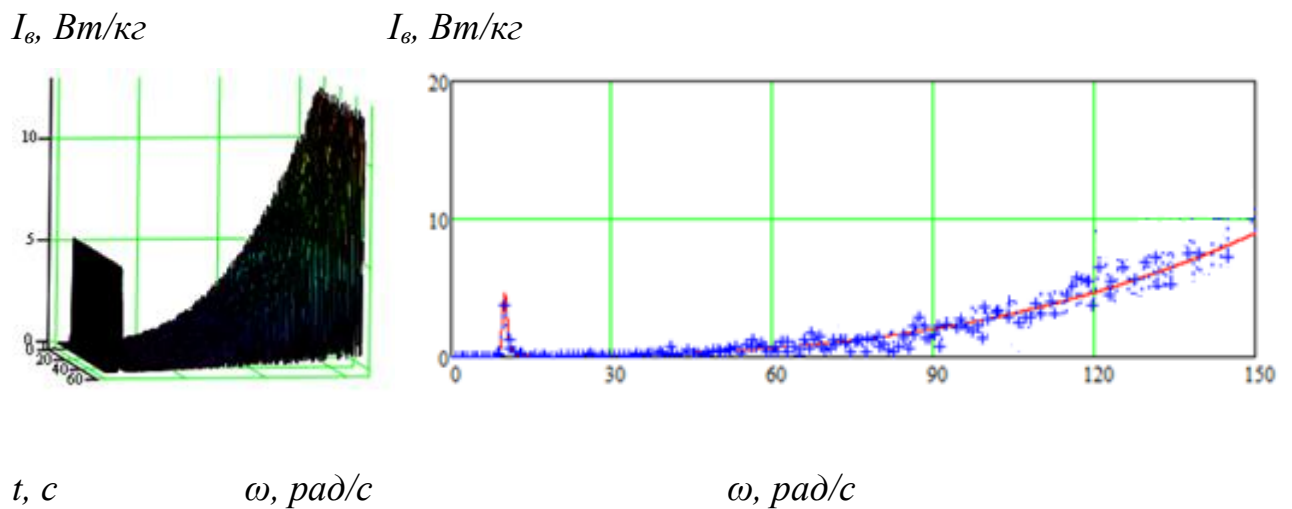


Рис. 3.14. Віброінтенсивність коливного режиму машини

$$I = A^2 \cdot \omega^3 = a \cdot v = \frac{N}{m_{\text{кол}}}$$

3.2. Математичне моделювання процесу масоперенесення за електроосмотичної дії на продукцію

3.2.1. Аналіз теоретичних засад електроосмосу при вологоперенесенні

Взагалі, у більшості випадків шлях, по якому різні автори підходять до вирішення питання про коректність класичної формули електроосмосу для складних діафрагм, у переважній більшості один. Це подання шуканого значення ξ - потенціалу у вигляді величини ξ_H яка визначається за формулою

Гельмгольца - Смолуховського без поправки на поверхневу провідність (як для неактивних діафрагм) на величину коригуючого співмножника. Головною метою, таким чином, є визначення останнього.

Цьому питанню присвячено безліч теоретичних і експериментальних робіт. Експериментальні роботи в цьому напрямку є провідними. Їх підсумок полягає в отриманні тієї чи іншої емпіричної формули, а роботи теоретичного плану розвиваються лише в цілях пояснення отриманих емпіричних закономірностей.

У роботі [103] вивчалася реальність застосування формули зв'язку:

$$\xi_e = \xi_H \alpha_e \quad (3.33)$$

де α_e - коефіцієнт ефективності, який переводить електричну провідність вільного розчину в значення електричної провідності розчину в порах, яка усереднюється по всьому об'єму поровити простору.

Коефіцієнт α_e можна представити у вигляді:

$$\alpha_e = 1 + \frac{x_s}{x_c} \quad (3.34)$$

x_s - усереднена за обсягом простору поверхнева провідність

x_c - електрична провідність вільного розчину.

Трохи пізніше Гхошем на основі обробки великої кількості експериментальних даних була отримана схожа емпірична формула:

$$\xi_r = \xi_H \alpha_r \quad (3.35)$$

У цій формулі коефіцієнт α_r :

$$\alpha_r = 1 + \left(\frac{x_s}{x_c} \right) y \quad (3.36)$$

де y - постійний емпіричний коефіцієнт для системи тверде тіло - розчин ($y > 1$).

Прийнято було вважати, що формула (3.35) дає більш достовірні результати, ніж у разі $y = 1, 5 \dots 3,0$.

В інших роботах можна знайти інші види емпіричних коригувальних

доданків, в яких замість електричної провідності вводиться електричний момент.

Подібне різноманіття використовуваних поправок, звичайно ж свідчить про недостатню коректність формули. Запропонованих формул багато, але жодна з них не приймається всіма дослідниками та дає достовірні результати.

Овербек і Війга в серії теоретичних робіт поставили під сумнів достовірність значень ξ , які розраховувалися за формулою (3.33) у разі застосування її до систем, що володіє складним паровим простором.

Зауваження авторів зводилося, зокрема, до того, що коригувальний співмножник виявляється функцією геометричної будови пори, а цю будову неможливо описати в аналітичному вигляді. Вони говорять про явну помилку у значенні ξ - потенціалу при розрахунку його за формулою (3.33) і призводять відповідні теоретичні розрахунки.

Однак, зауваження Овербека і Війга, що стосуються розвитку перепадів тиску, були б правомірні у тому випадку, якби за допомогою формули (3.33) намагалися описувати електроосмос через багатошарові діафрагми в цілому. Але дані формули можуть бути правомірними лише для так званих однорідних електрохімічно активних діафрагм. Ці діафрагми є «простими» з усіх діафрагм зернівки. Вони однорідні як за хімічною природою так і за поперечним перерізом, величинам коефіцієнта фільтрації k_{ϕ_i} і пористості ϖ_i , уздовж всієї системи.

Якщо в багатошаровій діафрагмі врахувати право застосування для кожного шару як аналог однорідну діафрагму з коригувальним співмножником α_{e_i} , а також використовувати загальний запис закону фільтрації для будь-яких колоїдних капілярно-пористих тіл, то можна отримати систему з вихідних рівнянь для об'ємної швидкості течії рідини в багатошаровій діафрагмі:

$$q_{M0} = -S_i k_{\phi_i} \frac{\Delta P_i}{l_i} - \frac{I \varepsilon \xi}{4\pi \eta_c \alpha_i}; \quad i = 1, \dots, m \quad (3.37)$$

При цьому дотримувалися два граничних умови:

- нерозривність рідини уздовж діафрагми ($q_i = q_{Mo}$)
- сума перепадів тисків дорівнює нулю ($\sum_{i=1}^m \Delta P_i = 0$)

3.2.2. Визначення електрокінетичного потенціалу у процесі вологоперенесення для однорідного нескінченно протяжного капіляра

Г. Квінке дав пояснення природи електрокінетичних явищ, зокрема електроосмосу, на підставі припущення про наявності на межі розділу двох фаз (твердої і рідкої) електричного подвійного шару.

Пізніше іонну природу подвійного електричного шару пояснили Гюї (1910 р.), Чепмен (1913 р.) незалежно один від одного. Гюї дає пояснення своїх теорій тим, що на межі розділу фаз діють протилежно спрямовані сили. З одного боку, це дія електростатичних сил надлишку іонів одного знака, в результаті якого іони протилежного знака притягуються, а однойменні - відштовхуються, з іншого боку, це дія молекулярного теплового руху в розчині, яка спрямована до рівномірного розподілу іонів так, щоб в одиниці об'єму було рівна кількість іонів різних знаків. У результаті взаємодії цих сил створюється дифузний розподіл іонів зовнішнього шару з поступовим збуванням щільності надлишкових зарядів, аналогічно атмосферному розподілу газових молекул у просторі у гравітаційному полі [128].

За теорією Штерна (1924 р.), можливі два шляхи висвітлення подвійного електричного шару: адсорбція іонів з рідкої фази та дисоціація молекул поверхневого шару твердої фази [129].

З рисунка 3.6 видно, що додаток електричного шару до капіляра, який незаповнений рідиною, змушує надлишкові іони зрушуватися до протилежно зарядженого полюса. Іони внутрішньої обкладки подвійного шару, які знаходяться безпосередньо на стінці так само, як і іони першого шару противоіонів не переміщуються, так як для подолання електростатичних сил, що діють в молекулярному конденсаті, необхідно докласти величезну напругу, яку неможливо нездійснити у реальних умовах.

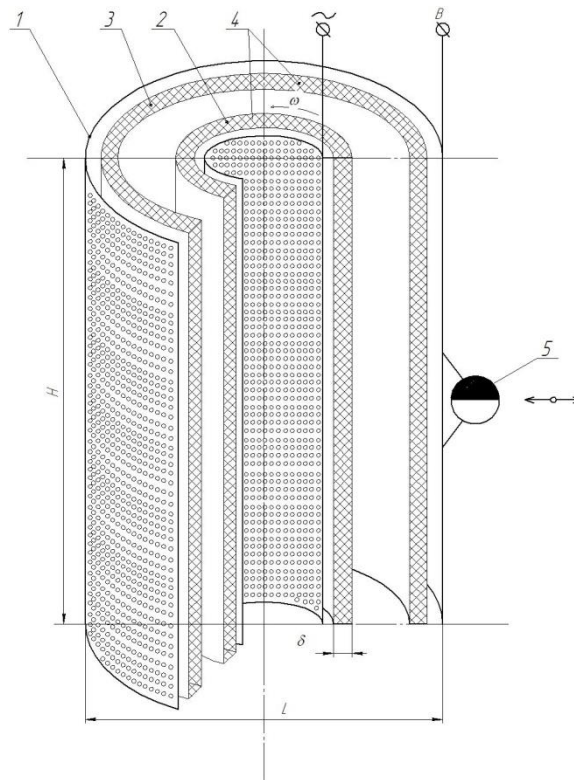


Рис. 3.6. Технологічна схема вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача: 1 - перфорований ротор; 2, 3 - електроконтактні пластини; 4 - подвійний електричний шар; 5 - дебалансний віброзбуджувач; H , δ - висота і товщина електричного шару; ω - кутова швидкість ротора

У середній частині капіляра іони обох знаків розподіляються в однаковому обсязі і кількості. Тому при накладенні електричного поля іони різного знака рухаються в протилежних напрямках зі швидкостями V , відповідно їх рухливості (коефіцієнту електроосмоса K_e) і градієнту потенціалу φ .

$$V = K_e \text{grad } \varphi \quad (3.38)$$

Можна зробити висновок, що близько стінки капіляра створюється спрямований потік, що представляє собою циліндричну оболонку з надлишкових іонів дифузного шару, що рухаються до протилежно зарядженого полюса. Переміщаючись, оболонка захоплює іншу масу рідини в капілярі за рахунок сил молекулярного зчеплення.

З вище зазначеного стає зрозуміло, що чим більша кількість іонів одного

заряду знаходяться в дифузійній частині подвійного шару (тобто чим більша величина потенціалу), тим більша сила буде прикладена в капілярі і з тим більшою швидкістю буде відбуватися переміщення рідини в капілярі при накладенні зовнішнього поля [130].

Явище електроосмосу в насінні слід почати розглядати з найбільш простого з можливих варіантів перебігу вологи під дією електричного поля. Йдеться про стаціонарний електроосмотичний потік в однорідному нескінченно протяжному капілярі, що відбувається у відсутності кінцевих і граничних ефектів [131].

Елементи ідеалізації розглянутої моделі полягають в тому, що перетин капіляра є постійним, його поверхня однорідна за хімічною природою уздовж всього капіляра де залишаються незмінними і властивості рідини, а у поперечному напрямку зміни структурно-механічних властивостей рідини відбуваються стрибкоподібно. Зважаючи на рух об'ємної рідини за межою ковзання приймається допущення, що капіляр займає в просторі горизонтальне положення.

В основі побудови загальної системи рівнянь електроосмотичної течії закладена модель розчину як суміші, яка складена з катіонів та аніонів (часток, що мають кінцевий об'єм та відокремлені у просторі), а також розчинника, що утворює дисперсне середовище. Така модель, що складається з трьох взаємопроникних середовищ: середовища катіонів - індекс (+), середовища аніонів (-) та розчинника (0), що становлять тришвидкісний континуум. Для більшої наочності картини математичний аналіз наводиться для випадку, коли у розчині тільки один вид катіонів і один вид аніонів.

У разі електрокінетичних явищ з об'ємних сил, діючих на середовище іонів, головну роль відіграють електричні сили. Потенціал електричного поля слід розглядати як сумарність доданків з потенціалу φ , що обумовлений наявністю зовнішнього електричного поля, і електричного потенціалу ψ надлишкових зарядів біля границі подвійного електричного шару, який в свою

чергу включає потенціал ξ . Останній існує в обсязі фази далеко від межі розділу фаз.

Діюча на одиницю маси середовища електрична сила може бути представлена наступним чином [103]:

$$F_{el}^{\pm} = \left(\frac{z^{\pm} e_0}{m^{\pm}} \right) \bar{E} \quad (3.46)$$

$$\bar{E} = grad\varphi \quad (3.47)$$

де z^{\pm} - валентність позитивних і негативних іонів (включаючи знак),
 m^{\pm} - маса іона.

e_0 - елементарний електричний заряд; позитивний знак \bar{E} відповідає напрямку руху позитивного заряду.

Враховуючи, що іони - це не тільки носії заряду, але й частки, що володіють ще певною масою і будовою, до об'ємних сил потрібно було б додати не тільки кулонівські, але також і ті, які обумовлені молекулярною масою і будовою іона. Однак у побудові моделі цими силами можна знехтувати. У першу чергу, це стосується сил тяжіння. Їх можна не враховувати через малу масу іонів, а також тому, що об'ємна частка іонів α° на багато менше об'ємної частки розчину α° :

$$\frac{\alpha^{\pm}}{\alpha^{\circ}} \ll 1 \quad (3.48)$$

При складанні основних рівнянь з ряду обставин не можуть бути введені і сили, пов'язані з молекулярною будовою. Їх облік допускав би проходження об'ємних і поверхневих хімічних реакцій, що виключається з розгляду. Крім того, радіус сил молекулярної взаємодії між іонами рідини і активними групами поверхні розділу із суміжною фазою виявляється зрівняним з молекулярним розміром. При цьому поверхневий шар, де дані сили реально впливають на компоненти розчину, не можна як зазвичай характеризувати за допомогою макропараметрів.

Однак у загальному випадку слід врахувати сили тяжіння, що діють на одиницю маси розчинника:

$$\bar{F}_r^o = \bar{g}\rho^o \quad (3.49)$$

\bar{g} – прискорення сили тяжіння,

ρ^o – щільність середовища розчину.

Слід також зазначити, що пересування іонів з одних ділянок всередині об'єму системи, де їх концентрація більша, в інші ділянки з меншою концентрацією може бути зумовлено ще й дифузією. А результат процесу дифузії при кількісному вирішенні завдань у фізиці широко трактується як результат дії осмотичної сили. Осмотична сила, що діє на одиницю маси середовища даних іонів:

$$\bar{F}g_{\pm} = -\left(\frac{kT}{m_{\pm}}\right)grad\ln\rho^{\pm} \quad (3.50)$$

де k - постійна Больцмана,

T - термодинамічна температура.

Електроосмотичний тиск визначається виразом [72]:

$$P_{eo} = \frac{2I\varepsilon\xi}{\pi^2 xR^4} \quad (3.51)$$

де I - сила струму,

ε - відносна діелектрична проникність рідини,

x - питома електропровідність рідини.

Максимальна лінійна швидкість по перетину капіляра:

$$V_{z,max} = -\frac{\varepsilon E_z \psi}{4\pi\eta} \quad (3.52)$$

де η - в'язкість рідини.

Об'ємна швидкість переміщення вологи за рахунок електроосмосу виражається формулою:

$$q = S_o \omega \frac{\varepsilon E_z \xi}{4\pi\eta} \quad (3.53)$$

де S_o - поперечний переріз діафрагми,

ω - пористість.

У випадку досить широкого капіляра ($kR > 4$) при заміні $E_z S_o \psi$ на I/χ_n

де χ_n - середня електрична провідність розчину в капілярі, вираз (3.53) переходить в класичну формулу електроосмосу Гельмгольца-Смолуховського:

$$q_e = \frac{\varepsilon \xi l}{4\pi \eta x_{II}} \quad (3.54)$$

Середню електричну провідність у формулі (3.54) слід відрізнити від аналогічного параметра x_e , що характеризує провідність у вільному розчині поза діафрагми, поза подвійним електричним шаром. З огляду на те, що x_n залежить від загального числа носіїв зарядів, а в будь-якій точці в області ДЕС сума носіїв зарядів більша, ніж поза подвійним електричним шаром, то їх середня за поперечним перерізом концентрація також більша ніж у розчині. У зв'язку з цим вводиться поняття коефіцієнта ефективності α :

$$\alpha = \frac{x_{II}}{x_e} \quad (3.55)$$

Тому формула (3.54) може бути записана інакше:

$$q_e = \frac{\xi \alpha l}{4\pi \eta x \alpha} \quad (3.56)$$

Звідси якщо $kR > 4$ при необхідності визначення електрокінетичного потенціалу ξ [132]:

$$\xi = \frac{-4\pi \eta x_{II} q_e}{\varepsilon l} \quad \text{або} \quad \xi = \frac{-4\pi \eta x_{II} \alpha q_e}{\varepsilon l} \quad (3.57)$$

Таким чином, аналізуючи формулу Гельмгольца - Смолуховського, можна зробити висновок про те, що швидкість електроосмотичного течії залежить від структурних параметрів пор тільки в тій мірі, в якій залежить від них сила струму. Формула (3.55) виявляється адекватною аналогічною формулою електроосмосу. Звідси випливає висновок, що форма капіляра не відбивається на загальному вигляді зв'язку лінійної швидкості електроосмосу з величиною зовнішнього електричного поля і з параметрами рідини.

Сила струму, як відомо, є функцією «живого перерізу» діафрагми, тобто сумарного перетину її пор. Якщо діафрагми будуть складені з капілярів з досить великим поперечним перерізом (коли $x_{II} \approx x_e$), то при рівності «живих

перетинів» діафрагм витрата q_e не повинна залежати від того, з яких конкретно капілярів за формою й перетину складені порівнювані діафрагми. У разі течії під дією напору витрата, як відомо, обернено пропорційна квадрату радіусу капіляра.

Слід зазначити, що розглянуті вище співвідношення ставилися до стаціонарного руху рідини. Проте з моменту включення зовнішнього електричного поля, коли рідина нерухома, до встановлення її стаціонарної течії, остання має перехідну стадію - так звану стадію нестационарного потоку (рис. 3.8). Проте, зазначено, що час встановлення стаціонарного потоку для реальних капілярних систем виявляється зовсім малим, що навіть для досить широких капілярів, у яких $K=100$ мкм, час встановлення стаціонарного потоку складає всього $5 \dots 10^{-3}$ с [133], [134].

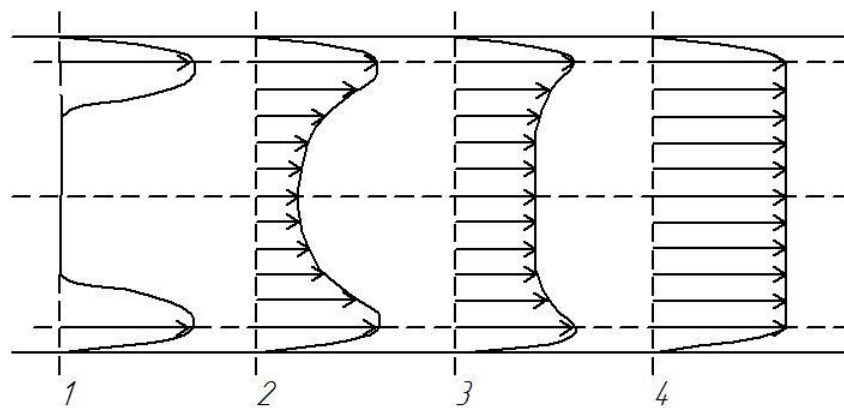


Рис. 3.8. Схема розвитку електроосмотичного потоку в капілярі [134]: 1 - момент включення поля; 2, 3 - різні стадії розвитку електроосмотичного потоку; 4 - еюра стаціонарного (сталого) потоку,

де \rightarrow швидкість потоку; ---- зовнішня межа зарядженого шару рідини

3.2.3. Визначення основних параметрів електроосмотичної дифузії

3.2.3.1. Відносна щільність електричного заряду на внутрішній поверхні порожнини матеріалу

Використовуючи вираз (3.23):

$$q = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_M \cdot \xi}{4\pi \cdot \delta} \quad (3.58)$$

де $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - абсолютна діелектрична проникність;

ξ – електрокінетичний потенціал або дзета – потенціал, В;

ε_M – відносна діелектрична проникність матеріалу;

δ - товщина подвійного електричного шару;

Товщину подвійного електричного шару відповідно до теорії сильних електролітів (3.59) можна визначити за формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{el} \cdot R \cdot T}{8\pi \cdot F^2 \cdot \sum C_i \cdot z_i^2}} \quad (3.59)$$

$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ - газова постійна;

ε_{el} – відносна діелектрична проникність електроліту;

T – температура матеріалу, К;

$F = 96540$ Кл – Число Фарадея;

C_i – концентрація іонів різної природи в електроліті, моль/м³;

Z – валентність іонів;

Електрокінетичний потенціал можна визначити з виразу (3.59):

$$\xi = 4\pi\delta \cdot \sigma_q / \varepsilon_{el} \quad (3.60)$$

де σ – поверхневий заряд, що дорівнює за абсолютним значенням об'ємному заряду (3.23).

Використовуючи (3.25) можна призначити $\varepsilon_{el} = 81$

Поверхневий заряд можна визначити як (3.23):

$$\sigma_q = -\int_0^{\infty} \rho_v dx \quad (3.61)$$

ρ_v – об'ємний заряд у розчині електроліта.

При $X = \infty$ об'ємний заряд $\rho_v = 0$ та за умови електронейтральності подвійного електролітичного шару можна вважати, що поверхневий заряд за абсолютним значенням дорівнює об'ємному заряду розчину електроліту,

тобто:

$$\sigma_q = \rho_v = \sum F \cdot Z_i \cdot C_i \quad (3.62)$$

3.2.3.2. Гідродинаміка електроосмотичного кінематичного процесу

Електроосмотична дифузія рідкої фракції виникає внаслідок дії електричного поля. Так всередині мікрокапілярів, тобто на межі розподілу твердої та рідкої фази виникає подвійний електричний шар, що складається з позитивних та негативних або так званих потенціаловизначаючих іонів, які розташовані на межі міжфазного розділення «тверда поверхня – електроліт». Безпосередньо у поверхні конденсованої фази адсорбуються іони одного знаку; далі розташовується шар іонів з протилежним знаком з певним дифузійним розподіленням у нормальному напрямі до поверхні розділу фаз, що створює за даним напрямом градієнт потенціала φ досліджуваного електрокінетичного процесу.

Дія зовнішнього електричного поля призводить до тангенціального зміцнення шару іонів з від'ємним знаком вздовж поверхні розділу фаз та відповідний рух рідини. У свою чергу, рух рідини під дією перепаду тиску також призводить до переміщення іонів та виникнення електричного струму.

З умов виникнення потенціалу течії та відповідного руху рідини справедливе рівняння Пуассона:

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho_q}{\varepsilon} \quad (3.63)$$

де $\Delta\varphi$ - перетворення Лапласа;

ρ_q - щільність об'ємного заряду.

Можна визначити рух рідини – ламінарним з постійним коефіцієнтом в'язкості η . В стаціонарному стані для досліджуваної системи має місце рівність:

$$E\rho_q = \eta \frac{d^2v}{dx^2} \quad (3.64)$$

де E - напруженість електричного поля.

Відповідно рівняння Пуассона набуває вигляду $\rho_q = -\varepsilon \frac{d^2\varphi}{dx^2}$ та з врахуванням (3.29) :

$$-\varepsilon E \frac{d^2\varphi}{dx^2} = \eta \frac{d^2\nu}{dx^2} \quad (3.65)$$

Проводимо інтегрування рівняння (3.65) за граничних умов: при $x = \infty$

$$\frac{d\nu}{dx} = 0;$$

$\frac{d\varphi}{dx} = 0, \varphi = 0$; у площині ковзання $\varphi = \xi, \nu = 0$.

В результаті отримуємо вираз для швидкості електроосмотичного руху:

$$\nu_{oc} = \frac{\varepsilon \cdot E \cdot \xi}{\eta} \quad (3.66)$$

А також для об'ємної витрати потоку:

$$V = \frac{\varepsilon \cdot E \cdot \xi \cdot S}{\eta} \quad (3.67)$$

де S - сумарна площа поперечного перерізу капілярів.

Для потоку, що викликається гідростатичним перепадом тиску ΔP в умовах ламінарної течії, можна використати формулу Пуазейля:

$$V = \frac{\pi \cdot r_K^4}{8\eta l_K} \quad (3.68)$$

де r_K, l_K - відповідно радіус та довжина капіляра.

3.2.3.3. Основні параметри електрогідродинаміки досліджуваного осмотичного масоперенесення

Осмотичний рух рідини, захоплюючи об'ємний заряд подвійного електричного шару, призводить до виникнення конвекційного струму I_K , який можна визначити як:

$$I_K = \int \nu_{\Pi} \rho_q df \quad (3.69)$$

де ν_{Π} - проекція вектора швидкості руху рідини на нормаль до елемента

перерізу df .

Перенесення зарядів призводить до виникнення різниці потенціалів на кінцях капіляра та відповідно електричного струму, який спрямований на зустріч конвекційному та рівний йому за величиною.

Використовуючи диференціальне формулювання закону Ома $I = S\sigma_q E$ об'ємну подачу потоку визначаємо за формулою:

$$V = \frac{\varepsilon \xi \cdot I_K}{\sigma_K \eta} \quad (3.70)$$

а рушійна сила процесу складає:

$$\Delta P = \frac{\ell_K \varepsilon \xi \cdot I_K}{S \cdot r_K^2 \sigma_q} \quad (3.71)$$

Розрахунок основних параметрів електроосмотичного кінетичного процесу проводимо, виходячи з наступних припущень:

- течія рідини вважається ламінарною, при якій конвекційний струм є пропорційним градієнту тиску $gradP$, а електричний струм провідності – градієнту потенціалу $grad\phi$;
- радіус кривизни капіляра або пор є значно більшим за товщину подвійного електричного шару;
- нівелюється величина поверхневої провідності стінок капіляра, тобто величина струму визначається тільки об'ємною провідністю рідини.

Враховуючи друге припущення, розподілення потенціала у подвійному електричному шарі можна вважати плоским, для якого:

$$E = \frac{2\pi \cdot q_s}{\varepsilon} \quad (3.72)$$

Вважаючи, що шар ковзання є достатньо близьким до поверхні розділу фаз, різниця потенціалів, яка виникає, або дзета – потенціал складає:

$$\xi = \frac{2\pi \cdot q_s}{\varepsilon} \delta \quad (3.73)$$

В результаті повний заряд поверхні циліндра одиничної довжини та радіуса R_{KP} складає:

$$q_0 = q_s \cdot S = \frac{\varepsilon \xi \cdot R_{\text{КР}}}{\delta} \quad (3.74)$$

а величина конвекційного струму:

$$I_{\text{К}} = \frac{\varepsilon \xi \cdot R_{\text{КР}}}{\delta} v_{\text{СЕР}} \quad (3.75)$$

де $v_{\text{СЕР}}$ – середня швидкість потоку в кільцевому шарі об'ємного заряду;
 $R_{\text{КР}}$ – радіус кривизни капіляра.

При знаходженні величини $v_{\text{СЕР}}$ враховуємо, що розподілення швидкості ламінарного руху рідини є параболічним, тобто:

$$v_r = v_0 \left(1 - \left(\frac{r_{\text{К}}}{R_{\text{КР}}} \right)^2 \right) \quad (3.76)$$

де v_0 – осьова швидкість руху.

Інтегруючи величину v_r в межах кільцевого шару δ , отримуємо:

$$v_{\text{СЕР}} = v_0 \frac{\delta}{R_{\text{КР}}} \quad (3.77)$$

та враховуючи градієнт тиску в процесі, а також, що $R_{\text{КР}} = r_{\text{К}}$

$$v_{\text{СЕР}} = \frac{r_{\text{К}} \delta \Delta P}{4\eta L} \quad (3.78)$$

Підсумовуючи аналітичне дослідження сила струму від конвекції $I_{\text{К}}$ та провідності $I_{\text{ПР}}$ становлять:

$$I_{\text{К}} = \frac{\varepsilon \xi \cdot r_{\text{К}} \cdot \Delta P}{4\eta L} \quad (3.79)$$

$$I_{\text{ПР}} = \pi r_{\text{К}}^2 \sigma_q \frac{\Delta \varphi}{L} \quad (3.80)$$

із яких очевидно, що

$$\frac{\Delta \varphi}{\Delta P} = \frac{\varepsilon \cdot \xi}{4\pi \eta \sigma_q} \quad (3.81)$$

Співвідношення між двома досліджуваними електрокінетичними процесами або так названі співвідношення Саксина, знаходимо, враховуючи отримані залежності (3.80) та (3.81):

$$\frac{V}{I_{\text{пр}}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta P} = \frac{\varepsilon \cdot \xi}{4\pi\eta\sigma_q} \quad (3.82)$$

3.2.3.4. Сила електрокінетичного тиску на дифузійну рідину

В умовах електричного поля з напруженістю E кожний шар рідини dx рухається паралельно площині стінки.

Електрорушійна сила зрівноважується силою тертя між шарами речовини, що взаємодіють, дорівнюючи:

$$dF = E\rho_q dx \quad (3.83)$$

При цьому кожний прошарок рідини прискорюється за рахунок дії попереднього шару та гальмується наступним шаром. Величина даних сил є пропорційна швидкості зміни течії рідини v при змінній відстані до стінки, тобто пропорційна похідній $\frac{dv}{dx}$.

За законами електродинаміки сила електроосмотичної кінетики складає:

$$F_{oc} = qS_o E \quad (3.84)$$

де S_o – загальна площа внутрішньої поверхні капілярів або пор;

Напруженість електричного кола можна визначити з виразу:

$$E = \frac{U}{L} \quad (3.85)$$

де U – напруга зовнішнього електричного поля, В

Площа внутрішньої поверхні капілярів або пористих каналів складає:

$$S_o = 2\pi \cdot r_k \cdot z_k \cdot H \quad (3.86)$$

де z_k – кількість капілярів або пористих порожнин: $z_k = 0.5h/r_k$

Таким чином, враховуючи вирази (3.58), (3.84), (3.85), (3.86) шукана величина сили в процесі електроосмотичної дифузії становить:

$$F_{oc} = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_M \xi}{4\pi\delta} \cdot 2\pi \cdot r_k z_k H \cdot \frac{U}{L} = \frac{\varepsilon_o \varepsilon_M \cdot 4\pi\delta\sigma_q}{2\delta\varepsilon_{en}} \cdot r_k z_k H \frac{U}{L} \quad (3.87)$$

Враховуючи, що $\varepsilon_M = \varepsilon_{en}$ остаточно отримуємо:

$$F_{oc} = \frac{2\pi\varepsilon_0\sigma_q \cdot r_k \cdot 0.5 \cdot h \cdot H \cdot U}{L \cdot r_k} = \pi\varepsilon_0\sigma_q \cdot h \cdot H \frac{U}{L} \quad (3.88)$$

3.3. Теоретичні засади фільтраційного зневоложення

Фільтраційне зневоложення, що реалізується у досліджуваній машині, схема якого приведена на рис.3.9, полягає в тому, що сушильний агент під дією перепадів тисків рухається через пористу структуру газопроникного матеріалу [135].

Процес тепломасообміну відбувається на внутрішньо-капілярній поверхні, яка на порядок-два перевищує геометричну поверхню висушуваного матеріалу. В процесі фільтраційного сушіння має місце механічне витіснення і винесення вологи в залежності від природи зв'язку її з матеріалом.

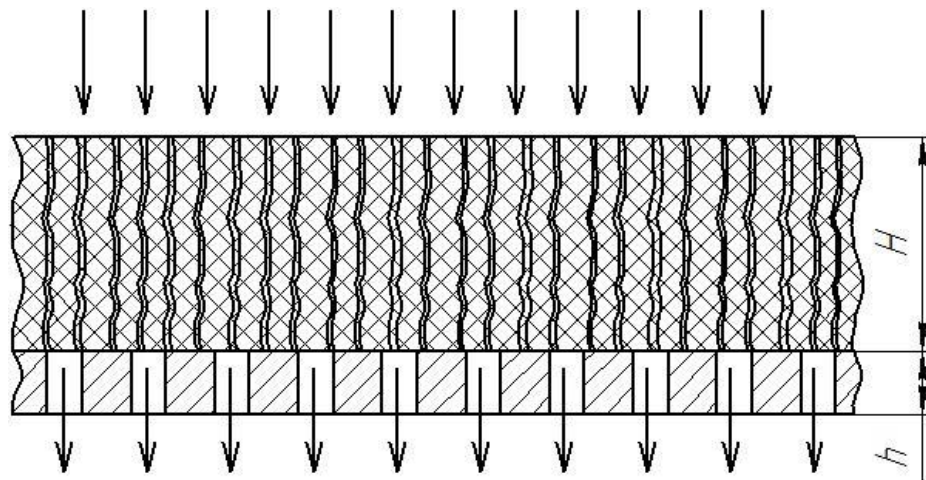


Рис. 3.9. Схема фільтраційного зневоложення

На гідравлічний опір шару матеріалу впливає як зростання швидкості сушильного агента, так і збільшення діаметра капілярів із зменшенням вологості матеріалу. Як показали дослідження, другий фактор має домінуючий вплив на гідравлічний опір шару. Зміна швидкості руху сушильного агента описується залежностями:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{1}{y^3} (av + bv^2) \quad (3.89)$$

$$y = y_c - B\bar{W} ; \quad (3.90)$$

де ΔP - гідравлічний опір, Па;

h - товщина шару, м;

y - поточний вільний об'єм, м³;

V - швидкість руху (фільтрації) сушильного агента, м/с;

\bar{W} - середня вологість матеріалу, %;

a, b, B - коефіцієнти пропорційності.

Узагальнення отриманих результатів дослідження гідродинаміки шару приведено у вигляді залежності:

$$P_k - P_o = \frac{2G\mu P_o h}{FK_n \rho_o} ; \quad (3.91)$$

P_k - тиск у сушильній камері, Па;

P_o - атмосферний тиск, Па;

G_{CA} - масова витрата сушильного агента, кг/с;

μ - динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

F - площа поверхні фільтрування, м²;

K_n - коефіцієнт проникливості, м²;

ρ_o - густина середовища за нормальних умов, кг/м³.

Приведена формула, яка свідчить, що величина гідравлічного опору залежить від витрати сушильного агента, коефіцієнта проникності та висоти шару матеріалу.

3.4. Висновки до 3 розділу

1. На основі розробленої у 3 розділі конструкційно-технологічної схеми вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача була складено його розрахункова схема, що містить 3 основних маси та 6 степеней вільності, за якими було складено диференційні рівняння руху використовуючи метод Лагранжа.

2. Враховуючи, що складова динамічних характеристик за дії власних

коливань затухає для зарезонансного режиму виявилось можливим використати метод Коші, для розв'язання отриманої системи лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь руху та отримати графічні залежності для траєкторії руху, амплітуди коливань, віброшвидкості та віброприскорення виконавчих органів досліджуваної коливальної системи, витрат енергії на привод та енергетичної інтенсивності коливного режиму.

3. Отримані закономірності зміни основних параметрів віброзбуджувача машини дозволили обґрунтувати ефективні його робочі режими, які становлять $\omega = 80 \div 110$ рад/с, $A = 1,8 \div 2$ мм при $N = 150 \div 220$ Вт.

4. Теоретичне дослідження електроосмотичної дифузії рідини за допомогою розробленої схеми зневоложувача дозволили отримати залежності для електрокінетичних, гідродинамічних та силових параметрів процесу, приріст рушійної сили за рахунок електроосмотичного ефекту становив в середньому 120 Н.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРАЦІЙНО-ОСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖЕННЯ

4.1. Оцінка амплітудно-частотних характеристик процесу

Досліджуваний процес містить такі різні за механізмом реалізації фізико-механічні дії як вібрації робочого контейнера, фільтрування при проходженні через перфорований ротор та осмотичний тиск в якості важелів для інтенсифікації зневоложення пектиномісткої сировини та харчового насіння баштанних культур, що складає актуальність експериментального дослідження розроблених процесів та обладнання для його реалізації.

Вважаючи, що продуктивність будь-якого процесу вологовидалення обернено пропорційна дифузійному опору середовища та різниці концентрацій дифузійної речовини порівняно з рівноважним, то означені параметри є основними факторами досліджуваного процесу.

Збільшення рушійної сили процесу зневоложення в даній роботі планується підвищити шляхом вібраційного відтискування, центрифугування при обертанні ротора, створення електроосмотичного ефекту при створенні умов для дифузії вологи, а також процесу фільтрування середовища через перфорації ротора. Проте останній процес призводить до підвищення технологічного опору, що погіршує умови для інтенсифікації процесу обробки. Даний недолік можна нівелювати, створюючи псевдозріджений шар продукції за рахунок надання робочій ємкості коливального руху та значно зменшуючи сили внутрішнього тертя у масі завантаження, так що дія означених факторів спрямована на підвищення інтенсифікації процесу зневоложення при мінімізації енерговитрат, що зумовлює актуальність даних досліджень.

На рисунку 4.1 представлена схема повної реалізації комбінованої фізико-механічної обробки пектиномісткої сировини та харчового насіння

баштанних культур.

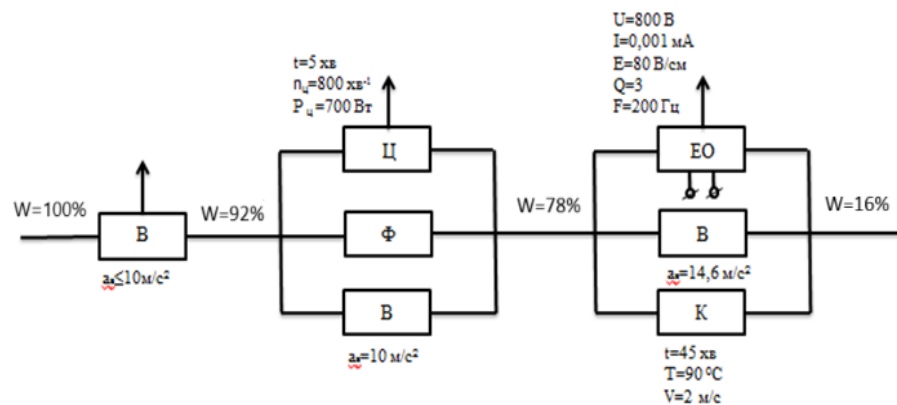
Кожна сировина, володіючи специфічним набором фізико-механічних властивостей та певними обмеженнями стосовно якості отримуваної продукції, накладає свої особливості на перебіг представлених вище процесів. При обробці пектиномісткої сировини (рис. 4.1, а) на 1 етапі здійснюється вібраційне ущільнення з метою видалення вільної вологи, що відбувається за рахунок прискорення силового поля $a_g \approx g = 9,81 \text{ м/с}^2$. На 2 етапі обробки здійснюється одночасно відтискування вільної вологи при центрифугуванні, фільтруванні та вібраційній сепарації. Дані операції здійснюються при досягненні сталого режиму роботи віброзбуджувача для запобігання негативної дії вібрації при резонансі на елементи конструкції фільтруючої центрифуги. На 3 етапі мають місце реалізація операцій електроосмотичного відтискування, вібраційного розпушування технологічних мас, що підвищує процес конвективного сушіння для досягнення потрібної вологості продукції.

При зневоложенні харчового насіння баштанних культур (рис. 4.1, б) обробка здійснюється у два основних етапи. Спочатку відбувається видалення вільної вологи в процесах фільтруючого центрифугування та електроосмотичного відтискування. Далі вимикається центрифуга та вмикається віброзбуджувач для досягнення сталого режиму при значенні прискорення силового поля порядку 15 м/с^2 , що ефективно для подальшого конвективного сушіння даної сировини.

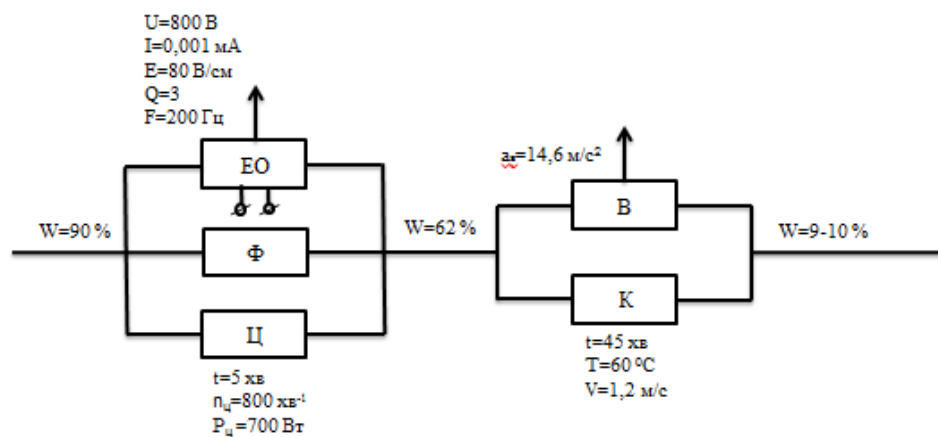
За методикою, що приведена у підрозділі 2.2 будуюмо амплітудно-частотні характеристики (рис. 4.2), з яких визначаємо типові 3 режими руху виконавчих органів вібромашини: дорезонансний ($\omega = 0 \div 12 \text{ рад/с}$), резонансний ($\omega = 12 \div 18 \text{ рад/с}$) та зарезонансний ($\omega > 30 \text{ рад/с}$). Можна відзначити стабілізацію амплітуди коливань робочого контейнера починаючи з $\omega = 60 \text{ рад/с}$.

Аналогічно, використовуючи відповідну вимірювальну апаратуру та методику, що описана у 2 розділі дисертації, будуюмо залежності

віброшвидкості та віброприскорення від частоти обертання приводного валу віброзбуджувача (рис. 4.3, 4.4). Графік $v_g = f(\omega)$ показує закономірності зміни положень рівноваги при збільшенні прискорення силового поля (рис. 4.3), а графік $a_g = f(\omega)$ дозволяє фактично оцінити зміну силової складової або змушуючої сили при збільшенні частоти обертання приводного валу віброзбуджувача.



а



б

Рис. 4.1. Схема комбінованої фізико-механічної обробки високовологої сировини: а - експериментальне визначення робочих режимів зневоложення пектиномісткої сировини; б - експериментальне визначення робочих режимів зневоложення харчового насіння баштанних

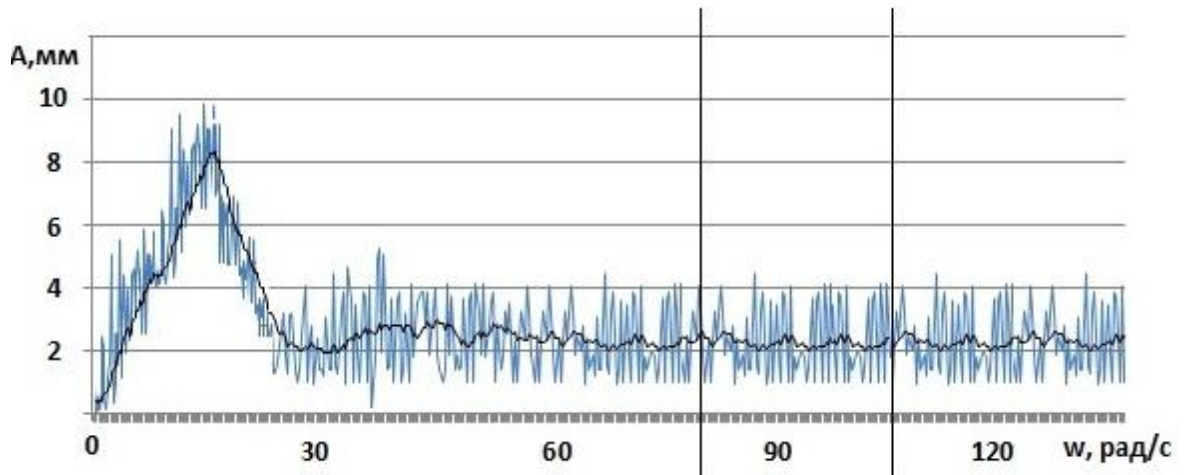


Рис. 4.2. Амплітудно-частотна характеристика досліджуваної машини

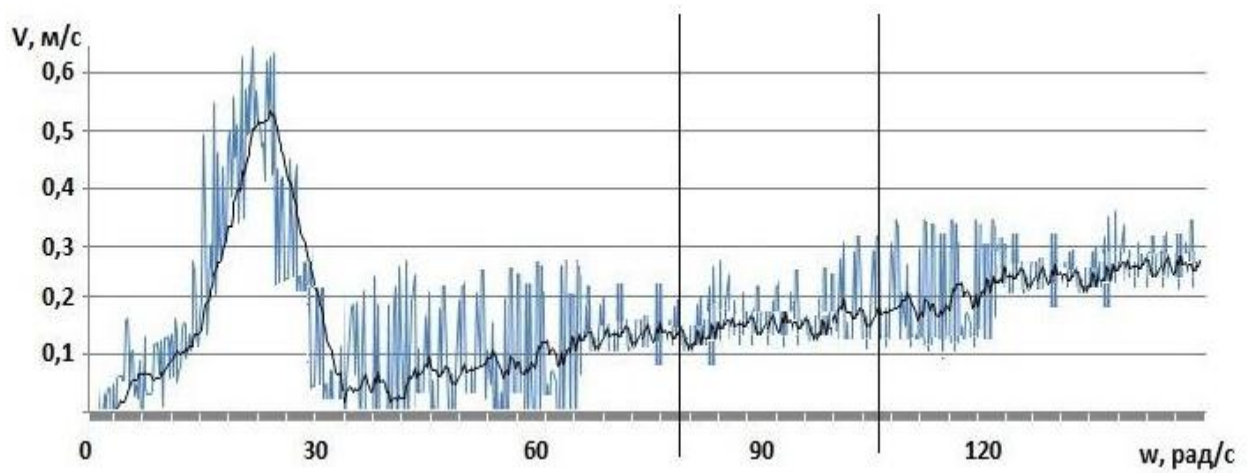


Рис. 4.3. Вібровшвидкість досліджуваної машини

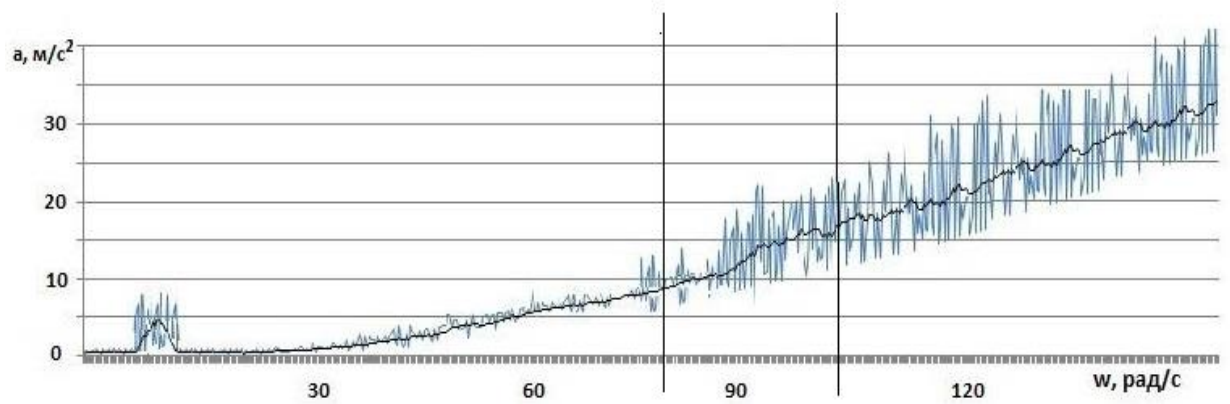


Рис. 4.4. Віброскорення досліджуваної машини

4.2. Оцінка кінетики процесу зневоложення

Дослідження процесу зневоложення проводились за загальною методикою, яка передбачала вимірювання вологості харчового насіння та пектиномісткої сировини в залежності від часу обробки. Харчове насіння з початковою вологістю 62 % та пектиномістка сировина – 78 % подавались через завантажувальний пристрій і займали 3/4 її об'єму. Інтенсивність вологовидалення контролювалась по різниці відносної вологості сушильного агента на вході і виході з сушильної камери. При досягненні значення вологості насіння близько 9-10 %, пектиномісткої сировини – 16 %.

Вібровідцентровий електроосмотичний експериментальний зневоложувач забезпечував послідовне проведення двоетапного фільтраційно-конвективного зневоложення високоволової сировини шляхом зміни технологічних параметрів.

З метою визначення оптимальних параметрів досліджуваного процесу видалення води із застосуванням електроосмотичного ефекту було проведено дослідження із застосуванням комплексу розроблених і виготовлених пристроїв. Порівняльні дослідження різних способів його реалізації здійснювались в три етапи.

На першому етапі – досліджувався процес фільтраційного сушіння в нерухомому шарі. У нерухому сушильну камеру через перфорований циліндр подавався підігрітий сушильний агент, який проходив через шар насіння і видалявся через перфоровані стінки сушильної камери (рис. 4.5, 1 та 4.6, 1).

На другому етапі сушильній камері надавались коливання за допомогою вібробуджувача. Задавались значення амплітуди і частоти вібрацій, при яких фіксувалась тривалість процесу (рис. 4.5, 2 та 4.6, 2).

На третьому етапі досліджень при попередніх режимах було задіяно пристрої формування, задання та автоматичне регулювання густини струмів електродів при зміні значень частоти, асиметрії та густини струмів

відсліджувався їх вплив на час вологовидалення (рис. 4.5, 3 та 4.6, 3).

Задана температура сушильного агента підтримувалась автоматично, також було можливе її оперативне регулювання за допомогою регулятора потужності. Задана частота та амплітуда вібрацій встановлювались незалежно за допомогою електронного пристрою та шляхом зміни кута установки дебалансів противаги вібробуджувача.

Дослідження впливу амплітуди вібрації здійснювались шляхом порівняння тривалості процесів при різних співвідношеннях складових.

Дослідження здійснювались при постійній частоті коливань – 16 Гц задавались значення амплітуди 2, 4 і 6 мм, при яких фіксувалась тривалість процесу фільтраційно-конвективного сушіння.

Особливістю розробленої машини є можливість реалізації комбінованого вібромеханічного та фізико-механічного впливу для сировини, що відзначається своїми специфічними властивостями, які представлені на рис. 4.5, 4.6 та доводить ефективність саме комбінованої технологічної дії на сировину.

Дослідження впливу параметрів реалізації електроосмотичного ефекту: напруженості електричного поля (рис. 4.7, 4.8); частота струму (рис. 4.9, 4.10); шпаруватість імпульсів (рис. 4.11, 4.12) дозволили оптимізувати параметри процесу за даної технологічної дії.

Було проведено експериментальні дослідження впливу параметрів вібрацій на інтенсивність фільтраційно-осмотичного зневоложення (рис. 4.13, 4.14), (рис. 4.15, 4.16), що показує високі технологічні якості даного процесу обробки за амплітуди коливань в межах $A = 4 \dots 6$ мм.

Залежність динаміки руху потоку теплоносія при зневоложенні (рис. 4.17, 4.18) виявляє незначне зменшення часу обробки при збільшенні швидкості конвективного потоку. Враховуючи що при цьому має місце певне збільшення енерговитрат на процес зневоложення, то можна вважати досліджуваний фактор підвищення швидкості теплоносія як незначний.

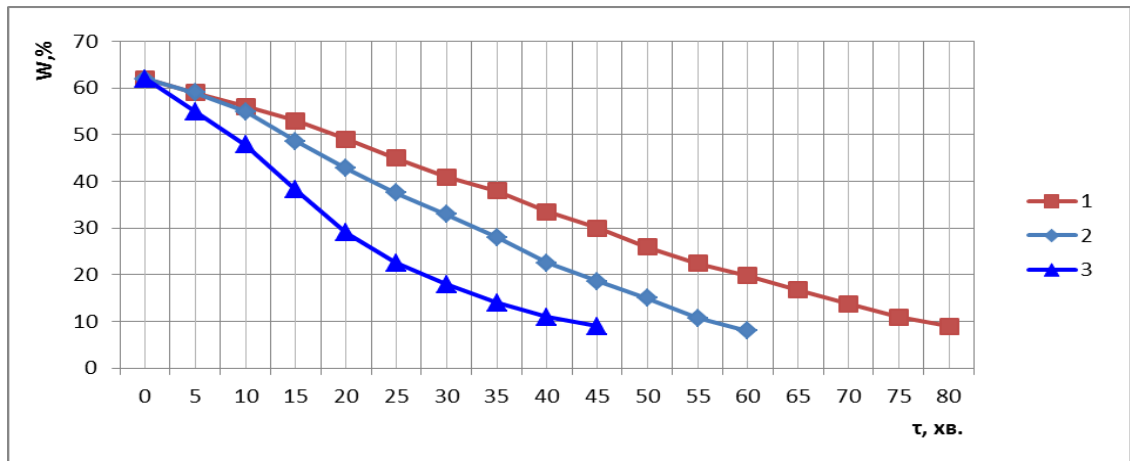


Рис. 4.5. Кінетика сушіння харчового насіння баштанних при різних способах вологовидалення: 1 – фільтраційне сушіння в нерухомому шарі при $W_n = 62 \%$, $V = 1,2$ м/с; 2 – вібраційно-фільтраційне сушіння при $W_n = 62 \%$, $V = 1,2$ м/с, $A = 4$ мм; 3 – вібраційно-фільтраційне сушіння із застосуванням електроосмотичного ефекту при $W_n = 62 \%$, $V = 1,2$ м/с., $A = 4$ мм, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $Q = 3$, $\Pi = 0,75$

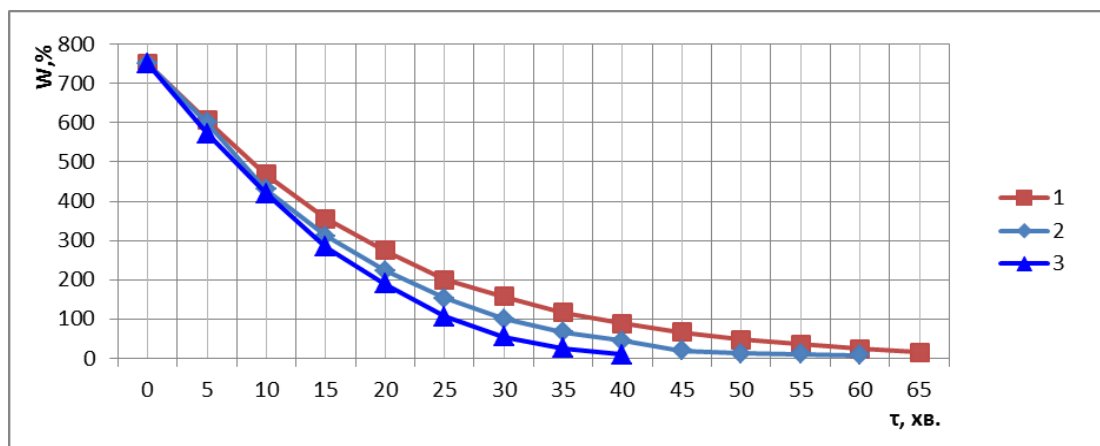


Рис. 4.6. Кінетика сушіння пектиномісткої сировини при різних способах вологовидалення: 1 – фільтраційне сушіння в нерухомому шарі при $W_n = 78 \%$, $V = 3$ м/с; 2 – вібраційно-фільтраційне сушіння при $W_n = 78 \%$, $V = 3$ м/с, $A = 4$ мм; 3 – вібраційно-фільтраційне сушіння із застосуванням електроосмотичного ефекту при $W_n = 78 \%$, $V = 3$ м/с, $A = 4$ мм, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $Q = 3$, $\Pi = 0,75$

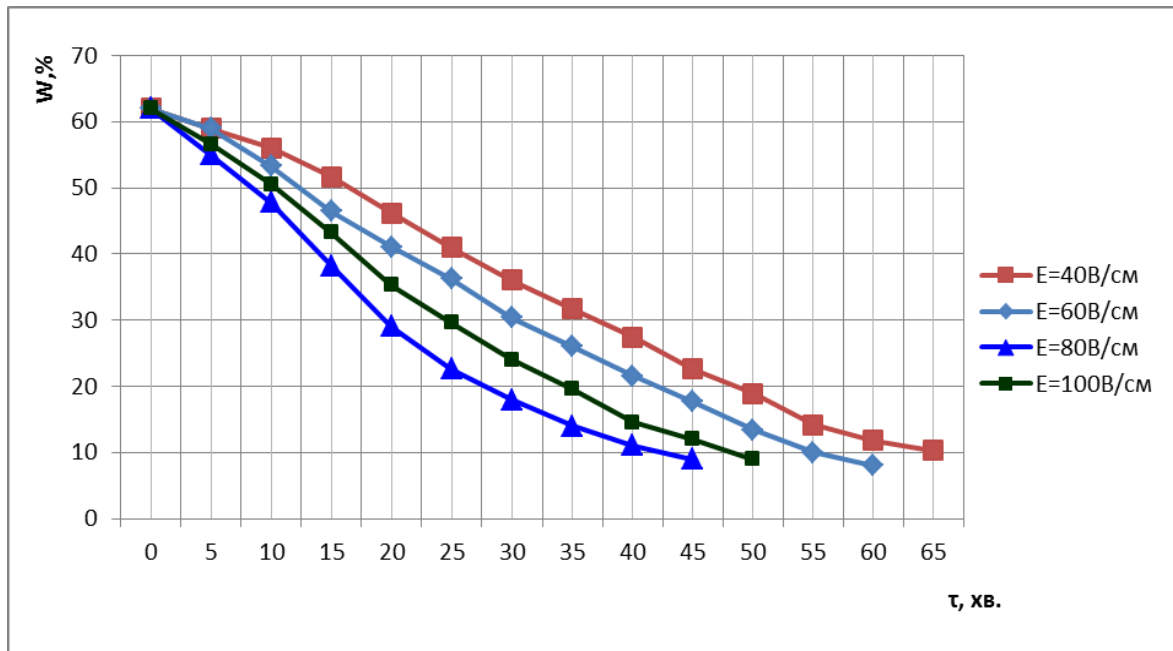


Рис. 4.7. Вплив напруженості електричного поля на кінетику сушіння харчового насіння баштанних при $W_n = 62\%$, $V = 1,2$ м/с, $A = 4$ мм, $F = 200$ Гц, $Q = 3$, $\Pi = 0,75$

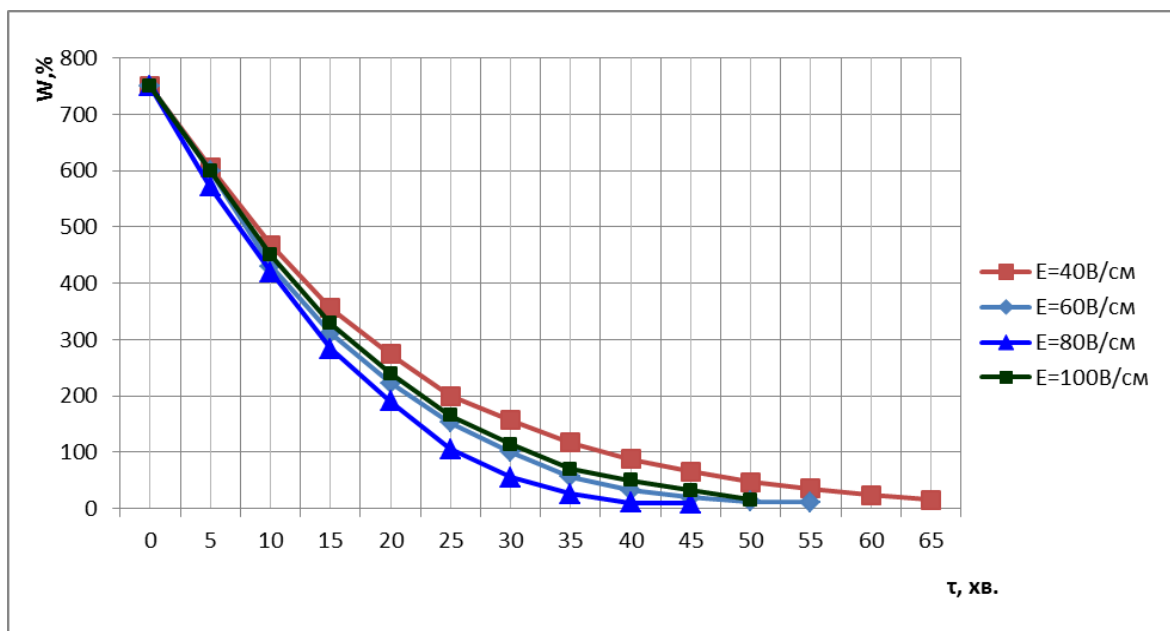


Рис. 4.8. Вплив напруженості електричного поля на кінетику сушіння пектиномісткої сировини при $W_n = 78\%$, $V = 3$ м/с, $A = 4$ мм, $F = 200$ Гц, $Q = 3$, $\Pi = 0,75$

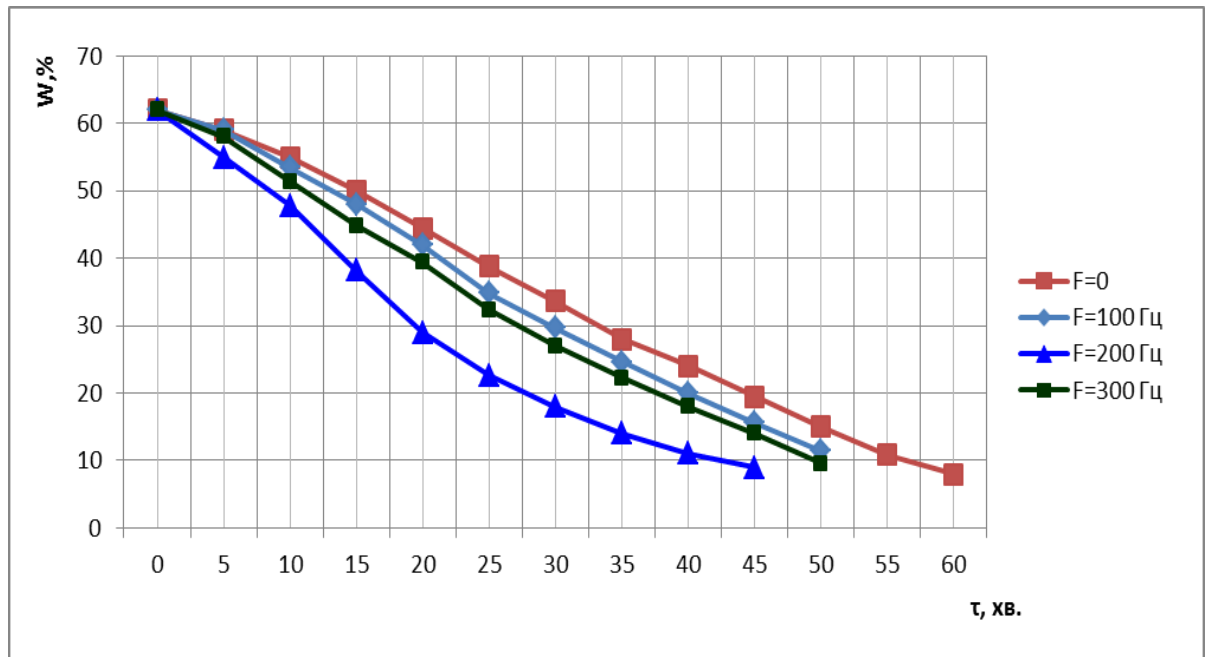


Рис. 4.9. Вплив частоти електричного струму на кінетику сушіння харчового насіння баштанних при $W_n = 62 \%$, $V = 1,2$ м/с, $A = 4$ мм, $E = 80$ В/см, $Q = 3$, $\Pi = 0,75$

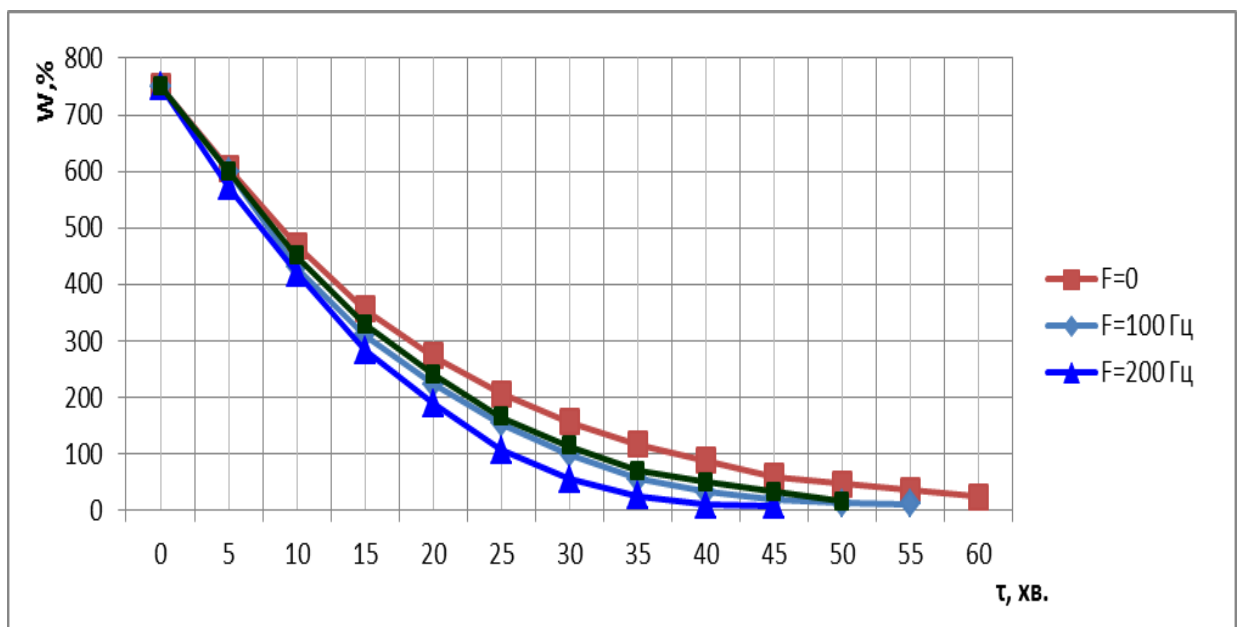


Рис. 4.10. Вплив частоти електричного струму на кінетику сушіння пектиномісткої сировини при $W_n = 78 \%$, $V = 3$ м/с, $A = 4$ мм, $E = 80$ В/см, $Q = 3$, $\Pi = 0,75$

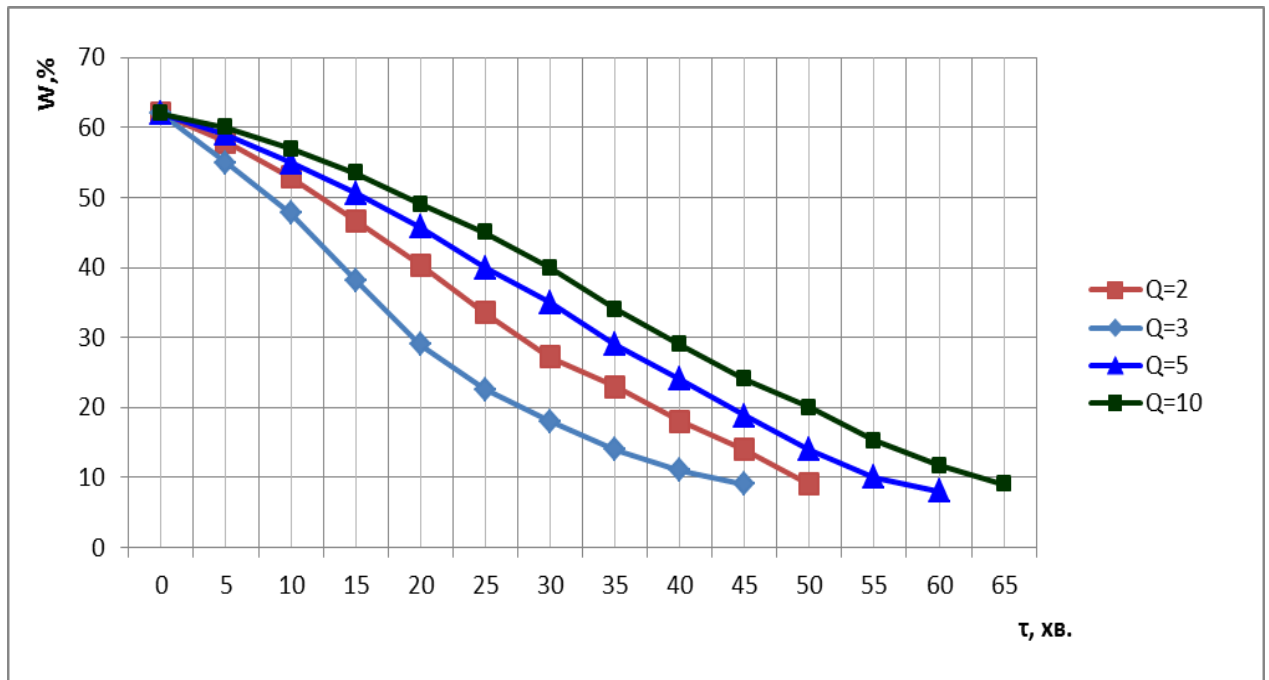


Рис. 4.11. Вплив шпаруватості імпульсів на кінетику сушіння харчового насіння баштанних при $W_n = 62\%$, $V = 1,2$ м/с, $A = 4$ мм, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $\Pi = 0,75$

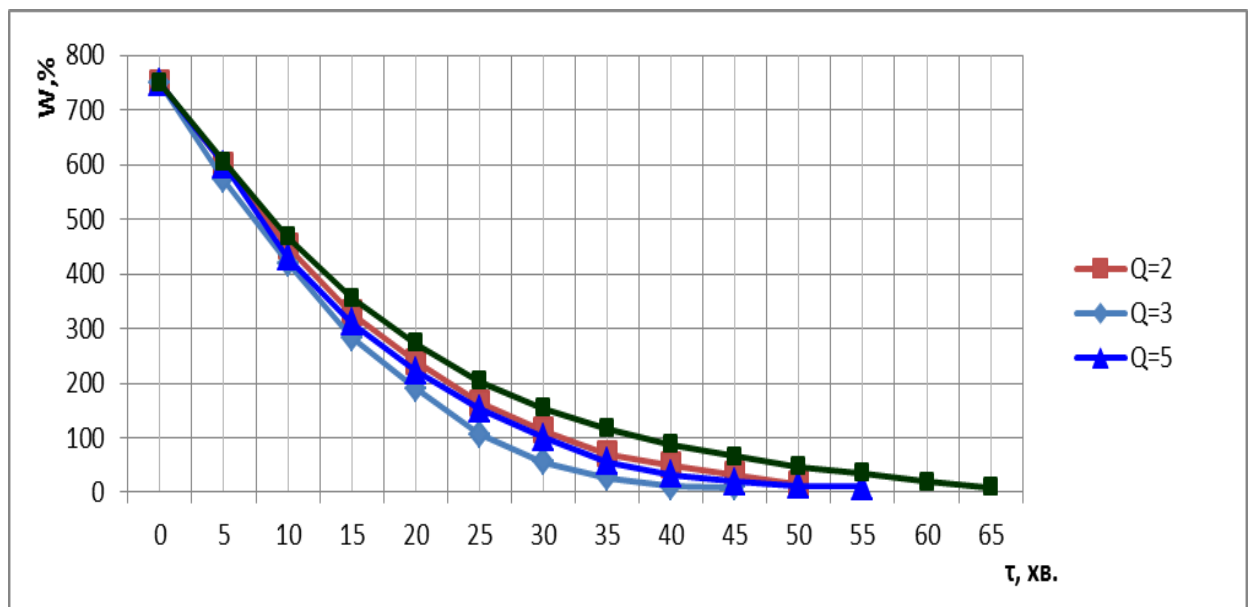


Рис. 4.12. Вплив шпаруватості імпульсів на кінетику сушіння пектиномісткої сировини при $W_n = 78\%$, $V = 3$ м/с, $A = 4$ мм, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $\Pi = 0,75$

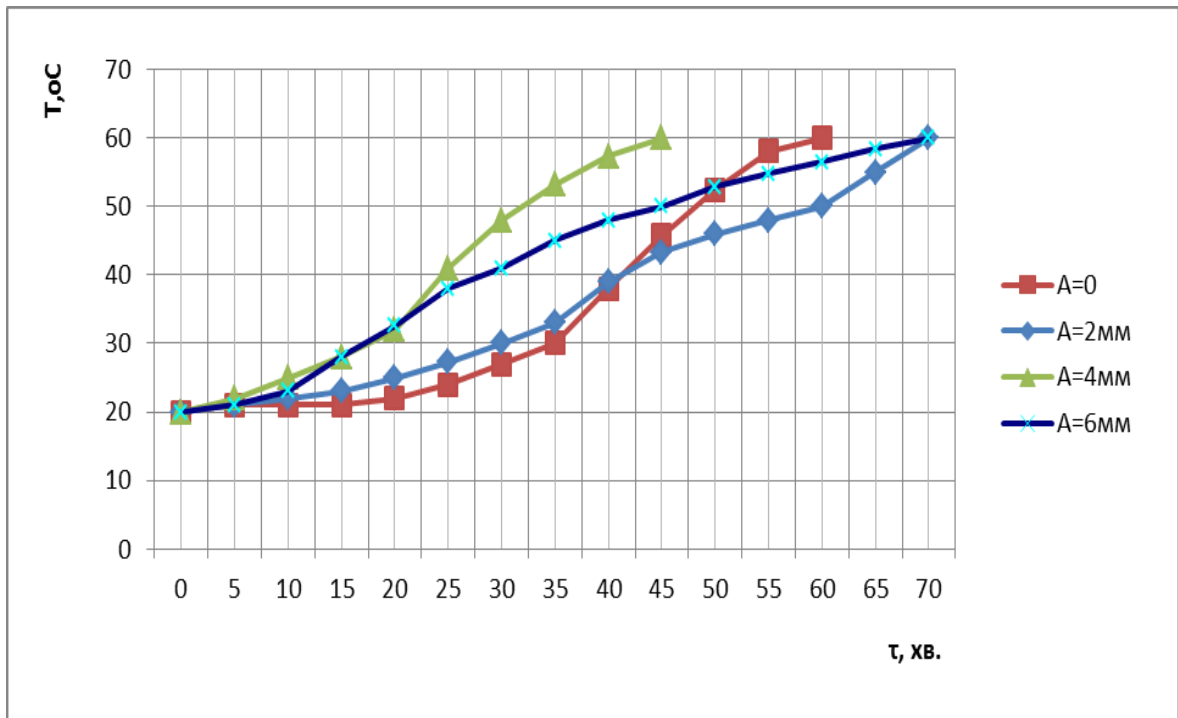


Рис. 4.13. Залежність температури харчового насіння баштанних T °С від часу зневоложення τ , хв. при різних амплітудах коливань

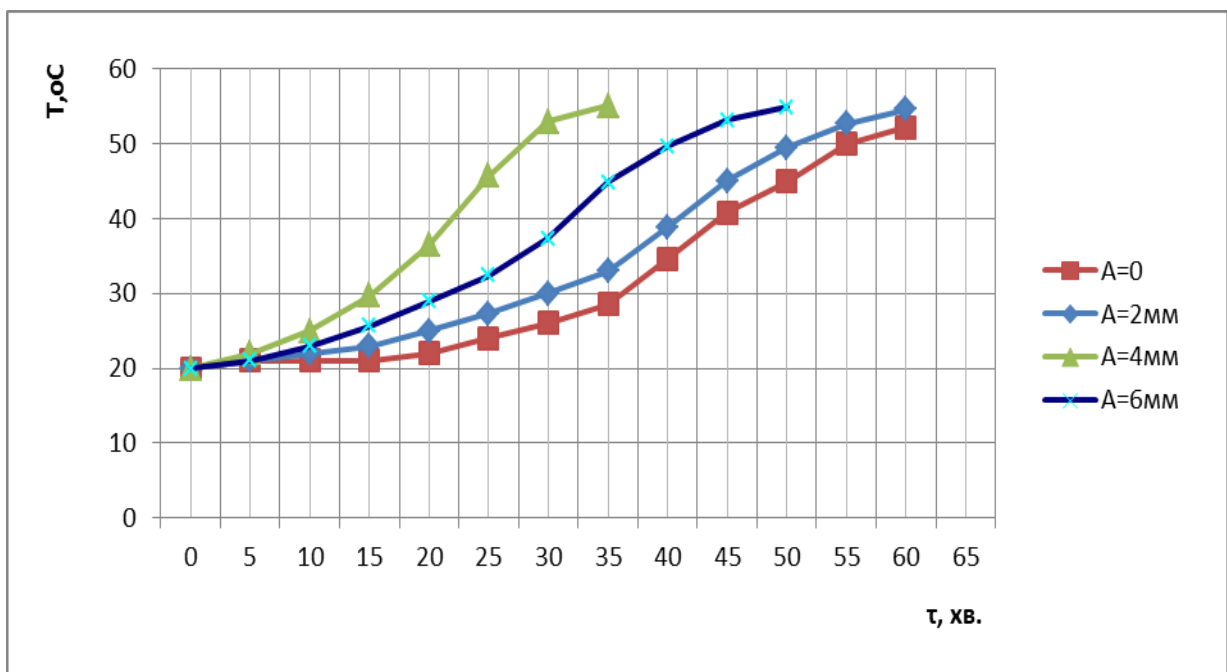


Рис. 4.14. Залежність температури пектиномісткої сировини T °С від часу зневоложення τ , хв. при різних амплітудах коливань

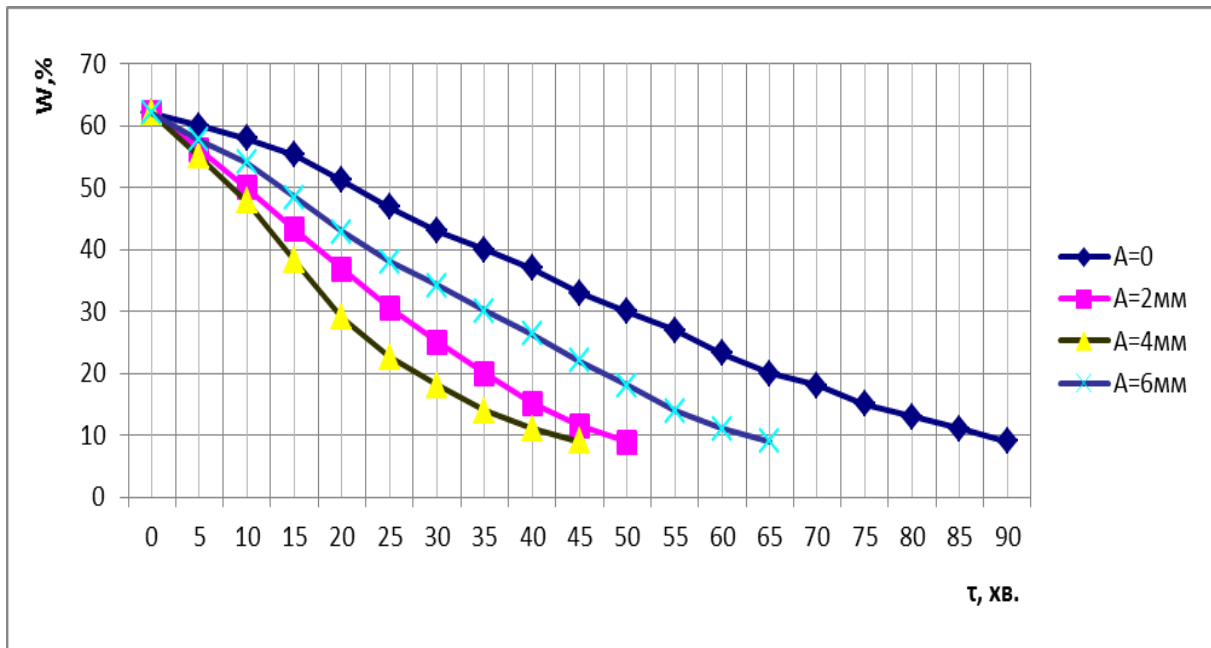


Рис. 4.15. Залежність вологості харчового насіння баштанних W , % від часу зневоложення τ , хв. при різних амплітудах коливань $W_n = 62$ %, $V = 1,2$ м/с, $Q = 3$, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $\Pi = 0,75$

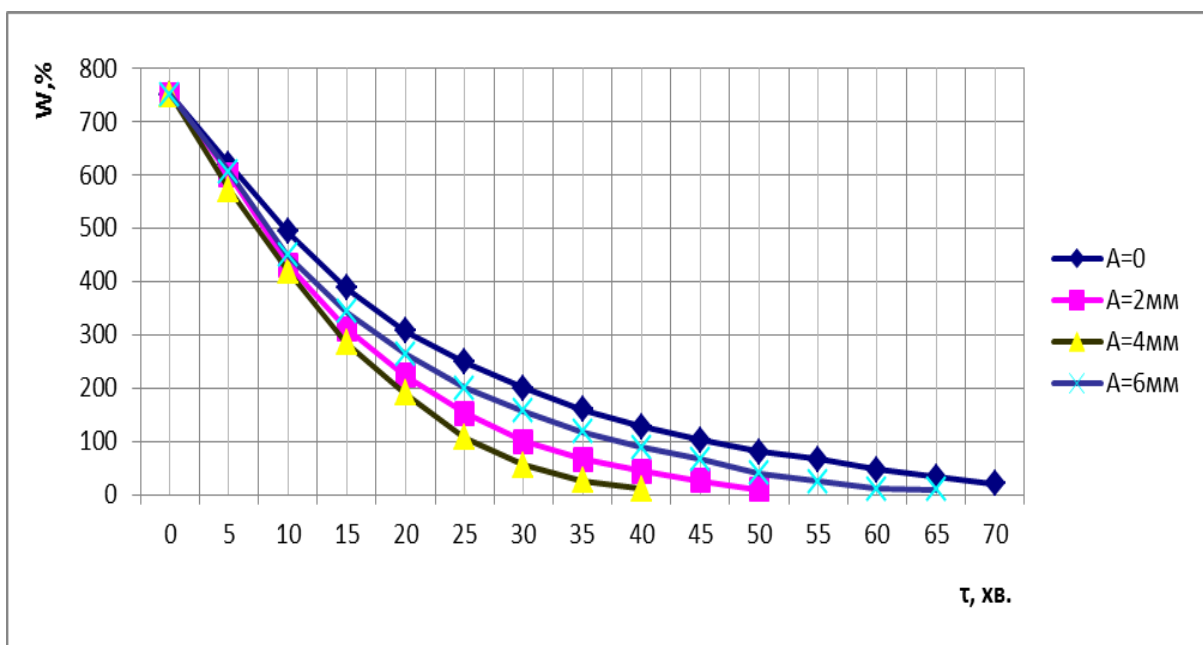


Рис. 4.16. Залежність вологості пектиномісткої сировини W , % від часу зневоложення τ , хв. при різних амплітудах коливань $W_n = 78$ %, $V = 3$ м/с., $Q = 3$, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $\Pi = 0,75$

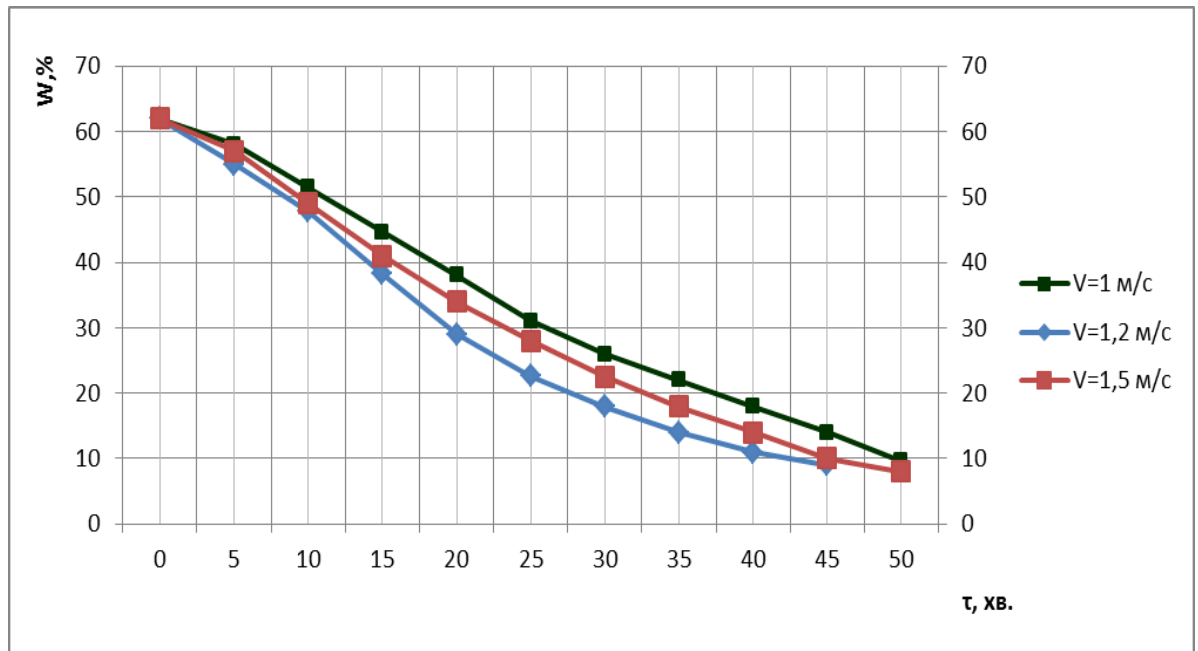


Рис. 4.17. Залежність вологості харчового насіння баштанних W , % від часу зневоложення τ , хв. при різних швидкостях повітряного потоку $W_n = 62$ %, $A = 4$ мм, $Q = 3$, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $\Pi = 0,75$

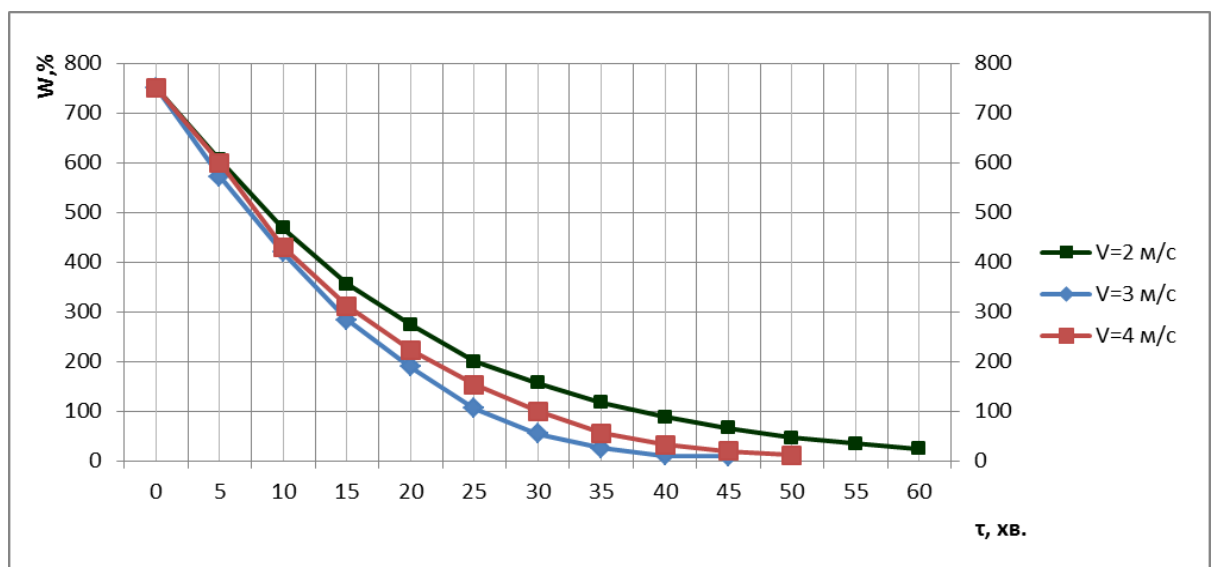


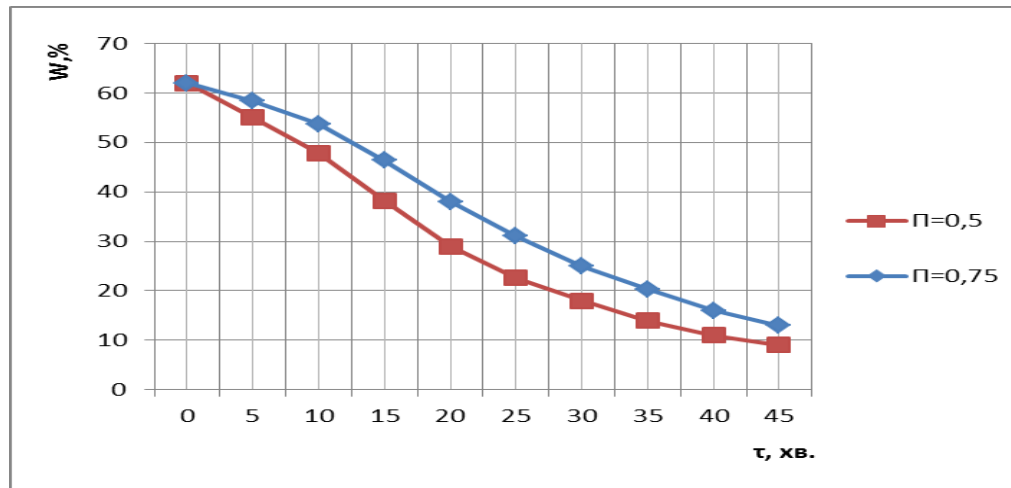
Рис. 4.18. Залежність вологості пектиномісткої сировини W , % від часу зневоложення τ , хв. при різних швидкостях повітряного потоку $W_n = 78$ %, $A = 4$ мм, $Q = 3$, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $\Pi = 0,75$

Проведені дослідження дозволили здійснити порівняльний аналіз впливу різних фізико-механічних заходів (рис. 4.1) та довели ефективність вібровідцентрового видалення вільної вологи на 1 стадії обробки, на 2 стадії – руйнування суцільного шару продукції під дією вібраційного поля (для пектиномісткої сировини) та подальша дифузія вологи з електроосмотичною інтенсифікацією процесу на 3 стадії обробки

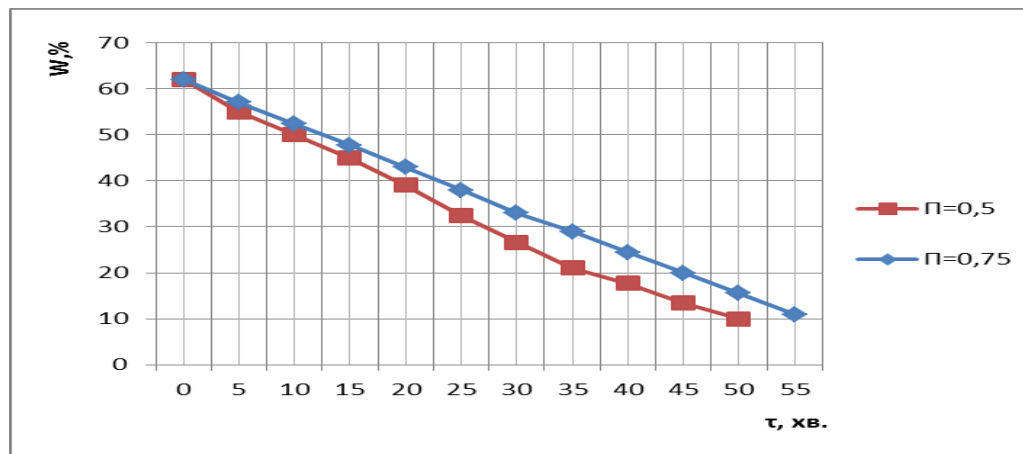
4.3. Оцінка техніко-економічних характеристик процесу

Для визначення оптимальних параметрів роботи вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача були проведені дослідження впливу ступеня завантаження контейнера на кінетику зневоложення харчового насіння баштанних культур та пектиномісткої сировини. Дослідження проводились, для зневоложення харчового насіння, при завантаженні контейнера $\Pi = 0,75$ та $0,5$ при температурі сушильного агента $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, швидкості руху повітря $1,2\text{ м/с}$ та початковою вологістю сировини $W=62\text{ \%}$ (рис. 4.19) та для пектиномісткої сировини при: завантаженні контейнера $\Pi = 0,75$ та $0,5$ при температурі сушильного агента $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, швидкості руху повітря 2 м/с та початковою вологістю сировини $W=78\text{ \%}$ (рис. 4.20). Очікуваним стало збільшення часу обробки при підвищенні степені завантаження контейнера. Проте дане збільшення є незначним, тому для підвищення продуктивності зневоложення є ефективним підвищення степені завантаження контейнера до $0,75$.

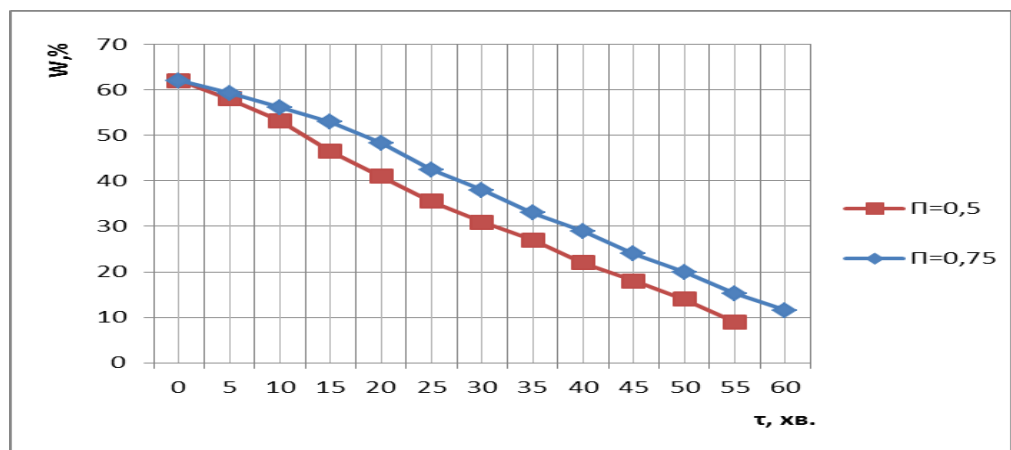
Конструкція розробленого вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача передбачала можливість зміни положення дебалансів у межах $(0\dots360^{\circ})$ з кроком 45° , що дало можливість визначити оптимальні просторові координати вібробуджувача та відстежити відповідні траєкторії руху робочої камери.



а)

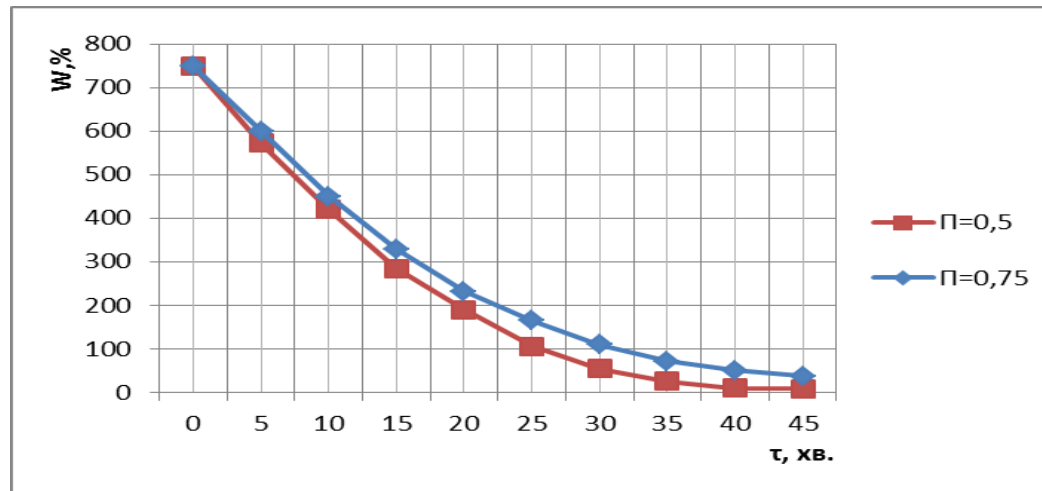


б)

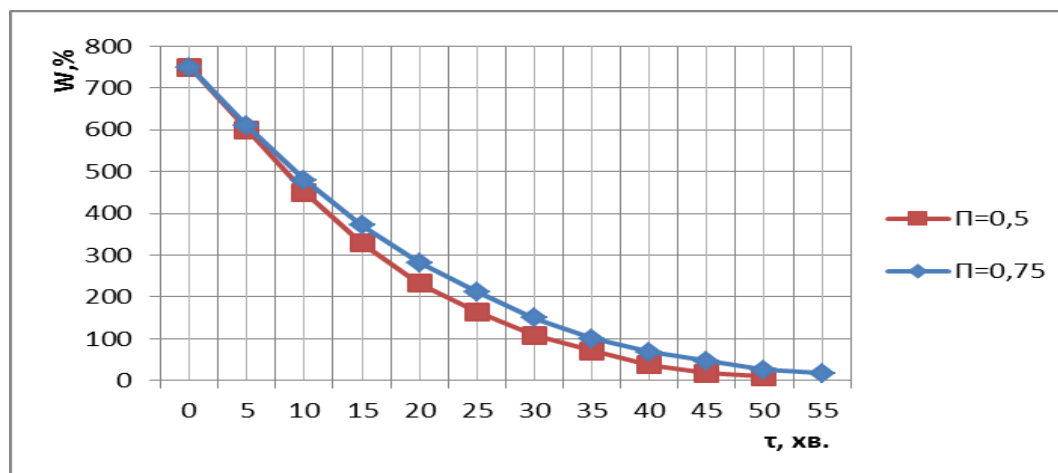


в)

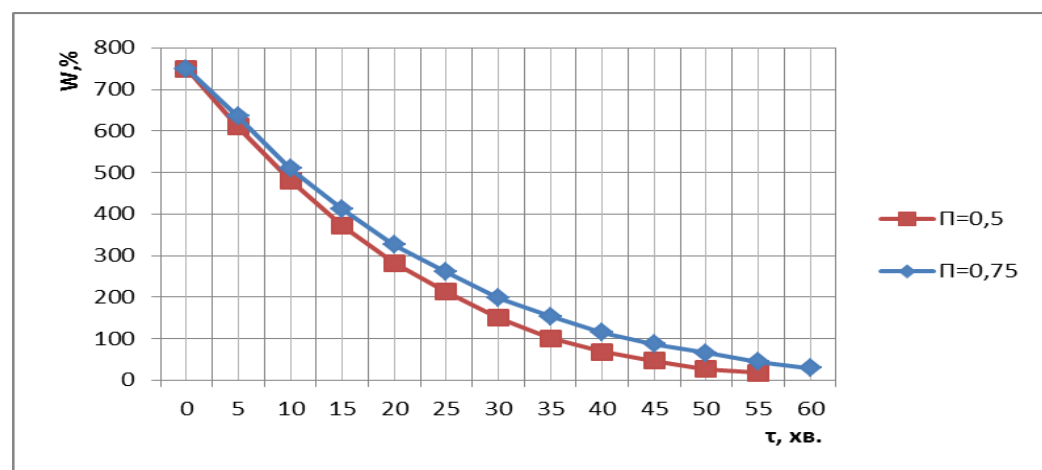
Рис. 4.19. Вплив ступеня завантаження на кінематичні характеристики процесу зневоложення харчового насіння баштанних при $W_n = 62\%$, $V = 1,2$ м/с, $A = 4$ мм, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $Q = 3$: а – $f = 80$ с⁻¹; б – $f = 70$ с⁻¹; в – $f = 60$ с⁻¹



а)



б)



в)

Рис. 4.20. Вплив ступеня завантаження на кінетичні характеристики процесу зневоложення пектиномісткої сировини при $W_n = 78\%$, $V = 3$ м/с, $A = 4$ мм, $E = 80$ В/см, $F = 200$ Гц, $Q = 3$: а – $f = 80$ с⁻¹; б – $f = 70$ с⁻¹; в – $f = 60$ с⁻¹

Оптимальні відхилення, при яких спостерігається максимальне значення амплітуди вібрації, коли монтування незрівноважених елементів дебалансу противаги на платформі знаходяться в межах 270° .

Аналіз представлених кривих показав рівномірне підвищення інтенсивності зневоложення по всіх розглянутих частотах вібрації: $a - f = 80 \text{ c}^{-1}$; $b - f = 70 \text{ c}^{-1}$; $c - f = 60 \text{ c}^{-1}$, оптимальним значенням якої можна прийняти $f = 80$ та при $P=0,75$.

Питомі витрати потужності або віброінтенсивність коливального руху значно зростають при кутовій швидкості приводного валу віброзбуджувача $\omega > 110 \text{ рад/с}$ (рис. 4.21).

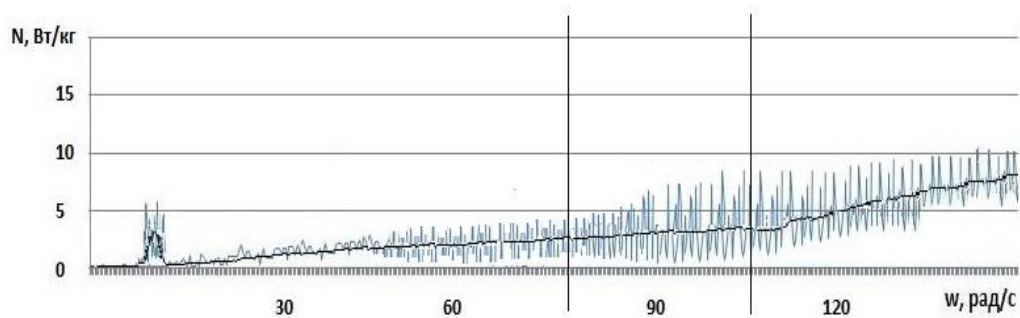


Рис. 4.21. Інтенсивність коливань досліджуваної машини

Враховуючи залежності на рисунках 4.2 – 4.4 можна відзначити, що ефективна частота вібрації лежить в межах $\omega = 80 \div 110 \text{ рад/с}$, амплітуда коливань $A = 2 \div 4 \text{ мм}$ (з рис. 4.15, 4.16 та 4.17, 4.18) при ступені завантаження робочого контейнера 0,75 (рис. 4.19, 4.20).

4.4. Визначення степеневих коефіцієнтів критеріального рівняння досліджуваного процесу тепломасообміну

Експерименти проводились при зміні таких параметрів:

- об'єму продукції в контейнері: $P=0,75$ та $P=0,5$;
- частоти вібрації: $f=60, 70$ та 80 c^{-1} .

Площа поверхні зернини $F_{з\text{ер}}$. Визначали за виразом [136]:

$$F_{з\text{ер}} = 4\pi R(l + 3R), \quad (4.1)$$

де R – приведений радіус зернини

$$R = \frac{5a + 6b}{60}, \quad (4.2)$$

де a – товщина зернини, $a = 3$ мм;

b – ширина зернини, $b = 7$ мм;

l – довжина зернини, $l = 18$ мм;

$$R = \frac{5 \cdot 3 + 6 \cdot 7}{60} = 0,95 \text{ мм} \quad (4.3)$$

$$F_{з\text{ер}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 0,95(18 + 3 \cdot 0,95) = 248,8 \text{ мм}^2 \approx 2,48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (4.4)$$

Загальна маса зерна в контейнері при $\Pi = 0,75\%$ – 1,6 кг;

$\Pi = 0,5\%$ – 1,3 кг;

Маса 1000 шт. зернин – 195 гр.

Загальна кількість зернин в контейнері при $\Pi = 0,75\%$ – 8205 шт.;

$\Pi = 0,5\%$ – 6666 шт.;

Загальна площа поверхні зернин при $\Pi = 0,75\%$

$$F = 8205 \cdot 2,48 \cdot 10^{-4} = 2,03 \text{ м}^2 \quad (4.5)$$

Загальна площа поверхні зернин при $\Pi = 0,5\%$

$$F = 6666 \cdot 2,48 \cdot 10^{-4} = 1,65 \text{ м}^2 \quad (4.6)$$

Визначення модифікованого вібраційного числа Пекле здійснюємо за формулою $Pe_g = \frac{\rho d^2}{D}$

Модифіковане вібраційне число Пекле при $f = 60 \text{ с}^{-1}$;

$$Pe_g = \frac{60 \cdot (7 \cdot 10^{-3})^2}{0,216 \cdot 10^{-4}} = 1,36 \quad (4.7)$$

Модифіковане вібраційне число Пекле при $f = 70 \text{ с}^{-1}$;

$$Pe_g = \frac{70 \cdot (10^{-3})^2}{0,216 \cdot 10^{-4}} = 1,58 \quad (4.8)$$

Модифіковане вібраційне число Пекле при $f = 80 \text{ с}^{-1}$;

$$Pe_e = \frac{80 \cdot (0,6 \cdot 10^{-3})^2}{0,216 \cdot 10^{-4}} = 1,81 \quad (4.9)$$

Видалення вологи при зневоложенні за проміжок часу:

$$M = \beta F(C_H - C_\tau) \quad (4.10)$$

де F – площа поверхні насіння, м²;

C_H – концентрація вологи в повітрі в умовах насичення при температурі повітря, кг/м³;

C_τ – поточне значення концентрації вологи в повітрі $C_\tau = 13,764 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

З формули (4.10) коефіцієнт масовіддачі при зневоложенні:

$$\beta = \frac{M}{F(C_H - C_\tau)} \quad (4.11)$$

де M – видалення вологи при сушінні за проміжок часу, $\left[\frac{m^3}{c} \right]$

Використовуючи *i-d* діаграму визначаємо значення C_H та заносимо в таблицю 4.1. Також в таблицю заносимо розраховані значення M та β .

Таблиця 4.1

Основні параметри зневоложення харчового насіння баштанних

	D	$W, \%$	M	C_H	β	f	St_e	Pe_e
1	0,216	48	0,7	$111,53 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	60	$5,55 \cdot 10^{-6}$	1,36
2	0,216	31	1,7	$184,8 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	60	$7,71 \cdot 10^{-6}$	1,36
3	0,216	21	1	$228,65 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	60	$3,61 \cdot 10^{-6}$	1,36
4	0,216	10	1,1	$363,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	60	$2,44 \cdot 10^{-6}$	1,36
1	0,216	49	0,6	$111,53 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	70	$3,81 \cdot 10^{-6}$	1,58
2	0,216	38	1,1	$184,8 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	70	$3,99 \cdot 10^{-6}$	1,58
3	0,216	30	0,8	$228,65 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	70	$2,31 \cdot 10^{-6}$	1,58
4	0,216	21	0,9	$363,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	70	$1,59 \cdot 10^{-6}$	1,58
1	0,216	51	0,4	$111,53 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	80	$2,11 \cdot 10^{-6}$	1,81
2	0,216	45	0,6	$184,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	80	$1,81 \cdot 10^{-6}$	1,81
3	0,216	38	0,7	$228,65 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	80	$1,68 \cdot 10^{-6}$	1,81
4	0,216	29	0,9	$363,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	80	$1,33 \cdot 10^{-6}$	1,81

Таблиця 4.2

Параметри критеріїв подібності досліджуваного процесу

E_1	E	St_g	Pe_g	Eu	$St_g / E^{0,61}$	$St_g / Re_g^{1,77} \cdot E^{0,61}$	$St_g / Eu^{1,35} \cdot Re_g^{1,77} \cdot E^{0,61}$
40	0,025	$4,83 \cdot 10^{-6}$	1,36	$2,86 \cdot 10^4$	$4,58 \cdot 10^{-2}$	$0,45 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$
60	0,016	$2,92 \cdot 10^{-6}$	1,58	$1,98 \cdot 10^4$	$3,56 \cdot 10^{-2}$	$0,25 \cdot 10^{-2}$	$4,52 \cdot 10^{-2}$
80	0,012	$1,73 \cdot 10^{-6}$	1,81	$1,46 \cdot 10^4$	$2,51 \cdot 10^{-2}$	$0,16 \cdot 10^{-2}$	$6,37 \cdot 10^{-2}$

Показники r , s , p , m та A знаходимо за результатами графоаналітичного аналізу при використанні наступної методики [137].

За узагальненими даними таблиці 4.2 будуємо графік функції $St=f(E)$, що представляємо на рисунку 4.23.

З графіка функції $St_g=f(E)$ знаходимо показник степені r (рис. 4.22).

$$r = \operatorname{tg} 31^{\circ} 51' = 0,61 \quad (4.12)$$

Далі знаходимо другий показник степені s з графіка функції $St_g / E^{0,61} = f(Re)$, що представлений на рисунку 4.23 за даними таблиці 4.2.

$$s = \operatorname{tg} 60^{\circ} 59' = 1,77 \quad (4.13)$$

З графіка функції $St_g / Re_g^{1,77} \cdot E^{0,61} = f(Eu)$, що представлений на рисунку 4.24 та даними таблиці 4.2, знаходимо наступний показник степені p .

$$p = \operatorname{tg} 53^{\circ} 49' = 1,35 \quad (4.14)$$

З графіка функції $St_g / Eu^{1,35} \cdot Re_g^{1,77} \cdot E_1^{0,61} = f(Pe)$ та даними таблиці 4.2 знаходимо наступний показник степені m та величину параметра A (рис. 4.25)

$$m = \operatorname{tg} 65^{\circ} 13' = 2,15 \quad (4.15)$$

$$A = 0,1 \quad (4.16)$$

Використовуючи отриману базу даних знаходимо рівняння досліджуваного процесу масообміну у критеріальному вигляді.

$$St_g = 0,1 \cdot Pe_g^{2,15} \cdot Eu^{1,35} \cdot Re_g^{1,77} \cdot E_1^{0,61} \quad (4.17)$$

Використовуючи складене рівняння 4.17 та розроблену програму [139], знаходимо рекомендований ряд параметрів робочого режиму для

зневоложення харчового насіння баштанних.

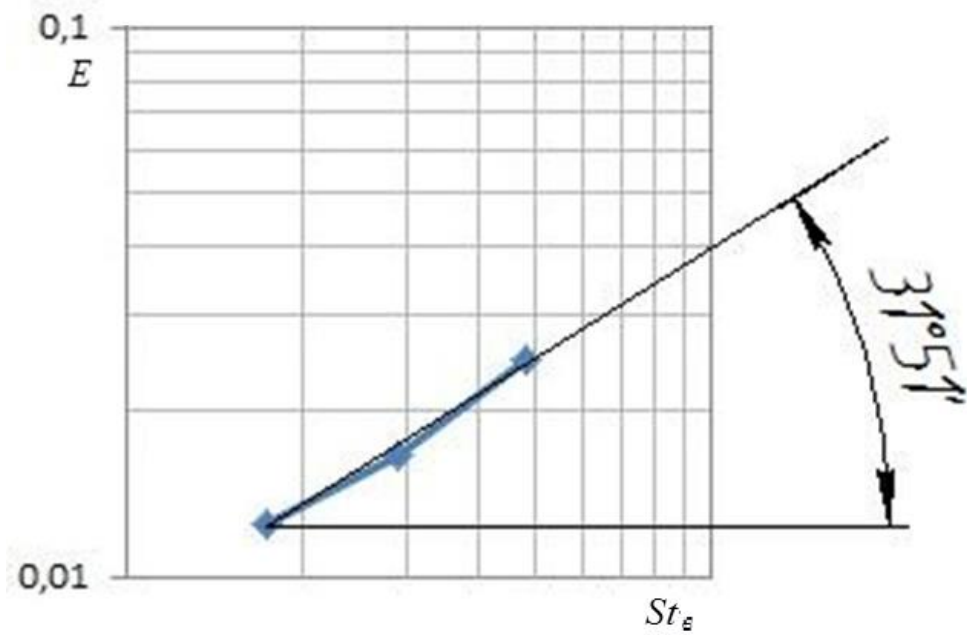


Рис. 4.22. Графік залежності вібраційного числа Стантона від питомої напруженості електричного поля E

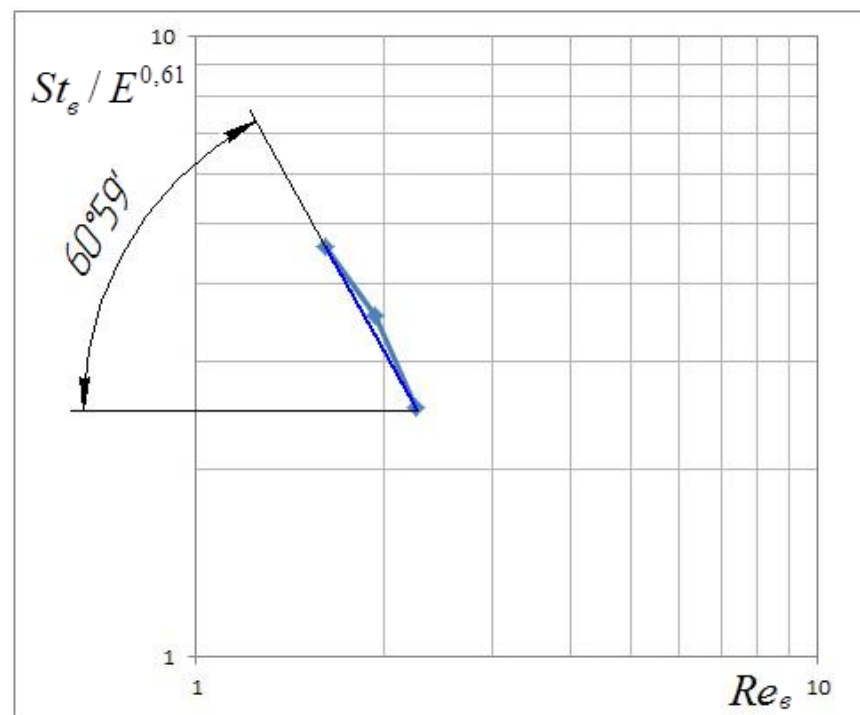


Рис. 4.23. Графік залежності $St_\epsilon / E^{0,61}$ від вібраційного числа Рейнольдса

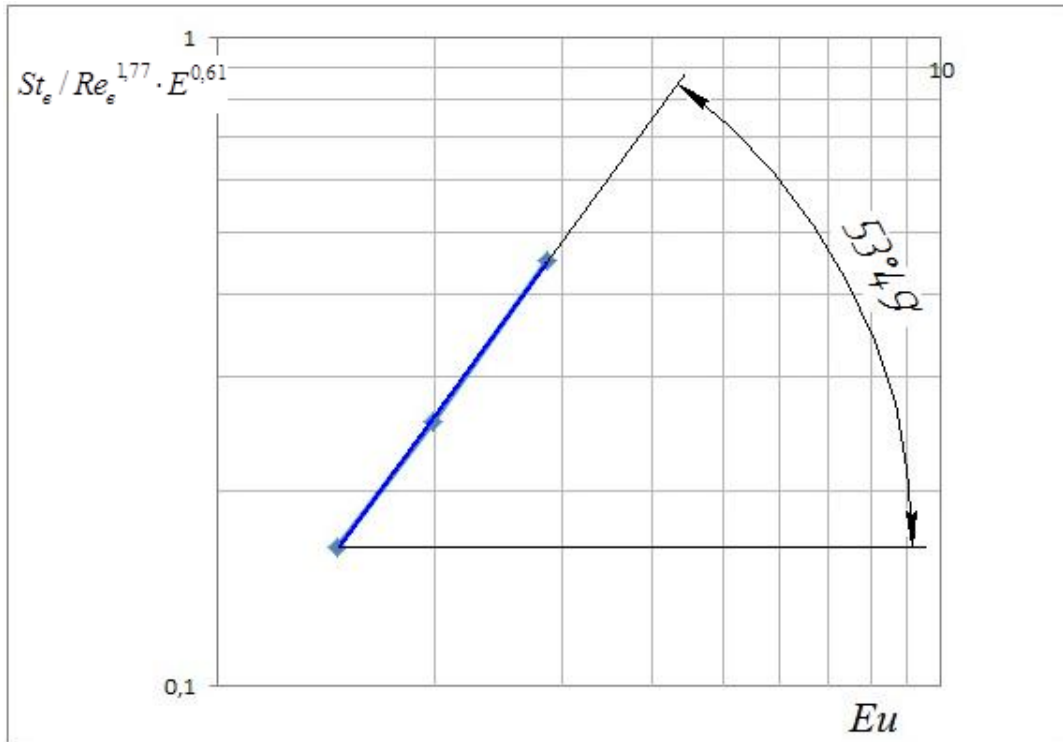


Рис. 4.24. Графік залежності $St_e / Re_e^{1.77} \cdot E^{0.61}$ від дифузійного числа Ейлера

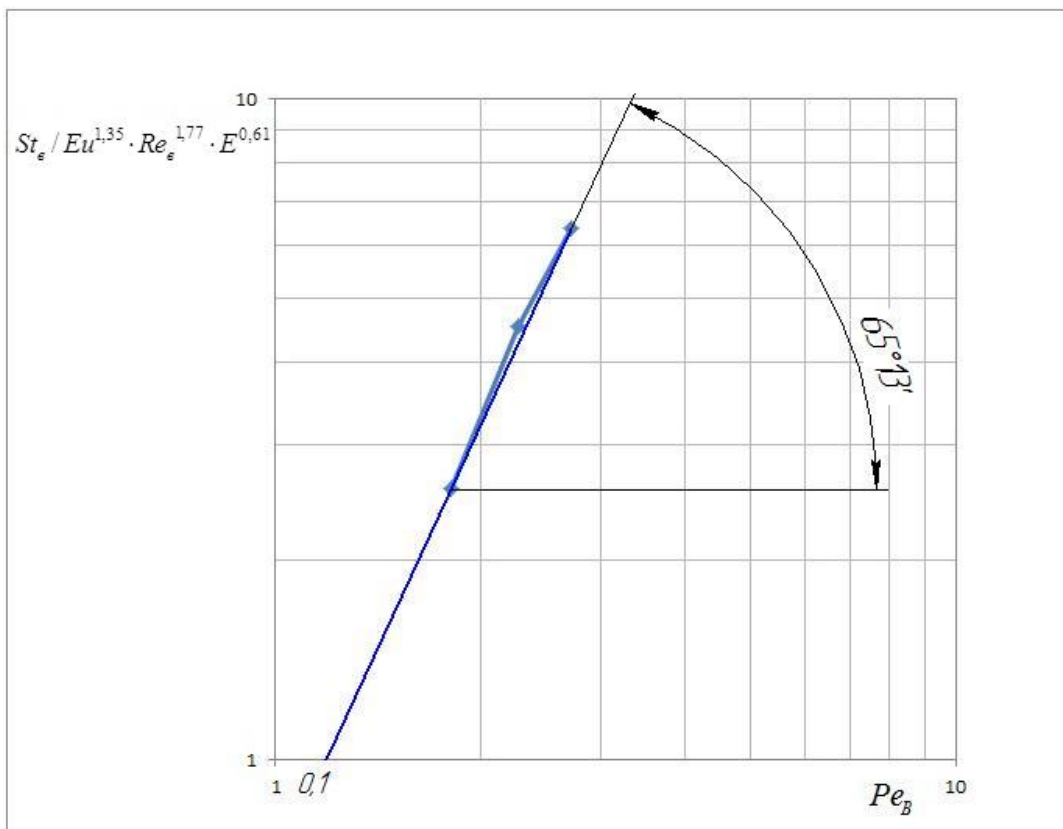


Рис. 4.25. Графік залежності $St_e / Eu^{1.35} \cdot Re_e^{1.77} \cdot E^{0.61}$ від вібраційного числа

Пекле

4.5. Оптимізація параметрів процесу зневоложення

Якісними параметрами оптимізації досліджуваного процесу було визначено W – вміст кінцевої вологи у вихідному продукті, %:

$$W = f(\alpha, E, t, \Pi) \quad (4.18)$$

де α – віброприскорення, м/с^2 ;

E – напруженість електричного поля;

t – час технологічного впливу, хв;

Π – коефіцієнт технологічного завантаження, %.

Дослідження впливу перерахованих вище факторів на технологічні параметри досліджувального процесу при проведенні однофакторних експериментів пов'язані зі значними труднощами та об'ємами робіт. Тому доцільно провести статистичний аналіз для отримання функціональної залежності у вигляді множинної регресії другого порядку за допомогою рототабельного центрально-композиційного планування (РЦКП) багатфакторного експерименту [138, 139, 140].

Метод РЦКП дозволяє більш точно отримати математичний опис розподілу даних, за рахунок збільшення кількості експериментів у центральних точках матриці плану і спеціальному вибору величини “зіркового значення” α .

Всі фактори, які входять до функцій (1), (2), є параметрами, що мають різну розмірність та порядки. Тому для отримання поверхні відгуку цих функцій було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору [141]. Встановлено наступні значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний -1 , середній 0 , максимальний $+1$ та зіркові значення $-\alpha$; $+\alpha$.

Істинні значення факторів матриці РЦКП встановлені на основі проведення пошукових експериментів і наведені в табл.4.3.

Для проведення РЦКП повнофакторного експерименту було складено матрицю планування експерименту, яку наведено в таблиці (Додаток Б).

Таблиця 4.3

Рівні факторів та варіювання параметрів оптимізації процесу зневоложення

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	α	1	0	1	α	
x_1 – віброприскорення, m/s^2		15	20	25		5
x_2 – робоча напруга, В/см	0	0	0	0	00	20
x_3 – час обробки, хв.	5	0	5	0	5	5
x_4 – коефіцієнт технологічного завантаження, %	0	0	0	0	00	10

Досліджувану функціональну залежність плануємо отримати у вигляді рівняння множинної регресії 2-го порядку:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_{ij} x_{ij} \quad (4.19)$$

Таблиця 4.4

Значення розрахункових критеріїв для отриманих регресійних моделей

Критерій оцінки	Позначення критерію	Функція відгуку
Коефіцієнт детермінації	R^2	0,31
Дисперсія адекватності	$S_{ад}$	10,94
Дисперсія відтворюваності	$S_{відт}$	4,73
Критерій Фішера	F	2,3
Критичне значення критерію Фішера, яке рівне значенню розподілу Фішера	$F_{\alpha, f1, f2}$	2,84 _{0,05;4;21}

Для оцінки адекватності отриманих регресійних рівнянь використаємо аналітичний метод аналізу. Гіпотезу про відтворюваність дослідів перевіряємо за

допомогою критерія Кохрена, який показує, що на 95 % рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, так як розрахункове значення критерію менше за табличне. Перевірку значимості коефіцієнтів регресії перевіряємо по t - критерію Стьюдента. Оцінку адекватності отриманих математичних моделей проводимо за критерієм Фішера, який показав, що розрахункові значення значно нижчі від критичних. Відповідно отримані регресійні моделі адекватно описують поверхні відгуку та їх можна використовувати для оптимізації означеного процесу.

В результаті обробки експериментальних даних в статистичному середовищі STATISTICA 6.0 було отримано коефіцієнти комплексних рівнянь множинної регресії 2-го порядку та побудовано наступні залежності швидкості вологовіддачі продукту від віброприскорення контейнера, коефіцієнта завантаження контейнера, температури нагріву зерна та часу технологічного впливу (4.20).

Таблиця 4.5

Оптимальні технологічні параметри досліджуваного процесу зневоложення жому

Технологічний параметр	Раціональне значення
Віброприскорення, м/с ²	20 - 22
Напруженість електричного поля, В/см	45 - 55
Час технологічного впливу, хв	45
Коефіцієнт технологічного завантаження, %	60 - 65

За результатами проведених експериментів, досліджень та випробувань розробленого вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача на основі побудованих поверхонь відгуку досліджуваних процесів було визначено оптимальні технологічні параметри його роботи (табл. 4.5), компромісне значення яких було отримано методом Крамера в математичному середовищі "Mathcad 14".

$$W(\alpha, E, t, \Pi) = -42 - 0,3\alpha + 0,01\alpha^2 + 0,002E + 1,17t + 0,003t^2 + 0,64\Pi + 0,002\Pi^2 - 0,005\alpha t - 0,015t\Pi \quad (4.20)$$

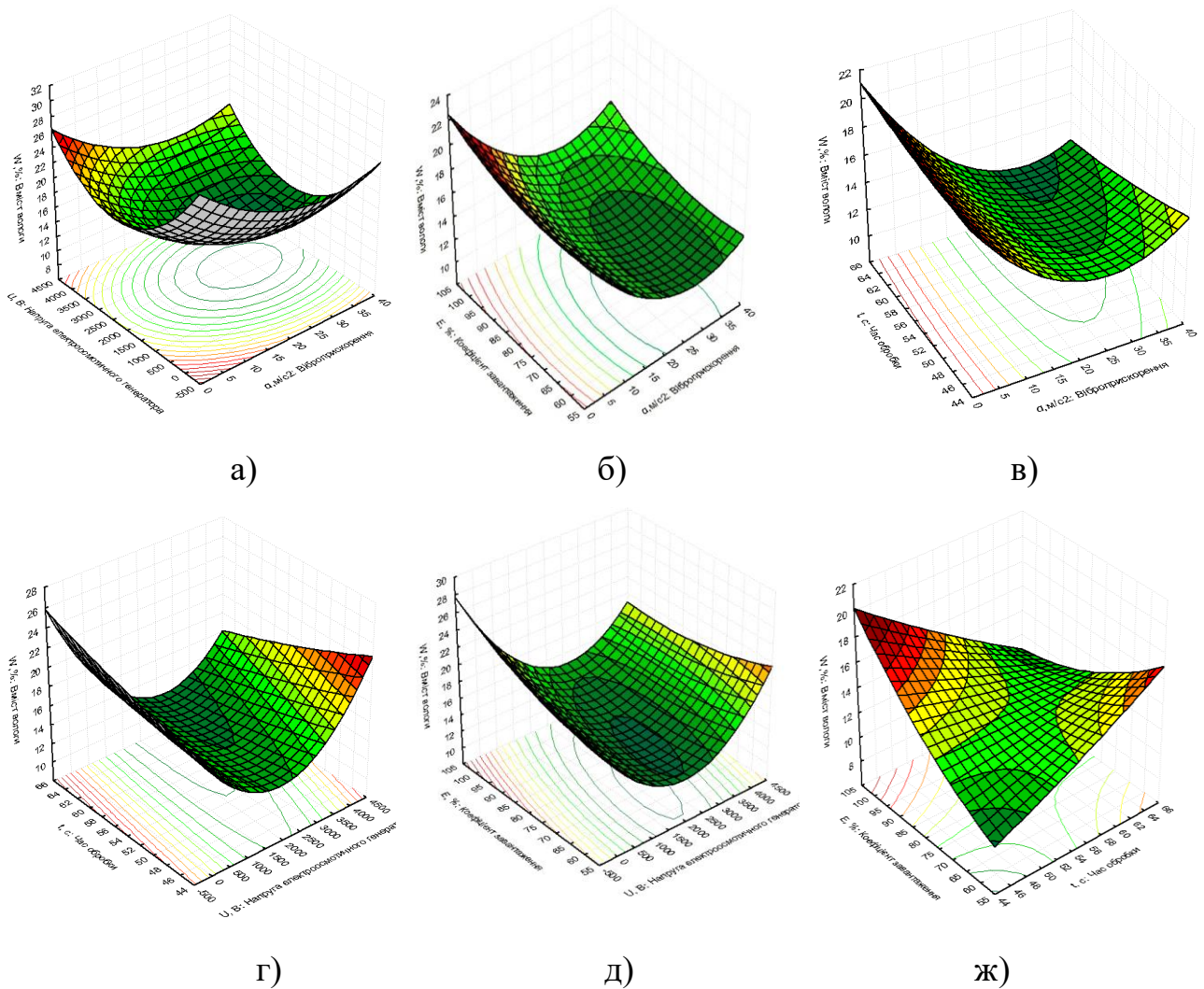


Рис. 4.26. Поверхні відгуків та їх проєкції для якісних параметрів процесу зневоложення жому: а) - напруга електроосмотичного генератора та віброприскорення; б) - час обробки та віброприскорення; в) - коефіцієнт завантаження оброблюваного матеріалу та віброприскорення; г) - час обробки та напруга електроосмотичного генератора; д) - коефіцієнт завантаження оброблюваного матеріалу та напруга електроосмотичного генератора; ж) - коефіцієнт завантаження оброблюваного матеріалу та час обробки

4.6. Перевірка адекватності математичної моделі

Ґрунтуючись на результатах теоретичного аналізу розробленого обладнання, було побудовано математичну модель виконавчого органа

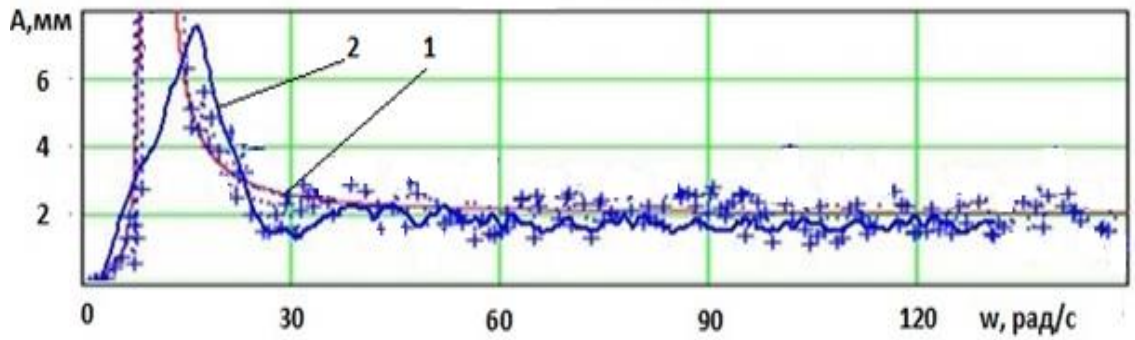
вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложувача, що дає змогу, враховуючи геометрично масові параметри, отримати апріорні залежності основних кінематичних та енергетичних параметрів системи. Взявши за основу теоретичні залежності, було здійснено експериментальні випробування; за допомогою вимірювальної апаратури отримано реальні значення амплітудно-частотних характеристик розробленого обладнання.

Перевірку адекватності математичної моделі проводимо за комплексними критеріями оцінки, які враховують кінематичні параметри руху виконавчих органів машини, які характеризують степінь проникнення вібрації у масу продукції $A = f(\omega)$ (рис. 4.27, а), частоту зміни положень рівноваги елементів технологічного середовища $v = f(\omega)$ (рис. 4.27, г), силові характеристики коливальної системи $a = f(\omega)$ (рис. 4.27, в), техніко-економічні характеристики досліджуваного процесу, що описуються зміною питомих витрат потужності $N_m = f(\omega)$ (рис. 4.27, б).

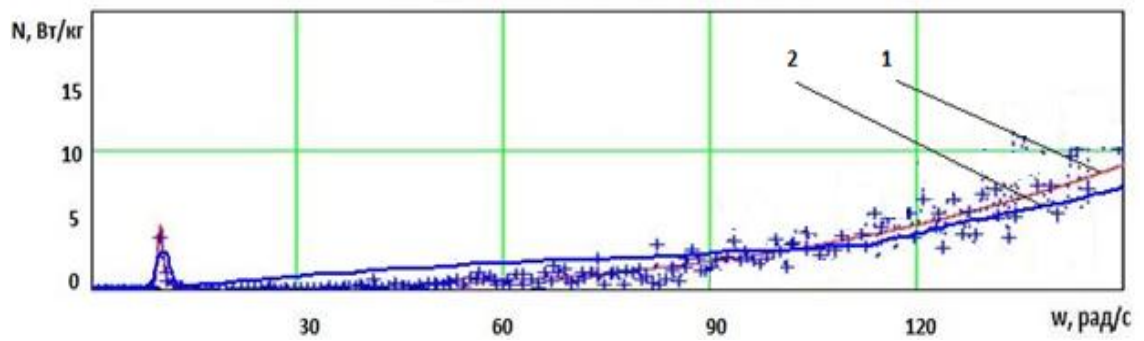
Відхилення експериментальних характеристик від теоретичних для представлених вище параметрів оцінки в межах вибраного ефективного режиму обробки сировини ($\omega = 80 \div 110$ рад/с) складають 8,1...11,3%.

4.7. Дослідження якісних показників

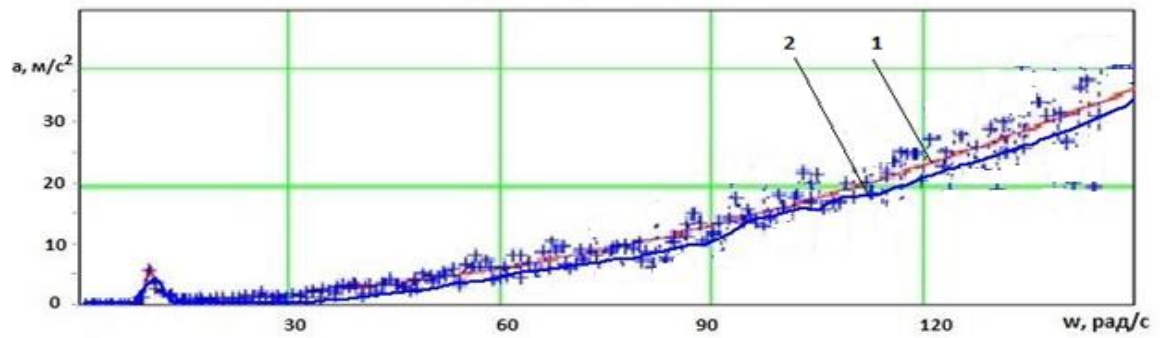
Збереження цінних компонентів які входять до складу харчового насіння баштанних культур є важливим завданням при його зневоложенні. Технологічні параметри процесу повинні бути такими, щоб запобігти незворотні зміни в харчовому насінні баштанних, які можуть привести до погіршення якості продукту. Тому поряд з інтенсифікацією процесу і зниженням енергетичних витрат оптимальні режими зневоложення повинні забезпечувати високу якість продукту.



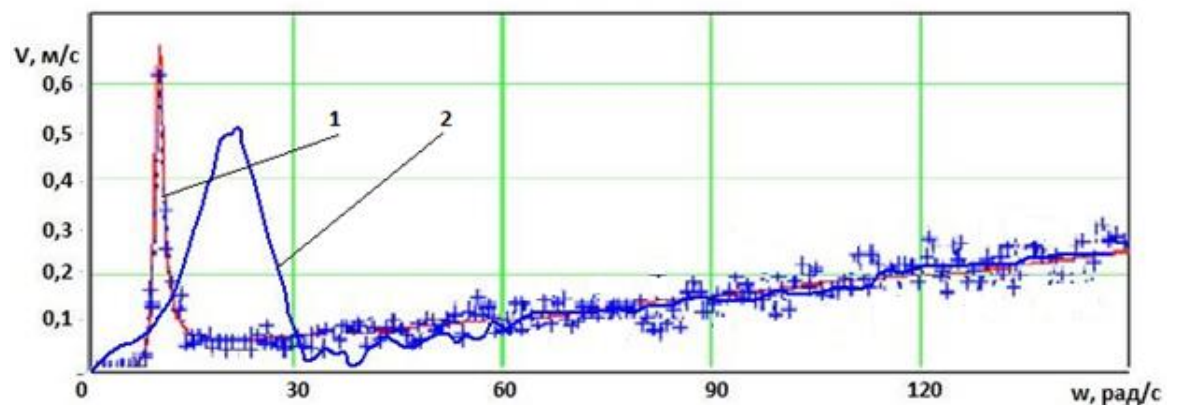
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.27. Графіки розподілу кінематичних характеристик розробленого обладнання: 1 - теоретична крива; 2 - експериментальні дані

Об'єктами досліджень були зразки сухого харчового насіння гарбуза сорту «Волзька сіра 92», що оброблялися у відровідцентровому електроосмосичному зневоложувачі при температурі сушильного агента 60 °С, швидкості руху повітря 1,2 м/с, амплітуді коливань 4 мм, напруженості електричного поля 80 В/см, частоті електричного струму 200 Гц та шпаруватості імпульсів 3.

Якісні показники харчового насіння гарбуза досліджувалися у Лабораторії якості кормів і сировини Інституту кормів та сільського господарства поділля НААН згідно з державними стандартами і представлені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Якісні показники харчового насіння гарбуза

Хімічний склад у натуральній речовині, %						
Назва зразка	Суха речовина	Протеїн	Жир	Клітковина	Зола	БЕР
1	2	3	4	5	6	7
Висушене насіння гарбуза, с. Волзька сіра 92	4,46	38,06	44,70	2,58	3,20	7,00
Хімічний склад у абсолютно сухій речовині, %						
Висушене насіння гарбуза, с. Волзька сіра 92		39,84	46,79	2,88	3,28	7,21

4.8. Висновки до 4 розділу

1. На основі приведених експериментальних досліджень були отримані основні параметри процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення харчового насіння баштанних та пектиномісткої сировини, що

дозволило обґрунтувати робочі режими їх здійснення та перевірити адекватність математичної моделі для даного діапазону, що становили в межах $5,8 \div 9,1\%$ відхилення.

2. Експериментальні залежності швидкісних характеристик процесу дозволили визначити зміну кінетики процесу зневоложення в залежності від зміни завантаження робочого контейнера, енергетичних та амплітудно-частотних характеристик.

3. Реалізація електроосмотичного ефекту в умовах розробленої машини дали можливість визначити такі характеристики силового поля: залежність швидкості зневоложення від асиметрії напівперіодів змінного струму, залежність зневоложення від густини струму, залежність швидкості зневоложення від частоти змінного струму, залежність швидкості вологовидалення від асиметрії напівперіодів струму при різній формі струму, залежність швидкості зневоложення від віброприскорення.

4. На основі теорії розмірностей та отриманих експериментальних даних досліджуваного процесу графоаналітичним способом було визначено критеріальне рівняння досліджуваної схеми зневоложення, що враховує як параметри тепло масообміну, вібромеханічні та електроосмотичні характеристики.

5. На основі результатів регресивного аналізу експериментальних даних була проведена оптимізація параметрів процесу зневоложення пектиномісткої сировини за такими критеріями оцінки як напруга електричного поля, віброприскорення, коефіцієнт завантаження робочої ємкості.

6. На основі досліджень якісних показників харчового насіння гарбузів, що були проведені в умовах Лабораторії якості кормів і сировини Інституту кормів та сільського господарства поділля НААН України, підтверджено відповідність стандартам обробленої продукції за хімічним складом у натуральній та абсолютно сухій речовині.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ОЦІНКА РІВНЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНІКИ НА КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНІСТЬ

5.1. Розрахунок основних техніко-економічних параметрів

Критерієм комплексної оцінки ефективності застосування запропонованого вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача (ВЕЗ-12) передбачається визначення оцінюваного варіанта на відповідність його світовому рівню, а також доцільності його використання у переробному виробництві.

Таблиця 5.1

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності нового зневоложувача ВЕЗ-12

Показники	Позначення	Одиниця виміру	Значення	
			Універсальна сушарка барабанного типу ПП «Технолог»	Новий зневоложувач ВЕЗ-12
Маса	m	кг	450	110
Оптова ціна	C	грн.	20000	6495
Продуктивність	Q	кг/год.	40	12
Споживана потужність	N	кВт	19	1,76
Обслуговуючий персонал	$\sum L$	люд.	1	1
Тижневе напрацювання машини	B_z	кг/тиж	550	450
Ставка оплати оператора за зміну	τ	грн.	380	380

Таблиця 5.2

Результати розрахунку річного економічного ефекту

Показники	Позначення	Одиниця виміру	Значення	
			Універсальна сушарка барабанного типу ПП «Технолог»	Новий зневоло-жувач ВЕЗ-12
Витрати на монтажні роботи	$B_{\text{виг}} = C_v \cdot E_n$	грн	3000	733,2
Загальні експлуатаційні витрати	$B = B_{\text{виг}} + B_{\text{ен}} + B_{\text{зн}}$	грн	4671,68	1326,14
Відрахування на амортизацію	$A = \frac{B \cdot 1,1 \cdot \alpha}{B_z \cdot T_r \cdot 100\%}$	грн/кг	-	1,68
Відрахування на ремонт і тех. обслугов.	$P = \frac{B \cdot 1,1 \cdot \alpha}{B_z \cdot T_r \cdot 100\%}$	грн/кг	-	1,32
Вартість енергоресурсів	$B_{\text{ен}} = B'_{\text{ен}} \cdot \Pi_{\text{ен}}$	грн/кг	-	112,94
Витрати на оплату праці оператора	$B_{\text{зн}} = B_{\text{зн.м}} \cdot n_m \cdot n_{\text{пр}}$	грн	-	480
Тижневі енерговитрати при експлуатації	$B'_{\text{ен}} = N_{\text{пр}} \cdot t_{\text{р.зм}} \cdot n_{\text{зм}} \cdot n_{\text{р}}$	грн	1191,68	153,95
Тижневий економічний ефект	$E = E_1 + E_2$	грн	-	3585,68
Термін окупності капіталовкладень	$T_{\text{ок}}^e = \frac{B}{E}$	років	-	0,4

Під час визначення доцільності ВЕЗ-12 для зневоложення високовологої сировини в основу розрахунків покладено комплексну енергетичну оцінку ефективності технологій і технічних засобів, виконану за типовими методиками [142, 143, 144].

Економічна ефективність від впровадження нової техніки оцінюється за допомогою річного економічного ефекту і терміну окупності додаткових капіталовкладень.

Результати розрахунку річного економічного ефекту представлені в табл. 5.2.

Розрахунок економічної ефективності нового зневоложувача високовологого насіння баштанних культур по відношенню до універсальної сушарки барабанного типу ПП «Технолог» склав 3585,68 грн. При цьому термін окупності від впровадження розробленого зневоложувача у виробництво становить 0,4 роки.

Методику розрахунку відображено в додатку В.

За аналог прийнято технологію зневоложення високовологої сировини з використанням універсальної сушарки барабанного типу ПП «Технолог»

Дані порівняльної характеристики наведено в таблиці 5.1.

Усі розрахунки порівняльного аналізу техніко-економічних показників запропонованої та базової технології відображено в таблиці 5.2.

За даними таблиці 5.2 можна зробити висновок, що ефективність застосування запропонованої технології має істотні переваги перед використанням базової, яка нині використовується для зневоложення високовологої сировини.

5.2. Визначення конкурентоспроможності розробленого вібрвідцентрового електроосмотичного зневоложувача

Сучасний стан переробних і харчових виробництв характеризується

використанням різноманітних технологій та обладнання, що розроблене як вітчизняними, так і закордонними науковцями.

Традиційне обладнання переробних і харчових виробництв частково потребують модернізації через значні енерговитрати, металоємність тощо. З точки зору конкурентоспроможності перевагу надають впровадженню більш складних процесів, проте різко зменшується ручна праця, видаляються зайві операції.

Оцінка розробленого обладнання за конкурентоспроможністю здійснювалася для досліджуваного процесу зневоложення високоволого харчового насіння башнних культур.

Для порівняння окремих машин використовували узагальнюючі показники оцінки двох видів, що визначались як середнє геометричне від окремих оціночних показників, але при визначенні одного із них були враховані ступені вагомості окремих показників [145, 146, 147].

Розглядали три подібних машин для зневоложення високоволого харчового насіння башнних культур: універсальна сушарка барабанного типу ПП «Технолог», сушильна установка безперервної дії «Дністер», універсальна сушильна установка ВСБК та ВЕЗ-12 (що розробляється). В якості показників для оцінки технічного рівня машин, були використані продуктивність (кг/год), встановлена потужність (Вт), енергонасиченість установки (Вт/кг), маса установки (кг), орієнтовна ціна (грн) (табл. 5.3).

За першим способом узагальнюючий показник оцінки визначаємо таким чином [150] :

$$D^j = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n}, \quad (5.1)$$

де d_1, d_2, \dots, d_n - бажаності для окремо взятих показників, які визначаються:

$$d_i = \exp\left[-e^{-(x_i^j - 4)}\right], \quad (5.2)$$

де x_i^j - значення кожного i – го показника за безрозмірною шкалою x^j .

Інтервали варіювання d_{\min}, d_{\max} (рис. 5.4) кожного показника залежать від його ступеня вагомості.

Значення показників x_i переносимо на безрозмірну шкалу x' з урахуванням масштабних лінійних коефіцієнтів [150]:

$$M'_x = \frac{(x_{i\max} - x_{i\min})}{(x'_B - x'_A)}, \quad (5.3)$$

де $x_{i\max}$ і $x_{i\min}$ - відповідно максимальне та мінімальне значення окремих номінальних показників машин;

x'_B - максимальне значення безрозмірної шкали x' для процесу зневоложення $d_{\max}=0,91$;

x'_A - мінімальне значення безрозмірної шкали x' для процесу зневоложення $d_{\min}=0,2$.

При цьому значення x'_A і x'_B визначаємо за формулами [114]:

$$x'_B = 4 + [-\ln(-\ln d_{\max})], \quad (5.4)$$

$$x'_A = 4 + [-\ln(-\ln d_{\min})]. \quad (5.5)$$

Кожне статистичне значення окремого показника оцінки машини x_i переводимо в масштабні значення шкали за такою методикою:

- для показників, збільшення яких покращує конкурентоспроможність машини (продуктивність):

$$x'_i = x'_A + \frac{x_{ic} - x_{i\min}}{M'_x}, \quad (5.6)$$

- для показників, збільшення яких погіршує конкурентоспроможність машини (питомі енерговитрати на привод, маса машини):

$$x_i = x'_B - \frac{x_{ic} - x_{i\min}}{M'_x}, \quad (5.7)$$

де x_{ic} - статистичне значення i -того показника.

Після чого знаходимо всі бажаності d_i за формулами (5.8 та 5.9), потім узагальнюючий D' -й показник за формулою (5.10). Максимальне значення узагальнюючого показника відповідає кращому варіанту машини.

Аналогічно першому способу, при визначенні узагальнюючого показника другого виду кожний окремий показник перетворюємо в

безрозмірну величину за наступними формулами:

- для показників, збільшення яких покращує конкурентоспроможність машини (продуктивність):

$$d_i = d_{i_{\max}} + (d_{i_{\min}} - d_{i_{\max}}) \cdot (x_i - x_{i_{\max}}) / (x_{i_{\min}} - x_{i_{\max}}), \quad (5.8)$$

- для показників, збільшення яких погіршує конкурентоспроможність машини (питомі енерговитрати на привод, габаритні розміри, маса машини):

$$d_i = d_{i_{\max}} + (d_{i_{\min}} - d_{i_{\max}}) \cdot (x_i - x_{i_{\min}}) / (x_{i_{\max}} - x_{i_{\min}}), \quad (5.9)$$

де $x_{i_{\max}}, x_{i_{\min}}$ - граничні значення окремих показників;

$d_{i_{\min}}, d_{i_{\max}}$ - безрозмірні оцінки показника (для розрахунків ми прийняли $d_{i_{\max}} = 5, d_{i_{\min}} = 1$).

Узагальнюючу оцінку визначаємо як середнє геометричне значення:

$$D'' = \sum_{i=1}^n a_i \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i^{a_i}}, \quad (5.10)$$

де a_i - ступінь вагомості i -того показника.

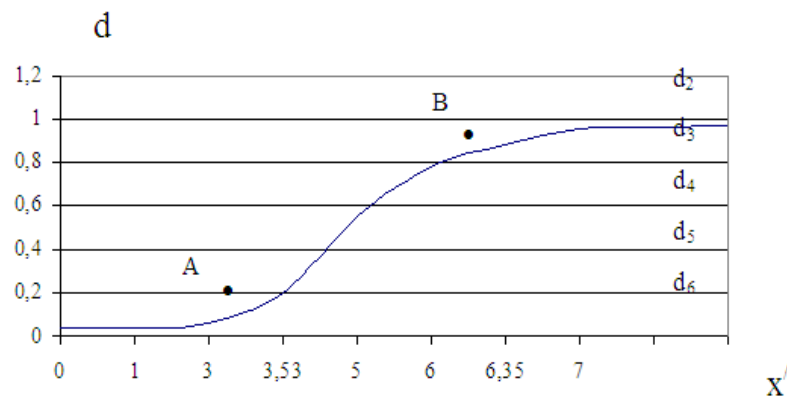


Рис. 5.1. Шкала значень коефіцієнта переваги (бажаності)

Ступінь вагомості показників визначаємо методом граничних і номінальних значень за формулою:

$$a_i = \frac{1 - q_i}{\sum_1^n (1 - q_i)}, \quad (5.11)$$

де q_i - частка покращення i -го показника в майбутньому:

$$q_i = \frac{P_{i\text{ep}}}{P_{i\text{н}}}; \quad (5.12)$$

$$q_i = \frac{P_{i\text{н}}}{P_{i\text{ep}}}, \quad (5.13)$$

де $P_{i\text{ep}}$ - граничне (прогнозоване) значення показника за i -м критерієм;
 $P_{i\text{н}}$ - номінальне значення показника за i -м критерієм.

Залежно від напрямку покращення показника використовуємо ту чи іншу формулу для визначення q_i . Якщо відповідно до вимог технічного прогресу показник треба зменшити, (наприклад, питомі енерговитрати на привод, об'єм, що займає машина, масу), то використовуємо формулу (5.12), якщо ці показники треба збільшити (наприклад, продуктивність), тоді використовуємо формулу (5.13).

В якості номінальних значень використовуємо середньо статистичні значення показників, які досягнуті в період проведення оцінки технічного рівня та рівня якості машин.

Граничні значення показників визначаємо як найкраще значення даного показника для групи машин, яка оцінюється. В нашому випадку ступені вагомості показників визначаються за результатами оцінки тільки даної групи машин (табл. 5.4). У випадку оцінки іншої групи машин аналогічного технологічного призначення вони будуть мати інше значення.

Оцінку технічного рівня розробленого вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача проводимо за представленими узагальнюючими техніко-економічними показниками, результати яких заносимо у таблиці 5.5, 5.6.

Розроблений вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач пройшов виробничу апробацію в умовах ТОВ «Компанія «Технопром-Продукт».

Таблиця 5.3

Вихідні дані

Варіант агрегату		Техніко економічні показники				
		1	2	3	4	5
		Продуктивність, кг/год	Встановлена потужність, Вт	Енергонасиченість установки, Вт/кг	Маса установки, кг	Орієнтовна ціна, грн
Проектна ВЕЗ-12	1	12	1,76	16	110	4888
Універсальна сушарка барабанного типу ПП «Технолог»	2	320	19000	42,2	450	20000
Сушильна установка безперервної дії «Дністер»	3	400	3000	54,5	550	6970
Універсальна сушильна установка ВСБК	4	144	22800	65,1	350	44335
Показник необхідно	5	Збільшити	Зменшити	Зменшити	Зменшити	Зменшити

Таблиця 5.4

Значення степенів вагомості показників

Варіант агрегату		Техніко економічні показники				
		1	2	3	4	5
		Продуктивність, кг/год	Встановлена потужність, Вт	Енергонасиченість установки, Вт/кг	Маса установки, кг	Орієнтовна ціна, грн
Проектна ВЕЗ-12	1	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Універсальна сушарка барабанного типу ПП «Технолог»	2	0,0617	0,2801	0,1917	0,2332	0,2333
Сушильна установка безперервної дії «Дністер»	3	0,0000	0,2787	0,2091	0,2369	0,2753
Універсальна сушильна установка ВСБК	4	0,1644	0,237	0,1938	0,1762	0,2286
Середнє значення ступеня вагомості для і-тої групи машин асер		0,3065	0,1990	0,1486	0,1616	0,1843
					Сума асер	1,0000

Таблиця 5.5

Безрозмірних та узагальнюючих показників якості I виду

Варіант агрегату		Техніко економічні показники						
		1	2	3	4	5	7	
		Продуктивність, кг/год.	Встановлена потужність, Вт.	Енергонасіченість установки, Вт/кг.	Маса установки, кг.	Орієнтовна ціна, грн.	Узагальнюючі показники D	Рейтинг
Проектна ВЕЗ-12	1	1,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0529	1
Універсальна сушарка барабанного типу ПП «Технолог»	2	3,7925	2,5581	2,8656	1,9091	4,0669	3,0495	2
Сушильна установка безперервної дії «Дністер»	3	5,0000	1,0000	1,8695	1,0000	1,0000	1,7966	3
Універсальна сушильна установка ВСБК	4	1,1358	2,0198	1,0000	2,8182	2,5643	1,6818	4
Найкращий узагальнюючий показник D = 3,0529								

Таблиця 5.6

Безрозмірних та узагальнюючих показників якості II виду

Варіант агрегату		Техніко економічні показники						
		1	2	3	4	5	7	
		Продуктивність, кг/год.	Встановлена потужність, Вт.	Енергонасіченість установки, Вт/кг.	Маса установки, кг.	Орієнтовна ціна, грн.	Узагальнюючі показники D	Рейтинг
Проектна ВЕЗ-12	1	0,5478	0,7445	0,7285	0,7327	0,7399	0,6941	1
Універсальна сушарка барабанного типу ПП «Технолог»	2	0,7195	0,6599	0,6729	0,6425	0,7117	0,6807	2
Сушильна установка безперервної дії «Дністер»	3	0,7760	0,5962	0,6440	0,6123	0,6026	0,6430	3
Універсальна сушильна установка ВСБК	4	0,5574	0,6388	0,6177	0,6177	0,6614	0,6279	4
Найкращий узагальнюючий показник D = 0,6941								

5.3. Розробка промислового вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача

5.3.1. Конструктивно-технологічна реалізація вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача

У лабораторії автоматизації виробничих процесів Вінницького національного аграрного університету було розроблено і виготовлено вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач (рис. 5.2 та рис. 5.3) який містить станину 1, що встановлена на опорах 12 та два основних структурних контури, які приводяться в рух електродвигунами 2, 3 і 20. Внутрішній контур вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача має у своєму складі підпружинений корпус 4 з перфорованим ротором 5, що приводиться в обертний рух електродвигуном 2, патрубків 6 і 7 відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. Кришку 8 з радіально розміщеними електродами 9 навколо центрального перфорованого патрубка 10, що розташований співвісно із перфорованим ротором 5 та знаходиться в центрі перфорованого ротора, який з'єднаний через проміжний шланг 11 із теплогенератором та компресором (теплогенератор та компресор на фігурах непоказані). Зовнішній контур ВЕЗ-12 містить пружні елементи 14, приводний вал 15 керованого дебалансного віброприводу 13 у якого є можливість [148, 149], дистанційно змінювати ексцентриситет центра мас дебалансів 16 та 21 за рахунок кута $\beta \pm \Delta_\beta$ між ними. Приводний вал 15 через компенсуючу муфту 17 приводиться в рух електродвигуном 3 та через підшипниковий вузол 18 та траверси 19 жорстко приєднаний до підпружиненого корпусу 4. Приводний вал 15 встановлений у корпус 15 керованого дебалансного віброприводу 13 на конічних підшипниках 18. На приводному валу 15 жорстко закріплений нерухомий дебаланс 21, а із протилежної сторони до підшипників 18 на приводному валу 15 виконано діаметрально протилежно дві зустрічно напрямлені канавки К1, що мають довжину, рівну половині кроку гвинта і в нормальному перерізі форму півкруга. У канавках розміщено шарики шпонки 22 на яких встановлено рухомий

дебаланс 16, який кінематично з'єднаний із механізмом регулювання положення 23 рухомого дебалансу 16 вздовж осі приводного валу 15 керованого дебалансного віброприводу 13. Механізм регулювання положення 23 рухомого дебалансу 16 складається із перетворювача руху 24, що виконаний у вигляді передачі гвинт-гайка яка перетворює обертовий рух валу крокового двигуна 20, що кріпиться до механізму регулювання положенням 23 у поступальний рух рухомого дебалансу 16 вздовж осі приводному валу 15.

Експериментальний ВЕЗ-12 працює наступним чином. Перед запуском дебаланси 16 та 21 керованого дебалансного віброприводу 13 знаходяться в діаметрально протилежному положенні (так само як у роботі [151]) тобто, кут між їхніми центрами мас становить $\beta = 180^\circ$. Їхній сумарний статичний момент (16 та 21) відносно центральної осі приводного валу 15 рівний нулю. Після чого вологий матеріал (сировину) довільної маси завантажують у перфорований ротор 5. Вмикають електродвигун 2. За рахунок відцентрових сил, виникаючих при обертанні перфорованого ротора 5 відбувається вилучення вільно зв'язаної вологи через патрубок 6 у підпружиненому корпусі 4 та ущільнення оброблювального матеріалу відносно стінок ротора. Після відпрацювання заданого часу центрифугування $t_y(c)$ та закону зміни його в часі $\omega_y(t)$ вимикається електродвигун 2. Після чого фіксується кришка 8, у перфорований патрубок 9 через проміжний шланг 11 при допомозі компресора і теплогенератора нагнітається теплоагент (теплогенератор та компресор на фігурах непоказані). Одночасно до радіально розміщених електродів 9 підводиться електричний струм зумовлюючи виникнення електроосмотичного ефекту [150] та дифузійного видалення вологи з матеріалу через патрубок 7.

Проведеним аналізом існуючих способів електрокінетичної обробки сировини із різними фізико-хімічними властивостями [151, 152] встановлено, що для видалення вологи з продуктів, найчастіше застосовується конвективний спосіб сушіння, істотним недоліком якого є високі енерговитрати процесу, а також те, що сушильний агент спочатку сприяє інтенсифікації переміщення

зони випаровування всередину та утворенню у поверхневих шарах продукту, збільшеного вмісту сухих речовин, що в подальшому стримує процес зневоложення і погіршує випаровування вологи з глибини продукту.

Комбінування конвективного та електроосмотичного зневоложення дещо стримує вищевикладені негативні зміни. У той же час, відсутність наукових основ комбінованого конвективно-електроосмотичного сушіння не дає повної уяви щодо механізмів даного процесу, впливу окремих чинників на швидкість його перебігу тому, що матеріали із різними фізико-хімічними властивостями є складними вологовмістними системами. Сучасні погляди на механізм електрокінетичних явищ ґрунтуються на уявленні про наявність подвійного електричного шару на межі розподілу фаз [153], що визначається швидкістю електродних процесів і, відповідно, переміщенням вологи всередині продукту.

Електроосмос, як окремий випадок електрокінетичних явищ, цілеспрямовано може бути використаний для зневоложення харчових продуктів, проте високі значення напруги негативно впливають на структуру і фізико-хімічні показники продукту, що обробляється [153].

Наступним етапом технологічного процесу зневоложення сировини із різними фізико-хімічними властивостями є увімкнення електродвигуна 3, крутний момент якого через компенсуючу муфту 17 передається на приводний вал 15 з дебалансами 16 та 21, для створення силової незрівноваженості системи, яка дозволить за рахунок постійного перемішування та розпушування ущільненої сировини інтенсифікувати технологічний процес сушіння. Після запуску електродвигуна 3 завдяки адаптивній системі керування (на фігурах не показана) починаються зростання частоти обертання ω валу електродвигуна 3 та відповідно приводного валу 15 аж до виходу на заданий резонансний режим роботи $\omega = \omega_0$, який є енергетично оптимальним для реалізації ВЕЗ-12 своїх функцій.

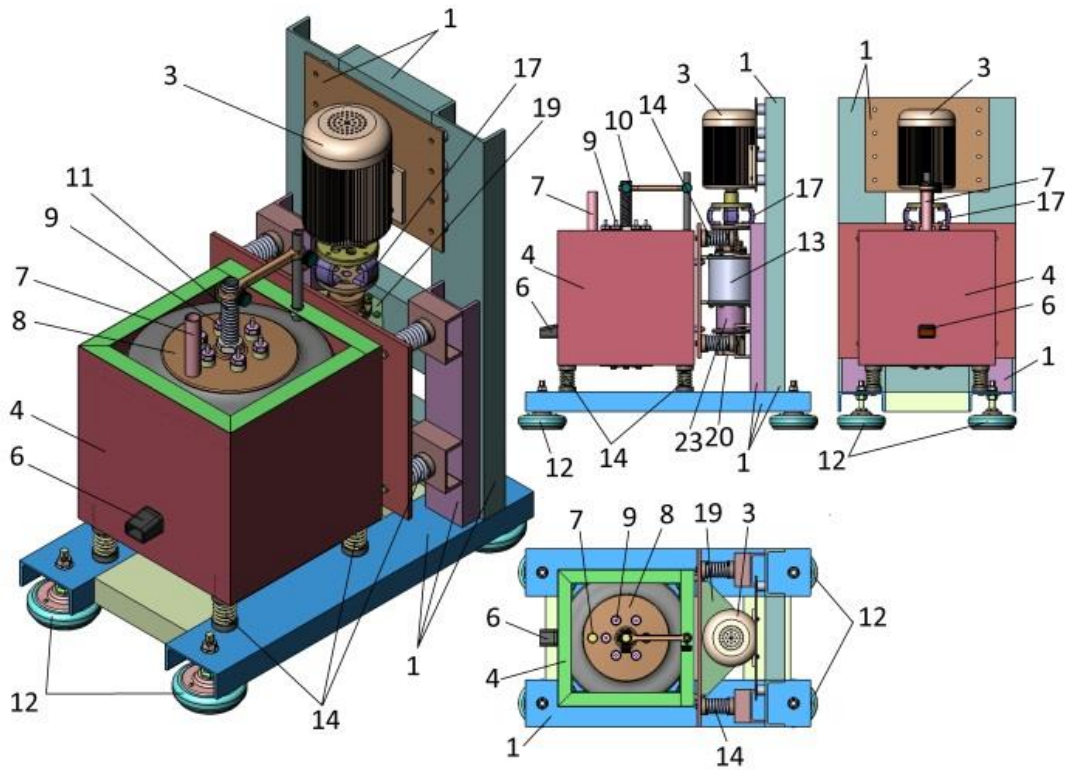


Рис. 5.2. Експериментальний вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач

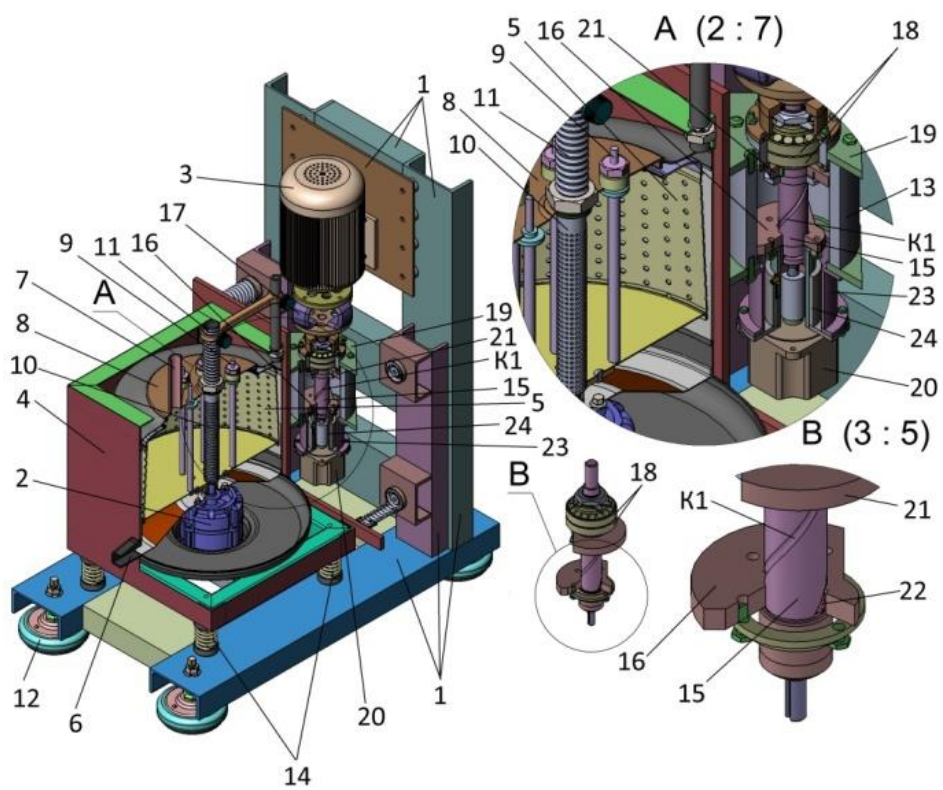


Рис. 5.3. Конструктивне рішення електромеханічної будови експериментального ВЕЗ-12

При резонансному режимі коливань власна резонансна частота коливань ω_0 коливної механічної системи (підпружиненого корпусу 4) дорівнює частоті циклічної вимушуючої сили керованого дебалансного віброприводу 13 вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача. Після виходу зневоложувача на заданий режим роботи по ω частоті коливань його циклічної вимушуючої сили F ($F = F \cdot \sin(\omega \cdot t)$), система керування (не показана на фігурах) починає виводити F амплітуду циклічної вимушуючої сили керованого дебалансного віброприводу 13 на задане технологічно оптимальне значення для забезпечення вібраційного перемішування яке характеризується коефіцієнтом перевантаження k [154] вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 (який в літературі ще називають коефіцієнтом режиму вібрації [155] або коефіцієнт динамічності [156]). Виведення амплітуди F циклічних, вимушуючої сил керованого дебалансного віброприводу 13, (та керування нею $F \pm \Delta F$) проводиться системою керування на основі промислового мікроконтролера через наступний контур системи керування: одноосьовий модуль позиціонування, кабель, сервопідсилювач, сервопривод (20) – шляхом виведення заданої кількості імпульсів для забезпечення певного кута повороту валу сервоприводу (або крокового двигуна) 20. В результаті команди від системи керування сервопривод 20 повертає свій вал на заданий кут α (значення величини кута повороту α валу сервоприводу обмежень немає, тобто може бути як більшим за 360° так і меншим за 360° і визначається лише кількістю імпульсів та кутовим кроком самого сервоприводу, ще однією особливістю сервоприводу є те, що він має здатність утримувати заданий кут повороту в часі). Поворот валу на кут α сервоприводу 20 зумовлює викручування (закручування) у передачі гвинт-гайка перетворювача руху 24 механізму регулювання положення 23 рухомого дебалансу 16. Викручування (закручування) у перетворювачі руху 24 зумовить рух рухомого дебалансу 16 вздовж основної осі приводного валу 15 керованого дебалансного віброприводу 13. Завдяки кінематичному зв'язку рухомого дебалансу 16 із перетворювачем

руху 24 він може обертатись навколо основної осі приводного валу 15 і переміщатись вздовж неї. Переміщуючись вздовж основної осі приводного валу 15 рухомий дебаланс 16 починає повертатись відносно даної центральної осі завдяки тому, що відбувається переміщення двох шарикових шпонок 22 котрі одночасно перебувають у двох пазах під шпонку на рухомому дебалансі 16 і у двох діаметрально протилежно зустрічно напрямлених канавках К1 приводного валу 15 керованого дебалансного віброприводу 13. В результаті повороту рухомого дебалансу 16 навколо основної осі приводного валу 15 керованого дебалансного віброприводу 13 змінюється сумарний статичний момент пари дебалансів 21 і 16 відносно центральної осі приводного валу 15. Зміна ексцентриситету пари дебалансів 21 і 16 призведе до зміни відцентрової циклічної вимушуючої сили F керованого дебалансного віброприводу 13. Завдяки вище описаним кінематичним зв'язкам між елементами (вузлами) запропонованого конструктивного рішення ВЕЗ-12 система керування отримує можливість динамічно в процесі зневоложення сировини із різними фізико-хімічними властивостями керувати амплітудою циклічної вимушуючої сили керованого дебалансного віброприводу 13. І як наслідок керувати амплітудою коливань підпружиненого корпус 4 та динамічними параметрами вібраційного поля, що пронизує сировину яка знаходиться в перфорованому роторі 5 на власній резонансній частоті коливань ($\omega = \omega_0$) коливного механічного ВЕЗ-12. Запропоноване конструктивне рішення дозволяє забезпечити заданий коефіцієнт перевантаження вібраційного поля в перфорованому роторі 5, а отже задану якість (інтенсивність) перемішування сипучого середовища на фоні комбінованого конвективно-електроосмотичного зневоложення при мінімальних затратах на електропривод (резонансний режим роботи) [157].

5.3.2. Розробка адаптивної схеми керування процесом вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення

Адаптивний ВЕЗ-12 містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі

теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту, на підпружиненому корпусі закріплено вібропривід який електрично з'єднаний із одним із двох входів детектора зсуву фаз, блоку оптимізації параметрів вібраційного впливу та першого компаратора, другий вхід першого компаратора електрично з'єднаний із одним із двох виходів блоку оптимізації параметрів вібраційного впливу та третім із трьох входів блоку оптимізації параметрів сушіння, а другий вихід блоку оптимізації параметрів вібраційного впливу електрично з'єднаний із одним із двох входів другого компаратора, другий вхід другого компаратора електрично з'єднаний із виходом детектора зсуву фаз, а другий вхід детектора зсуву фаз електрично з'єднаний із першим із трьох входів блока оптимізації параметрів сушіння з електродвигуном, що приводить в дію приводний вал з дебалансами та з виходом блока корекції частоти віброприводу, вихід другого компаратора електрично з'єднаний із входом блока корекції частоти віброприводу, другий вхід блоку оптимізації параметрів зневоложення електрично з'єднаний із одним із двох виходів блоку введення технологічних параметрів, а другий вихід блоку введення технологічних параметрів електрично з'єднаний із одним із двох входів блоку оптимізації параметрів вібраційного впливу, перший із трьох виходів блоку оптимізації параметрів зневоложення електрично з'єднаний із входом електроосмо блока, перший із двох виходів електроосмо блока має додатній потенціал і є електрично з'єднаний із розміщеними радіально електродами навколо центрального перфорованого патрубку, що розташований співвісно із перфорованим ротором та знаходиться в центрі перфорованого ротора, а другий із двох виходів електроосмо блока має від'ємний потенціал і є електрично з'єднаний із перфорованим ротором, другий із трьох виходів блоку оптимізації параметрів зневоложення електрично з'єднаний із входом термо-пневмо блока, перший із двох виходів термо-пневмо блока електрично з'єднаний із

компресором, а компресор за допомогою пневмопроводу з'єднаний із входом теплогенератора, вихід теплогенератора за допомогою пневмопроводу з'єднано із центральним перфорованим патрубком, а другий із двох виходів термо-пневмо блока електрично з'єднаний із електротеном теплогенератора, третій із трьох виходів блоку оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із електродвигуном, що надає обертового руху перфорованому ротору, вихід першого компаратора електрично з'єднаний із блоком корекції амплітуди віброприводу, а вихід блоку корекції амплітуди віброприводу електрично з'єднаний із кроковим електродвигуном приводу механізму зміни ексцентриситету дебалансів приводного валу.

Запропонована конструкція адаптивного ВЕЗ-12 реалізує ідею комбінованої взаємодії вібраційного та обертового руху перфорованого ротора в поєднанні з електроосмотичним ефектом, що дає можливість комплексної фізико-механічної дії на оброблювальне середовище для забезпечення інтенсивного вологовидалення. Застосування в конструктивному рішенні контуру автоматичного керування частотою циклічної вимушуючої сили дебалансного віброприводу корпусу із перфорованим ротором дозволяє забезпечувати та підтримувати на протязі циклу зневоложення енергетично вигідний резонансний режим роботи. Застосування в конструктивному рішенні контуру автоматичного керування амплітудою циклічної вимушуючої сили дебалансного віброприводу корпусу із перфорованим ротором дозволяє забезпечувати та підтримувати на заданому рівні на протязі циклу зневоложення технологічно оптимальне значення параметрів вібраційного поля при мінімальних енергозатратах (резонансний режим) для інтенсивного вібраційного перемішування оброблюваної сировини. Застосування в конструктивному рішенні контуру автоматичного керування кількістю гарячого повітря (продуктивність компресора), температурою гарячого повітря (продуктивністю теплогенератора) та величиною електричного поля для реалізації

електроосмотичного переміщення рідини із деякою заданою технологічно оптимальною для даного типу сировини швидкістю дозволяє в комплексі реалізувати та оптимізувати технологічний процес зневоложення сировини із конкретними фізико-хімічними показниками. Запропоноване конструктивне рішення адаптивного ВЕЗ-12 дозволяє реалізувати в автоматичному режимі із різною послідовністю їхньої зміни на протязі циклу зневоложення довільні (певні) закони зміни у часі всіх вище перерахованих чинників, що впливають на реалізацію технологічного процесу зневоложення сировини із конкретними фізико-хімічними показниками.

Адаптивний ВЕЗ-12 містить станину 1 та два основних структурних контури, які приводяться до руху електродвигунами 2, 3 і 20. Внутрішній контур адаптивного ВЕЗ-12 має у своєму складі підпружинений корпус 4 з перфорованим ротором 5, що приводиться в обертний рух електродвигуном 2, патрубками 6 і 7 відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. Кришку 8 з радіально розміщеними електродами 9 навколо центрального перфорованого патрубка 10, що розташований співвісно із перфорованим ротором 5 та знаходиться в центрі перфорованого ротора 5, який з'єднаний через проміжний шланг 11 з теплогенератором 12 та компресором 13. Теплогенератор 12 та компресор 13 з метою забезпечення керування їхніми вихідними параметрами з'єднанні із термо-пневмо блоком 24.

Зовнішній контур адаптивного ВЕЗ-12 містить пружні елементи 14, приводний вал 15 з ексцентрично розміщеними дебалансами 16, що оснащенні будь яким із відомих [158] механізмом зміни ексцентриситету дебалансів 16, який приводиться в дію та керується кроковим електродвигуном 20.

Приводний вал 15 через компенсуючу муфту 17 приводиться в рух електродвигуном 3 та через підшипникові вузли 18 та траверси 19 жорстко приєднаний до підпружиненого корпусу 4. На підпружиненому корпусі 4 жорстко закріплений давач вібрації 21 інформація від якого поступає в детектор зсуву фаз 22, блок оптимізації параметрів вібраційного впливу 28 та

перший компаратор 30. Вихід першого компаратора 30 з'єднано із блоком корекції амплітуди віброприводу 31, який завдяки електричному зв'язку керує кроковим електродвигуном 20 механізму зміни ексцентриситету дебалансів 16 приводного валу 15.

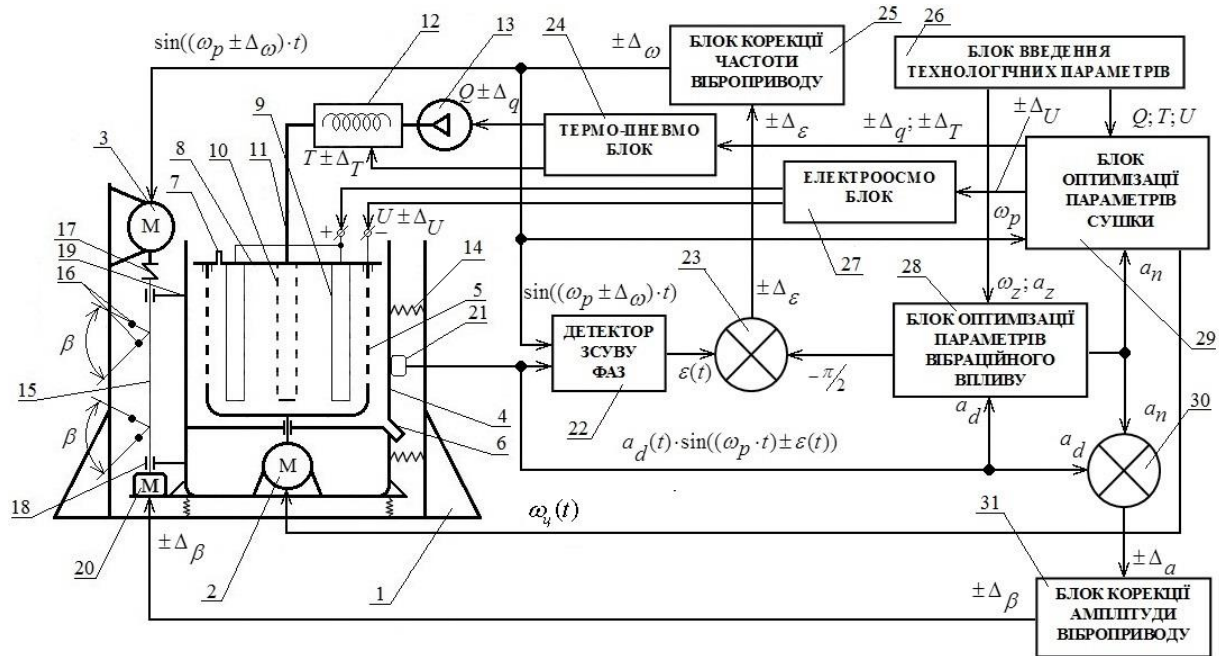


Рис. 5.4. Принципова схема ВЕЗ-12 з адаптивним регулюванням параметрів процесу

Електродвигун 3, що приводить в обертний рух приводний вал 15 підпружиненого корпусу 4 завдяки електричному зв'язку керується блоком корекції частоти віброприводу 25 та є також електрично з'єднаний із входом детектора зсуву фаз 22 та входом блоку оптимізації параметрів зневоложення 29. Блок оптимізації параметрів зневоложення 29 з метою забезпечення динамічного керування технологічними параметрами зневоложення електрично з'єднаний із термо-пневмо блоком 24 та електроосмо блоком 27. Вихід електроосмо блока 27 від'ємним потенціалом з'єднаний із перфорованим ротором 5, а додатнім потенціалом з'єднаний із радіально розміщеними електродами 9 навколо центрального перфорованого патрубку 10, що розташовані співвісно із перфорованим ротором 5 та знаходиться в центрі перфорованого ротора 5. Блок оптимізації параметрів зневоложення 29

також з'єднаний із електродвигуном 2, що надає обертового руху перфорованому ротору 5. Два входи другого компаратора з'єднано із виходом детектора зсуву фаз 22 та блока оптимізації параметрів вібраційного впливу 28, а вихід другого компаратора з'єднано із блоком корекції частоти віброприводу 25 підпружиненого корпусу 4. Блок оптимізації параметрів вібраційного впливу 28 з'єднано із входами блоку оптимізації параметрів зневоложення 29 та першого компаратора 30. Для керування технологічними та енергетичними параметрами процесу зневоложення в адаптивному ВЕЗ-12 застосовано блок введення технологічних параметрів 26 який електрично з'єднаний із блоком оптимізації параметрів вібраційного впливу 28 та блоком оптимізації параметрів зневоложення 29.

Адаптивний ВЕЗ-12 працює наступним чином: вологий матеріал (сировину) довільної маси завантажують у перфорований ротор 5. Перед початком реалізації процесу зневоложення сировини із конкретними фізико-хімічними показниками оператор адаптивного ВЕЗ-12 через блок введення технологічних параметрів 26 вводить (або вибирає із існуючого переліку) в блоки оптимізації параметрів вібраційного впливу 28 та оптимізації параметрів зневоложення 29 оптимальні значення технологічних параметрів для зневоложення певної сировини. До таких величин відносить:

- час центрифугування $t_y(c)$ перфорованого ротора 5 та закон зміни його в часі (закон зміни частоти обертання (центрифуги) $\omega_y(t)$ перфорованого ротора 5;
- час вібраційного змішування $t_s(c)$ сировини у перфорованому роторі 5 та закон його $k(t)$ в часі;
- оптимальну характеристику k вібраційного змішування (при змішуванні для визначення стану сипучого середовища використовують коефіцієнт перевантаження [159] k який в літературі ще називають коефіцієнтом режиму вібрації [163], або коефіцієнт динамічності [160], який

визначається за формулою: $k = a_d \cdot \omega_p^2 / g$, де a_d – дійсна амплітуда коливань підпружиненого корпусу 4, рівна $a_d = \sqrt{|a_d|_h^2 + |a_d|_v^2}$, де $|a_d|_v$ та $|a_d|_h$ миттєва вертикальна та горизонтальна складова коливань підпружиненого корпусу 4 зафіксована давачем вібрації 21, м; ω_p – кутова швидкість обертання приводного валу 15 з ексцентрично розміщеними на ньому дебалансами 16, c^{-1} ; g – прискорення вільного падіння, m/c^2)

- продуктивність компресора 13 (кількість повітря $Q \pm \Delta_q$) та закон зміни його в час $Q(t)$;
- продуктивністю теплогенератора 12 (температуру гарячого повітря $T \pm \Delta_T$) та закон зміни його в час $T(t)$;
- величину електричного поля $U \pm \Delta_U$ для реалізації електроосмотичного переміщення рідини із деякою заданою технологічно оптимальною для даного типу сировини швидкістю та закон зміни його в час $U(t)$;
- послідовність зміни в часі вище перерахованих параметрів, що впливають на реалізацію технологічного процесу зневоложення сировини із конкретними фізико-хімічними характеристиками.

Після введення технологічно оптимальних параметрів (або вибору із існуючого переліку) оператор запускає програму зневоложення. В результаті чого вмикається електродвигун 2. За рахунок відцентрових сил, виникаючих при обертанні перфорованого ротора 5 відбувається вилучення вільно зв'язаної вологи через патрубок 6 у підпружиненого корпусу 4 та ущільнення оброблювального матеріалу відносно стінок ротора. Відповідно до заданого часу центрифугування $t_u(c)$ та закону зміни його в часі $\omega_u(t)$ вимикається електродвигун 2 та вмикається електродвигун 3, крутний момент якого через компенсуючу муфту 17 передається на приводний вал 15 з дебалансами 16, для створення силової незрівноваженості системи, яка дозволить за рахунок

перемішування здійснити розпушування ущільненої сировини. Після виходу частоти обертання електродвигуна 3 на задане довільне значення ω адаптивна система керування починає в реальному масштабі часу обробляти інформацію про амплітуду, фазу і частоту коливань перфорованого ротора 5 яка надходить в детектор фаз 22, також в детектор фаз 22 надходить інформація про частоту та фазу циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16. Відповідно до [161, 162] при резонансі фаза амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 буде відставати від амплітуди циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16 на $-\pi/2$. Тому в детекторі фаз 22 проводиться визначення $\varepsilon(t)$ величини відставання (випередження) фази коливань підпружиненого корпусу 4 від приводного валу 15 з дебалансами 16. Інформацію про реальну фазу між коливанням підпружиненого корпусу 4, та вимушуючої силою приводного валу 15 з дебалансами 16 у формі кута $\varepsilon(t)$ надходить на другий компаратор 23, де постійно порівнюється із заданим енергетично оптимальним $-\pi/2$. Інформація про оптимальне значення $-\pi/2$ (резонанс) в другий компаратор 23 надходить із блоку оптимізації параметрів вібраційного впливу 28, куди вона була введена оператором адаптивного вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача через блок введення технологічних параметрів 26. В результаті порівняння існуючої фази $\varepsilon(t)$ із заданою оптимальною із енергетичної точки зору $-\pi/2$ отримується інформація $\pm\Delta_\varepsilon$ про те на скільки і з якої сторони від точки резонансу (ω_0) перебуває коливна система. Власна резонансна частота [157, 158, 159, 166] [170] ω_0 коливної системи залежить від маси завантаження вологим матеріалом (сировиною) та буде змінюватися в процесі зневоложення в зв'язку із міною маси через вилучення матеріалу патрубками 6 і 7 відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. На основі даної інформації блок корекції частоти віброприводу 25 підпружиненого корпусу 4 проводить корекцію електродвигуном 3 частоти

ω_p циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16 на величину $\pm\Delta_\omega$ з метою забезпечення та постійного підтримування рівності її із власною резонансною частотою, тобто забезпечення $\omega_p = \omega_0$. Даний контур керування здатний автоматично забезпечити та підтримувати резонансний режим роботи (коливань) адаптивного ВЕЗ-12 незалежно від маси завантаженими вологим матеріалом (сировиною) та в процесі її роботи.

Після адаптації ω_p частоти циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16 та забезпечення резонансного режиму роботи підпружиненого корпусу 4 другий контур адаптивної системи керування починає проводити адаптацію амплітуди циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16 для забезпечення заданого технологічно оптимального коефіцієнту перевантаження [162] k підпружиненого корпусу 4. Відповідно до [163], [163] оптимальним з точки зору якості змішування, часу змішування та енергозатрат на технологічний процес буде режим коли коефіцієнт перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 визначатиметься наступним виразом $[a_d \cdot \omega_0^2 / g] = 2.5 \dots 3$. З метою забезпечення необхідного значення коефіцієнту перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 блок оптимізації параметрів сушіння 29 розраховує значення a_n необхідного рівня амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 при кожній конкретній власній резонансній частоті ω_0 коливань коливної механічної системи адаптивного ВЕЗ-12. Обчислення a_n необхідного рівня амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 проводиться на основі виразу $a_n = [2.5 \dots 3] \cdot g / \omega_0^2$. Необхідне значення амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 порівнюється із дійсним значенням a_d амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 в першому компараторі 30. В результаті порівняння на виході першого компаратора 30 отримується величина $\pm\Delta_a$ яка показує на скільки і в яку сторону відхиляється амплітуда

коливань підпружиненого корпусу 4 від необхідної амплітуди для забезпечення технологічно оптимального коефіцієнту перевантаження [162] k підпружиненого корпусу 4. Дана інформація надходить в блок корекції амплітуди віброприводу 31, який завдяки електричному зв'язку керує кроковим електродвигуном 20 механізму [161] зміни ексцентриситету дебалансів 16 приводного валу 15. Кроковий електродвигун 20 механізму зміни ексцентриситету дебалансів 16 завдяки зміні кута між верхніми та нижніми параметрами дебалансів на величину $\pm\Delta_\beta$ змінює амплітуду циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16. Динамічна зміна амплітуди циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16 дозволяє забезпечити заданий технологічно оптимальний коефіцієнт перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 адаптивного ВЕЗ-12.

Завдяки злагодженій роботі першого та другого контуру адаптивної системи керування електроприводами адаптивного ВЕЗ-12 відбувається автоматичне самоналагодження коливної системи на резонансний режим роботи і автоматичне самоналагодження на резонансній частоті на забезпечення заданого перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 з метою забезпечення технологічно оптимального перемішування сировини. Після виходу адаптивного вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача на оптимальні вібраційні впливи з енергетичної ($\omega_p = \omega_0$) та технологічної (k) точки зору включається третій контур автоматичного керування, що постійно функціонує по заданій програмі на фоні роботи двох основних перших контурів. Третій контур автоматичного керування через перфорований патрубковий 9 через проміжний шланг 11 при допомозі компресора 13 і теплогенератора 12 нагнітається теплоагент. Закон зміни продуктивності $Q(t)$ компресора 13 та закон зміни $T(t)$ температури теплоагента у теплогенераторі 12 реалізовується по наперед заданій програмі і є прив'язаним до власної резонансної частота ω_0 коливної системи адаптивного ВЕЗ-12.

Тому, що ω_0 залежить від маси завантаження вологим матеріалом (сировиною) та буде змінюватися в процесі зневоложення в зв'язку із міною маси через вилучення матеріалу патрубками 6 і 7 відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. Також від власної резонансної частоти ω_0 коливної системи адаптивного ВЕЗ-12 залежить і якість вібраційного перемішування яка характеризує коефіцієнт перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 за рахунок підтримування a_n необхідного рівня амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4. Одночасно до радіально розміщених електродів 9 підводиться електричний потенціал $U(t)$, зумовлюючи виникнення електроосмотичного ефекту. Під електроосмосом [164] розуміється рух рідини через капіляри або пористу діафрагму під дією сил зовнішнього електричного поля. Електроосмос обумовлений тим, що на кордоні двох фаз (твердої і рідкої) за рахунок перерозподілу електричних зарядів утворюються подвійний електричний шар. Якщо вздовж кордону цих середовищ прокласти різницю потенціалів від зовнішнього джерела, то заряджений шар рідини під дією сил зовнішнього поля буде переміщатися в бік протилежно зарядженого джерела, захоплюючи за собою за рахунок внутрішнього тертя шари незарядженої рідини. Так виникає рух рідини відносно твердої фази. Закон зміни електричного потенціалу $U(t)$ визначається третім контуром автоматичного керування та є динамічно в'язаний із іншими факторами ($\omega_0(t), k(t), Q(t), T(t)$), що впливають на технологічний процес зневоложення сировини із конкретними фізико-хімічними характеристиками. Завдяки комплексній дії всіх факторів, що впливають на технологічний процес зневоложення запропоноване конструктивне рішення дозволяє:

- за допомогою центрифугуванню відділити незв'язану вологу із сировини;
- реалізувати при мінімальних енергозатратах ($\omega_p = \omega_0$) розрихлення та постійне стабільне ($k = constata$) перемішування сировини;

- за допомогою електроосмотичного ефекту виділити залишки зв'язаної вологи із найменших частин сировини;
- за допомогою інтенсивного перемішування та гарячого теплоагента видалити із сировини залишки незв'язаної вологи після електроосмотичного ефекту [165].

5.4. Висновки до 5 розділу

1. Проведений розрахунок та функціонально-вартісний аналіз досліджуваної машини та її аналогів на конкурентноспроможність, що виявив її високий рівень розробок приведених у дисертації.

2. Розроблено робочу документацію для виготовлення вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача та схему адаптивного регулювання параметрів процесу вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложення, що дозволяє адекватно реагувати на зміну фізико-механічної дії при обробці певної високовологої сировини за мінімізації енерговитрат.

3. Розроблений вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач пройшов успішну виробничу апробацію в умовах ТОВ «Компанія «Технопром-Продукт», м. Вінниця; тривалість зневоложення високовологого харчового насіння баштанних зменшилась в 2,1–2,5 рази, з очікуваним тижневим економічним ефектом 3585,68 грн, при терміні окупності 0,4 роки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу традиційних способів зневоложення високовологої сільськогосподарської продукції була обґрунтована доцільність застосування комбінованого вібровідцентрового впливу на високовологий продукт та розроблена конструкційно-технологічна схема його реалізації для обробки харчового насіння баштанних культур та пектиномісткої сировини, особливостями якої стали висока адаптивність та технологічна гнучкість.

2. Розроблена математична модель процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення дозволила отримати аналітичні та графічні залежності основних кінетичних, силових та енергетичних параметрів руху виконавчих органів досліджуваної технологічної системи, встановити межі ефективного робочого режиму розробленого процесу: амплітуди коливань контейнера 1,18...2,1 мм, кутова швидкість приводного валу 80...100 рад/с, при споживаній потужності 800...900 Вт, пікові значення сумарної амплітуди становлять 11 мм при 8...10 рад/с, додатковий приріст рушійної сили за даної технологічної дії становить 120 Н, 150 Н та 400 Н відповідно для електроосмотичної, відцентрової та вібраційної дії.

3. При реалізації електроосмотичного ефекту були отримані такі характеристики силового поля: віброприскорення $A\omega^2$ - 38 м/с²; асиметрія амплітуд змінного струму $A+/A$ - 7,5 мм/мм; середнє значення густини струму i - 5 мА/см²; частота змінного струму F - 200 Гц; ефективна форма струму - трикутна (пилкоподібна); координати установки вібробуджувача відносно корпусу установки складають 270°; сила струму 0,001 А, напруга 800 В, час обробки 45 хв ; енерговитрати на видалення 1 кг вологи знижуються у 2,7 рази порівняно з традиційним конвективним сушінням, враховуючи що останній метод є переважно руйнівним для термолабільних дисперсних систем.

4. На основі проведених експериментальних досліджень встановлено

раціональні технологічні параметри обробки харчового насіння баштанних культур та пектиномісткої сировини: коефіцієнт завантаження робочого контейнера 0,5-0,75, температура теплоносія 60 °С, час технологічного впливу 40-45 хв.

5. Порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних досліджень за енергетичними та амплітудно-частотними критеріями оцінки виявив розбіжність отриманих значень в межах 8...9,1 %, що підтверджує адекватність математичної моделі та її доцільність при використанні у розрахунках.

6. При використанні теорії розмінностей, II теореми Федермана-Букінгема та результатів експериментального аналізу було виведено критеріальне рівняння, що враховує особливості вібротехнічного та електроосмотичного впливу на сировину, дозволяє обґрунтувати алгоритм розрахунку досліджуваних тепломасообмінних процесів та обладнання.

7. Розроблено робочу документацію для виготовлення вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача та із схемою адаптивного регулювання робочих параметрів процесу, що дозволяє оперативно реагувати на зміну характеристик силового впливу та зміну властивостей оброблюваної сировини при мінімізації енерговитрат на процес.

Проведений розрахунок досліджуваної машини на конкурентоспроможність показав її позитивну оцінку ефективності порівняно з існуючими аналогами. Розроблений вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач пройшов виробничу апробацію в умовах ТОВ «Компанія «Технопром-Продукт», м. Вінниця; тривалість зневоложення високовологого харчового насіння баштанних зменшилась в 2,1–2,5 рази, очікуваний економічний ефект складає 3585,68 грн., за тижневий період експлуатації машини при очікуваному терміні окупності 0,4 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

-
1. Обладнання технологічних процесів фармацевтичних та біотехнологічних виробництв: навч. посібник для студю вищ. навч. закл. / М. В. Стасевич, А. О. Милянч, І. О. Гудзьова [та ін.] за ред. В. П. Новікова. – Вінниця: Нова книга, 2012. 408 с.
 2. Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Дуб В. В. Сучасний стан проблеми підвищення енергоефективності процесу сушіння насіння зернових культур. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2018. № 1. С. 231–243.
 3. Савойський О. Ю. Дослідження електроплазмолізу яблучної сировини в процесі комбінованого сушіння, *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь: ТДАТУ*. 2020. № 20, т. 4. С. 247–258.
 4. Хімічні технології харчових добавок та косметичних засобів [Електронний ресурс] : наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. О. В. Олабоді] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2021. 176 с.
 5. Паламарчук І. П., Зозуляк О. В., Зозуляк І. А. Обґрунтування конструктивної схеми вібраційної фільтраційно-осмотичної сушарки. *Збірник наукових праць ВНАУ Серія: Технічні науки*. 2011. № 9. С. 173–182.
 6. Паламарчук І. П., Зозуляк О. В., Липовий І. Г. Розробка математичної моделі процесу вібровідцентрового сушіння кератиномісткої сировини, *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. Вип. 45. Т.2. С.124–129.
 7. Palamarchuk I., Zozulyak O., Palamarchuk V. Determination of basic hydrodynamic and diffusive parameters electro-osmotic drying of pectin containing raw materials. *Ukrainian Journal of Food Science* 2014. Volume 2, Issue 2, P. 318–325.
 8. Янович В. П., Зозуляк О. В., Качур Я. Ю. Визначення оптимальних робочих параметрів вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача

жому. *Всеукраїнський НТЖ Вібрації в техніці та технологіях*. 2014. №1 (73). С. 122–126.

9. Зозуляк О. В., Зозуляк І. А., Чубик Р. В. Вібровідцентрова електроосмотична сушарка для зневоложення високо вологої сировини. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*. 2015. № 2 (90). С. 52–56.

10. Паламарчук І. П., Зозуляк О. В., Зозуляк І. А., Чубик Р. В. Електромеханічна модель адаптивної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв»*. 2015. № 166. С. 226–235.

11. Рапина Т. В. Высококонцентрированные кварцевые суспензии, полученные на основе нанотехнологического подхода и коллоидно-химических закономерностей дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків, 2009. 213 с.

12. URL: <http://lib.lntu.info/books/knit/auvp/2011/11-88/page5.html>. (дата звернення: 2012).

13. Севостьянов І. В. Теоретичні основи процесів потокового віброударного фазового розділення вологих дисперсних матеріалів та обладнання для їх реалізації: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08. Київ, 2013. 423 с.

14. Паламарчук І. П., Цуркан О. В., Зозуляк О. В., Герасімов О. О. Інтенсифікація процесів зневоложення насіння за рахунок використання вібраційного та електроосмотичного ефектів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 1 (65). С.110–114.

15. Калиновська Т. В., Крапивницька І. О., Оболкіна В. І., Кияниця С. Г. Використання вторинних продуктів переробки винограду під час розробки інноваційних технологій кондитерських виробів. *Обладнання та технології харчових виробництв*. Донецьк. 2013. № 30. С. 75–80.

16. Севостьянов І. В. Технологія та обладнання для віброударного

зневоднення вологих дисперсних матеріалів: монографія. Вінниця : ВНАУ. 2020. 303 с.

17. Севостьянов І. В., Поліщук О. В., Слабкий А. В. Розробка та дослідження установки для двокомпонентного віброударного зневоднення відходів харчових виробництв. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. С. 40 – 46.

18. Серьогін О. О. Ресурсоощадні технології у харчовій промисловості [Електронний ресурс]: підручник. Серьогін О. О., Осьмак О. О., Риндюк Д.В.. Київ: НУХТ. 2018. 414 с.

19. Цукрова промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс] : наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. О. В. Олабоді] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ. 2018. 92 с.

20. Яровой С. Л., Заборсин А. Ф., Луцик Ю. П., Буляндра А. Ф. Термовлагопроводность свекловичного жома и других коллоидных капиллярнопористых материалов. *Пищевая промышленность*. 1983. № 2. С. 38–41.

21. Гусарова О., & Шапар Р. Вплив параметрів сушильного агента та умов зневоднення на кінетику вологообміну, *Грааль науки*, 2021. №1. С. 204–208. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.19.02.2021.041>

22. Горбачов Ю. Г., Хруцький А. О., Громадський А. С., Ліфенцов О. С. Обґрунтування параметрів експериментального стенду для дослідження вібраційних машин та процесу вібротранспортування, *Вісник Криворізького національного університету*. 2020. Вип. 50. С. 169–173.

23. Відходи та безвідходне виробництво в харчовій промисловості [Електронний ресурс] : наук.-допом. бібліогр. покажч. двома мовами 1956–2020 рр. / [упоряд. І. М. Мельничук] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2021. 110 с.

24. Орлов В.Д. Исследование процесса сушки свекловичного жома

глибокого пресования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. 1978. Киев. 208 с.

25. Кардаш Ю. Н. Биоконверсия свекличого жома с получением углеводно-белковой кормовой добавки для комбикормов. *Технології хачових продуктів і комбікормів*. Зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 20 – 24 вересня 2021р. Одеса. 2021. С. 24–26.

26. Шишацкий Ю. И., Голубятников Е. И. Техника сушки пектиносодержащего растительного сырья – свекловичного жома. Зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф.. 2011. № 1 (32). С. 391– 402.

27. Використання гідроколоїдів в харчовій промисловості [Електронний ресурс] : наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. Т. П. Фесун] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ. 2021. 236 с.

28. Степанова Т. М. Инновационные идеи в технологии сладких железированных блюд на основе плодово-ягодного сырья. *Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків. 2015. №39 (1148). С. 108–114

29. Касабова К. Р., Самохвалова О. В., Олійник С. Г. Характеристика новых джерел харчових волокон для збагачення борошняних кондитерських виробів. *Восточно-Европейський журнал передових технологій*. 2013. 6/11 (66). С. 8–13.

30. Самохвалова О. В. Технологія маффінів оздоровчого призначення : монографія. Харків: Видавництво "Технологічний Центр". 2015. 120 с.

31. Скрипніков Ю. Г., Вінницька В. Ф. Технологія вирощування, зберігання і переробки гарбуза. Мічурінськ: Міч ДФУ. 2002 р. 20 с.

32. ДСТУ 3190-95. Гарбузи продовольчі свіжі. Технічні умови Київ 1995. 31 с.

33. Скрипніков Ю. Г., Коровкіна М. Ю. Використання гарбуза для виробництва консервів. *Праці ВДАУ*. 2003. Т. 2. С. 115–116.

34. Поперечний А. М., Корнійчук В. Г., Подзіраєв О. Г. Сушіння насіння

гарбуза в сушарці псевдо зрідженого шару. *Наукові пр. Одес. нац. акад. харч. Технологій*. 2009. Вип. 41, т.1. С. 111–115.

35. Цуркан О. В., Присяжнюк Д. В. Математична модель розповсюдження озону у шарі зерна при його сушінні із використанням віброозонуючого комплексу. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2018. Вип. 298. С. 55–58

36. Маренченко О. І. Інноваційні технології зневоднення харчової сировини : дис. ... канд. техн. наук: 133. Одеса, 2020. 201 с.

37. Аббасов З. М. Технологические основы механизации бахчеводства. Баку: Башиоглы. 1998. 244 с.

38. Богданов А. А. Технология механического обезвоживания : монографія, М-во образования и науки Украины, Нац. Горн. Ун-т. : Днепропетровск : НГУ. 2016. 100 с.

39. Rao M. A. Predicting the flow properties of food suspensions of plant origin. *Food Technol*, 1987. № 41. P. 45–48.

40. Бур'ян О. В., Дрьомін О. І., Запотоцька О. В., Ковбаса В. М. Сухі сніданки коекструзійної технології. *Нові ідеї в харчовій науці - нові продукти харчовій промисловості: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ НУХТ, 13-17 жовтня 2014р. м. Київ, 2014. С. 70–71.*

41. Джушок В.А. Фільтрування. Теорія та практика поділу суспензій. Київ. 1971. 440 с.

42. Rao M. A. Measurement of flow properties of fluid foods. Developments, limitations and interpretation of phenomena. *J. Texture Studies*. 1978. № 8. P. 257–282.

43. Бойченко М. С., Вовк О. О., Гладишева В. А., Бойченко С. В., Шаманський С. Й.. Перспективи мікробіологічного способу очищення стічних вод від біорезистентної фармацевтичної продукції. *Наукоємні технології*. 2018. 1(31). С. 87–95. DOI: 10.18372/2310-5461.37.12375

-
44. Monero O., Walters K. An elastic effects in unsteady pipe flows. *Rheol. Acta*, 1980, Vol. 19, N 3. P. 277–284.
45. Буренков Н. А. Интенсификация технологических процессов в пищевой промышленности при помощи низкочастотных колебаний. Киев: Техника, 1969. 194с.
46. Іскович-Лотоцький Р.Д., Обертюх Р.Р., Поліщук О.В. Використання гідроімпульсного приводу в обладнанні переробних виробництв : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 116 с.
47. Сафонова О. М. Наукове обґрунтування та розроблення технологій борошняних кондитерських і хлібопекарських продуктів з використанням нетрадиційної борошняної сировини: автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.18.01. Київ, 2007. 47 с.
48. Веселовська Н. Р., Зелінська О. В. Моделі інтегрованих комп'ютерних систем управління технологічними процесами на основі сучасних інформаційних технологій : монографія. Вінниця : ДНУ ім. В Стуса. 2020. 442 с.
49. Іскович-Лотоцький Р. Д., Івашко Є. І. Особливості конструктивних рішень навісних гідромолотів для зондування ґрунтів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. Вип. 1. С. 21–26.
50. Кузьо І. В., Корендій В. М., Прокопець Н. І. Оптимізація геометрії лопатей тихохідного вітроколеса з метою максимізації відбору потужності з потоків повітря. *Вісник національного університету «Львівська політехніка»: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2011. № 702. С. 59–68.
51. Іскович-Лотоцький Р. Д., Іванчук Я. В. Вібраційні та віброударні пристрої для розвантаження транспортних засобів : монографія. Вінниця : ВНТУ. 2012. 156 с.
52. Опирский Б. Я., Денисов П. Д. Новые вибрационные станки: Конструирование и расчет. Львов: Світ. 1991. 160 с.

53. Шпачук В. П. Синергетичний ефект у динаміці багатовимірних механічних систем : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 172 с.

54. Valevskaya L., Sokolovskaya O., & Iegorova A. Визначення показників якості зразків насіння кіноа. *Grain products and mixed fodder's*, 2022, 21(3). P. 6-11. [HTTPS://DOI.ORG/10.15673/GPMF.V21.I3.2228](https://doi.org/10.15673/GPMF.V21.I3.2228)

55. Казаков Е. Д., Кретович В. Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. Колос. 1980. 154 с.

56. Семенюк Д. П. Обладнання для холодильної та електромагнітної обробки харчових продуктів: навчальний посібник у 2 частинах. Ч. 1. / Д. П. Семенюк, О. В. Петренко, Є. М. Якушенко. Харків: ДБТУ. 2022. 184 с.

57. Korchak O. Investigation of oscillatory displacement of the hydraulic presses moving parts during their braking in the upper initial position. *Вісник ТНТУ*. 2020. № 3 (99). С. 66–74.

58. Луговський О. Ф., Шульга А. В., Берник. І. М., Гришко І. А., Мовчанюк А. В., Зілінський А. І. Ультразвукові технологічні процеси. Розпилення та екстрагування: монографія. Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю. В. 2022. 288 с.

59. Казаков К. В. Разработка энергосберегающей технологии сушки свекличного жома с исследованием параметров шнекового преса: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Киев. 2002. 156 с.

60. Корчак О. С. Розвиток наукових основ проектування гідравлічних пресів з насосно-акумуляторним приводом та індивідуальним сервоприводом : дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.05. Краматорськ. 2018. 471 с.

61. Русанов С., Луняка К., Михайлик В. Моделювання гідродинаміки віброкиплячих шарів. *Вісник ТДТУ*, 2006. Том 11. № 3. С. 189–195.

62. Чубик Р. В. Оптимізація роботи адаптивних вібраційних технологічних машин за критерієм розповсюдження вібрації у віброкип'ячому шарі. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*.

Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. 2015. № 822. С. 19–23.

63. Богачук В. В., Головченко О. М., Кухарчук В. В. Математична модель процесу конвективного сушіння сипких матеріалів. *Вісник ВПІ.* 2005. № 3. С. 67–73.

64. Цуркан О. В. Аналіз вібраційних технічних засобів для сушіння насіння гарбуза. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2021. № 4 (103). С. 5–14.

65. Калиновская О. П. Разработка вибрационных установок для сушки и охлаждения продуктов в пищевой и смежных отраслях промышленности: дис. ... докт. техн. наук. Львов. 1984. 350 с.

66. Іващенко Н. В., Буляндра О. Ф., Вербицький Б. І., Луцик Ю. П., Бондар В. І. Коефіцієнти ефузії бурякового жому *Zbiór raportów naukowych. Z 40 Zbiór artykułów naukowych. Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej "Inżynieria i technologia. Naukowe Wyszukaj "* (30.10.2015 - 31.10.2015) - Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2015. - 24 str. 10–13 с.

67. Паламарчук І. П.. Науково-технічні основи розроблення енергозберігаючих вібромашин механічної дії харчових і переробних виробництв : дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. Київ. 2008. 479 с.

68. Козак А., Гордийчук И., Семенишина И., Вильчинская Д. Анализ процесса воздействия электромагнитных импульсных сигналов на биологических вредителей, находящихся в почве. *MOTROL, Lublin – Rzeszów* 2015, Vol. 17, № 1. С. 45–51.

69. Пазюк О. Д., Паламарчук І. П. Оптимізація процесу сушіння зерна. Задачі та шляхи вирішення. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*, Серія: Технічні науки. 2011. №9. С. 164–172.

70. Романова, К. В., Пасюга, В. Н., Дядченко, А. В., Катрич В. А., & Шкорбатов Ю. Г. Вплив мікрохвильового випромінення різних довжин хвиль на стан хроматину в ізольованих клітинах букального епітелію

людини. *Фотобіологія та фотомедицина*. 2019. Том 9. № 1, 2. С. 56–62.

71. Савченко В. В., Синявський О. Ю., Бунько В. Я. Вплив магнітного поля на посівні якості насіння зернових культур. *Енергетика і автоматика*. 2020. №2. С. 15–22.

72. Базалій В. В., Малигін Б. В., Дюдяєва О. А. Магнітно-імпульсна обробка насіння як метод підвищення врожайності зернових культур. *Таврійський науковий вісник*. 2011. № 76. С. 3–10.

73. Chavan U. D., Amarowicz R. Osmotic Dehydration Process for Preservation of Fruits and Vegetables. *Journal of Food Research*. 2012, Vol. 1, N. 2. May. P. 202–209.

74. Михайлов В. М., Северін О. А., Михайлова С. В. Теоретичне обґрунтування механізму електроосмотичного зневоднення харчових продуктів. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. Збірник наук. пр. Харків : ХДУХТ. 2006. № 2 (4). С. 211–219.

75. Черевко А. И., Скрыпник В. А., Фарисеев А. Г. Влияние электроосмоса на процессы массопроводности в свином мясе. *Техника и технология пищевых производств*. 2014. №. 1. С. 115–120.

76. Аппарат для электроосмотического обезвоживания материалов: патент 565677 СССР № 2093485/26. Заявл. 25. 07. 77. Опубл. 24. 08. 77, бюл. № 27 (53).

77. Устройство для электроосмотического обезвоживания материалов: патент 2273513 Российская Федерация. № 2004130757/15. Заявл. 10.02.205. Опубл. 10.04.2006, бюл. № 10.

78. Устройство для электроосмотического обезвоживания материалов. : патент 2273513 Российская Федерация. № 2004130757/15. Заявл. 10.02.205. Опубл. 10.04.2006, бюл. № 10.

-
79. Электроосмотический обезвоживатель пастообразного материала: патент 175484 № 913681/23-26. Заявл. 24.VI I.1964. Оpubл. 09.X.1965, бюл. № 20.
80. Способ сушки материалов А.с. 1016643. СССР №3352518/24-06.. Заявл. 27.10.1981. Оpubл. 07.05.1983, бюл. № 17.
81. Способ сушки материалов. А.с. 1147907 СССР. № 3653985/24-06.. Заявл. 18.10.1983. Оpubл. 30.03.1985, бюл. № 12.
82. Способ зарядки частиц материалов. А.с. 1393485 СССР. № 4082460/31-26.. Заявл. 07.05.1986. Оpubл. 07.05.1988, бюл. № 17.
83. Способ сушки материалов. А.с. 1423877 СССР. № 4042124/24-06.. Заявл. 21.03.1986. Оpubл. 15.09.1988, бюл. № 34.
84. Сушильная фармацевтическая центрифуга CDR/«SULZER». URL: <http://ru.sultrade.cz/>. (дата обращения 2012).
85. Центрифуга с натяжным мешком и нижним ножевым съёмом осадка. Серия PLD/«АКИКО». URL: <http://akiko.ru/tsentrifug>. (дата обращения 2012).
86. Трёхколонная центрифуга со скребками и нижней выгрузкой. Серия SGZ/«АКИКО». URL: <http://akiko.ru/tsentrifug>. (дата обращения 2012).
87. Центрифуги фильтрующие, центрифуга с нижней выгрузкой осадка DEC/ООО «Тирит».URL:<http://tirit.org>.(дата обращения 2012).
88. Вертикальная центрифуга на платформе с верхней выгрузкой. Серии PSB/PBZ/«АКИКО». URL: <http://akiko.ru/tsentrifug>. (дата обращения 2012).
89. Вертикальная центрифуга на платформе с верхней выгрузкой. Серии PSB/PBZ/«АКИКО». URL: <http://akiko.ru/tsentrifug>.(дата обращения 2012).
90. Шишацкий Ю. И., Голубятников Е. И. Техника сушки пектиносодержащего растительного сырья – свекловичного жома. *Вопросы современной науки и практики*. Ун-т им. В. И. Вернадского. 2011. № 1 (32). С. 391–402.
91. Відходи та безвідходне виробництво в харчовій промисловості [Електронний ресурс] : наук.-допом. бібліогр. покажч. двома мовами 1956–

2020 рр. / [упоряд. І. М. Мельничук] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2021. 110 с.

92. Логвін В. М., Мартинюк А. С. Розрахунок швидкості адсорбції за умов безперервної карбонізації в одноступінчастому апараті. *Współpraca Europejska NR 2(9) 2016 / European Cooperation 2016. Vol. 2(9). С. 73–83.*

93. Мирончук В. Г., Орлов Л. О., Українець А. І., Пушанко М. М., Гуцалюк В. М. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості : Навчальний посібник, Нац. ун-т харч. технологій; Вінниця : Нова книга, 2004. 288 с.

94. Буляндра А. Ф., Иващенко Н. В. Исследование процессов сушки свекловичного жома при низкотемпературных режимах. *Пром. теплотехника*, 1999. Т. 21. № 2-3. С.67–71.

95. Kunz W. Die Nieder temperaturtrocknung in Verbindung mit der traditionellen Schnitzeltrocknung. *Zuckerindustrie*, 1983, V. 108, N. 9. S. 868–870.

96. Методики по визначенню нормативних показників питомих витрат паливноенергетичних ресурсів в цукровій промисловості. К.: Цукор України, 2006. 150 с.

97. Белик В. Г., Зозуля С. А., Жарик Б. Н. Справочник по технологическому оборудованию сахарных заводов. Київ: Техніка. 1982. 304 с.

98. Austmeyer K. E., Poersch W. Niedertemperatur – Schnitzeltrocknung: Grundlagen und Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit – Teil 1. *Zuckerindustrie*, 1983, V. 108, N. 9. S. 861–868.

99. Austmeyer K. E., Poersch W. Niedertemperatur – Schnitzeltrocknung: Grundlagen und Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit – Teil 2. *Zuckerindustrie*, 1983, V. 108, N. 11. S. 1033–1041.

100. Austmeyer K. E., Poersch W. Niedertemperatur – Schnitzeltrocknung: Grundlagen und Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit – Teil 3. *Zuckerindustrie*, 1984, V. 109, N. 5. S. 411–419.

101. Kunz W. Die Niedertemperaturtrocknung in Verbindung mit der

traditionellen Schnitzeltrocknung. Zuckerindustrie, 1983, V. 108, N. 9. S. 868–870.

102. Schroeder D. Einige Gedanken zum Einsatz einer Niedertemperatur – Trocknung innerhalb der Schnitzeltrocknung. Zuckerindustrie, 1983, V. 108, N. 2. S. 126–135.

103. Valentin P. Erhohte Abwarmenutzung der Zuckerfabrik in der Niedertemperaturtrocknung. Zuckerindustrie, 1983, V. 108, N. 11. S. 1025–1033.

104. Штангеев К. О. Сушка цукру та жому в бурякоцукровій галузі. Київ. 2015. 44 с.

105. Технології цукру та підготовки води : дайджест. Вип. 48 [Електронний ресурс] / Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка ; підгот. О. В. Олабоді. Київ, 2018. 27 с.

106. Установка для сушки влажного зернистого материала с помощью перегретого пара: патент 2079077 Российская Федерация. № 92016629/06. Заявл. 08.07.91. Опубл. 10.05.97, бюл. № 13.

107. Andersson V. Beet pulp drying using pressurized superheated steam. Int. Sugar J, 1999, Vol. 101, N. 1207. P. 340–344.

108. Пазюк В. М. Теплотехнічні основи сушіння насіннєвого зерна : дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.06. Київ. 2019. 356 с.

109. Присяжнюк Д. В. Обґрунтування параметрів процесу та розробка віброозонуючого комплексу для сушіння зернової сировини: канд. техн. наук : 05.05.11. 2019. 154 с.

110. Сільськогосподарські та меліоративні машини: підручник / Д. Г. Войтюк, В. О. Дубровін, Т. Д. Іщенко та ін.; за ред. Д. Г. Войтюка. К.: Вища освіта, 2004. 544 с.

111. Лімонт А. С., Лімонт З. А. Кузовні машини для внесення твердих органічних добрив: потужність на привод робочих органів і пропускну спроможність машин. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2022. Вип. 6(37). ч.І. С. 127–133.

112. Добрицкий А. А.. Повышение эффективности технологического

процесса сушки и разработка конструкции сушилки высоковлажных семян бахчевых культур: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Луганск. 2011. 189с.

113. Сушарка для насіння гарбуза / MotyGmbH. URL: <http://moty.at/en/pumpkin-seed-drying-plant>. (дата звернення 2012).

114. Сушилка для семян овощных и бахчевых культур / MeНас, ОАО. URL: <http://118041.ua.all.biz>. (дата обращения 2012).

115. Сушилка сыпучих материалов: патент 2059174 Российская Федерация. № 5050967/06. Заявл. 07.05.1992. Оpubл. 27.04.1996, бюл. № 4.

116. Плоская сушилка семян тыквы / Romberge.r. URL: <http://lionagro.ru/catalog>. (дата обращения 2013).

117. Вібровідцентрова сушарка: патент України на корисну модель № 80873, МПК F26B 17/30. Заявл. 02.01.2013. Оpubл. 10.06.2013, бюл. № 11.

118. Паламарчук І. П., Зозуляк О. В., Герасимов О. О. Розроблення комплексу вимірювання та автоматичного регулювання параметрів вібраційно-осмотичного сушіння. *Український міжвідомчий науково-технічний збірник «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні»*. Львів. 2012. Вип. 46. С.159–165.

119. Ланець О. В., Шпак Я. В., Лозинський В. І. Реалізація ефекту зоммерфельда у вібраційному майданчику з інерційним приводом. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. Вип. 47. 2013. С. 12–28.

120. Білоус Б. Д., Берник М. П., Білоус А. Б. Математична модель динаміки підпружиненого маятника як завгодно розміщеного в плоскому вібраційному полі. *Вібрації в техніці і технологіях*. 1997. № 4. С. 70–72.

121. Бекшаев С. Я., Фомин В. М. Основы теории колебаний. Учебное пособие. Одесса: Одесская государственная академия строительства и архитектуры. 2013. 103 с.

122. Потураев В. Н., Дырды В. И., Круш И. И. Динамика существенно-нелинейных вибротранспортных систем для перемещения больших масс

сыпучих грузов. Киев: Наук. думка. 1980. 246 с.

123. Борис В. В. Електротехнологія. Навчально – методичний посібник із контрольними завданнями. Київ. 2007. 285 с.

124. Григоренко С. М., Скляр Р. В. Адаптивні методи утилізації відходів птахівництва. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*: електронне наукове фахове видання ТДАТУ. 2021. Вип. 11, том 1. С. 1–13.

125. Каплан И. А. Практические занятия по высшей математике // Численные решения алгебраических и трансцендентных уравнений, матричное исчисление, векторный анализ и интегрирование линейных дифференциальных уравнений первого порядка с частными производными. Харьков. 1972. 412 с..

126. Лойцянский Л. Г., Лурбе А. И. Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2. Динамика. Дрофа. 2006. 447 с.

127. Фірсова С. Г., Долгова Д. Д. Методичний інструментарій прийняття управлінських рішень при виведенні товару на новий ринок. *Вісник ОНУ ім. І.І. Мечникова*. 2019. Т. 24. № 6(79). С. 84–90.

128. Духин С. С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев: Наук. Думка. 1975. 246 с.

129. Гачкевич О., Терлецький Р. Моделі термомеханіки багатокomпонентних деформівних твердих тіл. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2008. № 8. С. 26–36

130. Верхола Л. А., Пушанко Н. Н. Наладка жомосушительной установки. *Сахар*. 2009. № 8. С. 34–40

131. Притула Н. М. Математичне моделювання нестационарного масоперенесення в газотранспортних мережах та підземних сховищах газу: дис. ... док. тех. наук : 01.05.02. Львів, 2021. 304 с

132. Костира С. В. Обґрунтування режимних та конструктивних параметрів пристрою комплексної дії для зневоднення гірської маси: канд. техн. наук : 05.05.06. 2019. 169 с.

133. ДСТУ 7453:2013 Зерно, зернобобові та продукти їх перероблення. Київ: Національний стандарт України, 2015. 3 с.

134. Косулина Н. Г., Черенков А. Д. Низкоенергетические электромагнитные технологии в растениеводстве. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2008. № 4. С. 80–85.

135. Паламарчук І. П., Цуркан О. О., Зозуляк О. В., Герасімов О. О. Інтенсифікація процесів зневоложення насіння за рахунок використання вібраційного та електроосмотичного ефектів. *Всеукраїнський НТЖ Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця: ВНАУ. 2012. №1(65). С. 110–115.

136. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник/Царенко О. М. та ін.; за ред. С. С. Яцуна. Київ: Мета. 2003. 448 с.

137. Бурдо О. Г., Калинин Л. Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах: учебник. Одесса: Друк. 2008. 348с.

138. Єлізаров О. В. Порядок планування та обробки первинних результатів випробувань в теплодимокамері. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*: збірник наукових праць. Черкаси: чіпб ім. Героїв чорнобиля НУЦЗ України. 2017. № 2. С. 13–19 .

139. Кирилков В. А., Мукосій Г. Д. Вплив характеристик кадрового складу ВАТ «Будівельне управління хмельницької атомної електростанції» на важкість травматизму. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2010. №4. С. 267–270.

140. Шевченко В. А. Оценка степени зависимости уровня знаний, полученных студентами по дисциплине «Информатика», от выбранных факторов с помощью регрессионного анализа. *Механіка та машинобудування*. 2012. № 1. С. 162–166.

141. Шолохов С. М. Теоретичні основи планування експерименту та обробки експериментальних даних [електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня доктор філософії за освітньонауковою програмою «Спеціальні системи електронних комунікацій» спеціальністю 172 електронні комунікації та радіотехніка / С. М. Шолохов, І. І. Самборський, Ю. О. Головін ; КПІ ім. Ігоря сікорського. - електрон. Текст. Дані (1 файл). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 159 с.

142. Галич І. В. Підвищення ефективності експлуатації машинно-тракторного агрегату зниженням коливань елементів : канд. техн. наук : 05.05.11. Харків, 2021. 193 с.

143. ДСТУ 4397:2005. Методики економічного оцінювання техніки на етапі випробування. [Чинний від 28-04-2005]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 20 с.

144. Гулько І. В., Спирін А. В., Холодюк О. В. Надійність систем та обґрунтування інженерних рішень. Вінниця: ВДАУ. 2006. 76 с.

145. Гарькавий А. Д., Петриченко В. Ф., Спирін А. В. Конкурентоспроможність технологій і машин. Вінниця: Тірас. 2003. 32с.

146. Нагірний Ю. П. Обґрунтування інженерних рішень. Київ: Урожай. 1994. 216 с.

147. Єремєєв В., Прокоф'єв Є., Наумук О., & Брянцев, О. Програмне забезпечення для оптимізації процесу методом бокса-бенкіна у разі трифакторного експерименту з декількома вихідними параметрами. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2019. 19(3). С. 295–307. Retrieved із <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/266>

148. Вибровозбудитель: патент 1281312 ССРС. № 3925547/24-28. Заявл. 28.05.1985. Опубл. 07.01.1987, бюл. № 1, 3 с.

149. Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. Керовані вібраційні технологічні машини. Вінниця: ВНАУ. 2011. 355 с

150. Барінова Н. О. Нелинейные электрофорез и электроосмос для единичных частиц и сложных систем : дис. ... канд. хім. наук : 02.00.11. Київ, 2016. 164 с.

151. Соколова В. П. Оценка разупрочнения твердых полезных ископаемых при использовании адсорбционно-активных сред. *Загальні питання технології збагачення: Збагачення корисних копалин*, 2014. Вип. 57 (98). С. 15–21.

152. Ялпачик В. Ф., Тарасенко В. Г. Вибір температури заморожування рослинної сировини по вимороженій воді. *Холодильна техніка і технологія*, 2008. № 5 (115). С. 36–40.

153. Бойко Ю. П. Исследование электроосмоса в условиях перекрытия двойных слоев в водных дисперсиях алюмосиликатов : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. хим. наук. Київ. 1981. 24 с.

154. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: Львівська політехніка. 2004. 248 с.

155. Лянна О. В., Луняка К. В., Русанов С. А. Исследование виброкипящего слоя ионита (постановка задачи). *Науковий вісник ХДМІ*. 2011. № 2 (5). С. 212–216.

156. Дубіковський А. О., Дем'яненко П. О. Трикомпонентний волоконно-оптичний акселерометр. Принцип дії волоконно-оптичного давача. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2009. №39. С. 121–126.

157. Вібровідцентрова електроосмотична сушарка. Заявл. 16.11.2015. Опубл. 25.05.2016, бюл. № 10.

158. Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. Керовані вібраційні технологічні машини : монографія, Вінниця: ВНАУ. 2011. 355 с.

159. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: Львівська політехніка. 2004. 248 с.

160. Тіщенко В. С. Удосконалення методів розрахунку експлуатаційних

навантажень та зносів колінчатих валів локомотивних енергетичних установок : дис. ... канд. тех. наук : 05.22.07. Харків, 2010. 147 с.

161. Ярошенко Л. В., Чубик Р. В., Деревенько І. А. Обґрунтування параметрів системи керування електромеханічним дебалансним віброприводом вібраційних машин на основі штучної нейронної мережі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 3 (102). С. 52–63.

162. Пісарев В. П., Корнев О. В. Оцінювання впливу «конструкційного» тертя в підвісці на просторові коливання транспортного засобу. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2023. № 1(41). С. 92–103.

163. Цуркан О. В. Розробка та дослідження енергоощадного вібраційного змішувача для внесення преміксів в комбікорми: дис... канд. техн. наук: 05.05.11. Харків, 2004. 155 с.

164. Патент України на корисну модель № 107157, МПК F26B 17/30 Адаптивна вібровідцентрова електроосмотична сушарка. Заявл. 16.11.2015. Опубл. 25.05.2016, бюл. № 10.

ДОДАТКИ

Дадаток А
Данні для розрахунку чисел подібності

		D	$W,$ %	$dW,$ %	M	C_H	β	f	$St \cdot 10^{-6}$	Pe
П= 0,75 %	1	0,216	48	7	0,7	111,53	0,0031	80	5,558	1,8
	2	0,216	31	17	1,7	184,8	0,0043	80	7,716	1,8
	3	0,216	21	10	1	228,65	0,0020	80	3,613	1,8
	4	0,216	10	11	1,1	363,4	0,0013	80	2,442	1,8
П= 0,75 %	1	0,216	49	6	0,6	111,53	0,0026	100	3,811	2,2
	2	0,216	38	11	1,1	184,8	0,0027	100	3,994	2,2
	3	0,216	30	8	0,8	228,65	0,0016	100	2,312	2,2
	4	0,216	21	9	0,9	363,4	0,0011	100	1,598	2,2
П= 0,75 %	1	0,216	51	4	0,4	111,53	0,0017	120	2,117	2,7
	2	0,216	45	6	0,6	184,8	0,0015	120	1,815	2,7
	3	0,216	38	7	0,7	228,65	0,0014	120	1,686	2,7
	4	0,216	29	9	0,9	363,4	0,0011	120	1,332	2,7

Дадаток Б

Чотирифакторна матриця для визначення оптимальних параметрів процесу зневоложення

№ дослідю	Фактори					Параметри				
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	F(x ₁ x ₂ x ₃ x ₄)	a, м/с ²	U, В f=15кГц	t, с	E, %	W, %
1	+	+	+	+	+	25	80	60	90	12
2	-	+	+	+	+	15	80			
3	+	-	+	+	+	25	40	60	90	16
4	-	-	+	+	+	15	40	60	90	18
5	+	+	-	+	+	25	80	70	90	16
6	-	+	-	+	+	15	80	70	90	17
7	+	-	-	+	+	25	40	70	90	16
8	-	-	-	+	+	15	40	70	90	17
9	+	+	+	-	+	25	80	70	70	15
10	-	+	+	-	+	15	80	60	70	17
11	+	-	+	-	+	25	40	60	70	16
12	-	-	+	-	+	15	40	60	70	17
13	+	+	-	-	+	25	80	70	70	14
14	-	+	-	-	+	15	80	70	70	15
15	+	-	-	-	+	25	40	70	70	14
16	-	-	-	-	+	15	40	70	70	16
17	+α	0	0	0	+	35	60	55	80	12
18	-α	0	0	0	+	5	60	55	80	17
19	0	+α	0	0	+	20	100	55	80	14
20	0	-α	0	0	+	20	20	55	80	19
21	0	0	+α	0	+	20	60	65	80	10
22	0	0	-α	0	+	20	60	45	80	13
23	0	0	0	+α	+	20	60	55	100	14
24	0	0	0	-α	+	20	60	55	60	10
25	0	0	0	0	+	20	60	55	80	12
26	0	0	0	0	+	20	60	55	80	12

Дадаток В

Розрахунок техніко-економічної ефективності застосування зневоложувача високоволового насіння баштанних культур

Для розрахунку основних техніко-економічних параметрів розробленого обладнання та технології була використана методика, що передбачає наступні етапи розрахунку.

Основні експлуатаційні витрати розробленої установки це витрати на виготовлення машини, енерговитрати під час роботи та витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу.

Витрати на монтажні роботи розробленого вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача розраховували як:

$$B_{\text{виз}} = C_{\text{в}} \cdot E_{\text{н}} \quad (5.1)$$

де $C_{\text{в}}$ - вартість виготовлення вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача;

$E_{\text{н}}$ - нормативний коефіцієнт капітальних вкладень.

Оптову ціну нової сушарки розраховуємо за формулою:

$$Ц = Ц_{\text{о.б.}} \cdot \frac{m_{\text{у.н.}}}{m_{\text{у.б.}}}, \text{ грн}, \quad (5.2)$$

де $Ц_{\text{о.б.}}$, $Ц_{\text{о.н.}}$ – оптова ціна базового зразка і нової машини, відповідно, грн;

$m_{\text{у.б.}}$, $m_{\text{у.н.}}$ - маса базового зразка і нової машини відповідно, кг.

Тижневі енерговитрати при експлуатації даної машини знаходили:

$$B'_{\text{ен}} = N_{\text{пр}} \cdot t_{\text{р.зм}} \cdot n_{\text{зм}} \cdot n_{\text{р}} \quad (5.3)$$

де $N_{\text{пр}}$ - потужність привода;

$t_{\text{р.зм}}$ - робочий час однієї зміни;

$n_{\text{зм}}$ - кількість змін;

n_p - кількість робочих днів.

Річні витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховували:

$$B_{зп} = B_{зп.м} \cdot n_m \cdot n_{пр}, \quad (5.4)$$

де $B_{зп.м}$ - місячна заробітна плата;

n_m - кількість річних місяців;

$n_{пр}$ - кількість чоловік обслуговуючого персоналу.

Загальні експлуатаційні витрати установки складали:

$$B = B_{виз} + B_{ен} + B_{зп} \quad (5.5)$$

Аналогічно розраховували загальні експлуатаційні витрати для існуючої універсальної сушарки барабанного типу ПП «Технолог».

Відрахування на амортизацію (капітальний ремонт і реновацію) визначені за балансовою вартістю сушарки і відповідним для них нормам амортизаційних відрахувань

$$A = \frac{B \cdot \alpha}{B_2 \cdot 100\%}, \text{ грн./кг}, \quad (5.6)$$

де B - балансова вартість сушарки, грн. ;

α - відсоток щорічних амортизаційних відрахувань на реновацію;

Балансова вартість зневоложувача визначається

$$B = Ц \cdot \beta, \text{ грн}, \quad (5.7)$$

де β - коефіцієнт, який визначає середні витрати на транспортування, $\beta = 1,1$.

Відрахування на капітальний, поточний ремонт і технічне обслуговування визначені за формулою:

$$P = \frac{B \cdot \alpha}{B_2 \cdot 100\%}, \text{ грн./кг}, \quad (5.8)$$

де α - відсоток відрахування на поточний ремонт і технічне обслуговування.

Економічний ефект, що мав місце в результаті зменшення енерговитрат запропонованої установки розраховували:

$$E = E_1 + E_2 \quad (5.9)$$

де E - загальний економічний ефект;

E_1 - економічний ефект від збільшення продуктивності запропонованої установки;

E_2 - економічний ефект від зменшення енерговитрат при експлуатації даної машини.

Дані складові визначали наступним чином:

$$E_1 = \frac{B_{зм} \cdot (n_p^i - n_p^n)}{n_p^i} \quad (5.10)$$

де n_p^i - кількість днів роботи за рік існуючої установки;

n_p^n - кількість днів роботи проектної машини, яку визначали:

$$n_p^n = \frac{n_{зм}^i \cdot n_p^i}{n_{зм}^n \cdot \kappa_v} \quad (5.11)$$

де $n_{зм}^i, n_{зм}^n$ - відповідно продуктивність за зміну проектної та існуючої установок;

κ_v - коефіцієнт коректування часу обробки на одну партію готової продукції для порівняльного аналізу.

Економічний ефект від зменшення енерговитрат знаходили:

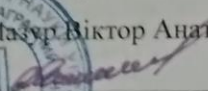
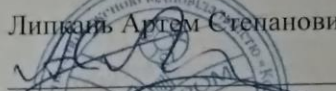


$$E_2 = B^i - B^n \quad (5.12)$$

Термін окупності при впровадженні одного зневоложувача розраховували:

$$T_{ок}^e = \frac{B}{E} \quad (5.13)$$

Додаток Г

Акти впровадження, промислових випробувань та експертної оцінки
розробленої машини та технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ	ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Вінницького національного аграрного університету, к.с.г.н., доцент Мазур Віктор Анатолійович	Генеральний директор ТОВ "Компанія "Технопром-Продукт" Липкань Артем Степанович
 _____ 2016р.	 _____ 2016р.
	
АКТ	
промислових випробувань технології, процесу та апаратурного оснащення зневоложення високоволової сировини з метою прискорення та полегшення процесу підготовки до зберігання та переробки харчового насіння баштанних	
Комісія у складі:	
головного інженера ТОВ "Компанія "Технопром-Продукт " В.І. Соболевса	
головного механіка ТОВ "Компанія "Технопром-Продукт " О.В. Соболевса	
наукового керівника теми, д.т.н., професора	І.П. Паламарчука
к.т.н., ст. викладача кафедри ПОПХВ	
ім. проф. П.С.Берника	І.А. Зозуляка
к.т.н., доцент кафедри ПОПХВ	
ім. проф. П.С.Берника	О.В. Цуркан
відповідального за виконання теми:	
асистента ВНАУ	О.В. Зозуляк
провела промислові випробування технології, процесу та апаратурного оснащення для зневоложення високоволової сировини з метою прискорення та полегшення процесу підготовки до зберігання і переробки харчового насіння баштанних.	
1. Об'єкт випробування.	
Досліджувалась технологія, процес та обладнання для зневоложення високоволової сировини з використанням вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача ВЕЗ-12. Даний технологічний процес зневоложення був розроблений у лабораторії автоматизації виробничих процесів	

переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету.

2. Мета випробувань.

Провести промислові дослідження технології і процесу зневолення високоволової сировини та вібровідцентрового електроосмотичного зневоловувача для реалізації запропонованої технології.

3. Сутність ефекту вібровідцентрового електроосмотичного зневолення високоволової сировини.

Явище електроосмосу набуває останнім часом широкого розповсюдження в переробних і харчових виробництвах як процес тонкого розділення неоднорідних систем, що містить рідку фазу.

При зневоленні високоволової сировини постає необхідність підвищення ефективності вилучення зв'язаної вологи за умови мінімізації пошкодження клітинної структури, що можна реалізувати за рахунок електроосмотичного відтискування вологи.

Електроосмотичне зневолення сприяє скороченню тривалості сушіння сировини, зниженню втрат біологічно активних речовин. Мінімізацію пошкодження структури високоволової сировини при підвищенні поверхні масообміну можна досягнути також за рахунок створення віброзрідженого шару, що реалізується в експериментальній моделі зневоловувача.

4. Проведення випробувань.

При підготовці до зберігання та переробки харчового насіння баштанних важливим етапом являється процес зневолення свіжозібраного та промитого насіння.

Для зневолення високоволого сировина подається у горловину установки. Для вилучення вільної вологи розпочинається перший етап обробки – відцентрове центрифугування. При цьому за допомогою двигуна здійснюється обертання контейнера. Під дією відцентрових сил відбувається притискання сировини до перфорованих стінок контейнера та видаляється вільна волога. Видалена волога видаляється через лоток. Після видалення вільної вологи

перфорофаний ротор центрифуги зупиняється. Під дією відцентрових сил сировина на бічній поверхні ротора утворює щільний, непроникний для повітря шар, для руйнування якого створюємо коливання контейнера при обертанні дебалансного валу. Після руйнування шару сировини за рахунок вібрації в ротор для досушування сировини подається теплоносій, що нагнітається компресором та підігрівається теплогенератором і подається в контейнер через перефорований патрубков. Розпушений шар сировини підсушується теплим повітрям. Одночасно до корпусу перфорованого ротора та до секції електродів підводиться електричний струм, за рахунок проходження якого крізь шар сировини виникає ефект електроосмосу, який дозволяє інтенсифікувати дифузію вологи через напівпроникну мембрану. Вологе повітря видаляється через лоток, зневоложена сировина – через горловину.

5. Результати випробувань.

1) За результатами досліджень встановлено, що продуктивність сушарки становить 12 кг/год. при споживанні потужності 1,76 кВт.

2) Завдяки запропонованій технології вдалося зменшити енерговитрати на привод зневоложувача в 2,5 – 3 рази, а металоємність конструкції в 8-10 разів.

Дані розрахунки велись за умови однакової продуктивності досліджуваного та типового зневоложувача.

3) Вважати за доцільним продовження роботи з вдосконалення обладнання для зневоложення високовологої сировини харчового насіння баштанних.

Члени комісії

від ТОВ "Компанія "Технопром-
Продукт"

головний інженер

В.І. Соболев

головний механік

О.В. Соболев

від ВНАУ

І.П. Паламарчук

О.В. Зозуляк

І.А. Зозуляк

О.В. Цуркан

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного
аграрного університету, к.с.г.н.,

доцент Мазур Віктор Анатолійович



2016 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор ТОВ

"Компанія "Технопром-Продукт"

Липкань Артем Степанович



" 2016 р.

АКТ

про впровадження науково-дослідної та
дослідно-конструкторської роботи

вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача ВЕЗ-12

Комісія у складі:

головного інженера ТОВ "Компанія "Технопром-Продукт" В.І. Соболева

головного механіка ТОВ "Компанія "Технопром-Продукт" О.В. Соболева

наукового керівника теми, д.т.н., професора

І.П. Паламарчука

к.т.н., ст. викладача кафедри ПОПХВ

ім. проф. П.С.Берника

І.А. Зозуляка

к.т.н., доцент кафедри ПОПХВ

ім. проф. П.С.Берника

О.В. Цуркан

відповідального за виконання теми:

асистента ВНАУ

О.В. Зозуляк

склала даний акт про впровадження у виробництво технології, процесу та апаратурне оснащення для зневоложення високоволової сировини з метою прискорення та полегшення процесу підготовки до зберігання і переробки харчового насіння баштанних.

Вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач ВЕЗ-12 являє собою закінчену конструкцію, яка використовується для зневоложення високоволової сировини – харчового насіння баштанних після їх вилучення та миття.

Досліджуваний процес містить за механізмом реалізації такі фізико-механічні дії як вібрація та центрифугування робочого контейнера, фільтрування при проходженні через перфорований ротор та осмотичний тиск в якості складових рушійної сили для інтенсифікації зневоложення високоволового харчового насіння баштанних.

Таке поєднання процесів дасть можливість на першому етапі обробки механічно видалити вільну вологу та на другому етапі застосовуючи вібраційний, електроосмотичний та тепловий вплив на продукт значно інтенсифікувати процес сушіння.

Наявність пружних елементів робочого контейнера поліпшує умови роботи опорних вузлів приводного механізму, на порядок підвищуючи термін їх експлуатації. Рівень шуму під час роботи машини відповідає нормам СНиП. Технічна характеристика розробленого обладнання наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Технічна характеристика вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача ВЕЗ-12

Режим роботи	періодичний
Продуктивність, кг/год	12
Витрати потужності на привод, кВт	1
Витрати потужності на теплогенератор, кВт	0,75
Витрати потужності на електроосмос, кВт	0,01
Частота обертів приводного валу контейнера, хв ⁻¹	800-1100
Амплітуда коливань, мм	2-2,5
Габаритні розміри, мм:	
довжина	850
ширина	340
висота	750

Очікуваний економічний ефект за тиждень від впровадження розробленого обладнання на підприємстві складає 3585,68 грн.

Члени комісії

від ТОВ "Компанія "Технопром-
Продукт"

головний інженер

В.І. Соболев

головний механік

О.В. Соболев

від ВНАУ

І.П. Паламарчук

О.В. Зозуляк

І.А. Зозуляк

О.В. Цуркан

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного

аграрного університету, к.с.г.н., доцент

Мазур Віктор Анатолійович



02 2017р.

АКТ

про впровадження результатів науково-дослідної роботи, виконаної згідно теми «Розробка вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача ВЕЗ-12» у навчальний процес кафедри «Процеси та обладнання переробних і харчових виробництв ім. проф. П.С. Берника» факультету механізації сільського господарства та кафедри «Харчових технології та мікробіології» факультету технології виробництва і переробки продукції тваринництва Вінницького національного аграрного університету

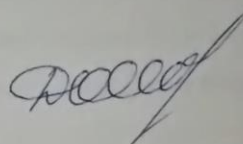
Даним актом підтверджується, що отриманні Зозуляк Оксаною Володимирівною результати наукової роботи з розробки вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача для зневоложення високовологої сировини з метою прискорення та полегшення процесу підготовки до зберігання і переробки насіння баштанних культур використані в навчальному процесі підготовки спеціалістів за фахом 6.050503 «Обладнання переробних і харчових виробництв» та 6.05050312 «Механізація сільського господарства», зокрема за такими дисциплінами:

- «Процеси та апарати переробних і харчових виробництв» в розділах, що стосуються теоретичного та експериментального дослідження процесу зневоложення;
- «Теорія розрахунку обладнання переробних і харчових виробництв» в розділах, що стосуються математичного моделювання виконавчих органів машини за вібраційної дії на досліджувану сировину;

- «Технологічне обладнання переробних і харчових виробництв» та «Машини та обладнання для переробки сільськогосподарської продукції» в розділах, що стосуються методики розрахунку, основних теоретичних положень та практичних рекомендацій використання нового вібраційного обладнання.

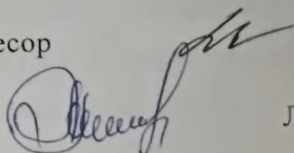
Завдяки використанню у навчальному процесі університету результатів виконаних наукових досліджень вдалося забезпечити сучасний рівень викладання вказаних дисциплін.

В.о. проректора з науково-педагогічної та навчальної роботи



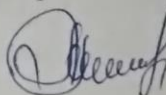
О.В. Дармограй

Декан факультету механізації сільського господарства, к.т.н., професор



В.М. Бандура

Начальник навчального відділу



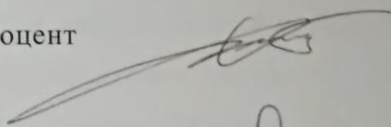
Л.М. Мудріцька

Завідувач кафедри харчових технологій та мікробіології, д.т.н., професор



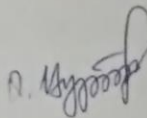
І.П. Паламарчук

Завідувача кафедри ПОПХВ ім. проф. П.С. Берника, к.т.н., доцент



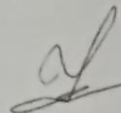
В.П. Янович

Доцент кафедри ПОПХВ ім. проф. П.С. Берника, к.т.н., доцент



О.В. Цуркан

Доцент кафедри ПОПХВ ім. проф. П.С. Берника, к.т.н., доцент



Л.В. Фіалковська

Доцент кафедри ПОПХВ ім. проф. П.С. Берника, к.т.н., доцент



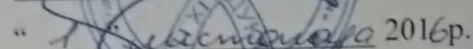
І.М. Берник

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Вінницького національного
аграрного університету, к.с.г.н.,

 Віктор Мазур Віктор Анатолійович
 2017р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор ТОВ
"Компанія "Технопром-Продукт"
Липкавіч Артем Степанович

 "Технопром-Продукт" 2016р.

**ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ
ВІБРОВОЦЕНТРОВОГО ЕЛЕКТРООСМОТИЧНОГО ЗНЕВОЛОЖУВАЧА
ВЕЗ-12
НА ТОВ "КОМПАНІЯ "ТЕХНОПРОМ-ПРОДУКТ"**

При оцінці економічної ефективності впровадженого на ТОВ "Компанія "Технопром-Продукт" вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача ВЕЗ-12 був проведений порівняльний аналіз основних техніко-економічних показників даної машини та універсальною сушаркою барабанного типу ПП «Технолог» що є близькою за технологічною суттю до оцінювальної. Результати проведених розрахунків означених параметрів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Показники	Розмірність	Базова машина	Розроблена машина
Продуктивність	кг/год	40	12
Основні експлуатаційні витрати	грн.	4671,68	1326,14
Ефект від економії електроенергії	грн.	-	3345,5
Економічна ефективність	грн.	-	2,8
Термін окупності	роки	-	0,4

Проведена оцінка свідчить про техніко-економічну ефективність та доцільність впровадження розробленого вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача ВЕЗ-12 для обробки високовологої сировини.

Члени комісії

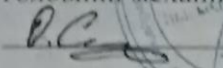
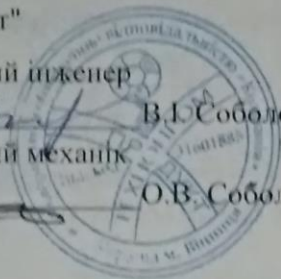
від ТОВ "Компанія "Технопром-

Продукт"

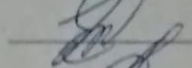
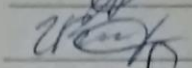
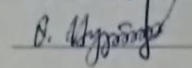
головний інженер

 В.І. Соболев

головний механік

 О.В. Соболев

від ВНАУ

 І.П. Паламарчук О.В. Зозуляк І.А. Зозуляк О.В. Цуркан

Додаток Д
Патенти України на корисну модель





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **80873** (13) **U**
(51) МПК
F26B 17/30 (2006.01)

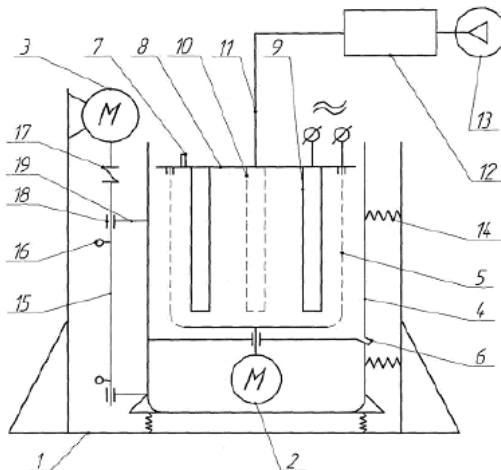
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2013 00049	(72) Винахідник(и): Паламарчук Ігор Павлович (UA), Янович Віталій Петрович (UA), Зозуляк Ігор Анатолійович (UA), Зозуляк Оксана Володимирівна (UA)
(22) Дата подання заявки: 02.01.2013	(73) Власник(и): ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.06.2013	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.06.2013, Бюл.№ 11	

(54) ВІБРОВІДЦЕНТРОВА СУШАРКА

(57) Реферат:

Вібровідцентрова сушарка містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорованого ротора, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту.



UA 80873 U

UA 80873 U

Корисна модель належить до сушильної техніки і може бути використана для сушіння високо вологих матеріалів у харчовій, хімічній та інших галузях переробної промисловості.

Відома відцентрова сушарка (Патент. UA № 33245 U кл. F26B 5/00, Б. №11, 2008), що містить корпус з системою патрубків для подачі та видалення теплоносія, з'єднаних з внутрішнім об'ємом привода у верхній частині конусоподібної перфорованої корзини, яка встановлена усередині корпусу з двома приводами та центральним завантажувальним пристроєм, змонтовані масивні порожнисті феромагнітні ротори, причому ротори приводів жорстко з'єднані з відповідними частинами перфорованої корзини, а їх статори утворюють обертальні магнітні поля протилежних напрямків.

До недоліків даної конструкції можна віднести складність вивантаження та регулювання часу термічної обробки сировини, що негативно впливає на кінцеву якість готової продукції.

Також відома відцентрова сушарка (А.С. СРСР № 144460 кл. P26B 5/08, Б. № 46, 1988), що містить корпус з системою патрубків для вводу і виводу теплоносія, встановленої усередині корпусу обертальної конусоподібної перфорованої корзини, утвореної з двох автономних частин з приводами і центрального завантажувального пристрою.

Недоліком вказаної сушарки є значні витрати електричної та теплової енергії, зумовлені складністю генерації та транспортування теплоносія до робочої камери. При цьому градієнти вологості та температури у шарі вологого матеріалу не співпадають з напрямком відцентрових сил, що приводить до зниження вологовидалення з оброблювального матеріалу та зменшення загального коефіцієнта корисної дії сушарки.

Найбільш близьким аналогом є відцентрова сушарка для високовологих матеріалів (А.С. СРСР № 323621 кл. F26B 11/08, Б. № 1, 1972), що містить корпус з перфорованою камерою, яка приєднана до дебалансного вібробуджувача, завантажувальний пристрій, виконаний у вигляді пресуючого шнека, парогенератор та вивантажувальний механізм у формі підпружиненої тарілки, змонтованої в центральній камері.

До основних недоліків розглянутої установки можна віднести значку складність конструкції та порівняно низьке вологовидалення фізично зв'язаної вологи з матеріалів.

В основу корисної моделі поставлено задачу створення вібраційної сушарки, в якій за рахунок зміни конструкції приводного механізму та застосуванні електроосмотичного ефекту досягається інтенсифікація процесу тепломасообміну, збільшення вологовидалення як вільної та фізично зв'язаної вологи з матеріалу.

Поставлена задача вирішується шляхом створення вібровідцентрової сушарки, в якій реалізується поетапний відцентровий, вібраційний та електроосмотичний етапи зневоложення сировини.

На кресленні представлена принципова схема розробленої вібровідцентрової сушарки.

Вібровідцентрова сушарка містить станину 1 та два основних структурних контури, які приводяться до руху електродвигунами 2 і 3.

Внутрішній контур сушарки має у своєму складі підпружинений кожух 4 з фільтруючим ротором 5, що приводиться до обертання від електродвигуна 2, патрубки 6 і 7 відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря, кришку 8 з радіально розміщеними електродами 9 та центральним перфорованим патрубком 10, з'єднаним через проміжний шланг 11 з теплогенератором 12 та компресором 13.

Зовнішній контур вібровідцентрової сушарки містить пружні елементи 14, приводний вал 15 з ексцентрично розміщеними дебалансами 16, який через компенсуючу муфту 17 приводиться в рух електродвигуном 3 та через підшипникові вузли 18 та траверси 19 жорстко приєднаний до кожуха 4.

Запропонована конструкція реалізує ідею комбінованої взаємодії вібраційного та обертового руху контейнера в поєднанні з електроосмотичним ефектом, що дає можливість комплексної фізико-механічної дії на оброблювальне середовище за інтенсивного вологовидалення.

Дана конструкція працює наступним чином.

Вологий матеріал завантажують у фільтруючий ротор 5, після чого вмикають електродвигун 2. За рахунок відцентрових сил, виникаючих при обертанні фільтруючого ротора 5 відбувається вилучення вільно зв'язаної вологи через патрубок 6 у кожусі 4 та ущільнення оброблювального матеріалу відносно стінок ротора. Вимикають електродвигун 2 та вмикають електродвигун 3, крутий момент якого через компенсуючу муфту 17 передається на приводний вал 15 з дебалансами 16, для створення силової незрівноваженості системи, що дозволяє здійснити розпушування ущільненої сировини. Після чого фіксується кришка 8, у перфорований патрубок 9 через проміжний шланг 11 при допомозі компресора 13 і теплогенератора 12 нагнітається теплоагент. Одночасно до радіально розміщених електродів 9 підводиться електричний струм,

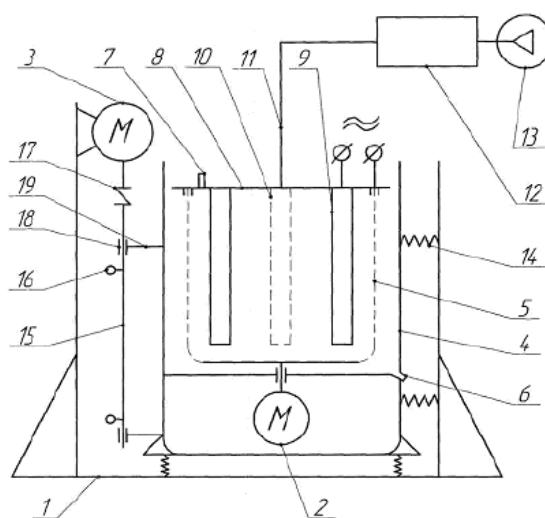
UA 80873 U

зумовлюючи виникнення електроосмотичного ефекту та дифузійного видалення вологи з матеріалу через патрубок 7.

- 5 В результаті комплексної фізико-механічної взаємодії вібрації та електроосмотичного ефекту на оброблювальну сировину, має місце значна інтенсифікація процесу сушіння та підвищення вологовидалення.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 10 Вібровідцентрова сушарка, що містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, який містить систему патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, яка **відрізняється** тим, що корпус сушарки містить електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту.



Комп'ютерна верстка Д. Шверун

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **107157** (13) **U**
(51) МПК
F26B 17/30 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 11239	(72) Винахідник(и): Зозуляк Оксана Володимирівна (UA), Зозуляк Ігор Анатолійович (UA), Болонний Василь Тарасович (UA), Чубик Роман Васильович (UA)
(22) Дата подання заявки: 16.11.2015	(73) Власник(и): Зозуляк Оксана Володимирівна, вул. Наукова, 16, с. Агрономічне, Вінницький р-н, Вінницька обл., 23227 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.05.2016	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.05.2016, Бюл.№ 10	

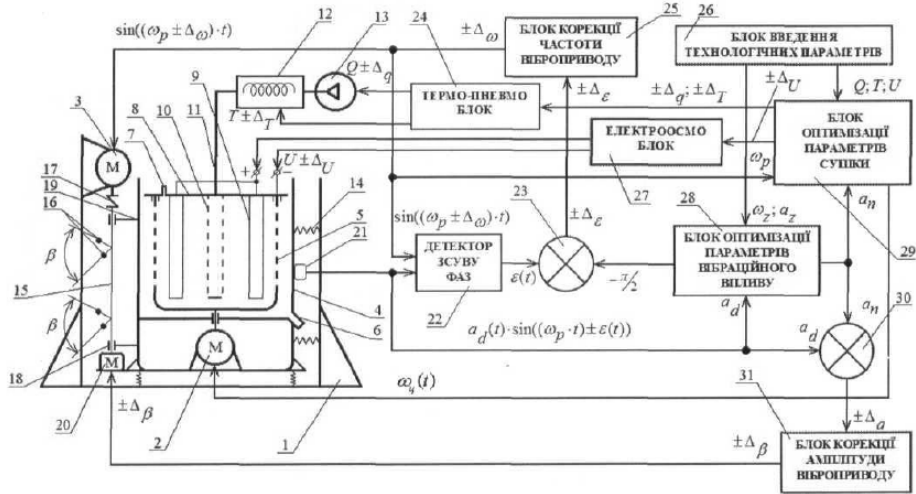
(54) АДАПТИВНА ВІБРОВІДЦЕНТРОВА ЕЛЕКТРООСМОТИЧНА СУШАРКА

(57) Реферат:

Адаптивна вібровідцентрова електроосмотична сушарка, що містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту, причому на підпружиненому корпусі закріплено давач вібрації, який електрично з'єднаний із одним із двох входів детектора зсуву фаз, блока оптимізації параметрів вібраційного впливу та першого компаратора, другий вхід першого компаратора електрично з'єднаний із одним із двох виходів блока оптимізації параметрів вібраційного впливу та третім із трьох входів блока оптимізації параметрів сушіння, а другий вихід блока оптимізації параметрів вібраційного впливу електрично з'єднаний із одним із двох входів другого компаратора, другий вхід другого компаратора електрично з'єднаний із виходом детектора зсуву фаз, а другий вхід детектора зсуву фаз електрично з'єднаний із першим із трьох входів блока оптимізації параметрів сушіння з електродвигуном, що приводить в дію приводний вал з дебалансами та з виходом блока корекції частоти віброприводу, вихід другого компаратора електрично з'єднаний із входом блока корекції частоти віброприводу, другий вхід блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із одним із двох виходів блока введення технологічних параметрів, а другий вихід блока введення технологічних параметрів електрично з'єднаний із одним із двох входів блока оптимізації параметрів вібраційного впливу, перший із трьох виходів блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із входом електроосмоблока, перший із двох виходів електроосмоблока має додатній потенціал і є електрично з'єднаний із розміщеними радіально електродами навколо центрального перфорованого патрубка, що розташований співвісно із перфорованим ротором та знаходиться в центрі перфорованого ротора, а другий із двох виходів електроосмоблока має від'ємний потенціал і є електрично з'єднаний із перфорованим ротором, другий із трьох виходів блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із входом термопневмоблока, перший із двох виходів термопневмоблока електрично з'єднаний із компресором, а компресор за допомогою пневмопроводу з'єднаний із входом теплогенератора, вихід теплогенератора за допомогою пневмопроводу з'єднано із центральним перфорованим патрубком, а другий із двох виходів термопневмоблока електрично з'єднаний із електротеном теплогенератора, третій із трьох виходів блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із електродвигуном, що надає обертового руху перфорованому ротору, вихід першого компаратора електрично з'єднаний із блоком корекції амплітуди віброприводу, а вихід блока корекції амплітуди віброприводу електрично з'єднаний із кроковим електродвигуном приводу механізму зміни ексцентриситету дебалансів приводного вала.

UA 107157 U

UA 107157 U



UA 107157 U

Корисна модель належить до сушильної техніки і може бути використана для сушіння високовологих матеріалів у харчовій, хімічній та інших галузях переробної промисловості.

Відома відцентрова сушарка для високовологих матеріалів (А.С. СРСР № 323621 кл. F26B 11/08, Б. № 1, 1972), що містить корпус з перфорованою камерою, яка приєднана до
5 дебалансного вібробудувача, завантажувальний пристрій, виконаний у вигляді пресуючого шнека, парогенератор та вивантажувальний механізм у формі підпружиненої тарілки, змонтованої в центральній камері.

До основних недоліків розглянутої установки можна віднести значку складність конструкції та порівняно низьке вологовидалення фізично зв'язаної вологи з матеріалів.

10 Найбільш близьким аналогом є вібровідцентрова сушарка [1], що містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту.

15 До основних недоліків даної вібровідцентрової сушарки можна віднести високі енергозатрати на реалізацію процесу сушіння. Це обумовлено тим, що конструктивне рішення вібровідцентрової сушарки [1] не дозволяє автоматично забезпечити та підтримувати [2, 3] (при зміні маси завантаження сировини перфорованому роторі) на протязі заданого циклу технологічного процесу сушіння енергетично вигідний резонансний режим роботи робочого органу (підпружиненого корпусу).

20 Із технологічної точки зору конструктивне рішення вібровідцентрової сушарки [1] при реалізації процесу сушіння сировини нездатне автоматично збалансовувати (оптимізувати) [4] динамічні параметри вібраційного поля із сировиною в пустотілому перфорованому роторі підпружиненого корпусу (при довільній та змінній масі завантаження сировиною) із такими наперед заданими технологічно оптимальними чинниками процесу сушіння сировини
25 конкретного типу як: кількість гарячого повітря (продуктивність компресора), температура гарячого повітря (продуктивність теплогенератора) та величину електричного поля для реалізації електроосмотичного переміщення рідини із деякою заданою технологічно оптимальною для даного типу сировини швидкістю.

30 Конструктивне рішення вібровідцентрової сушарки [1] не дозволяє в автоматичному режимі проводити реалізацію прийомів (підходів) для сушіння сировини певного типу по певних наперед визначених змінних у часі законах. Тобто, зміна в часі температури повітря, продуктивності компресора, величиною струму для реалізації електроосмотичного переміщення рідини, напряду обертання приводного вала підпружиненого корпусу, амплітуди циклічної вимушуючої сили приводного вала із дебалансами для сушіння сировини різного типу із різними
35 фізико-хімічними показниками є різною. Попри довільні (певні) закони зміни у часі вищеперерахованих чинників, що впливають на реалізацію технологічного процесу сушіння сировини із конкретними фізико-хімічними показниками, також і є різною послідовність їхньої зміни у часі.

40 В основу корисної моделі поставлено задачі зменшення енергозатрат на дебалансний вібропривод приводного вала робочого органу та розширення технологічних можливостей адаптивної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки.

Поставлена задача вирішується тим, що у адаптивній вібровідцентровій електроосмотичній сушарці, що містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту, згідно з
45 корисною моделлю, на підпружиненому корпусі закріплено давач вібрації, який електрично з'єднаний із одним із двох входів детектора зсуву фаз, блока оптимізації параметрів вібраційного впливу та першого компаратора, другий вхід першого компаратора електрично з'єднаний із одним із двох виходів блока оптимізації параметрів вібраційного впливу та третім із трьох входів блока оптимізації параметрів сушіння, а другий вихід блока оптимізації параметрів
50 вібраційного впливу електрично з'єднаний із одним із двох входів другого компаратора, другий вхід другого компаратора електрично з'єднаний із виходом детектора зсуву фаз, а другий вхід детектора зсуву фаз електрично з'єднаний із першим із трьох входів блока оптимізації параметрів сушіння з електродвигуном, що приводить в дію приводний вал з дебалансами та з виходом блока корекції частоти віброприводу, вихід другого компаратора електрично з'єднаний
55 із виходом блока корекції частоти віброприводу, другий вхід блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із одним із двох виходів блока введення технологічних параметрів, а другий вихід блока введення технологічних параметрів електрично з'єднаний із одним із двох входів блока оптимізації параметрів вібраційного впливу, перший із трьох виходів
60 блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із виходом електроосмотблока,

UA 107157 U

перший із двох виходів електроосмоблока має додатній потенціал і є електрично з'єднаний із розміщеними радіально електродами навколо центрального перфорованого патрубка, що розташований співвісно із перфорованим ротором та знаходиться в центрі перфорованого ротора, а другий із двох виходів електроосмоблока має від'ємний потенціал і є електрично з'єднаний із перфорованим ротором, другий із трьох виходів блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із входом термопневмоблока, перший із двох виходів термопневмоблока електрично з'єднаний із компресором, а компресор за допомогою пневмопроводу з'єднаний із входом теплогенератора, вихід теплогенератора за допомогою пневмопроводу з'єднано із центральним перфорованим патрубком, а другий із двох виходів термопневмоблока електрично з'єднаний із електротеном теплогенератора, третій із трьох виходів блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із електродвигуном, що надає обертового руху перфорованому ротору, вихід першого компаратора електрично з'єднаний із блоком корекції амплітуди віброприводу, а вихід блока корекції амплітуди віброприводу електрично з'єднаний із кроковим електродвигуном приводу механізму зміни ексцентриситету дебалансів приводного вала.

Запропонована конструкція адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки реалізує ідею комбінованої взаємодії вібраційного та обертового руху перфорованого ротора в поєднанні з електроосмотичним ефектом, що дає можливість комплексної фізико-механічної дії на оброблювальне середовище для забезпечення інтенсивного вологовидалення. Застосування в конструктивному рішенні контуру автоматичного керування частотою циклічної примусової сили дебалансного віброприводу корпусу із перфорованим ротором дозволяє забезпечувати та підтримувати протягом циклу сушіння енергетично вигідний резонансний режим роботи. Застосування в конструктивному рішенні контуру автоматичного керування амплітудою циклічної примусової сили дебалансного віброприводу корпусу із перфорованим ротором дозволяє забезпечувати та підтримувати на заданому рівні протягом циклу сушіння технологічно оптимальне значення параметрів вібраційного поля при мінімальних енергозатратах (резонансний режим) для інтенсивного вібраційного перемішування оброблюваної сировини. Застосування в конструктивному рішенні контуру автоматичного керування кількістю гарячого повітря (продуктивність компресора), температурою гарячого повітря (продуктивністю теплогенератора) та величиною електричного поля для реалізації електроосмотичного переміщення рідини із деякою заданою технологічно оптимальною для даного типу сировини швидкістю дозволяє в комплексі реалізувати та оптимізувати технологічний процес сушіння сировини із конкретними фізико-хімічними показниками. Запропоноване конструктивне рішення адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки дозволяє реалізувати в автоматичному режимі із різною послідовністю їхньої зміни протягом циклу сушіння довільні (певні) закони зміни у часі всіх вищеперерахованих чинників, що впливають на реалізацію технологічного процесу сушіння сировини із конкретними фізико-хімічними показниками.

На фіг. 1 зображено конструктивне рішення електромеханічної будови запропонованої адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки.

Адаптивна вібровідцентрована електроосмотична сушарка містить станину 1 та два основних структурних контури, які приводяться до руху електродвигунами 2, 3 і 20. Внутрішній контур адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки має у своєму складі підпружинений корпус 4 з перфорованим ротором 5, що приводиться в обертовий рух електродвигуном 2, патрубки 6 і 7 відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. Кришку 8 з радіально розміщеними електродами 9 навколо центрального перфорованого патрубка 10, що розташований співвісно із перфорованим ротором 5 та знаходиться в центрі перфорованого ротора 5, який з'єднаний через проміжний шланг 11 з теплогенератором 12 та компресором 13. Теплогенератор 12 та компресор 13 з метою забезпечення керування їхніми вихідними параметрами з'єднанні із термопневмоблоком 24. Зовнішній контур адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки містить пружні елементи 14, приводний вал 15 з ексцентрично розміщеними дебалансами 16, що оснащені будь-яким із відомих [5] механізмом зміни ексцентриситету дебалансів 16, який приводиться в дію та керується кроковим електродвигуном 20. Приводний вал 15 через компенсуючу муфту 17 приводиться в рух електродвигуном 3 та через підшипникові вузли 18 та траверси 19 жорстко приєднаний до підпружиненого корпусу 4. На підпружиненому корпусі 4 жорстко закріплений давач вібрації 21 інформація від якого надходить в детектор зсуву фаз 22, блок оптимізації параметрів вібраційного впливу 28 та перший компаратор 30. Вихід першого компаратора 30 з'єднано із блоком корекції амплітуди віброприводу 31, який завдяки електричному зв'язку керує кроковим електродвигуном 20 механізму зміни ексцентриситету дебалансів 16 приводного вала 15.

UA 107157 U

Електродвигун 3, що приводить в обертовий рух приводний вал 15 підпружиненого корпусу 4 завдяки електричному зв'язку керується блоком корекції частоти віброприводу 25 та є також електрично з'єднаний із входом детектора зсуву фаз 22 та входом блока оптимізації параметрів сушіння 29. Блок оптимізації параметрів сушіння 29 з метою забезпечення динамічного керування технологічними параметрами сушіння електрично з'єднаний із термопневмоблоком 24 та електроосмоблоком 27. Вихід електроосмоблока 27 від'ємним потенціалом з'єднаний із перфорованим ротором 5, а додатнім потенціалом з'єднаний із радіально розміщеними електродами 9 навколо центрального перфорованого патрубку 10, що розташовані співвісно із перфорованим ротором 5 та знаходиться в центрі перфорованого ротора 5. Блок оптимізації параметрів сушіння 29 також з'єднаний із електродвигуном 2, що надає обертового руху перфорованому ротору 5. Два входи другого компаратора з'єднано із виходом детектора зсуву фаз 22 та блока оптимізації параметрів вібраційного впливу 28, а вихід другого компаратора з'єднано із блоком корекції частоти віброприводу 25 підпружиненого корпусу 4. Блок оптимізації параметрів вібраційного впливу 28 з'єднано із входами блока оптимізації параметрів сушіння 29 та першого компаратора 30. Для керування технологічними та енергетичними параметрами процесу сушіння в адаптивній вібровідцентровій електроосмотичній сушарці застосовано блок введення технологічних параметрів 26, який електрично з'єднаний із блоком оптимізації параметрів вібраційного впливу 28 та блоком оптимізації параметрів сушіння 29.

Адаптивна вібровідцентрова електроосмотична сушарка працює наступним чином: вологий матеріал (сировину) довільної маси завантажують у перфорований ротор 5. Перед початком реалізації процесу сушіння сировини із конкретними фізико-хімічними показниками оператор адаптивної вібровідцентровій електроосмотичній сушарки через блок введення технологічних параметрів 26 вводить (або вибирає із існуючого переліку) в блоки оптимізації параметрів вібраційного впливу 28 та оптимізації параметрів сушіння 29 оптимальні значення технологічних параметрів для сушіння певної сировини. До таких величин належать:

час центрифугування $t_c(c)$ перфорованого ротора 5 та закон зміни його в часі (закон зміни частоти обертання (центрифуги) $\omega_c(t)$ перфорованого ротора 5;

час вібраційного змішування $t_z(c)$, сировини у перфорованому роторі 5 та закон його $k(t)$ в часі;

оптимальну характеристику k вібраційного змішування (при змішуванні для визначення стану сипучого середовища використовують коефіцієнт переваження [6] k , який в літературі ще називають коефіцієнтом режиму вібрації [7], або коефіцієнт динамічності [8], який визначається за формулою: $k = a_d \cdot \omega_p^2 / g$, де a_d - дійсна амплітуда коливань підпружиненого

корпусу 4, рівна $a_d = \sqrt{|a_{d|h}|^2 + |a_{d|v}|^2}$, де $|a_{d|v}|^2$ та $|a_{d|h}|^2$ миттєва вертикальна та горизонтальна

складова коливань підпружиненого корпусу 4 зафіксована давачем вібрації 21, м; ω_p - кутова швидкість обертання приводного вала 15 з ексцентрично розміщеними на ньому дебалансами 16, c^{-1} ; g - прискорення вільного падіння, m/c^2)

продуктивність компресора 13 (кількість повітря $Q \pm \Delta_q$) та закон зміни його в час $Q(t)$;

продуктивністю теплогенератора 12 (температуру гарячого повітря $T \pm \Delta_T$) та закон зміни його в час $T(t)$;

величину електричного поля $U \pm \Delta_U$ для реалізації електроосмотичного переміщення рідини із деякою заданою технологічно оптимальною для даного типу сировини швидкістю та закон зміни його в час $U(t)$;

послідовність зміни в часі вищеперерахованих параметрів, що впливають на реалізацію технологічного процесу сушіння сировини із конкретними фізико-хімічними характеристиками.

Після введення технологічно оптимальних параметрів (або вибору із існуючого переліку) оператор запускає програму сушіння. В результаті чого вмикається електродвигун 2. За рахунок відцентрових сил, виникаючих при обертанні перфорованого ротора 5, відбувається вилучення вільно зв'язаної вологи через патрубок 6 у підпружиненого корпусу 4 та ущільнення оброблювального матеріалу відносно стінок ротора. Відповідно до заданого часу

центрифугування $t_c(c)$ та закону зміни його в часі $\omega_c(t)$ вмикається електродвигун 2 та вмикається електродвигун 3, крутний момент якого через компенсуючу муфту 17 передається

UA 107157 U

на приводний вал 15 з дебалансами 16, для створення силової незрівноваженості системи, яка дозволить за рахунок перемішування здійснити розпушування ущільненої сировини. Після виходу частоти обертання електродвигуна 3 на задане довільне значення со адаптивна система керування починає в реальному масштабі часу обробляти інформацію про амплітуду, фазу і частоту коливань перфорованого ротора 5 яка надходить в детектор фаз 22, також в детектор фаз 22 надходить інформація про частоту та фазу циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16. Відповідно до [9, 10] при резонансі фаза амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 буде відставати від амплітуди циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16 на $-\pi/2$. Тому в детекторі фаз 22 проводиться визначення $\varepsilon(t)$ величини відставання (випередження) фази коливань підпружиненого корпусу 4 від приводного валу 15 з дебалансами 16. Інформацію про реальну фазу між коливанням підпружиненого корпусу 4 та примусовою силою приводного валу 15 з дебалансами 16 у формі кута $\varepsilon(t)$ надходить на другий компаратор 23, де постійно порівнюється із заданим енергетично оптимальним $-\pi/2$. Інформація про оптимальне значення $-\pi/2$ (резонанс) в другий компаратор 23 надходить із блока оптимізації параметрів вібраційного впливу 28, куди вона була введена оператором адаптивної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки через блок введення технологічних параметри 26. В результаті порівняння існуючої фази $\varepsilon(t)$ із заданою оптимальною із енергетичної точки зору $-\pi/2$ отримується інформація $\pm\Delta\varepsilon$ про те, на скільки і з якої сторони від точки резонансу (ω_0) перебуває коливна система. Власна резонансна частота [6, 7, 8, 9, 10] ω_0 коливної системи залежить від маси завантаження вологим матеріалом (сировиною) та буде змінюватися в процесі сушіння в зв'язку із міною маси через вилучення матеріалу патрубками 6 і 7 відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. На основі даної інформації блок корекції частоти віброприводу 25 підпружиненого корпусу 4 проводить корекцію електродвигуном 3 частоти ω_p циклічної примусової сили приводного валу 15 з дебалансами 16 на величину $\pm\Delta\omega$ з метою забезпечення та постійного підтримування рівності її із власною резонансною частотою, тобто забезпечення $\omega_p = \omega_0$. Даний контур керування здатний автоматично забезпечити та підтримувати резонансний режим роботи (коливань) адаптивної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки незалежно від маси завантаженими вологим матеріалом (сировиною) та в процесі її роботи.

Після адаптації ω_p частоти циклічної примусової сили приводного валу 15 з дебалансами 16 та забезпечення резонансного режиму роботи підпружиненого корпусу 4 другий контур адаптивної системи керування починає проводити адаптацію амплітуди циклічної вимушуючої сили приводного валу 15 з дебалансами 16 для забезпечення заданого технологічно оптимального коефіцієнта перевантаження [6] k підпружиненого корпусу 4. Відповідно до [7, 11] оптимальним з точки зору якості змішування, часу змішування та енергозатрат на технологічний процес буде режим коли коефіцієнт перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 визначатиметься наступним виразом $[a_d \cdot \omega_0^2 / g] = 2.5 \dots 3$. З метою забезпечення необхідного значення коефіцієнт перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 блок оптимізації параметрів сушіння 29 розраховує значення a_n необхідного рівня амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 при кожній конкретній власній резонансній частоті ω_0 коливань коливної механічної системи адаптивної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки. Обчислення a_n необхідного рівня амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 проводиться на основі виразу $a_n = [2.5 \dots 3] \cdot g / \omega_0^2$. Необхідне значення амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 порівнюється із дійсним значенням a_d амплітуди коливань підпружиненого корпусу 4 в першому компараторі 30. В результаті порівняння на виході першого компаратора 30 отримується величина $\pm\Delta a$, яка показує на скільки і в яку сторону відхиляється амплітуда коливань підпружиненого корпусу 4 від необхідної амплітуди для забезпечення технологічно оптимального коефіцієнта перевантаження [6] k підпружиненого

UA 107157 U

- корпусу 4. Дана інформація надходить в блок корекції амплітуди віброприводу 31, який завдяки електричному зв'язку керує кроковим електродвигуном 20 механізму [5] зміни ексцентриситету дебалансів 16 приводного вала 15. Кроковий електродвигун 20 механізму зміни ексцентриситету дебалансів 16 завдяки зміні кута між верхніми та нижніми параметрами
- 5 дебалансів на величину $\pm\Delta\beta$ змінює амплітуду циклічної примусової сили приводного вала 15 з дебалансами 16. Динамічна зміна амплітуди циклічної примусової сили приводного вала 15 з дебалансами 16 дозволяє забезпечити заданий технологічно оптимальний коефіцієнт перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки.
- 10 Завдяки злагодженій роботі першого та другого контуру адаптивної системи керування електроприводами адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки відбувається автоматичне самоналагодження коливної системи на резонансний режим роботи і автоматичне самоналагодження на резонансній частоті: на забезпечення заданого перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 з метою забезпечення технологічно оптимального
- 15 перемішування сировини. Після виходу адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки на оптимальні вібраційні впливи з енергетичної ($\omega_p = \omega_0$) та технологічної (k) точки зору включається третій контур автоматичного керування, що постійно функціонує по заданій програмі на фоні роботи двох основних перших контурів. Третій контур автоматичного керування через перфорований патрубок 9 через проміжний шланг 11 за допомогою
- 20 компресора 13 і теплогенератора 12 нагнітається теплоагент. Закон зміни продуктивності $Q(t)$ компресора 13 та закон зміни $T(t)$ температури теплоагента у теплогенераторі 12 реалізується по наперед заданій програмі і є прив'язаним до власної резонансної частоти ω_0 коливної системи адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки. Тому, що ω_0 залежить від маси завантаження вологим матеріалом (сировиною) та буде змінюватися в процесі сушіння в зв'язку із міною маси через вилучення матеріалу патрубками 6 і 7 відповідно
- 25 для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. Також від власної резонансної частоти ω_0 коливної системи адаптивної вібровідцентрованої електроосмотичної сушарки залежить і якість вібраційного перемішування, яка характеризує коефіцієнт перевантаження k вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 за рахунок підтримування a_n необхідного рівня амплітуди коливаний підпружиненого корпусу 4. Одночасно до радіально розміщених електродів
- 30 9 підводиться електричний потенціал $U(t)$, зумовлюючи виникнення електроосмотичного ефекту. Під електроосмосом [12] розуміється рух рідини через капіляри або пористу діафрагму під дією сил зовнішнього електричного поля. Електроосмос обумовлений тим, що на кордоні двох фаз (твердої і рідкої) за рахунок перерозподілу електричних зарядів утворюються
- 35 подвійний електричний шар. Якщо вздовж кордону цих середовищ прокласти різницю потенціалів від зовнішнього джерела, то заряджений шар рідини під дією сил зовнішнього поля буде переміщатися в бік протилежно зарядженого джерела, захоплюючи за собою за рахунок внутрішнього тертя шари незарядженої рідини. Так виникає рух рідини відносно твердої фази. Закон зміни електричного потенціалу $U(t)$ визначається третім контуром автоматичного
- 40 керування та є динамічно в'язаним із іншими факторами ($\omega_0(t), k(t), Q(t), T(t)$), що впливають на технологічний процес сушіння сировини із конкретними фізико-хімічними характеристиками. Завдяки комплексній дії всіх факторів, що впливають на технологічний процес сушіння запропоноване конструктивне рішення дозволяє:
- за допомогою центрифугування відділити незв'язану вологу із сировини;
- 45 реалізувати при мінімальних енергозатратах ($\omega_p = \omega_0$) розрихлення та постійне стабільне ($k = \text{constata}$) перемішування сировини;
- за допомогою електроосмотичного ефекту виділити залишки зв'язаної вологи із найменших частин сировини;
- 50 за допомогою інтенсивного перемішування та гарячого теплоагента видалити із сировини залишки незв'язаної вологи після електроосмотичного ефекту.

Джерела інформації:

UA 107157 U

1. Пат. 80873 U Україна, F26B 17/30. Вібровідцентрова сушарка. Паламарчук І. П., Янович В. П., Зозуляк І. А., Зозуляк О. В. (Україна). - № u201300049; Опубл. 10.06.2013; Бюл. № 11, 4 ст.
2. Пат. 87776 А Україна, B65G27/00. Спосіб керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин. Серета Л. П., Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. (Україна). - № a200803685; 5 Опубл. 10.08.2009; Бюл. № 15, 4 ст.
3. Чубик Р.В. Адаптивна система керування режимами резонансних вібраційних технологічних машин: дис... канд. тех. наук: 05.13.07 / Чубик Роман Васильович. - Львів, 2007.-266 с.
4. Пат. 92041 А Україна, B65G27/100. Спосіб стабілізації технологічно оптимальних 10 параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин. Серета Л. П., Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. (Україна). -№ a200806209; Опубл. 27.09.2010; Бюл. № 18, 3 ст.
5. Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. Керовані вібраційні технологічні машини: Монографія / Р. В. Чубик, Л. В. Ярошенко. - Вінниця.: ВНАУ, 2011.-355 с.
6. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання / В. О. Повідайло. - Львів: Видавництво 15 НУ "Львівська політехніка", 2004.-248 с.
7. Членов В. А., Михайлов Н. В. Виброкипящий слой / В. А. Членов, Н. В. Михайлов. - М.: Наука, 1972.-341 с
8. Левитский Н. И. Колебания в механизмах: Учеб. пособие для втузов / Н. И. Левитский. - М.: Наука, 1988.-336 с.
9. Хайкин С. Э. Физические основы механики / С. Э. Хайкин. - М.: Наука, 1971.-751 с.
10. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Ж. Янг, У. Уивер; [пер с английского канд. физ.-мат. наук Л. Г. Корнейчука под ред. чл.-корр. АН ССР Э. И.Григолюка]. - М.: Машиностроение, 1985.-472 с.
11. Цуркан О.В. Розробка та дослідження енергоощадного вібраційного змішувача для 25 внесення преміксів в комбікорми: дис... к-та техн. наук 05.05.11 / Цуркан Олег Васильович. - Харків, -2004.-155 с.
12. Тихомолова, К. П. Электроосмос / К. П. Тихомолова. - Л.: "Химия". 1989-247с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

30 Адаптивна вібровідцентрова електроосмотична сушарка, що містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту, яка **відрізняється** тим, що на 35 підпружиненому корпусі закріплено давач вібрації, який електрично з'єднаний із одним із двох входів детектора зсуву фаз, блока оптимізації параметрів вібраційного впливу та першого компаратора, другий вхід першого компаратора електрично з'єднаний із одним із двох виходів блока оптимізації параметрів вібраційного впливу та третім із трьох входів блока оптимізації параметрів сушіння, а другий вихід блока оптимізації параметрів вібраційного впливу електрично з'єднаний із одним із двох входів другого компаратора, другий вхід другого компаратора електрично з'єднаний із виходом детектора зсуву фаз, а другий вхід детектора зсуву фаз електрично з'єднаний із першим із трьох входів блока оптимізації параметрів сушіння з електродвигуном, що приводить в дію приводний вал з дебалансами та з виходом блока корекції частоти віброприводу, вихід другого компаратора електрично з'єднаний із виходом блока корекції частоти віброприводу, другий вхід блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із одним із двох виходів блока введення технологічних параметрів, а другий вихід блока введення технологічних параметрів електрично з'єднаний із одним із двох входів блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із входом електроосмоблока, перший із двох виходів електроосмоблока має додатній потенціал і є електрично з'єднаний із розміщеними радіально електродами навколо центрального перфорованого патрубка, що розташований співвісно із перфорованим ротором та знаходиться в центрі перфорованого ротора, а другий із двох виходів електроосмоблока має від'ємний потенціал і є електрично з'єднаний із перфорованим ротором, другий із трьох виходів блока оптимізації параметрів сушіння електрично з'єднаний із входом термопневмоблока, перший із двох виходів термопневмоблока електрично з'єднаний із компресором, а компресор за допомогою пневмопроводу з'єднаний із входом теплогенератора, вихід теплогенератора за допомогою пневмопроводу з'єднано із центральним перфорованим патрубком, а другий із двох виходів термопневмоблока електрично з'єднаний із електротеном теплогенератора, третій із трьох виходів блока оптимізації параметрів сушіння електрично 60 з'єднаний із електродвигуном, що надає обертового руху перфорованому ротору, вихід першого





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **107156** (13) **U**
(51) МПК
F26B 17/30 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 11238	(72) Винахідник(и): Зозуляк Оксана Володимирівна (UA), Зозуляк Ігор Анатолійович (UA), Болонний Василь Тарасович (UA), Чубик Роман Васильович (UA)
(22) Дата подання заявки: 16.11.2015	(73) Власник(и): Зозуляк Оксана Володимирівна, вул. Наукова, 16, с. Агрономічне, Вінницький р-н, Вінницька обл., 23227 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.05.2016	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.05.2016, Бюл.№ 10	

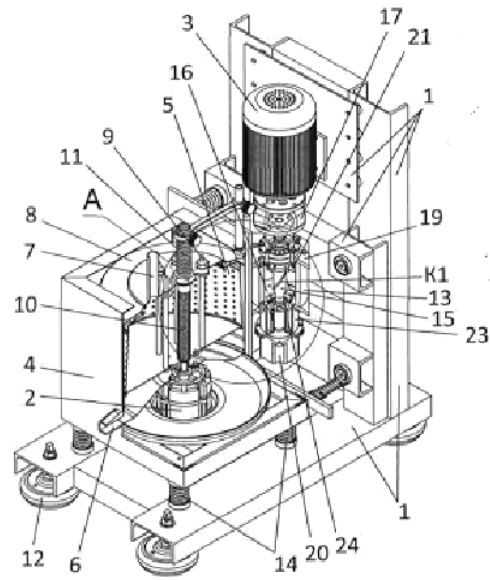
(54) ВІБРОВІДЦЕНТРОВА ЕЛЕКТРООСМОТИЧНА СУШАРКА

(57) Реферат:

Вібровідцентрова електроосмотична сушарка містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту, причому приводний вал з дебалансами, що розташований вертикально з боку підпружиненого корпусу та забезпечує коливальний рух підпружиненого корпусу є керованим, він виконаний так, що має можливість дистанційно змінювати ексцентриситет центра мас рухомого і нерухомого дебалансів, які розташовані на приводному валу, який із верхньої сторони встановлений на двох конічних підшипниках у циліндричний корпус керованого дебалансного віброприводу, із сторони двох конічних підшипників в сторону центра приводного вала, на приводному валу закріплено нерухомий дебаланс, а із протилежної сторони до двох конічних підшипників на приводному валу виконано діаметрально протилежні дві зустрічно напрямлені канавки, що мають довжину, рівну половині кроку гвинта і у нормальному перерізі форму півкруга, у канавках розміщено шарикові шпонки, на яких встановлено рухомий дебаланс, рухомий дебаланс кінематично з'єднаний із механізмом регулювання положення рухомого дебалансу вздовж осі приводного вала керованого дебалансного віброприводу, механізм регулювання положення рухомого дебалансу вздовж осі приводного валу складається із перетворювача руху, що виконаний у вигляді передачі гвинт-гайка, яка перетворює обертовий рух вала крокового двигуна, який кріпиться до механізму регулювання положення рухомого дебалансу вздовж осі приводного вала в поступальний рух рухомого дебалансу вздовж осі приводного вала керованого дебалансного віброприводу, приводний вал із сторони двох конічних підшипників через еластичну муфту з'єднано із розміщеним вертикально співвісно з керованим дебалансним віброприводом, електродвигуном, який кріпиться до станини, на якій пружно встановлений підпружинений корпус.

UA 107156 U

UA 107156 U



Фиг.5

UA 107156 U

Корисна модель належить до сушильної техніки і може бути використана для сушіння високовологих матеріалів у харчовій, хімічній та інших галузях переробної промисловості.

Відома відцентрова сушарка для високовологих матеріалів (А.С. СРСР № 323621 кл. F26B 11/08, Б. № 1, 1972), що містить корпус з перфорованою камерою, яка приєднана до

5 дебалансного вібробуджувача, завантажувальний пристрій, виконаний у вигляді пресуючого шнека, парогенератор та вивантажувальний механізм у формі підпружиненої тарілки, змонтованої в центральній камері.

До основних недоліків розглянутої установки можна віднести значну складність конструкції та порівняно низьке вологовидалення фізично зв'язаної вологи з матеріалів.

10 Найбільш близьким аналогом є вібровідцентрова сушарка [1], що містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту.

15 До основних недоліків даної вібровідцентрової сушарки можна віднести високі енергозатрати на реалізацію процесу сушіння.

Суттєвим недоліком конструктивного рішення вібровідцентрової сушарки [1] є те, що конструктивне рішення сушарки [1] не дозволяє керувати динамічними параметрами вібраційного поля [2], що пронизує сировину, яка знаходиться у перфорованому роторі. Виходячи із цього, конструктивне рішення вібровідцентрової сушарки [1] не здатне

20 забезпечувати [3] енергетично вигідний резонансний режим роботи підпружиненого корпусу, при різній або змінній масі завантаження сировиною із конкретними фізико-хімічними параметрами.

В основу поставлено задачі зменшення енергозатрат на дебалансний вібропривод приводного вала підпружиненого корпусу та розширення технологічних можливостей

25 вібровідцентрової електроосмотичної сушарки.

Поставлена задача досягається тим, що у вібровідцентровій електроосмотичній сушарці, що містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту, згідно

30 корисної моделі, приводний вал з дебалансами, що розташований вертикально з боку підпружиненого корпусу та забезпечує коливальний рух підпружиненого корпусу є керованим, він виконаний так, що має можливість дистанційно змінювати ексцентриситет центра мас рухомого і нерухомого дебалансів, які розташовані на приводному валу, який із верхньої сторони встановлений на двох конічних підшипниках у циліндричний корпус керованого

35 дебалансного віброприводу, із сторони двох конічних підшипників у сторону центра приводного вала, на ньому закріплено нерухомий дебаланс, а із протилежної сторони до двох конічних підшипників на приводному валу виконано діаметрально протилежні дві зустрічно напрямлені канавки, що мають довжину, рівну половині кроку гвинта і в нормальному перерізі форму півкола, у канавках розміщено шарики шпонки, на яких встановлено рухомий дебаланс.

40 Рухомий дебаланс кінематично з'єднаний із механізмом регулювання положення рухомого дебалансу вздовж осі приводного валу керованого віброприводу, механізм регулювання положення рухомого дебалансу вздовж осі приводного валу складається із перетворювача руху, що виконаний у вигляді передачі гвинт-гайка, яка перетворює обертовий рух валу крокового двигуна, який кріпиться до механізму регулювання положення рухомого

45 дебалансу вздовж осі приводного валу в поступальний рух рухомого дебалансу вздовж осі приводного валу керованого дебалансного віброприводу, приводний вал із сторони двох конічних підшипників через еластичну муфту, з'єднану із розміщеним вертикально співвісно із керованим дебалансним віброприводом, електродвигуном, який кріпиться до станини, на якій пружно встановлений підпружинений корпус.

50 Запропонована конструкція вібровідцентрової електроосмотичної сушарки дозволяє в реальному масштабі часу реалізувати процес незалежного керування амплітудою та частотою коливань сировини, що проходить технологічний процес сушіння у перфорованім роторі. Завдяки зміні частоти циклічної примусової сили керованого дебалансного віброприводу вібровідцентрової електроосмотичної сушарки в запропонованій конструкції є можливість

55 забезпечувати та підтримувати постійно протягом технологічного процесу сушіння сировини із різними фізико-хімічними показниками енергозберігаючий резонансний режим коливань підпружиненого корпусу та дає можливість додатково при постійному резонансному режимі коливань підпружиненого корпусу керувати динамічними параметрами вібраційного впливу (коефіцієнтом перевантаження вібраційного поля, питомою роботою вібраційного поля, питомою потужністю вібраційного поля) на сировину, що проходить технологічний процес

60

UA 107156 U

сушіння у перфорованім роторі. Запропоноване конструктивне рішення розширює технологічні можливості вібровідцентрових сушарок завдяки комплексному підходу до використання вібраційного впливу в технологічному процесі сушіння сировини із різними фізико-хімічними властивостями.

5 З фіг. 1 по фіг. 4 зображено загальний вигляд запропонованої вібровідцентрової електроосмотичної сушарки.

З фіг. 5 по фіг. 8 зображено конструктивне рішення електромеханічної будови запропонованої вібровідцентрової електроосмотичної сушарки.

Вібровідцентрова електроосмотична сушарка містить станину 1, що встановлена на опорах 12 та два основних структурних контури, які приводяться до руху електродвигунами 2, 3 і 20. Внутрішній контур вібровідцентрової електроосмотичної сушарки має у своєму складі підпружинений корпус 4 з перфорованим ротором 5, що приводиться в обертний рух електродвигуном 2, патрубку 6 і 7 відповідно для зливу вилученої рідини та видалення вологого повітря. Кришку 8 з радіально розміщеними електродами 9 навколо центрального перфорованого патрубка 10, що розташований співвісно із перфорованим ротором 5 та знаходиться в центрі перфорованого ротора 5, який з'єднаний через проміжний шланг 11 з теплогенератором та компресором (теплогенератор та компресор на фігурах непоказані). Зовнішній контур вібровідцентрової електроосмотичної сушарки містить пружні елементи 14, приводний вал 15 керованого дебалансного віброприводу 13 у якого є можливість [4, 5] дистанційно змінювати ексцентриситет центра мас дебалансів 16 та 21 за рахунок кута $\beta \pm \Delta\beta$ між ними. Приводний вал 15 через компенсуючу муфту 17 приводиться в рух електродвигуном 3 та через підшипниковий вузол 18 та траверси 19 жорстко приєднаний до підпружиненого корпусу 4. Приводний вал 15 встановлений у корпус 15 керованого дебалансного віброприводу 13 на кінцевих підшипниках 18. На приводному валу 15 жорстко закріплений нерухомий дебаланс 21, а із протилежної сторони до підшипників 18 на приводному валу 15 виконано діаметрально протилежно дві зустрічно напрямлені канавки К1, що мають довжину, рівну половині кроку гвинта і в нормальному перерізі форму півкола. У канавках розміщено шарики шпонки 22 на яких встановлено рухомий дебаланс 16, він кінематично з'єднаний із механізмом регулювання положення 23 рухомого дебалансу 16 вздовж осі приводного валу 15 керованого дебалансного віброприводу 13. Механізм регулювання положення 23 рухомого дебалансу 16 вздовж осі приводного валу 15 складається із перетворювача руху 24, що виконаний у вигляді передачі гвинт-гайка яка перетворює обертний рух валу крокового двигуна (або сервоприводу) 20, що кріпиться до механізму регулювання положенням 23 у поступальний рух рухомого дебалансу 16 вздовж осі приводного валу 15.

Вібровідцентрова електроосмотична сушарка працює наступним чином. Перед запуском вібровідцентрової електроосмотичної сушарки дебаланси 16 та 21 керованого дебалансного віброприводу 13 знаходяться в діаметрально протилежному положенні (так само як у роботі [4]) тобто, кут між їхніми центрами мас становить $\beta=180^\circ$. Їхній сумарний статичний момент (16 та 21) відносно центральної осі приводного валу 15 рівний нулю. Після чого вологий матеріал (сировину) довільної маси завантажують у перфорований ротор 5. Вмикають електродвигун 2. За рахунок відцентрових сил, виникаючих при обертанні перфорованого ротора 5 відбувається вилучення вільно зв'язаної вологи через патрубок 6 у підпружиненому корпусу 4 та ущільнення оброблювального матеріалу відносно стінок ротора. Після відпрацювання заданого часу центрифугування t_d (с) та закону зміни його в часі ω_d (t) вимикається електродвигун 2. Після чого фіксується кришка 8, у перфорований патрубок 9 через проміжний шланг 11 при допомозі компресора і теплогенератора нагнітається теплоагент (теплогенератор та компресор на фігурах непоказані). Одночасно до радіально розміщених електродів 9 підводиться електричний струм, зумовлюючи виникнення електроосмотичного ефекту [6] та дифузійного видалення вологи з матеріалу через патрубок 7. Проведеним аналізом існуючих способів електрокінетичної обробки сировини із різними фізико-хімічними властивостями [7, 8] встановлено, що для видалення вологи з продуктів, найчастіше застосовується конвективний спосіб сушіння, істотним недоліком якого є високі енерговитрати процесу, а також те, що сушильний агент спочатку сприяє інтенсифікації переміщення зони випаровування всередину та утворенню в поверхневих шарах продукту збільшеного вмісту сухих речовин, що в подальшому стримує процес зневоложення і погіршує випаровування вологи з глибини продукту. Комбінування конвективного та електроосмотичного зневоложення дещо стримує вищевикладені негативні зміни. У той же час, відсутність наукових основ комбінованого конвективно-електроосмотичного сушіння не дає повної уяви щодо механізмів даного процесу, впливу окремих чинників на швидкість його перебігу тому, що матеріали із різними фізико-хімічними властивостями є складними вологовмісними системами. Сучасні погляди на механізм

UA 107156 U

електрокінетичних явищ ґрунтуються на уявленні про наявність подвійного електричного шару на межі розподілу фаз [9], що визначається швидкістю електродних процесів і, відповідно, переміщенням вологи всередині продукту. Електроосмос, як окремий випадок електрокінетичних явищ, цілеспрямовано може бути використаний для зневоложення харчових продуктів, проте високі значення напруги негативно впливають на структуру і фізико-хімічні показники продукту, що обробляються [6].

Наступним етапом технологічного процесу сушіння сировини із різними фізико-хімічними властивостями є ввімкнення електродвигуна 3, крутний момент якого через компенсуючу муфту 17 передається на приводний вал 15 з дебалансами 16 та 21, для створення силової незрівноваженості системи, яка дозволить за рахунок постійного перемішування та розпушування ущільненої сировини інтенсифікувати технологічний процес сушіння. Після запуску електродвигуна 3 завдяки адаптивній системі керування (на фігурах непоказана) починаються зростання частоти обертання ω валу електродвигуна 3 та відповідно приводного валу 15 аж до виходу на заданий резонансний режим роботи $\omega = \omega_0$, який є енергетично оптимальним для реалізації вібровідцентровою електроосмотичною сушаркою своїх функцій. При резонансному режимі коливань власна резонансна частота коливань ω_0 коливної механічної системи (підпружиненого корпусу 4) дорівнює частоті циклічної примусової сили керованого дебалансного віброприводу 13 вібровідцентрової електроосмотичної сушарки. Після виходу вібровідцентрової електроосмотичної сушарки на заданий режим роботи по ω частоті коливань його циклічної примусової сили F ($F = F \cdot \sin(\omega \cdot t)$), система керування роботою (не показана на фігурах) починає виводити F амплітуду циклічної примусової сили керованого дебалансного віброприводу 13 на задане технологічно оптимальне значення для забезпечення вібраційного перемішування яке характеризується коефіцієнтом перевантаження k [10] вібраційного поля підпружиненого корпусу 4 (який в літературі ще називають коефіцієнтом режиму вібрації [11] або коефіцієнт динамічності [12]). Виведення амплітуди F циклічної примусової сил керованого дебалансного віброприводу 13 (та керування нею $F \pm \Delta F$) проводиться системою керування на основі промислового мікроконтролера через наступний контур системи керування: одноосьовий модуль позиціонування, кабель, сервопідсилювач, сервопривод (20) - шляхом виведення заданої кількості імпульсів для забезпечення певного кута повороту вала сервоприводу (або крокового двигуна) 20. В результаті команди від системи керування сервопривод 20 повертає свій вал на заданий кут α (значення величини кута повороту α валу сервоприводу обмежень немає, тобто може бути як більшим за 360° , так і меншим за 360° , і визначається лише кількістю імпульсів та кутовим кроком самого сервоприводу, ще однією особливістю сервоприводу є те, що він має здатність утримувати заданий кут повороту в часі). Поворот вала на кут α сервоприводу 20 зумовлює регручування (закручування) у передачі гвинт-гайка перетворювача руху 24 механізму регулювання положення 23 рухомого дебалансу 16. Викручування (закручування) у перетворювачі руху 24 зумовить рух рухомого дебалансу 16 вздовж основної осі приводного валу 15 керованого дебалансного віброприводу 13. Завдяки кінематичному зв'язку рухомого дебалансу 16 із перетворювачем руху 24 він може обертатись навколо основної осі приводного валу 15 і переміщатись вздовж неї. Переміщуючись вздовж основної осі приводного валу 15 рухомий дебаланс 16 починає повертатись відносно даної центральної осі завдяки тому, що відбувається переміщення двох шарикових шпонок 22, які одночасно перебувають у двох пазах під шпонками на рухомому дебалансі 16 і у двох діаметрально протилежно зустрічно напрямлених канавках $K1$ приводного вала 15 керованого дебалансного віброприводу 13. В результаті повороту рухомого дебалансу 16 навколо основної осі приводного валу 15 керованого дебалансного віброприводу 13 змінюється сумарний статичний момент пари дебалансів 21 і 16 відносно центральної осі приводного валу 15. Зміна ексцентриситету пари дебалансів 21 і 16 призведе до зміни відцентрової циклічної примусової сили F керованого дебалансного віброприводу 13. Завдяки вище описаним кінематичним зв'язкам між елементами (вузлами) запропонованого конструктивного рішення вібровідцентрової електроосмотичної сушарки система керування отримує можливість динамічно в процесі сушіння сировини із різними фізико-хімічними властивостями керувати амплітудою циклічної примусової сили керованого дебалансного віброприводу 13 і як наслідок керувати амплітудою коливань підпружиненого корпусу 4 та динамічними параметрами вібраційного поля, що пронизує сировину, яка знаходиться в перфорованому роторі 5 на власній резонансній частоті коливань ($\omega = \omega_0$) коливної механічної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки. Запропоноване конструктивне рішення дозволяє забезпечити заданий коефіцієнт перевантаження вібраційного поля в перфорованому роторі 5, а отже задану якість (інтенсивність) перемішування сипучого

UA 107156 U

середовища на фоні комбінованого конвективно-електроосмотичного сушіння при мінімальних затратах на електропривод (резонансний режим роботи).

Джерела інформації:

1. Пат. 80873 U Україна, F26B 17/30. Вібровідцентрова сушарка. Паламарчук Т.П., Янович В.П., Зозуляк І.А., Зозуляк О.В. (Україна). - № u201300049; Оpubл. 10.06.2013; Бюл. № 11, 4 ст.
2. Пат. 92041 А Україна, B65G2 7/100. Спосіб стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин. Серета Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. (Україна). - № a200806209; Оpubл. 27.09.2010; Бюл. № 18, 3 ст.
3. Пат. 87776 А Україна, B65G 27/00. Спосіб керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин. Серета Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. (Україна). - № a200803685; Оpubл. 10.08.2009; Бюл. № 15, 4 ст.
4. Пат. 1281312 А1 (СССР), B06B 1/16. Вибровозбудитель. Сердюк Л.И. (СССР). - № 3925547/24-28; Оpubл. 07.01.1987; Бюл. № 1, 3 ст.
5. Чубик Р.В. Керовані вібраційні технологічні машини / Р.В. Чубик, Л.В. Ярошенко. - Вінниця.: ВНАУ, 2011. - 355 с.
6. Тихомолова К. П. Электроосмос / К.П. Тихомолова. - Л.: "Химия". 1989-24 7с.
7. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах / П.А. Ребиндер. - Избранные труды. - М.: Наука, 1978. - 368 с.
8. Вода в дисперсных системах / [Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко и др.]- М: Химия, 1989. - 288 с.
9. Бойко Ю.П. Исследование электроосмоса в условиях перекрытия двойных слоев в водных дисперсиях алюмосиликатов: Автореф. дис... канд. хим. наук. - К.: 1981. - 24 с.
10. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання / В.О. Повідайло. - Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2004. - 248 с.
11. Членов В.А. Виброкипящий слой / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. - М.: Наука, 1972.-341 с.
12. Левитский Н.И. Колебания в механизмах: Учеб. пособие для вузов / Н.И. Левитский. - М: Наука, 1988. - 336 с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- Вібровідцентрова електроосмотична сушарка, що містить підпружинений корпус, приводний вал з дебалансами та перфорований ротор, з системою патрубків для подачі теплоносія та відведення видаленої вологи, електроди, елементи живлення та його регулювання для реалізації електроосмотичного ефекту, яка **відрізняється** тим, що приводний вал з дебалансами, що розташований вертикально з боку підпружиненого корпусу та забезпечує коливальний рух підпружиненого корпусу, є керованим, він виконаний так, що має можливість дистанційно змінювати ексцентриситет центра мас рухомого і нерухомого дебалансів, які розташовані на приводному валу, який із верхньої сторони встановлений на двох конічних підшипниках у циліндричний корпус керованого дебалансного віброприводу, із сторони двох конічних підшипників в сторону центра приводного вала, на приводному валу закріплено нерухомий дебаланс, а із протилежної сторони до двох конічних підшипників на приводному валу виконано діаметрально протилежні дві зустрічно напрямлені канавки, що мають довжину, рівну половині кроку гвинта і у нормальному перерізі форму півкруга, у канавках розміщено шарики шпонки, на яких встановлено рухомий дебаланс, рухомий дебаланс кінематично з'єднаний із механізмом регулювання положення рухомого дебалансу вздовж осі приводного вала керованого дебалансного віброприводу, механізм регулювання положення рухомого дебалансу вздовж осі приводного вала складається із перетворювача руху, що виконаний у вигляді передачі гвинт-гайка, яка перетворює обертовий рух вала крокового двигуна, який кріпиться до механізму регулювання положення рухомого дебалансу вздовж осі приводного вала в поступальний рух рухомого дебалансу вздовж осі приводного вала керованого дебалансного віброприводу, приводний вал із сторони двох конічних підшипників через еластичну муфту з'єднано із розміщеним вертикально співвісно з керованим дебалансним віброприводом, електродвигуном, який кріпиться до станини, на якій пружно встановлений підпружинений корпус.

UA 107156 U

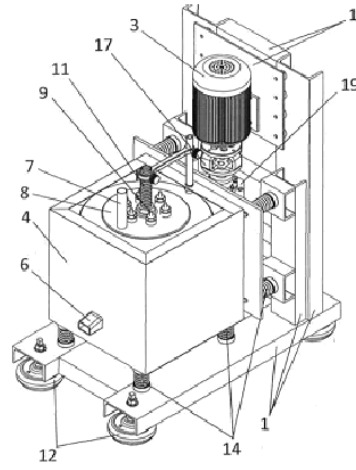


Fig.1

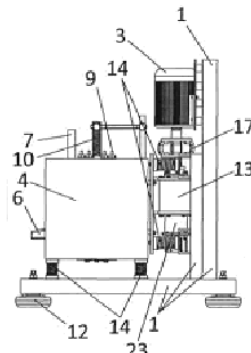


Fig.2

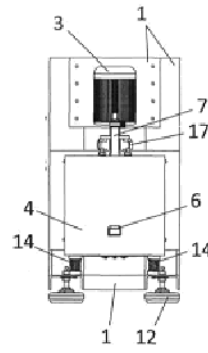
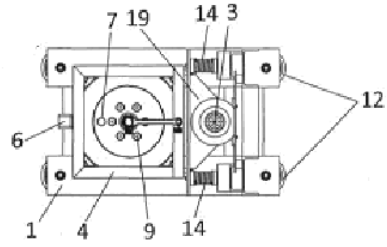
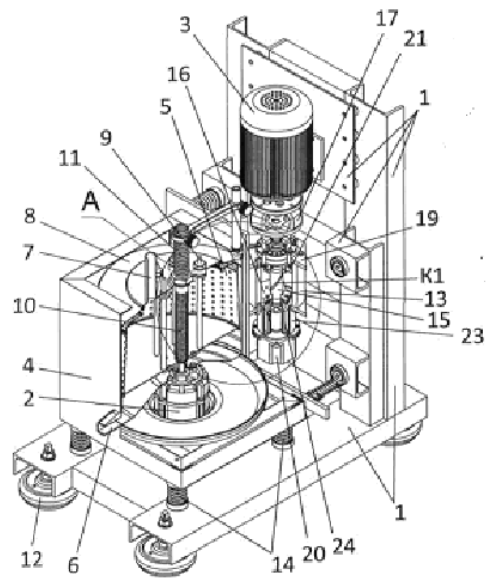


Fig.3

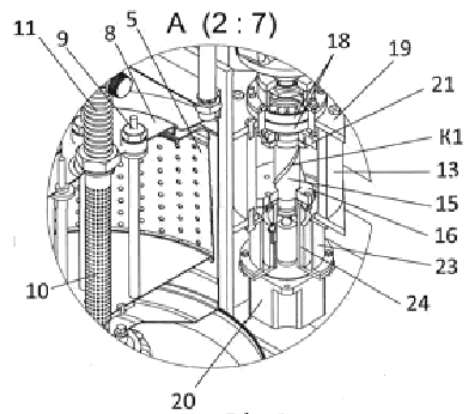
UA 107156 U



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

Додаток Е

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КОРМІВ ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ПОДІЛЛЯ НААН**

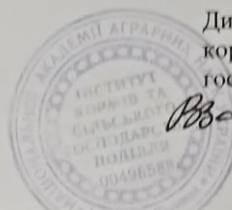
ЛАБОРАТОРІЯ МОНИТОРИНГУ ЯКОСТІ КОРМІВ І СИРОВИНИ
СВІДОЦТВО ПРО АТЕСТАЦІЮ №ПУ-0111/14 НА ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ У СФЕРІ ТА
ПОЗА СФЕРОЮ ПОШИРЕННЯ ДЕРЖАВНОГО МЕТРОЛОГІЧНОГО НАГЛЯДУ ОБ'ЄКТІВ
ВИМІРЮВАННЯ НАСІННЯ, ПРОДОВОЛЬЧОГО ЗЕРНА, КОРМІВ, КОМБИКОРМІВ ТА
КОРМОВИХ ДОБАВОК

видане 08 серпня 2014 року чинне до 23 липня 2017 року

Адреса: 21100, м. Вінниця
пр. Юності, 16
тел/факс 46-41-16
тел. лабор. 43-81-94
ел.пошта: zoolab@ukr.net
<http://www.fri.vin.ua>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту
кормів та сільського
господарства Поділля НААН
О.В. Корнійчук
26 січня 2017 р.



**ПРОТОКОЛ № 6
ВИПРОБУВАНЬ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ**

Заявник: *ФОП Зозуляк О.В.*

Об'єкт випробувань: *Висушене насіння гарбуза, с. Волзька сіра 92, реєстр. № 5833.*

Мета випробувань: *визначення показників загального зоотехнічного аналізу.*

Дата надходження зразка до випробувальної лабораторії: *11.01.2017 р.*

Дата проведення випробувань: *11. – 25.01.2017р.*

Результати випробувань:

1. Хімічний склад у натуральній речовині, %

№	Назва зразка	Шифр	Суша речовина	Протеїн	Жир	Кліткова вива	Зола	БЕР
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Висушене насіння гарбуза, с. Волзька сіра 92	5833	4,46	38,06	44,70	2,58	3,20	7,00

2. Хімічний склад у абсолютно сухій речовині, %

№	Назва зразка	Шифр	Протеїн	Жир	Клітковина	Зола	БЕР
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Висушене насіння гарбуза, с. Волзька сіра 92	5833	39,84	46,79	2,88	3,28	7,21

Загальна вартість виконаних робіт складає 577 грн. 44 коп. (п'ятсот сімдесят сім гривень 44 копійки), у т.ч. 96,24 грн. ПДВ.

Завідувач відділу оцінки якості, безпеки
кормів і сировини, кандидат с.-г. наук

Л.П. Чернолата

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор Інституту
 кормів та сільського
 господарства Поділля НААН
О.В. Корнійчук
 січня 2017р.

АКТ

здачі-приймання науково-технічної продукції

м. Вінниця

січня 2017р.

Ми, що нижче підписалися, відповідальний Виконавець – завідувач відділом оцінки якості, безпеки кормів і сировини Інституту кормів та сільського господарства Поділля НААН **Чорнолата Л.П.**, з одного боку, та Замовник – **ФОП Зозуляк О.В.** з іншого боку, склали даний акт про те, що проводились вимірювальні випробування зразку: висушеного зерна гарбуза, реєстр. № 5833.

Результати випробувань оформлені протоколом випробувань № 6 і задовольняють Замовника.

Загальна вартість виконаних робіт складає **577 грн. 44 коп.** (п'ятсот сімдесят сім гривень 44 копійки), у т.ч. **96,24 грн. ПДВ.**


Розрахунки проведені у відповідності до виставленого рахунку.

Роботу здав:

Роботу прийняв:

ВИКОНАВЕЦЬ

Завідувач відділу оцінки якості, безпеки
 кормів і сировини
 канд. с-г. наук

 **Л.П. Чорнолата**

ЗАМОВНИК

О.В. Зозуляк

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття у науковому виданні, включеному до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Palamarchuk I., **Zozulyak O.**, Mushtruk M., Petrychenko I., Slobodyanyuk N., Domin Î., Udodov S., Semenova O., Karpovych I., Blishch R. The intensification of dehydration process of pectin-containing raw materials. *Potravinarstvo*. 2022. Vol. 16. P. 15–26. *(Zozulyak O. проведено експериментальні дослідження для визначення технологічних параметрів, що характеризують інтенсифікацію процесу вібровідцентрового електроосмотичного вологовидалення харчової сировини. Palamarchuk I. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Mushtruk M. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Petrychenko I. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів. Slobodyanyuk N. сформульовано актуальність досліджень з урахуванням усіх виявлених узгоджень і відмінностей у масиві наукової літератури).*

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

2. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А. Обґрунтування конструктивної схеми вібраційної фільтраційно-осмотичної сушарки. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2011. Вип. 9. С. 173–182. *(Зозуляк О. В. розроблено технологічні характеристики фільтраційно-осмотичної сушарки та проведено експериментальні дослідження. Паламарчуком І. П. взято*

участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Зозуляк І. А. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).

3. Паламарчук І. П., Цуркан О. О., **Зозуляк О. В.**, Герасімов О. О. Інтенсифікація процесів зневоложення насіння за рахунок використання вібраційного та електро-осмотичного ефектів. Вібрації в техніці та технологіях. 2012. № 1 (65). С. 110–115. *(Зозуляк О. В. розроблено сушарку з використанням електроосмотичного ефекту. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Цуркан О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Герасімовим О. О. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).*

4. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Герасімов О. О. Дослідження швидкісних характеристик вібраційно-осмотичного процесу зневоложення. Галузеве машинобудування, будівництво. 2012. Вип. 2 (32). Т. 1. С. 200–207. *(Зозуляк О. В. виконано дослідження швидкісних характеристик вібраційно-осмотичного процесу зневоложення. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Зозуляк І. А. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Герасімовим О. О. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).*

5. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Герасімов О. О. Експериментальне обґрунтування основних параметрів вібраційного фільтраційно-осмотичного сушіння. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2012. Вип. 10. Т. 1 (58). С. 157–163.

(Зозуляк О. В. виконано експериментальні дослідження з визначення основних технологічних параметрів сушарки. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Герасимовим О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).

6. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Герасимов О. О. Розроблення комплексу вимірювання та автоматичного регулювання параметрів вібраційно-осмотичного сушіння. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2012. Вип. 46. С. 159–165. *(Зозуляк О. В. висвітлено основні елементи розробленого вимірювального комплексу для дослідження основних параметрів вібрації, проведено пошук літературних джерел відповідно до тематики досліджень авторів. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Герасимовим О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

7. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Герасимов О. О. Визначення енергетичних та кінематичних параметрів процесу вібраційного конвективно-фільтраційного зневоложення за допомогою мікроконтролера та комп'ютера. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. 2013. Вип. 12 (75). С. 120–128. *(Зозуляк О. В. виконано необхідні експериментальні дослідження для оцінки енергетичних характеристик процесу сушіння. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Герасимовим О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

8. Янович В. П., **Зозуляк О. В.**, Качур Я. Ю. Визначення оптимальних робочих параметрів вібровідцентрового електроосмотичного зневоложувача жому. Вібрації в техніці та технологіях. 2014. № 1 (73). С. 122–126. *(Зозуляк О. В. виконано необхідні експериментальні дослідження для основних*

робочих режимів процесу сушіння. Янович В. П. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Качур Я. Ю. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).

9. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Липовий І. Г. Розробка математичної моделі процесу вібровідцентрового сушіння кератиномісткої сировини. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. 2014. Вип. 45. Т. 2. С. 124–129. *(Зозуляк О. В. приведено теоретичне обґрунтування основних робочих параметрів вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложувача, представлено розрахункову схему і закони руху цієї системи у вигляді рівнянь Лагранжа. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Липовим І. Г. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

10. Palamarchuk I., **Zozulyak O.**, Palamarchuk V. Hydrodynamic and diffusive parameters electroosmotic drying of pectin containing raw materials. Ukrainian Journal of Food Science. 2014. Vol. 2. Iss. 2. P. 318–325. *(Зозуляк О. визначено рівняння сили електроосмотичної дифузії, основні закономірності електроосмотичного кінетичного процесу руху рідкої фази, залежності основних параметрів електрогідродинаміки осмотичного масоперенесення. Palamarchuk I. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Palamarchuk V. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).*

11. **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Чубик Р. В. Вібровідцентрова електроосмотична сушарка для зневоложення високовологої сировини. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2015. № 2 (90). С. 52–56. *(Зозуляк О. В. представлено загальний вигляд та конструкторське рішення вібровідцентрової електроосмотичної сушарки для зневоложення високовологої сировини. Зозуляк І. А. взято участь у підготовці й оформленні*

публікації відповідно до вимог видання. Чубик Р. В. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).

12. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Чубик Р. В. Електромеханічна модель адаптивної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. 2015. Вип. 166. С. 226–235. (Зозуляк О. В. розроблено рішення регулювання параметрів вібровідцентрової електроосмотичної сушарки для зневоложення. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Зозуляк І. А. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Чубик Р. В. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).

13. Palamarchuk I., **Zozuliak O.**, Zozuliak I., Novgorodska N. Modeling of vibrocentrifugal electric osmotical dehydrating of with high humidity. Engineering, Energy, Transport AIC. 2017. No. 3 (98). P. 112–118. (Zozuliak O. використано II теорію подібності та теорію розмірностей, складено критеріальне рівняння масообміну для досліджуваного процесу. Palamarchuk I. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Zozuliak I. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання. Novgorodska N. проведено порівняльний аналіз наявної наукової літератури, яка наближена до тематики досліджень авторів та визначено відповідні узгодження і відмінності, що визначило її актуальність).

14. Паламарчук І. П., Слободянюк Н. М., Зозуляк О. В., Іволга А. Р. Оцінка вібраційних і електротехнічних параметрів процесу зневоложення високовологих та рідких дисперсних систем переробних і харчових виробництв. Тваринництво та технології харчових продуктів. 2020. № 1. С. 67–76. (Зозуляк О. В. обґрунтовано збільшення рушійної сили процесу зневоложення насіння гарбуза та іншої високовологої сільськогосподарської сировини шляхом центрифугування за обертання ротора, створення електроосмотичного ефекту за ефективних умов для одnobічної дифузії, процесу фільтрування середовища через перфорації ротора. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Слободянюк Н. М. проведено розрахунок залежностей швидкості зневоднення від асиметрії напівперіодів змінного струму, густини струму, частоти змінного струму, асиметрії напівперіодів електричного струму за різної форми зміни параметрів напруги та віброприскорення. Іволгою А. Р. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).

Стаття у науковому виданні іншої держави

15. Паламарчук І. П., Зозуляк О. В., Герасимов О. А. Разработка системы управления процессом сушки сыпучего сырья в конвективно-фильтрационной виброцентробежной машине. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2013. Vol. 15. № 4. С. 212–219. (Зозуляк О. В. розглянуто і розроблено схеми системи автоматичного регулювання і вимірювання енергетичних і просторових параметрів вібраційних тепломасо-обмінних процесів. Паламарчуком І. П. взято участь в інтерпретації отриманих результатів, формулюванні висновків. Герасимовим О. О. взято участь у підготовці й оформленні публікації відповідно до вимог видання).

Патенти України на корисну модель

16. Паламарчук І. П., Янович В. П., Зозуляк І. А., **Зозуляк О. В.** Вібровідцентрова сушарка: патент на корисну модель № 80873 Україна, МПК F26B 17/30. Заявник та патентовласник Вінницький національний аграрний університет; u 2013 00049; заявлено 02.01.2013; опубліковано 10.06.2013. 4 с. *(Зозуляк О. В. розроблено конструктивну схему вібровідцентрової сушарки для зневоложення високовологої сировини, проведено випробування. Зозуляк І. А. підготовлено патентну заявку. Паламарчом І. П. розроблено загальну концепцію ідеї та основні технічні рішення вібровідцентрової сушарки. Янович В. П. здійснено патентний пошук та попередній аналіз наявних технологій, визначено ключові технічні вимоги та характеристики пристроїв).*

17. **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Болонний В. Т., Чубик Р. В. Адаптивна вібровідцентрова електроосмотична сушарка: патент на корисну модель № 107157 Україна, МПК F26B 17/30. Заявник та патентовласник Зозуляк Оксана Володимирівна; u 2015 11239; заявлено 16.11.2015; опубліковано 25.05.2016. 4 с. *(Зозуляк О. В. розроблено схему регулювання параметрів вібровідцентрової сушарки для зневоложення високовологої сировини, проведено випробування. Зозуляк І. А. підготовлено патентну заявку. Болонним В. Т. взято участь у проєктуванні прототипу та вивченні ефективності роботи сушарки, створенні технічної документації. Чубик Р. В. здійснено патентний пошук та попередній аналіз наявних технологій, визначено ключові технічні вимоги та характеристики пристроїв).*

18. **Зозуляк О. В.**, Зозуляк І. А., Болонний В. Т., Чубик Р. В. Вібровідцентрова електроосмотична сушарка: патент на корисну модель № 107156 Україна, МПК F26B 17/30. Заявник та патентовласник Зозуляк Оксана Володимирівна; u 2015 11238; заявлено 16.11.2015; опубліковано 25.05.2016. 4 с. *(Зозуляк О. В. розроблено конструктивну схему вібровідцентрової сушарки для зневоложення високовологої сировини,*

проведено випробування. Зозуляк І. А. підготовлено патентну заявку. Болонним В. Т. взято участь у проектуванні прототипу та вивченні ефективності роботи сушарки, створенні технічної документації. Чубик Р. В. здійснено патентний пошук та попередній аналіз наявних технологій, визначено ключові технічні вимоги та характеристики пристроїв).

Тези наукових доповідей

19. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.** Обґрунтування енергоощадного процесу вібраційного електроосмотичного сушіння високовологої сировини. *Енергія. Бізнес. Комфорт: регіональна науково-практична конференція, м. Одеса, 19 грудня 2012 року: тези доповіді. Одеса, 2012. С. 35–36. (Зозуляк О. В. запропоновано напрями енергоефективності процесу зневоложення високовологої сировини за застосування вібровідцентрової та електроосмотичної дії, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків).*

20. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.** Обґрунтування конструкцій та режимних параметрів процесу вібраційного фільтраційно-осмотичного зневоложення. *Сучасні проблеми землеробської механіки: XIII Міжнародна наукова конференція, м. Вінниця, 17–19 жовтня 2012 року: тези доповіді. Вінниця, 2012. С. 91–93. (Зозуляк О. В. запропоновано загальний вигляд та конструкторське рішення вібровідцентрової електроосмотичної сушарки для зневоложення високовологої сировини, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації; особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків).*

21. Зозуляк О. В. Обґрунтування параметрів електроосмотичної дії при вібровідцентровому зневоложенні високовологих дисперсних матеріалів.

Актуальні проблеми харчової промисловості: Всеукраїнська науково-технічна конференція, м. Тернопіль, 08–09 жовтня 2013 року: тези доповіді. Тернопіль, 2013. С. 82–83.

22. **Зозуляк О. В.**, Лапа О. Ю. Розробка системи керування процесом сушіння сипкої сировини у конвективно-фільтраційній вібровідцентровій машині. Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 25–26 квітня 2013 року: тези доповіді. Вінниця, 2013. С. 9–10. *(Зозуляк О. В. розроблено систему регулювання параметрами вібровідцентрової електроосмотичної сушарки для зневоложення високовологої сировини, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Лапою О. Ю. проведено науковий літературний пошук, систематизовано інформацію, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації).*

23. **Зозуляк О. В.**, Бондарчук Є. В. Математичне моделювання процесу вібраційного фільтраційно-відцентрового зневоложення. Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 25–26 квітня 2013 року: тези доповіді. Вінниця, 2013. С. 23. *(Зозуляк О. В. проведено математичне моделювання процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення високовологої сировини, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Бондарчук Є. В. проведено науковий літературний пошук, систематизовано інформацію, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації).*

24. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.** Обґрунтування роботи енергоощадного електроосмотичного зневоложувача. Енергія. Бізнес. Комфорт: Науково-практична конференція, м. Одеса, 20 листопада 2014 року: тези доповіді. Одеса, 2014. С. 56–57. *(Зозуляк О. В. проведено дослідження для визначення технологічних параметрів оцінки енергоефективності розробленої*

вібровідцентрової електроосмотичної сушарки, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків).

25. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.** Визначення основних параметрів електро-осмотичної технологічної дії у процесі зневоложення пектиномісткої сировини. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023: III Міжнародна науково-технічна конференція, м. Вінниця, 1–3 червня 2023 року: тези доповіді. Вінниця, 2023. С. 332. *(Зозуляк О. В. проведено дослідження для оцінки основних різновидів технологічної дії розробленого процесу вібровідцентрового електроосмотичного зневоложення, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків).*

26. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Fu Yuanxia. Проектування конструкції вібровідцентрового рушійного органу машини для видалення вологи із харчової сировини. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 509–512. *(Зозуляк О. В. спроектовано конструкцію вібровідцентрової сушарки для зневоложення високовологої сировини, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації та презентації, особисто здійснено усну доповідь на конференції. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків. Fu Yuanxia проведено науковий літературний пошук, систематизовано інформацію, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації).*

27. Паламарчук І. П., **Зозуляк О. В.**, Fu Yuanxia. Розробка конструктивно-технологічної схеми вібраційного зневоложувача насіння баштанних культур. Продовольча та екологічна безпека в умовах війни та повоєнної відбудови: виклики для України та світу: Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 125-річчю Національного університету біоресурсів і природокористування України: м. Київ, 25 травня 2023 року: тези доповіді. Київ, 2023. С. 512–515. *(Зозуляк О. В. розроблено технологічні аспекти процесу вібровідцентрового зневоложення насіння баштанних культур. Паламарчуком І. П. взято участь у формулюванні актуальності, наукової новизни та висновків. Fu Yuanxia проведено науковий літературний пошук, систематизовано інформацію, взято участь у підготовці й оформленні матеріалів публікації).*

28. Зозуляк О. В. Вібровідцентровий електроосмотичний зневоложувач. Інноваційні рішення, актуальні проблеми та виклики у галузі харчових технологій: I Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Ірпінь, 05 жовтня 2023 року: тези доповіді. Ірпінь, 2023. С. 119–120.