

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
«ІНСТИТУТ МЕХАНІЗАЦІЇ ТА ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА»

ДМИТРЕНКО ВІКТОР ПЕТРОВИЧ



УДК 621.87.42 621.855

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРУДЕРА З ПРУЖНИМ  
ГВИНТОВИМ ЕЛЕМЕНТОМ**

05.05.11 – машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Вінницькому національному аграрному університеті, Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Кондратюк Дмитро Гнатович**,  
Вінницький національний аграрний університет,  
доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу.

**Офіційні опоненти:** академік НААН, доктор технічних наук, заслужений винахідник України, лауреат державної премії України, професор **Булгаков Володимир Михайлович** Національний університет біоресурсів і природокористування України, професор кафедри механіки, опору матеріалів та будівництва;

кандидат технічних наук, доцент  
**Павельчук Юрій Федорович** Подільський державний аграрно-технічний університет, доцент кафедри агроінженерії і системотехніки.

Захист відбудеться «18» 06 2020 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.27.358.01 у Національному науковому центрі «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» за адресою: 08631, Київська обл., Васильківський р-н, смт Глеваха, вул. Вокзальна, 11, к. 613.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового центру «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» за адресою: 08631, Київська обл., Васильківський р-н, смт Глеваха, вул. Вокзальна, 11, к. 215.

Автореферат розісланий «15» 05 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



С.П. Погорілий

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Переробка зернових кормів шляхом екструзії дозволяє перевести крохмаль зерна у сприятливу для засвоєння організмом форму, а відтак підвищити рівень їх засвоєння тваринами. Цей процес застосовують з метою отримання якісних кормів, які легко перетравлюються. Під час екструдуювання продукт піддається знезараженню, подрібненню, перемішуванню та частковому зневодненню.

Екструдери дозволяють переробляти зерно, його відходи та відходи переробної і харчової промисловості в якісні корми та сприяють підвищенню їх засвоювання тваринами. Максимальне використання кормових ресурсів та удосконалення технології приготування є нагальними вимогами часу.

Ефективним способом збільшення продуктивності екструдерів є поліпшення умов захоплення матеріалу гвинтом у зоні завантаження і зниження опору переміщення матеріалу до зони пластифікації, що в результаті, знижує енергоємність екструзії. Тому, **актуальним** є завдання розробки нових конструкцій пружних гвинтових елементів робочих органів екструдерів із розширеними технологічними можливостями, які забезпечують підвищення продуктивності у порівнянні з відомими, зменшення енерговитрат і характеризуються простотою конструкції та технологією їх виготовлення.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження, що складають основи дисертаційної роботи, виконані відповідно до Державної науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України за НТП 14 «Кормові ресурси», «Науково-технологічні основи селекційно-технологічного забезпечення виробництва кормів». Підпрограма 4 «Технології виробництва кормових добавок і преміксів на основі місцевої сировинної бази». Завдання другого рівня 14.04.03.05. П. встановити ефективні норми введення зерна тритикале у раціони свиней різних вікових груп, ДР №0114U002102. Встановити норми введення екструдованого та не екструдованого зерна тритикале у складі раціонів свиней.

**Мета роботи і задачі досліджень.** *Мета роботи* – поліпшення експлуатаційних показників процесу екструзії шляхом розробки екструдера з пружним гвинтовим елементом, обґрунтування параметрів та режимів його роботи.

Для досягнення поставленої мети було висунуто *робочу гіпотезу*, згідно якої поліпшення експлуатаційних показників процесу екструзії можливо досягнути шляхом вібрації пружного гвинтового елемента в результаті скачків тиску в перед матричній зоні одnogвинтового екструдера.

Процес перевірки робочої гіпотези передбачав вирішення наступних завдань:

- провести аналіз роботи та конструкцій робочих органів екструдерів і визначити напрямки їх удосконалення;
- виконати аналіз конструкцій пристроїв для підготовки зернових кормів до екструдуювання;

- здійснити теоретичні дослідження, які дозволяють визначити параметри екструдера з пружним гвинтовим елементом та його продуктивність;
- побудувати математичну модель коливань пружного гвинтового елемента, вздовж якого переміщується безперервно розподілена маса (середовище);
- розробити методику проведення досліджень, стендове обладнання та експериментальну установку для дослідження процесу приготування екструдованих кормів;
- провести експериментальні дослідження для визначення основних параметрів та експлуатаційних показників запропонованої конструкції робочого органу екструдера;
- провести експериментальні дослідження з визначення раціональних параметрів вузла підготовки зернової суміші до екструдуювання.

**Об'єкт дослідження** – процес екструдуювання зернових сумішей екструдером із пружним гвинтовим елементом.

**Предмет дослідження** – взаємозв'язок між основними конструкційно-технологічними параметрами і факторами екструдера із пружним гвинтовим елементом та експлуатаційними показниками процесу екструзії.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проведено із використанням основ теоретичної механіки, опору матеріалів, положень вищої математики, інженерної механіки та теорії коливань. Експериментальні дослідження проведено із використанням методів планування багатофакторних експериментів за галузевими та розробленими методиками з використанням стандартизованого та спеціально сконструйованого і виготовленого обладнання.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

*вперше:*

- обґрунтовано і розроблено конструкцію одногвинтового екструдера з пружним гвинтовим елементом;
- виявлено вплив основних параметрів пружного гвинтового елемента екструдера та фізико-механічних характеристик середовища на процес екструзії;
- розроблено математичну модель процесу екструзії, яка враховує зміну фізико-механічних параметрів суцільного середовища вздовж пружного гвинтового елемента та встановлено вплив основних параметрів на процес, який передуює його формуванню;

*дістало подальшого розвитку:*

- співвідношення, які описують зміну параметрів системи пружний гвинтовий елемент – суцільне середовище як для резонансного, так і нерезонансного режимів роботи;
- закономірності впливу технологічних параметрів розробленого пружного гвинтового елемента екструдера на функціональні та експлуатаційні показники процесу роботи екструдера.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Запропоновано і експериментально обґрунтовано нову конструкцію одновинтового екструдера з пружним гвинтовим елементом та визначено його основні параметри. Результати виробничих випробувань екструдера з пружним гвинтовим елементом підтвердили ефективність його використання у виробничих умовах.

Технічна новизна розробок захищена 6 патентами на корисні моделі України. Отримані наукові та практичні результати, методики й рекомендації впроваджено виробництво на ТДВ «Брацлав» (Вінницька обл.) та Фермерському господарстві «ЛІТАГОР» (Вінницька область, Козятинський район, с. Миколаївка), Державному підприємстві дослідне господарство «Артеміда» інституту картоплярства НААН України (Вінницька область, м. Калинівка).

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні та експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи здобувачем отримані особисто. У роботах, які виконані у співавторстві, автору належать наступні ідеї, наукові та практичні результати: запропонована методика розрахунку з отриманням залежностей частоти власних коливань середовище-пружний гвинтовий елемент; розроблена методика проведення експериментальних досліджень із визначення нерівномірності змішування зернової суміші; запропоновані пружні властивості моделі гвинтового робочого органу описані квазілінійним законом пружності, отримане диференціальне рівняння динаміки системи суцільне середовище – пружний гвинтовий елемент; виконані дослідження резонансних коливань системи суцільне середовище – пружний гвинтовий елемент; розроблено методику оцінки конструкцій механізмів з секційними гвинтовими робочими органами на технологічність; отримано залежність для визначення продуктивності екструдера з постійними геометричними параметрами гвинта; проектування та виготовлення експериментального обладнання, розроблення методик дослідження та їх виконання; виведено аналітичні залежності для визначення силових і конструктивних параметрів пружного гвинтового елемента; дана технологічна характеристика конструктивних параметрів гвинтового робочого органу екструдера; запропоновано нову конструкцію пружного гвинтового робочого органу; у винахідницьких працях здобувач генерував ідеї, брав безпосередню участь у розробленні принципів схем механізмів та конструктивних особливостей виконавчих органів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідались й обговорювались на: науково-практичних конференціях Вінницького національного аграрного університету у 2014-2016 рр.; Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя у 2014-2016 рр.; Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» у Луцькому національному технічному університеті 2014-2016 рр. Робота доповідалась у повному обсязі та отримала позитивний відгук на розширеному засіданні міжкафедрального наукового семінару інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету в 2019 р.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 18 праць; з них – 8 у періодичних фахових виданнях, одна в журналі, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, 3 у матеріалах конференцій і тезах доповідей. Отримано 6 деклараційних патентів України на корисні моделі.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Роботу викладено на 161 сторінках, вона містить 47 рисунків, 12 таблиць, а також додатки на 39 стор. Список літератури включає 137 позицій. Загальний обсяг дисертації становить 200 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, визначено мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про їх апробацію, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі представлено огляд літературних джерел за темою дисертації, проведено аналіз гвинтових екструдерів та напрацювання у галузі удосконалення робочих органів екструдерів.

Проводячи аналіз результатів досліджень гвинтових машин можна відмітити, що значний вклад у створенні теоретичних основ їх проектування та проведенні теоретичних і експериментальних досліджень здійснили П.М. Василенко, В.В. Адамчук, Р.М. Рогатинський, А.М. Григор'єв, Х. Герман, І.Е. Груздєв, Р.Л. Зенков, В.В. Новиков, Б.М. Гевко, Р.Б. Гевко, В.С. Ловейкін, В.В. Братішко, В.М. Булгаков, Б.В. Єгоров та багато інших. Значна увага вченими і конструкторами приділялась використанню гвинтових машин у різних галузях народного господарства, таких як машинобудування, сільськогосподарське виробництво, харчова та переробна промисловість. Зокрема науковці здійснювали пошук шляхів розв'язку задач взаємодії матеріалів із гвинтовими робочими органами та їх проектування в залежності від використання у тій чи іншій галузі.

Дослідження процесів пресування полімерних композицій у виробі, шляхом екструзії та литва під тиском, проводили К. Раувендель, В.С. Ким, В.А. Сілін, Д.Д. Рябінін та інші. Ними отримано залежності зміни температури нагріву та реологічних властивостей перероблюваних сумішей від обертального моменту та швидкості обертання гвинтів у екструдерах, що дозволяє здійснювати ефективний вибір конструктивних параметрів обладнання.

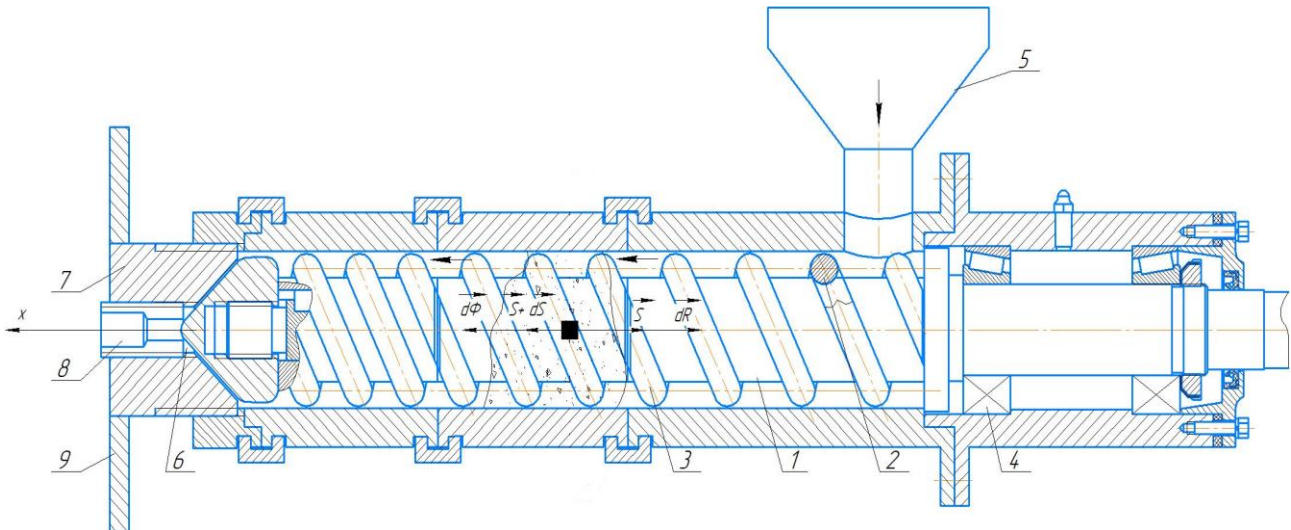
Значний внесок у формуванні наукових основ і загальних відомостей процесу змішування сипких матеріалів зробили: Г.М. Кукта, І.В. Кулаковський, І.Е. Груздєв, Ю.І. Макаров та ін.

У другому розділі проведено теоретичне обґрунтування параметрів та динаміки механічної системи суцільне середовище - пружний гвинтовий елемент.

Для обґрунтування параметрів процесу функціонування робочого органу з пружним гвинтовим елементом побудована математична модель процесу

ущільнення сипкого матеріалу, формалізованого як рух потоку матеріалу по робочих поверхнях (рис.1) екструдера. Для опису динаміки системи використали загальні принципи побудови математичних моделей динаміки механічних систем. Відповідно до них розглянуто динамічну рівновагу умовно виділеного елемента системи середовище – пружне тіло.

Беручи до уваги, що у запропонованій моделі системи відсутня депланація нормальних плоских перерізів пружного тіла, для однозначного визначення переміщення довільного його перерізу достатньо знати переміщення його центру. Таким чином, за розрахункову модель було прийнято одновимірне пружне тіло вздовж якого рухається суцільне середовище. Для нього переміщення центру маси перерізу із координатою  $x$  в довільний момент часу  $t$  однозначно визначається функцією  $u(x,t)$ . Сила інерції вказаного елемента, в такому разі, рівна  $dm \frac{d^2u}{dt^2}$ , де  $dm$  - маса виділеного елемента. Вона рівна сумі мас суцільного середовища  $dm_1$  і пружного тіла  $dm_2$ , тобто  $dm = dm_1 + dm_2$ .



1 – вал; 2 – гвинтова канавка; 3 – гвинтова пружина; 4 – циліндричний корпус; 5 – завантажувальний бункер; 6 – зона вивантаження; 7 – гайка; 8 – фільтр; 9 – рукоятка;  $d\bar{P}$  – вага виділеного елемента;  $d\bar{N}$  – нормальна реакція;  $d\bar{R}$  – сила опору;  $d\bar{\Phi}$  – сила інерції відносного руху вказаного елемента середовища разом із гвинтовою спіраллю;  $\bar{S}$  – зусилля, яке діє на правий кінець виділеного елемента зі сторони відсіченої частини пружного гвинта;  $\bar{S} + d\bar{S}$  – зусилля, яке діє на лівий кінець виділеного елемента зі сторони, відсіченої частини пружного гвинта.

Рисунок 1 – Розрахункова схема середовище – пружний гвинтовий елемент екструдера

У свою чергу  $dm_1 = \rho_1(x)dx$ ,  $dm_2 = \rho_2(x)dx$ , а  $\rho_1(x)$  та  $\rho_2(x)$  - погонні маси відповідно середовища та тіла. Приймемо, що пружні властивості моделі гвинта описуються квазілінійним законом пружності  $\sigma = E\varepsilon + \mu f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ , в якому  $\sigma$  - нормальне напруження у перерізі моделі системи;  $\varepsilon$  та  $\dot{\varepsilon}$  - відповідно відносна

деформація та її швидкість;  $\mu f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  - функція, яка вказує на відхилення пружних властивостей матеріалу моделі системи від лінійного закону;  $\mu$  - параметр, який вказує відхилення вказаних властивостей від лінійного закону. В такому разі величини внутрішніх сил  $S$  та  $S + dS$  можна записати у вигляді

$$S = EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + A\mu f\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t}\right), \quad (1)$$

$$S + dS = EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + A\mu f\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t}\right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + A\mu f\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t}\right) \right] dx. \quad (2)$$

У наведених вище співвідношеннях враховано, що відносна деформація одновимірної моделі тіла визначається залежністю  $\varepsilon = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}$ , тут  $A$  - площа його поперечного перерізу. Якщо перейти від векторного співвідношення, що виражає рівняння кінетостатики виділеного елемента до скалярного вигляду, отримаємо

$$(\rho_1(x) + \rho_2(x)) \frac{d^2 u(x,t)}{dt^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + A\mu f\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t}\right) \right] + R \left( \frac{du(x,t)}{dt} \right) = 0. \quad (3)$$

Оскільки вздовж виділеного елемента пружного тіла рухається суцільний потік середовища з відносною швидкістю  $V$ , то сила інерції середовища буде становити

$$\rho_2(x) \frac{d^2 u(x,t)}{dt^2} = \rho_2(x) \left[ \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + 2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} V + \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} V^2 + \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \frac{dV}{dt} \right]. \quad (4)$$

Отже, диференціальне рівняння динаміки системи суцільне середовище – робочий орган з пружним гвинтовим елементом можна записати у вигляді

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - \frac{1}{\rho_1(x) + \rho_2(x)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + A\mu f\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t}\right) \right] + R \left( \frac{du(x,t)}{dt} \right) - \rho_2(x) \left[ \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + 2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} V + \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} V^2 + \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \frac{dV}{dt} \right] \right\} = 0. \quad (5)$$

Для покращення структури і однорідності суцільного середовища пружний гвинтовий елемент піддається періодичним збуренням руху, точніше кажучи здійснює гармонічні коливання. Для того, щоб їх урахувати в математичній моделі процесу, необхідно записати крайові умови для рівняння (5). Періодичне переміщення, правого кінця можна записати за допомогою крайової умови:

$$u(x,t)_{|x=l} = h \sin \theta, \quad \theta = \omega t + \varphi, \quad (6)$$

де  $h$  – амплітуда збурення на початку процесу;  $\omega$  – кутова швидкість обертання гвинтового елемента;  $\varphi$  – початкова фаза збурення.

Подібним чином запишемо і крайову умову для лівого кінця

$$u(x,t)_{|x=0} = 0. \quad (7)$$

Отже, для дослідження впливу геометричних, кінематичних та фізико-механічних чинників на процес переміщення середовища в екструдері необхідно здійснити розв'язок рівняння, яке описує динаміку системи суцільне середовище – спіраль гвинта, тобто рівняння (5) за граничних умов (6) та (7).



Оскільки здійснити це без додаткових обмежень неможливо, то приймемо наступні обмеження, які притаманні гвинтовим екструдерам, а саме:

- розподіл мас суцільного середовища та гвинтових секцій спіралей вздовж довжини робочого органу є функціями лінійної змінної  $x$ , тобто  $\rho_1(x) = \rho_{10} + \mu\rho_{11}(x)$ ,  $\rho_2(x) = \rho_{20} + \mu\rho_{21}(x)$ ,  $\rho_{11}(x)$ ,  $\rho_{12}(x)$  - відомі неперервні функції);

- максимальне значення сили опору є величиною порядку  $\mu$  у порівнянні із максимальним значенням відновлювальної сили, тобто  $\max EA \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \gg \max R \left( \frac{du(x,t)}{dt} \right)$ .

На основі обмежень можна представити математичну модель динаміки суцільне середовище – гвинтовий робочий орган

$$\frac{\partial^2 u_0(x,t)}{\partial t^2} + \frac{2\rho_{20}}{\rho_{10} + \rho_{20}} \frac{\partial^2 u_0(x,t)}{\partial x \partial t} V - \frac{(EA - \rho_{20}V^2)}{\rho_{10} + \rho_{20}} \frac{\partial^2 u_0(x,t)}{\partial x^2} = 0, \quad (8)$$

за крайових умов

$$\begin{aligned} u_0(x,t)|_{x=0} &= 0 \\ u_0(x,t)|_{x=l} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

До речі, саме доданки  $\frac{2\rho_{20}}{\rho_{10} + \rho_{20}} \frac{\partial^2 u_0(x,t)}{\partial x \partial t} V$  та  $\frac{\rho_{20}V^2}{\rho_{10} + \rho_{20}} \frac{\partial^2 u_0(x,t)}{\partial x^2}$  враховано у

лінійній моделі руху суцільного середовища відносно гвинтової спіралі. Із (8) випливає, що хвильові числа зв'язані із частотою співвідношеннями

$$\Omega^2 + \frac{2\rho_{20}V}{\rho_{10} + \rho_{20}} \Omega K - \frac{EA - \rho_{20}V^2}{\rho_{10} + \rho_{20}} K^2 = 0, \quad \Omega^2 - \frac{2\rho_{20}V}{\rho_{10} + \rho_{20}} \Omega H - \frac{EA - \rho_{20}V^2}{\rho_{10} + \rho_{20}} H^2 = 0. \quad (10)$$

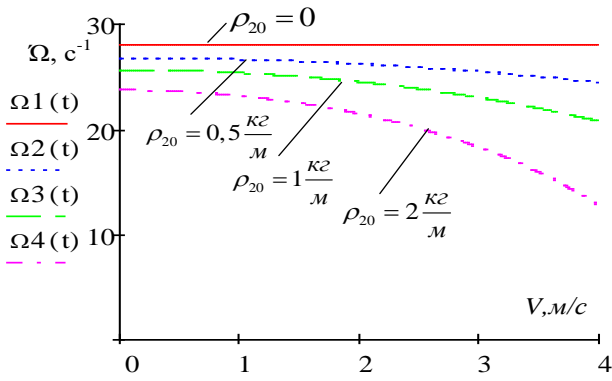
Із лінійності розглянутої вище крайової задачі випливає, що загальний розв'язок рівняння (8) за крайових умов (9) можна подати у вигляді лінійної комбінації одночастотних коливань, тобто:

$$u_0(x,t) = \sum_{k=1} a_k \left( \cos(K_k x + \Omega_k t + \varphi_{0k}) - \cos(H_k x - \Omega_k t - \varphi_{0k}) \right), \quad (11)$$

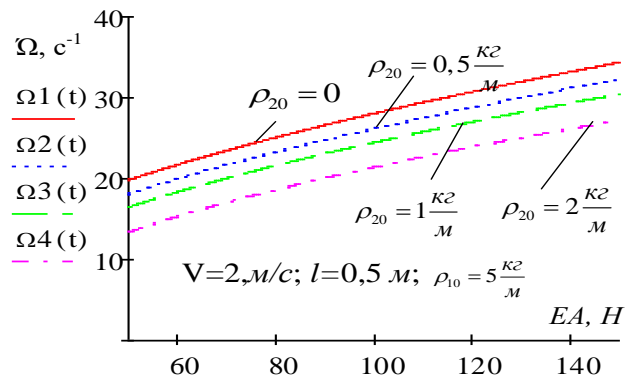
де  $a_k$  і  $\varphi_{0k}$  сталі, які знаходяться із початкових умов.

Для практичних досліджень – на базі принципу одночастотності коливань у нелінійних системах із зосередженими масами та розподіленими параметрами, треба дослідити вплив нелінійних та інших чинників на одну із мод коливань. Вона для лінійного випадку не залежить від амплітуди коливань, а визначається довжиною та пружними характеристиками робочого органу, головними частинами його погонної маси та середовища, поздовжньою складовою швидкості руху його.

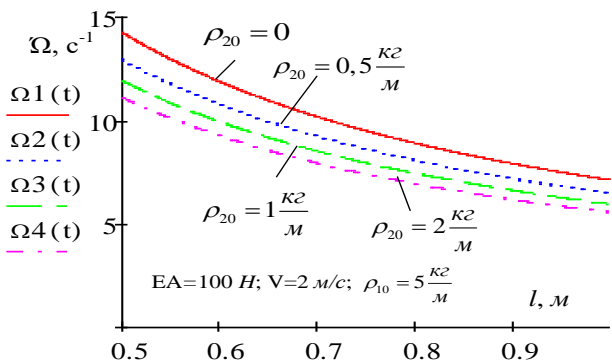
На рис. 2 подано залежності основної частоти коливань від основних характеристик системи середовище – пружний гвинтовий елемент (параметрів  $V$ , його погонної маси  $\rho_{20}$ , співвідношення між погонними масами середовища та пружного тіла).



а)



б)



в)

а) – швидкості руху середовища;

б) – пружної характеристики гвинта;

в) – довжини гвинта

Рисунок 2 – Залежність частоти власних коливань системи суцільне середовище – пружний гвинтовий елемент

Таким чином, отримані теоретичні результати та побудовані на їх базі графічні залежності (рис.2) показують, що власна частота системи середовища пружний гвинтовий елемент є меншою для більших швидкостей відносного руху середовища та більших значень погонних мас середовища та пружного гвинта. Так наприклад, зростання швидкості відносного руху від 0 до 2 м/с спричиняє зменшення власної частоти коливань системи на 12 % при  $\rho_1 = 5 \text{ кЗ/м}$ ,  $\rho_2 = 2 \text{ кЗ/м}$ ,  $l = 0,5 \text{ м}$ ,  $EA = 100 \text{ Н}$ , а зростання довжини гвинта від 0,5 м до 0,75 м на 26 % за вказаних вище характеристик.

Для отримання розрахункових залежностей для комплексної оцінки параметрів системи та крайових умов на динамічний процес дією періодичного збурення на правий кінець пружного гвинтового елемента слід розглянути два випадки: нерезонансний та резонансний. Для нерезонансного випадку має справджуватись співвідношення  $\Omega \neq \frac{r}{s} \omega$ , для резонансного ж  $\Omega \approx \frac{r}{s} \omega$  ( $r, s$  - взаємно прості числа). Таким чином, відповідно до основної ідеї асимптотичних методів нелінійної механіки нерезонансний розв'язок збуреної умови (7), (8) у першому наближенні асимптотичного ряду представимо у вигляді:

$$u(x, t) = a(\cos(Kx + \Omega t + \varphi) - \cos(Xx - \Omega t - \varphi)) + \varepsilon U(a, x, \phi, \theta), \phi = \Omega t + \varphi, \quad (12)$$

де  $U(a, x, \phi, \theta)$  – функція, яка повинна бути  $2\pi$  – періодичною за фазами власних та вимушених коливань, тобто  $\phi, \theta$  та задовольняє крайовим умовам, які випливають із (8), а саме:

$$\begin{aligned} U(a, x, \phi, \theta)|_{x=0} &= h_0 \sin \theta, \\ U(a, x, \phi, \theta)|_{x=l} &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

У резонансному випадку основні параметри, які визначають коливний процес значною мірою залежать від різниці фаз власних та вимушених коливань

$$v(x, t) = a(t) \left( \cos(Kx + \theta(t) + \mathcal{G}(t)) - \cos(Hx - \theta(t) - \mathcal{G}(t)) \right). \quad (14)$$

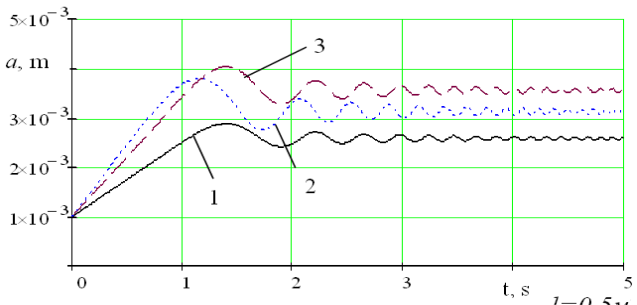
Для визначання основних параметрів коливань системи, зв'язок між амплітудою та різницею фаз набуває вигляду:

$$\begin{aligned} a_i = \frac{\mu}{2\pi l [(\Omega + VK)^2 + (\Omega - VH)^2]} \times \int_0^l \left( \Psi(x) \int_0^{2\pi} \tilde{f}_1(a, x, \mathcal{G} + \theta, \theta) \cos(\mathcal{G} + \theta) d\theta + \right. \\ \left. + \Theta(x) \int_0^{2\pi} \tilde{f}(a, x, y, \mathcal{G} + \theta, \theta) \sin(\mathcal{G} + \theta) d\theta \right) dx, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_i = \Omega - \frac{r}{s} \omega - \frac{\varepsilon}{2\pi l a [(\Omega + VK)^2 + (\Omega - VH)^2]} \times \int_0^l \left( \Psi(x) \int_0^{2\pi} \tilde{f}_1(a, x, \mathcal{G} + \theta, \theta) \sin(\mathcal{G} + \theta) d\theta - \right. \\ \left. - \Theta(x) \int_0^{2\pi} \tilde{f}_1(a, x, \mathcal{G} + \theta, \theta) \cos(\mathcal{G} + \theta) d\theta \right) dx. \end{aligned} \quad (16)$$

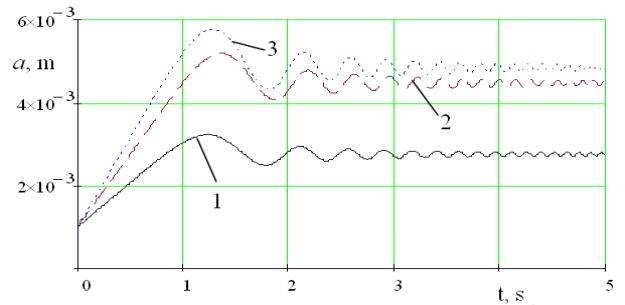
Таким чином, у резонансній коливання системи середовище – пружний гвинт описуються співвідношенням (14), а параметри  $a(t)$  та  $\mathcal{G}(t)$ , що входять у них визначаються залежностями (15, 16). На базі співвідношень (15, 16) побудовано залежності зміни в часі амплітуди коливань системи середовище – пружний гвинтовий елемент при переході через резонанс, які представлені на рис. 3. Вони показують:

- для більших значень швидкості відносного руху суцільного середовища значення резонансних амплітуд є меншим;
- для більших значень погонної маси суцільного середовища резонансне значення амплітуди є більшим;
- для пружних елементів великої жорсткості резонансна амплітуда має місце для більшого значення частоти вимушуючої сили і одночасно резонансна амплітуда є меншою;
- більшим значенням амплітуди коливань пружного гвинтового елемента відповідає більше значення резонансної амплітуди;
- вплив амплітуди входження у резонанс (початкового значення амплітуди) на резонансне значення амплітуди не значний;
- швидкість проходження резонансної зони впливає на резонансне значення амплітуди.



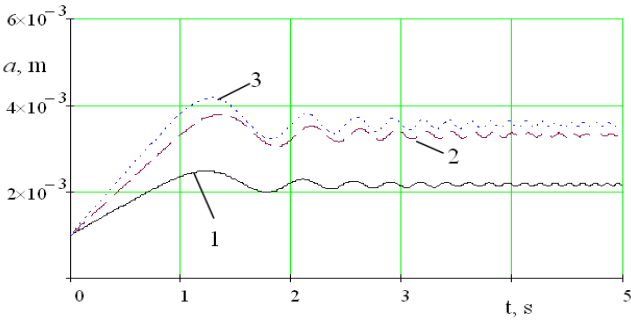
погонна маса: 1-  $\rho_0 = 0$ ; 2-  $\rho_0 = 3 \text{ кг/м}$ ; 3-  $\rho_0 = 5 \text{ кг/м}$

а)



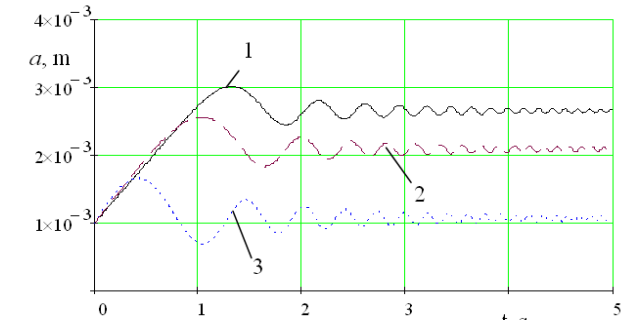
погонна маса: 1-  $\rho_0 = 0$ ; 2-  $\rho_0 = 3 \text{ кг/м}$ ; 3-  $\rho_0 = 5 \text{ кг/м}$

б)



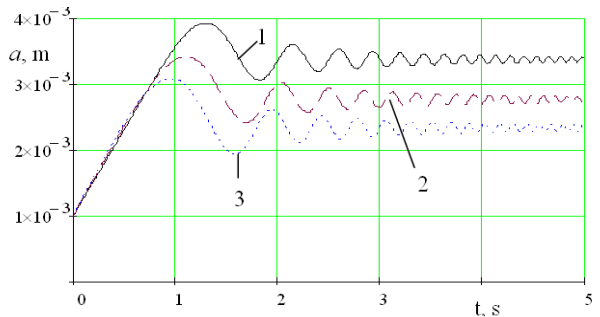
погонна маса: 1-  $\rho_0 = 0$ ; 2-  $\rho_0 = 3 \text{ кг/м}$ ; 3-  $\rho_0 = 5 \text{ кг/м}$

в)



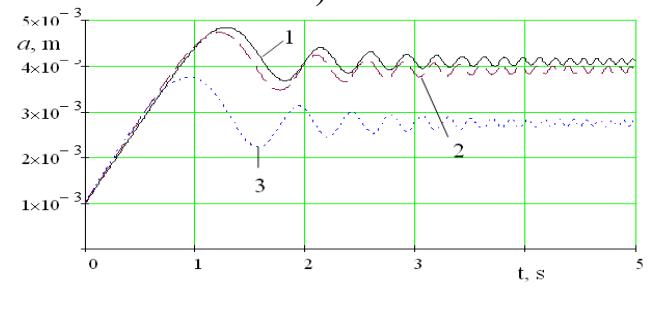
при швидкості: 1-  $\vartheta = 0$ ; 2-  $\vartheta = 3 \text{ м/с}$ ; 3-  $\vartheta = 5 \text{ м/с}$

г)



при швидкості: 1-  $\vartheta = 0$ ; 2-  $\vartheta = 3 \text{ м/с}$ ; 3-  $\vartheta = 4 \text{ м/с}$

д)



при швидкості: 1-  $\vartheta = 0$ ; 2-  $\vartheta = 3 \text{ м/с}$ ; 3-  $\vartheta = 4 \text{ м/с}$

е)

а), б), в) – різні значення погонної маси середовища; г), д), е) – різні швидкості руху його середовища

Рисунок 3 – Значення амплітуди коливань системи середовище – пружний гвинтовий елемент при переході через резонанс

Характерною особливістю екструдера запропонованої конструкції є те, що витки його гвинта сформовані круглою в перерізі спіраллю, тобто вони в зоні контакту з корпусом екструдера мають незначну товщину. Зазначене призводить до зростання втрат продуктивності внаслідок збільшення протитоку матеріалу між корпусом і витками гвинта. Це вимагає врахування впливу цього негативного явища на продуктивність екструдера.

Рівняння продуктивності гвинтового екструдера може бути отримане в результаті розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса:

$$Q = \frac{V}{2} WH + \frac{1}{12\mu} WH^3 \frac{\partial P}{\partial l} - Q_\delta, \quad (17)$$

де  $Q$  - об'ємна продуктивність екструдера, м<sup>3</sup>/с;  $W$  і  $H$  – відповідно, ширина і глибина розгортки каналу гвинта, м;  $V$  – швидкість руху матеріалу в гвинтовому каналі, м/с;  $\mu$  – в'язкість матеріалу, Па·с;  $\partial P/\partial l$  – градієнт тиску за довжиною каналу, Па/м;  $Q_\delta$  – втрати продуктивності внаслідок протитоку матеріалу між спіраллю та корпусом екструдера, м<sup>3</sup>/с.

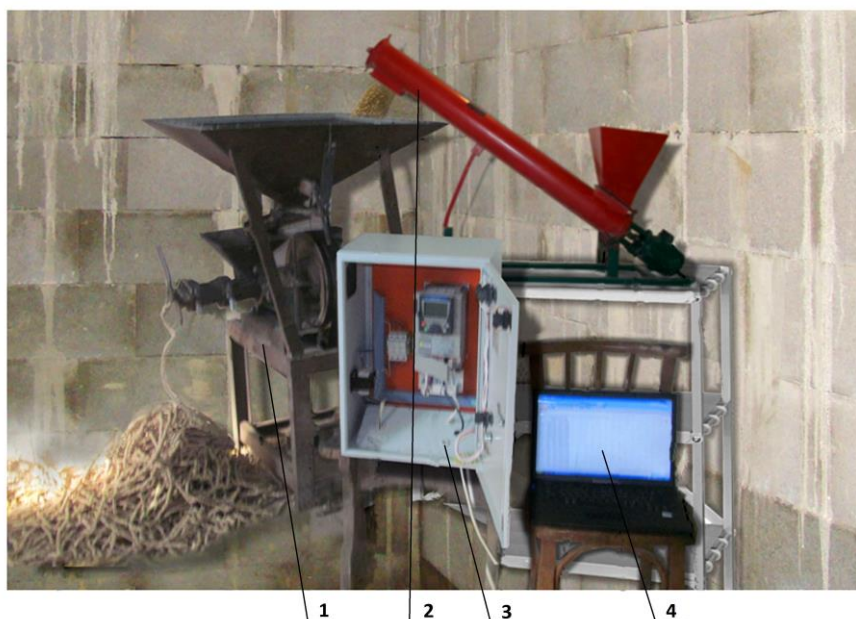
Після визначення складових і їх підстановки в (17) та спрощення виразу, одержано математичну модель, яка дозволяє визначити продуктивність екструдера з врахуванням втрат внаслідок протитоку матеріалу між спіраллю та корпусом:

$$Q = \frac{1}{32} \pi n d (D + 2\delta) (4t - \pi d) \cos \gamma + \frac{P_\phi}{12 \mu l} \left[ \frac{d^3 (\pi - 2) (4t - \pi d)^2}{256 t} - \frac{t \delta^3}{\sin \gamma} \right], \quad (18)$$

де  $D$  – зовнішній діаметр гвинта, м;  $n$  – частота обертання гвинта, с<sup>-1</sup>;  $\gamma$  – кут нахилу гвинтової лінії пружної спіралі, рад;  $\delta$  – зазор між гвинтом та корпусом екструдера, м;  $t$  – крок пружної спіралі гвинта, м;  $d$  – діаметр перерізу спіралі, м;  $P_\phi$  – тиск, створюваний формувальним пристроєм, Па;  $l$  – довжина каналу гвинта, м.

У третьому розділі наведені програма і методика експериментальних досліджень, описано макетну установку для екструдювання зернових кормів.

Розроблена установка (рис. 4) включає екструдер 1; вузол підготовки суміші до екструдювання 2; перетворювач частоти електричного струму 3; комп'ютер 4.

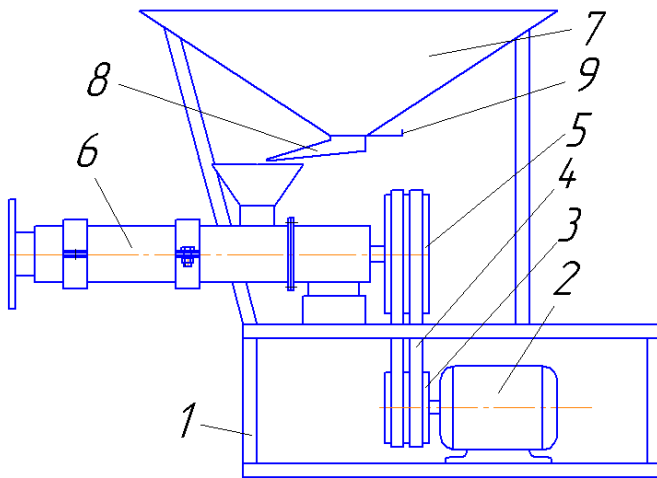


1 – екструдер; 2 – вузол підготовки суміші до екструдювання; 3 – перетворювач частоти електричного струму Altivar 71; 4 – комп'ютер

Рисунок 4 – Загальний вигляд макетного зразка установки

Екструдер (рис. 5) складається із рами 1, на якій встановлено електродвигун 2 марки АІР100L4, потужністю 4 кВт. На вихідному кінці валу електродвигуна закріплено шків 3, який через клиновидні паси 4 передає обертовий момент на шків-маховик 5 приводу гвинта робочої частини екструдера 6. У верхній частині рами 1 закріплено бункер 7 з лотком 8 для

накопичення і подачі зернової суміші в завантажувальну горловину робочої частини екструдера. Для регулювання подачі зернової суміші бункер обладнано заслінкою 9.



1 – рама; 2 – електродвигун;  
3 – шків; 4 – клиновидні паси;  
5 – шків-маховик; 6 – робоча  
частина екструдера; 7 – бункер;  
8 – лоток; 9 – заслінка

Рисунок 5 – Схема екструдера

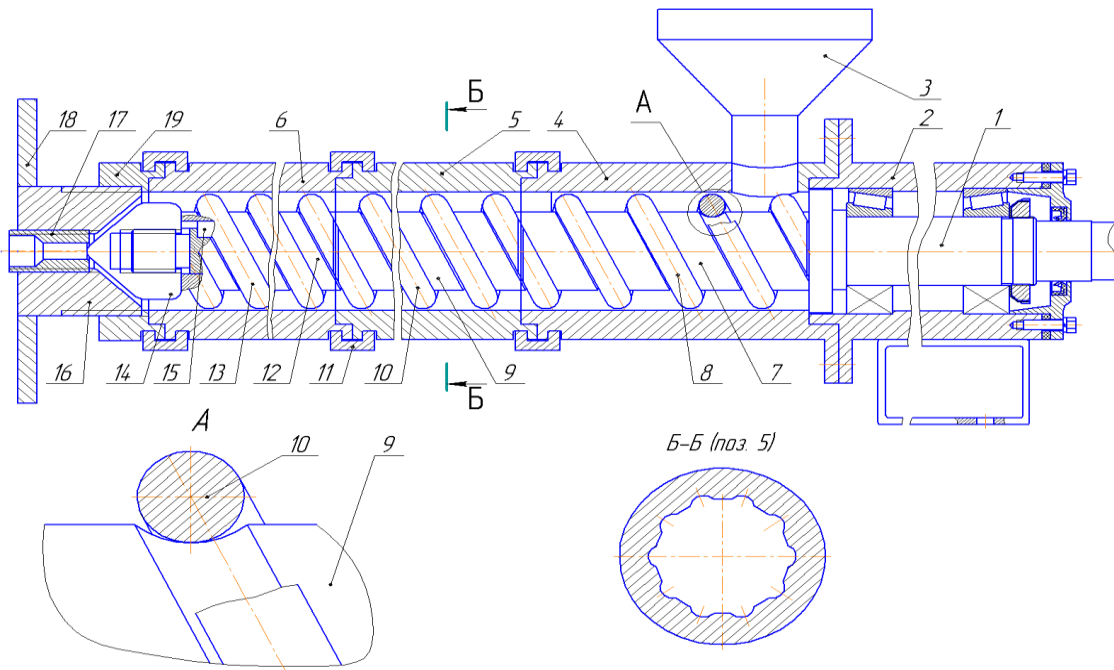
Робоча частина екструдера (рис. 6) виконана секційною. При цьому секції 7; 9 і 12 гвинта встановлені на валу 1 за допомогою призматичної шпонки 15. На зовнішній поверхні секції 7; 9 і 12 нарізано по чотири витки канавок напівкруглого перерізу різних кроків. Наприклад, на першій, по ходу руху матеріалу, секції 7 крок становить 21 мм, на другій секції (поз. 9) – 19 мм і на третій секції 12 крок становить 17 мм, тобто різниця кроків між секціями становить 2 мм. При цьому секції гвинта встановлені впритул, а їх канавки утворюють суцільну гвинтову лінію. Секції 7, 9 і 12 від осевого зміщення зафіксовані конусною гайкою 14. Секційний гвинт встановлено в циліндричний секційний корпус, який складається із секцій 4, 5 і 6. Секції корпусу з'єднані між собою хомутами 11.

Секція 4 оснащена завантажувальною горловиною 3. До секції 6 корпусу екструдера, за допомогою хомута 11, прикріплено гайку 19 (M50x2), в яку вгвинчується мундштук 16 з фільтрою 17. Зовні до мундштука 16 жорстко прикріпленні регулювальні рукоятки 18.

В канавки секцій гвинта 7; 9 і 12 вкладено, відповідно, пружини 8; 10 і 13, виконані із дроту діаметром 10 мм. Вал 1, секції гвинта 7; 9 і 12 та пружини 8; 10 і 13 разом з конусною гайкою 14 утворюють гвинт екструдера з пружним елементом.

Гвинтові канавки секцій 7, 9 і 12 мають ширину (довжину хорди), яка на 3 мм перевищує довжину хорди пружин 8, 10 і 13 на рівні зовнішнього діаметра секцій 7, 9 і 12 (рис. 6 вид А).

Працює робоча частина екструдера наступним чином. Підготовлена зернова суміш із завантажувальної горловини 3 поступає в міжвитковий простір гвинта і подається ним до фільтри. В міру переміщення суміші по робочій камері збільшується ступінь стиску. Суміш, ущільнюючись, нагрівається як за рахунок сил тертя зерен об поверхню гвинта та кожуха, так і за рахунок деформації зсуву. В результаті суміш гомонізується, набуває в'язко-текучого стану і піддається екструзії.



1 – вал; 2 – корпус підшипникової опори; 3 – завантажувальна горловина; 4, 5 і 6 – секції корпусу екструдера; 7, 9 і 12 – секції гвинта; 8, 10 і 13 – пружини; 11 – хомут; 14 – гайка конусна; 15 – шпонка; 16 – мундштук; 17 – фільтера; 18 – рукоятка; 19 – гайка М50х2

Рисунок 6 – Конструкція гвинтового робочого органу екструдера з пружним елементом

При приготуванні повноцінних, збалансованих кормів для тварин шляхом екструдювання, коли до зернових компонентів додають різні мікроелементи, небілкові азотисті речовини виникає проблема отримання рівномірного за вмістом компонентів корму. Досягнути цього можна шляхом підготовки суміші до екструдювання (змішування) компонентів перед екструдюванням. Для досягнення зазначеного запропонована конструкція вузла підготовки суміші до екструдювання рис. 7.

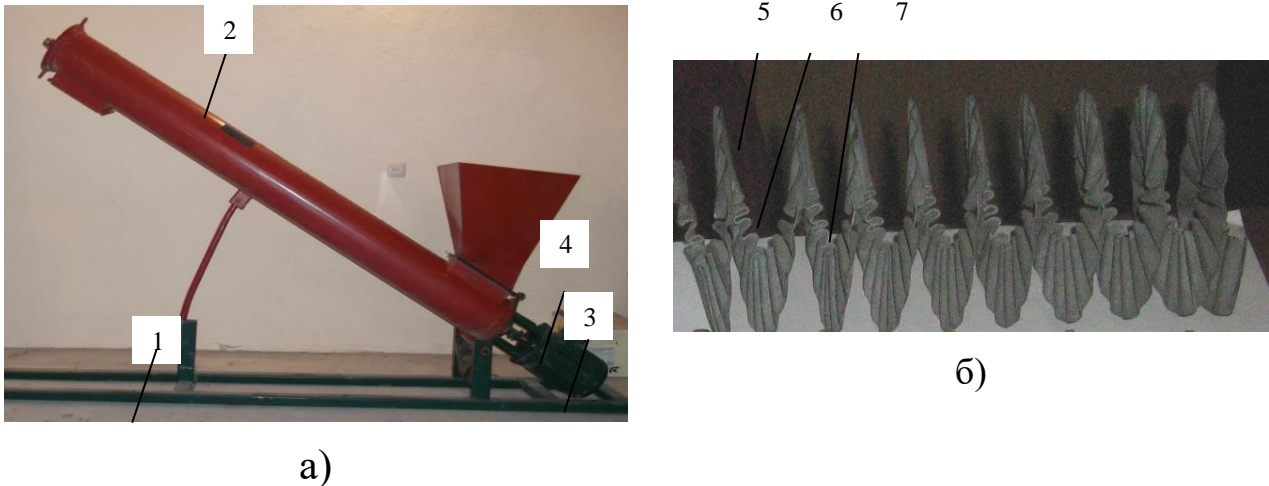
Вузол підготовки суміші до екструдювання виконано у вигляді рами 1, на якій жорстко встановлено кожух 2, електродвигун 3 із муфтою 4, гофрований робочий орган 5 (рис. 7 б), який має впадини 6 та виступи 7. У нижній частині кожуха 2 встановлено бункер із шибером, через який подається транспортований матеріал, що переміщується у зону вивантаження.

Експериментальні дослідження проводились з використанням методу планування багатофакторних експериментів на сировині, яка включала зерно кукурудзи, ячменю та озимої пшениці у масовому співвідношенні 5:3:2.

На першому етапі дослідження визначали вплив параметрів та режимів роботи екструдера на індекс розширення екструдату (відношення діаметру екструдату до діаметра фільтери).

Для вивчення процесу було вибрано наступні фактори, які найбільш суттєво впливають на індекс розширення екструдату: діаметр фільтери  $X_1(d, \text{мм})$ , відносна вологість зернової суміші  $X_2(W, \%)$  і температура екструдату  $X_3(T, ^\circ\text{C})$ .

Рівні та інтервали варіювання факторів були наступними (спочатку записаний нульовий рівень факторів, а після інтервал варіювання):  $X_1(6; 2 \text{ мм})$ ,  $X_2(16; 4 \%)$  і  $X_3(135; 25 \text{ }^\circ\text{C})$ .



а) – загальний вигляд, 1 – рама; 2 – кожух; 3 – електродвигун; 4 – муфта;  
 б) – загальний вигляд робочого органу, 5 – гофрований робочий орган; 6 і 7 – впадини і виступи гофр.

Рисунок 7 – Вузол підготовки суміші до екструдювання

При цьому частота обертання гвинта екструдера підтримували в межах 400...420 об/хв. Перевірка частоти обертання гвинта здійснювалася тахометром AR926. Вологість суміші визначали вологоміром марки Grain Moisture Meter MD782. Температуру корпусу екструдера біля фільтри фіксували пірметром RAYNGER ST20.

На другому етапі дослідження з обґрунтування параметрів та режимів роботи екструдера з пружним гвинтовим елементом визначали вплив їх на енергоємність процесу екструзії та об'ємну продуктивність екструдера.

Для вивчення процесу було вибрано наступні фактори, які найбільш суттєво впливають на зазначені вихідні величини: частота обертання гвинта  $X_1(n, \text{ об/хв})$ , глибина гвинтового каналу робочого органу  $X_2(h, \text{ мм})$ , крок гвинта  $X_3(t, \text{ мм})$  і кількість пазів, нарізаних на внутрішній поверхні корпусу екструдера  $X_4(m)$ .

Рівні та інтервали варіювання факторів були наступними (спочатку записаний нульовий рівень факторів, а після інтервал варіювання):  $X_1(500; 300 \text{ об/хв})$ ;  $X_2(6; 2 \text{ мм})$ ;  $X_3(21; 2 \text{ мм})$ ;  $X_4(8; 4)$ .

Питому енергоємність процесу екструзії визначали так:

$$C = \frac{3IU \cos \varphi}{G},$$

де  $C$  – питома енергоємність процесу екструзії, кВт·год/т;  $I$  – сила струму, А;  $U$  – напруга на фазах, В;  $G$  – масова продуктивність екструдера, т/год.

Об'ємну продуктивність екструдера визначали за формулою:

$$Q = \frac{G}{\rho},$$

де  $\rho$  – щільність екструдату, т/м<sup>3</sup>.



Для отримання регресійних моделей процесу був використаний некомпозиційний план Бокса  $V_4$ , який включав 24 досліди, проведених у трьох повтореннях.

Для проведення лабораторних досліджень з визначення якості роботи запропонованого вузла підготовки суміші до екструдування були вибрані наступні фактори: частота обертання гофрованого робочого органу  $X_1(n_1, \text{об/хв})$ , крок спіралі робочого органу  $X_2(t_1, \text{м})$ , кут нахилу кожуха вузла підготовки до горизонту  $X_3(\alpha, \text{град.})$  і висота гофрів по середньому діаметрі  $X_4(H, \text{мм})$ .

Рівні та інтервали варіювання факторів були наступними:  $X_1(125; 75 \text{ об/хв})$ ;  $X_2(0,15; 0,05 \text{ м})$ ;  $X_3(20; 10 \text{ град.})$ ;  $X_4(4,5; 1,5 \text{ мм})$ .

За критерій оцінювання якості підготовки суміші до екструдування був обраний коефіцієнт неоднорідності складу суміші:

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

де  $V_c$  – коефіцієнт неоднорідності суміші, %;  $\bar{c}$  – середнє значення концентрації головного компонента в усіх  $n$  пробах суміші, г;  $c_i$  – концентрація головного компонента в  $i$ -й пробі суміші, г.

З метою вибору раціональних параметрів і режимів роботи вузла підготовки суміші до екструдування було прийнято, що достатня ефективність підготовки буде тоді, коли неоднорідність суміші буде становити менше 10 %.

Для роботи експериментальної апаратури використовувалась програма Power Suite для налаштування перетворювачів частоти серії Altivar, в якій проводився вибір тих характеристик, які необхідні були при проведенні експериментів згідно розробленої методики проведення випробувань. Завдяки програмі Power Suite здійснювався вибір необхідної частоти обертання вала двигуна і напрям його обертання. Частота обертання задавалась у вікні осцилографа ПК у межах 8...16 Гц, що відповідало частоті обертання робочого органу вузла підготовки 56,8...227,2 об/хв.

**У четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень з обґрунтування параметрів та режимів роботи екструдера з пружним гвинтовим елементом.

Після реалізації плану експерименту, розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії та статистичного аналізу було отримано наступне рівняння, яке адекватно описує процес розширення екструдата  $\Delta$

$$\Delta = 2,48 - 0,13X_1 + 0,23X_2 + 0,14X_3 - 0,18X_1X_2 - 0,17X_1X_3 - 0,18X_1^2 - 0,25X_2^2 - 0,24X_3^2. \quad (19)$$

Рівняння (19) дозволяє оцінити ступінь як самостійного, так і спільного впливу основних параметрів процесу екструзії на вихідний параметр – індекс розширення екструдату  $\Delta$ . Як видно із (19) найбільше впливає на індекс розширення екструдату вологість зернової суміші  $X_2(W, \%)$ . В цьому рівнянні змінні приведені в закодованій формі. Для одержання рівняння регресії в натуральному масштабі можна використати наступні співвідношення:

$$X_1 = (d - 6,5)/2; \quad X_2 = (W - 16)/4; \quad X_3 = (T - 135)/25.$$

Рівняння (19) має екстремум  $\Delta_s = 2,72$  одиниць при:  $X_{1S} = -1,13$ ;  $X_{2S} = 0,87$  і  $X_{3S} = 0,69$ .

Встановлення раціональних режимів роботи екструдера здійснювали шляхом побудови двовірних перетинів поверхні відгуку. При цьому було прийнято, що достатня ступінь руйнування зерен крохмалю буде при умові, що індекс розширення екструдату  $\Delta$  буде більшим за 2,6 одиниць.

На рис. 8 наведені двовірні перетини поверхні відгуку, які характеризують рівень індексу розширення екструдату в залежності від зміни діаметра фільтри  $d$  і температури екструдату  $T$ .

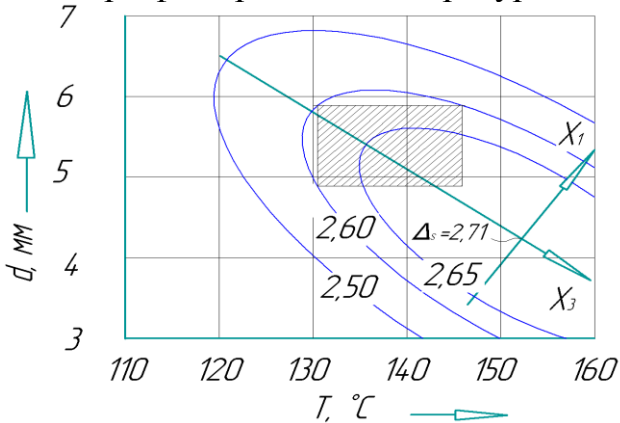


Рисунок 8 – Двовірні перетини поверхні відгуку, які характеризують зміну індексу розширення екструдату в залежності від діаметра фільтри  $d(X_1)$  та температури екструдату  $T(X_3)$  при  $X_{2S} = 0,87$  ( $W = 19,4\%$ ).

Розгляд двовірних перетинів зображених на рис. 8 показує, що при спільній дії діаметра фільтри  $d(X_1)$  та температури екструдату  $T(X_3)$

може бути досягнута умова ( $\Delta > 2,6$ ), якщо діаметр фільтри буде знаходитись в межах 4,9...5,9 мм, а температура екструдату буде становити 131...145 °C. Раціональний діапазон роботи екструдера на рис.8 заштрихований.

Побудувавши решту двовірних перетинів поверхні відгуку зміни індексу розширення екструдату було встановлено наступні раціональні параметри і режими роботи екструдера: діаметр фільтри  $d$  повинен знаходитись в межах 4,9...5,9 мм; вологість зернової суміші  $W$  - 17,7...20 %, а температура процесу екструзії  $T$  має становити від 140 до 145 °C.

Встановлено, що між густиною екструдату і його індексом розширення існує наступний зв'язок

$$\rho = \frac{\Delta}{0,00415\Delta - 0,00125}$$

В результаті проведення досліджень з визначення питомої енергоємності екструдера з пружним гвинтовим елементом та його об'ємної продуктивності були одержані наступні адекватні моделі досліджуваних процесів:

для питомої енергоємності

$$C = 57,12 + 3,29X_1 - 1,80X_2 - 2,04X_3 + 0,50X_4 + 3,28X_1^2 + 2,51X_2^2 + 2,03X_3^2 + 1,83X_4^2, \quad (20)$$

для об'ємної продуктивності

$$Q = 0,167 + 0,024X_1 + 0,015X_2 + 0,010X_3 - 0,007X_4 + 0,004X_1X_2. \quad (21)$$

В цих рівняннях змінні приведені в закодованій формі. Для одержання рівнянь із змінними в натуральному масштабі можна використати наступні співвідношення:  $X_1 = (n - 500) / 300$ ;  $X_2 = (h - 6) / 2$ ;  $X_3 = (t - 21) / 2$ ;  $X_4 = (m - 8) / 4$ .

Рівняння (20) і (21) справедливі при наступних значеннях нижчезазначених факторів, зафіксованих на рівні: діаметр гвинта екструдера  $D = 50$  мм, діаметр фільтри  $d = 5,5$  мм, температура процесу екструзії  $T = 138...143$  °С.

Аналіз рівняння (20) і встановлення раціональних режимів роботи та параметрів екструдера виконувався шляхом побудови двомірних перетинів поверхні відгуку. Один із таких перетинів показано на рис. 9.

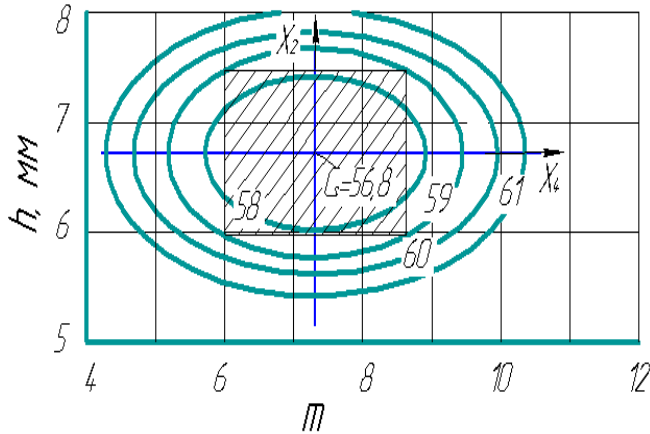


Рисунок 9 – Перетини поверхні відгуку, в координатах  $h(X_2) - m(X_4)$ , питомих енерговитрат процесу екструзії зернової суміші при  $X_1 = X_3 = 0$

Якщо прийняти, що питомі витрати енергії процесу екструзії не повинні перевищувати 59,0 кВт·год/т, то із рис. 9 будемо мати наступні раціональні параметри екструдера: глибина гвинтового каналу гвинта має становити 6,0...7,5 мм, а кількості пазів, нарізаних на внутрішній поверхні корпуса екструдера, – 6...9 штук.

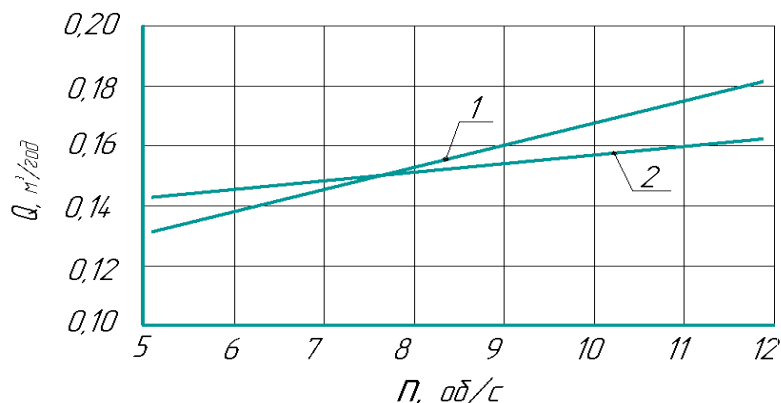
Побудувавши решту двомірних перетинів поверхні відгуку зміни питомої енергоємності процесу екструзії було встановлено наступні раціональні параметри і режими роботи екструдера: частота обертання гвинта 370...520 об/хв.; глибина каналу гвинта 6,2...7,5 мм; крок гвинта 21,6...22,7 мм; кількість пазів, нарізаних на внутрішній поверхні корпуса екструдера 5...6 штук. Крок спіральної канавки другої та третьої, за ходом руху сировини, секції гвинта має відповідно становити 19,6...21,7 та 17,6...19,7 мм.

Після реалізації плану багатофакторних експериментів, розрахунків коефіцієнтів рівнянь регресії та статистичного аналізу було отримано наступне рівняння, яке описує нерівномірність складу зернової суміші в процесі підготовки до екструдювання

$$V_c = 7,95 + 2,83X_1 + 1,37X_2 + 0,22X_3 + 0,48X_4 - 0,36X_1X_2 + 2,89X_1^2 + 0,64X_2^2 + 0,44X_3^2 + 0,54X_4^2. \quad (22)$$

Математична модель (22) дозволяє оцінити ступінь як самостійного, так і спільного впливу основних параметрів процесу на вихідний параметр – неоднорідність підготовки суміші  $V_c$ . Встановлення раціональних режимів роботи вузла підготовки суміші до екструдювання здійснювали шляхом побудови двомірних перетинів поверхні відгуку. В результаті встановлено наступні раціональні параметри і режими роботи вузла підготовки: частота обертання гофрованої спіралі  $n_1 = 50...112$  об/хв.; крок гофрованої спіралі  $t_1 = 0,100...0,128$  м; кут нахилу кожуха вузла підготовки до горизонту  $\alpha = 10...25$  °; висота гофрів по середньому діаметрі  $H = 3,0...4,7$  мм.

Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень здійснювали шляхом графічного аналізу залежностей (18) і (21). Графіки зміни продуктивності екструдера в залежності від частоти обертання його гвинта наведено на рис. 10.



1 – теоретичні дані; 2 – експериментальні дані.

Рисунок 10 – Графіки зміни об'ємної продуктивності екструдера  $Q$  в залежності від частоти обертання його гвинта  $n$

Як видно із рис. 10 в обох випадках відбувається зростання об'ємної продуктивності екструдера із збільшенням частоти обертання його гвинта. Причому інтенсивність наростання теоретичної продуктивності є більшою в порівнянні із збільшенням продуктивності, визначеної за рівнянням регресії.

У п'ятому розділі викладенні результати лабораторно-виробничої перевірки екструдера з пружним гвинтовим елементом для підтвердження висунутої робочої гіпотези та результати його виробничих випробувань і розрахунку економічної ефективності.

Встановлено, що питома енергоємність екструдера з пружним гвинтовим елементом є меншою на 8,1... 12,6 %, ніж у екструдера з жорстким гвинтом. Зазначене підтверджує достовірність прийнятої робочої гіпотези про можливість поліпшення експлуатаційних показників процесу екструзії за рахунок вібрації спіральної навивки гвинта.

Виробничі випробування відбувалися в Державному підприємстві дослідне господарство «Артеміда» інституту картоплярства НААН України (Вінницька область, місто Калинівка). Під час виробничої перевірки було екструдовано 809 кг зернової суміші, вологістю 13,8 %, яка включала 356 кг (44 %) зерна кукурудзи, 243 кг (30 %) ячменю і 210 кг (26 %) озимої пшениці. Температуру процесу екструзії підтримували в межах 138...142 °С, частоту обертання пружного гвинта – 490...510 об/хв. Крім того, проводився хронометраж робочого часу. Необхідно зазначити, що під час випробувань простоїв екструдера по технічним причинам (несправності) не зафіксовано.

При розрахунках економічної ефективності за базу для порівняння був обраний екструдер ЕГК–50 виробництва «ТехноМашБуд» м. Черкаси, з паспортною продуктивністю 50 кг/год.

Результати розрахунків економічної ефективності показали, що від використання екструдера з пружним гвинтовим елементом може бути одержаний річний економічний ефект в сумі 4562 грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі приведені результати досліджень процесу екструзії зернових кормів, на основі яких обґрунтовано параметри та режими роботи екструдера з пружним гвинтовим елементом, дозволило сформулювати такі висновки і пропозиції

1. Аналізом технологій екструдювання зернових кормів та конструкцій екструдерів встановлено, що переробка зернових кормів шляхом екструзії дозволяє перетворити крохмаль зерна у сприятливу для засвоєння організмом форму. Для екструзії зернових кормів здебільшого використовують одногвинтові екструдери, суттєвим недоліком яких є пульсація тиску в передматречній зоні, висока енергоємність процесу та низька довговічність окремих елементів конструкції, зокрема гвинта. Навіть часткове розв'язання вказаних проблемних задач дозволить підвищити технічний рівень екструдерів і зважаючи на їх широке використання, заощадити значні матеріальні ресурси.

2. З метою підвищення продуктивності і зниження енергоємності одногвинтового екструдера висунута робоча гіпотеза про можливість використання для цього пульсації тиску в зоні перед матрицею. Запропоновано конструкцію секційного екструдера, у якого пружна навивка гвинта (пружний гвинтовий елемент) в результаті пульсації тиску може здійснювати коливання вздовж вісі гвинта.

3. Вперше отримано математичну модель коливань пружного гвинтового елемента, вздовж якого переміщається безперервно розподілена маса (середовище). Математична модель являє собою нелінійне диференціальне рівняння з частинними похідними та збуреними крайовими умовами. Розроблено методику наближеного розв'язку математичної моделі досліджуваної системи суцільне середовище – пружний гвинтовий елемент. В результаті встановлено, що для більших значень швидкостей відносного руху погонних мас середовища та пружного гвинтового елемента частота власних коливань є меншою.

Збільшення швидкості відносного руху середовища від 0 до 2 м/с спричиняє зменшення власної частоти коливань системи на 12 %. Інтенсивність спадання амплітуди коливань є більшою для більшої швидкості відносного руху середовища вздовж пружного шнекового гвинта.

4. Теоретичними дослідженнями встановлено, що існує така частота збурення пружного елемента гвинта, за якої у системі виникають резонансні коливання. Для таких коливань системи більшим значенням швидкості відносного руху суцільного середовища відповідає менше значення резонансної амплітуди. При більших значеннях погонної маси суцільного середовища значення резонансної амплітуди є більшим. Із зростанням жорсткості пружного гвинтового елемента резонансна амплітуда настає при більших значеннях частоти вимушеної сили при одночасному зменшенні резонансної амплітуди.

5. В результаті проведених багатofакторних експериментів з визначення індексу розширення екструдату зернової суміші, яка включала зерно кукурудзи,

ячменю і озимої пшениці у масовому співвідношенні 5:3:2 встановлено, що індекс розширення екструдату буде становити не менше 2,6 одиниць тоді, коли вологість зернової суміші буде знаходитись в межах 17,7...20,0 %, температура процесу екструзії - 140...145 °С, при діаметрі фільери матриці 4,9...5,9 мм.

6. Встановлено, що раціональними з точки зору мінімальних питомих витрат енергії процесу екструзії зернової суміші є наступні значення параметрів і режимів роботи екструдера з пружним гвинтовим елементом: частота обертання гвинта 370...520 об/хв.; глибина каналу гвинта 6,2...7,5 мм; крок першої, за ходом руху сировини, секції гвинта 21,6...22,7 мм; кількість пазів, нарізаних на внутрішній поверхні корпусу екструдера 5...6 штук. Крок спіральної гвинтової навивки другої та третьої, за ходом руху сировини, секції гвинта має відповідно становити 19,6...21,7 та 17,6...19,7 мм. Встановлено, що питома енергоємність екструдера з пружним гвинтовим елементом є меншою на 8,1... 12,6 %, ніж у екструдера з жорстким гвинтом. Зазначене підтверджує достовірність прийнятої робочої гіпотези про можливість поліпшення експлуатаційних показників процесу екструзії за рахунок вібрації спіральної навивки гвинта.

7. При приготуванні збалансованих екструдованих кормів виникає проблема отримання рівномірного за вмістом компонентів кормів. Досягнути цього можна шляхом підготовки їх до екструдуювання. Аналізом конструкцій пристроїв для підготовки кормів до екструдуювання встановлено, що для цього доцільно використовувати шнекові пристрої, які дають змогу в одній машині поєднати безперервне змішування компонентів корму з транспортуванням, дозуванням та вивантаженням готової суміші.

8. Проведеними експериментальними дослідженнями встановлено, що пристрій для підготовки кормів до екструдуювання з гофрованою спіраллю може забезпечити нерівномірність складу зернової суміші на рівні 10 % при умові, що кут нахилу його кожуха до горизонту буде знаходитись в межах 10...25 °, висота гофрів по середньому діаметрі буде становити 3,0...4,7 мм, крок гофрованої спіралі має бути рівним 0,100...0,128 м, при частоті обертання гофрованої спіралі 50...112 об/хв.

9. Науково-практичні результати дисертаційної роботи впроваджені в Фермерському господарстві «ЛІТАГОР», Державному підприємстві дослідне господарство «Артеміда» інституту картоплярства НААН України і передані конструкторському бюро Товариству з додатковою відповідальністю «Брацлав». Технічна новизна розробок захищена 6 патентами України на корисну модель. Річний економічний ефект від використання екструдера з пружним гвинтовим елементом у порівнянні з базовим екструдером ЕГК – 50, становить 4562 грн.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### *Публікації в наукових виданнях України*

1. Кондратюк Д. Г., Дмитренко В. П., Волошиненко В. М. Математична модель динаміки: середовище – пружний шнек екструдера. / Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Техніка, енергетика, транспорт АПК.

Вінниця, 2016. Вип. 1 (93). С.43 – 47. (Автором запропонована методика розрахунку з отриманням теоретичних залежностей частоти власних коливань середовище-пружний шнековий робочий орган).

2. Дмитренко В. П., Дячун А. Є., Клендій В. М., Навроцька Т. Д., Катрич О. П. Технологічні передумови розрахунку гвинтового розходоміра / Збірник наукових праць «Перспективні технології та прилади». Луцьк, 2014. Вип. №5 (2). С. 51 – 57. (Автором виведено аналітичні залежності для визначення конструктивних параметрів гвинтового розходоміра).

3. Дмитренко В. П., Гевко Б. М., Третьяков О. Л., Котик Р. М. Конструктивно-технологічна характеристика гвинтових деталей у машинобудуванні / Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2016. Вип. 2(94). С. 63 – 67. (Автором приведено технологічну характеристику конструктивних параметрів гвинтових деталей машин виготовлених різними способами).

4. Кондратюк Д. Г., Дмитренко В. П., Ляшук О. Л. Теоретичне обґрунтування конструкції пружинного гвинтового робочого органу екструдера. / Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2017. Вип. 1(96). С. 100 – 103 (Автором виведено аналітичні залежності для визначення силових і конструктивних параметрів пружного робочого органу).

5. Ляшук О. Л., Клендій В. М., Кондратюк Д. Г., Дмитренко В. П. Резонансні коливання системи суцільне середовище – пружний шнековий гвинт. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Технічні науки. Вип. 3(75). Рівне: НУВГП, 2016. С. 237 – 243. (Автором виведено аналітичні залежності розглядуваної системи, а саме зв'язок між амплітудою та різницею фаз).

6. Ляшук О. Л., Третьяков О. Л., Дмитренко В. П., Колесник О. А. Технологічність конструкцій механізмів гвинтових робочих органів екструдерів / Сільськогосподарські машини: зб. наук. Статей. Луцьк, 2015. Вип. 33. С. 94 – 102. (Автором розроблено методику оцінки конструкцій механізмів з секційними гвинтовими робочими органами на технологічність).

7. Клендій В. М., Скиба О. П., Третьяков О. Л., Пиндус Т. Б., Дмитренко В. П. Обґрунтування конструкцій гвинтових робочих органів екструдерів / Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць – Луцьк, 2016. Вип. №8 (1). С. 22 – 28. (Автором отримано залежність для визначення продуктивності екструдера з постійним і геометричними параметрами гвинта).

8. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Ляшук О. Л., Кондратюк Д. Г., Дмитренко В. П. Комплексні експериментальні дослідження виготовлення кормової суміші для тваринництва / Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць – Луцьк, 2016. Вип. №9 (2). С. 13 – 25. (Автором розроблена методика проведення експериментальних досліджень з визначення нерівномірності змішування зернової суміші).

*Публікації в наукових фахових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз*

9. Oleg Lyashuk. Study on Nonlinear Model of Dynamics of a System 'Extruder Elastic Auger Working Body' / Oleg Lyashuk, Mariya Sokil, Volodymyr Klendiy, Olena Skyba, Victor Dmytrenko // Acta technologica agriculturae. 2016. Num. 4. P. 101–106. Nitra. Slovak Republic. ISBN 1335-2555. (Scopus, AGRIS/FAO).

*Матеріали і тези конференцій*

10. Дмитренко В. П., Дячун А. Є., Клендій В. М. Прилад для заміру сили опору сипких матеріалів / Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 19 – 20 листопада 2014 р. : тези допов. Тернопіль : ТНТУ, 2014. 98 с. (Автору належить розроблення конструкції приладу для заміру сили опору).

11. Ляшук О. Л., Клендій В. М., Третяков О. Л., Дмитренко В. П. Обґрунтування конструкції гвинтового робочого органу екструдера / Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25 – 26 листопада 2015 р.: збірник тез допов. Том 1. Тернопіль: ТНТУ, 2015. С. 171 – 173. (Автором запропоновано нову конструкцію пружного гвинтового робочого органу).

12. Кондратюк Д. Г., Дмитренко В. П. Моделювання конструкції гвинтового робочого органу екструдера / Матеріали ХІХ наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 18 – 19 травня 2016 року: тези допов. Тернопіль: ТНТУ, 2016. 51 с. (Автором приведено технологічну характеристику конструктивних параметрів гвинтового робочого органу екструдера).

*Патенти України на корисну модель*

13. Патент на корисну модель № 106084. Україна, МПК(2016.01) F16F 1/00, B21F 35/00. Пристрій для навивання пружин екструдерів / О. Л. Ляшук, М. Б. Сокіл, В. О. Дзюра, О. Л. Третяков, В. П. Дмитренко, Т. Д. Навроцька., № у 201511346; заявл. 17.11.2015.; опубл. 11.04.2016р., Бюл.№7. 6с.

14. Патент на корисну модель № 109763. Україна, МПК(2016.01) B23G 5/00. Універсальний пристрій для нарізання комплекту заготовок гвинтових елементів екструдерів / О. Л. Ляшу, О. Л. Третяков, А. Є. Дячун, В. П. Дмитренко, П. В. Казмірчук, Т. С. Дубиняк., № у 201601164; заявл. 11.02.2016.; опубл. 12.09.2016р., Бюл.№17. 6с.

15. Патент на корисну модель № 109764. Україна, МПК(2016.01) A23K 40/20(2016.01), B30B 11/00. Машинно-апаратна схема виробництва кормових брикетів для тварин / О. Л. Ляшук, В. П. Дмитренко, В. І. Бадищук, О. Л. Третяков, В. М. Клендій., № у 201601169; заявл. 11.02.2016.; опубл. 12.09.2016р., Бюл.№17. 5с.

16. Патент на корисну модель № 109801. Україна, B30B 11/00, A23K 40/20 (2016.01). Установка для формування кормових брикетів / О. Л. Ляшук,



А. Є. Дячун, В. І. Бадищук, В. П. Дмитренко., № у 201601809; заявл. 25.02.2016.; опубл. 12.09.2016р., Бюл.№17. 5с.

17. Патент на корисну модель № 109821. Україна, G01F 1/82 (2006.01), B65G 33/08 (2006.01), G01F 15/00 Гвинтовий розходомір транспортних засобів / О. Л. Ляшук, В. П. Дмитренко, В. З. Гудь, А. Є. Дячун, Т. Д. Навроцька, В. М. Клендій.. № у 201602121; заявл. 04.03.2016.; опубл. 12.09.2016р., Бюл.№17. 5с.

18. Патент на корисну модель № 111197. Україна, B30B 11/22 (2006.01) Гвинтовий робочий орган екструдера / О. Л. Ляшук, М. Б. Сокіл, В. П. Дмитренко, О. Л. Третяков., № у 201602629; заявл. 17.03.2016.; опубл. 10.11.2016р., Бюл.№21. 4с.

## АНОТАЦІЯ

**Дмитренко В.П. Обґрунтування параметрів екструдера з пружним гвинтовим елементом. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2019.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним і експериментальним дослідженням розробленого пружного робочого органу екструдера з метою підвищення його експлуатаційних показників.

Для вирішення поставлених задач виведено аналітичні залежності для визначення раціональних конструктивних та кінематичних параметрів пружного робочого органу. Встановлено вплив основних параметрів гвинта екструдера та суцільного середовища на процес, який передуює його формуванню у кормову суміш, а також розроблено методіку побудови математичної моделі, яка описує визначальні параметри системи пружний гвинт – суцільне середовище як для резонансного, так і нерезонансного випадку.

Здійснено комплекс експериментальних досліджень для визначення основних конструктивно-силових параметрів та експлуатаційних показників розробленої конструкції робочого органу. Проведено виробничі випробування розробленого екструдера, а також встановлені його техніко-економічні показники.

**Ключові слова:** екструдер, гвинт, корпус, секція, пружний елемент, зернова суміш, вузол підготовки.

## АННОТАЦИЯ

**Дмитренко В.П. Обоснование параметров экструдера с упругим винтовым элементом. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Винницкий национальный аграрный университет, Винница, 2019.

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям разработанного упругого рабочего органа экструдера с целью повышения его эксплуатационных показателей.

Для решения поставленных задач выведены аналитические зависимости для определения рациональных конструктивных и кинематических параметров упругого рабочего органа. Установлено влияние основных параметров винта экструдера и сплошной среды на процесс, который предшествует его формированию в кормовую смесь, а также разработана методика построения математической модели, описывающей определяющие параметры системы упругий винт – сплошное сред как для резонансного, так и нерезонансного случая.

Осуществлен комплекс экспериментальных исследований для определения основных конструктивно-силовых параметров и эксплуатационных показателей разработанной конструкции рабочего органа. Проведено производственные испытания разработанного экструдера, а также установлены его технико-экономические показатели.

**Ключевые слова:** экструдер, винт, корпус, секция, упругий элемент, зерновая смесь, узел подготовки.

## ANNOTATION

**Dmitrenko V. Substantiation of the parameters of the extruder with an elastic screw element. – Manuscript.**

Thesis for candidate degree in the field of technical sciences. Specialty 05.05.11 – machines and means for mechanization of the agricultural production. – Vinnytsia National Agrarian University, Vinnitsa, 2019.

The dissertation is devoted to theoretical and experimental researches of the developed elastic working body of the extruder in order to increase its operational performance.

Analytical dependences for determination of rational constructive and kinematic parameters of the elastic working body have been deduced to solve these problems. The influence of the main parameters of the screw of the extruder and the solid medium on the process that precedes its formation in the feed mixture is established, as well as the method of construction of a mathematical model that describes the defining parameters of the system elastic screw – solid media for both the resonant and non-resonant cases.

The complex of experimental researches was carried out to determine the basic design-force parameters and operational parameters of the developed design of the working body. The production tests of the developed extruder were carried out, as well as its technical and economic indicators.

An experimental unit which includes a knot for preparing grain mixtures for corrugated spiral extrusion and an extruder with an elastic screw element was made.

Methods of experimental researches for studying of influence of extruder parameters with elastic screw element on extrudate (extruder) expansion index, extruder productivity and its energy consumption are developed.

It is established that the following values of the parameters and modes of operation of the extruder with an elastic screw element are rational in terms of the minimum specific energy costs of the grain extrusion process: rotating screw speed 370... 520 rpm; screw channel depth 6.2... 7.5 mm; step one, in the course of the movement of the mixture, screw sections 21.6... 22.7 mm; the number of grooves cut into the inner surface of the body of the extruder 5... 6 pieces.

It is established that the node of preparation of material for extrusion with a corrugated spiral can provide a non-uniform composition of the grain mixture at the level of 10%, provided that the slope angle of a casing of the preparation node to the horizon will be within 10... 25 °, the height of the corrugations in the average diameter will be 3, 0... 4.7 mm, the pitch of the corrugated spiral should be equal to 0.100... 0.128 m, at a speed of rotation of a corrugated spiral 50... 112 rpm.

**Key words:** extruder, screw, housing, section, elastic element, grain mixture, preparation site.

Підписано до друку 14.05.20 р.

Папір офсетний. Гарнітура Times

Формат 60x90/16. Умов. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим.

---

Видавництво ННЦ «ІМЕСГ»

08631, Україна, Київська обл., Васильківський р-н,

смт. Глеваха-1, вул. Вокзальна, 11

Тел. (04571)-3-11-00, 3-21-04