

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Пижик Ярослав Сергійович

УДК 631.348

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**РОЗРОБКА БАРАБАННОГО ПРОТРУЮЧОГО З
КІЛЬЦЕВИМ ВСТАВКАМИ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Пижик Я.С.

Керівник роботи
Боровський В.М.
старший викладач

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Пижик Ярослав Сергійович. Розробка барабанного протруювача з кільцевими вставками. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В кваліфікаційній роботі розроблена конструкція барабанного протруювача, що складається з вставок, що чергуються, з різними коефіцієнтами тертя мають різні кінематичні характеристики взаємодії з оброблюваним насінням.

Проведено дослідження робочого процесу барабанного протруювача на основі залежностей класичної механіки, чисельного моделювання з використанням методів дискретних елементів у системі автоматизованого проектування та інженерного аналізу EDEM (DEM) Solution. Встановлено, що дані, отримані на основі віртуальних моделей насіннєвого матеріалу у вигляді зернівки пшениці та робочих процесів шнекового, камерного та барабанного протруювачів, мають високий ступінь відповідності з реальними дослідженнями.

Розроблено методику оцінки рівномірності покриття поверхні насіння захисно-стимулюючими препаратами на основі цифрової обробки зображення протруєного насіння у програму ImageJ оптичного аналізу. Встановлено лінійний взаємозв'язок дисперсії насиченості кольору, параметра оцінки рівномірності покриття та кількості глобальних контактів зерновок між собою. Найбільші показники рівномірності покриття досягаються при чергуванні кільцевих вставок шириною з коефіцієнтом тертя $\mu=0,3$ в діапазоні $l_1=0,25 - 0,30$ м, з великим коефіцієнтом $\mu=0,7$ у діапазоні $l_2=0,15 - 0,25$ м.

Ключові слова: барабаний протруювач, кільцева вставка, дискретні елементи, проектування.

ANNOTATION

Yaroslav Sergiyovych Pyzhyk. Development of a drum dresser with ring inserts. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2023.

In the qualification work, a design of a drum dresser consisting of alternating inserts with different friction coefficients and different kinematic characteristics of interaction with the treated seeds was developed.

The study of the drum dresser's working process was carried out on the basis of the dependencies of classical mechanics, numerical modelling using discrete element methods in the EDEM Solution computer-aided design and engineering analysis system (DEM). It was found that the data obtained on the basis of virtual models of seed material in the form of wheat kernels and the working processes of auger, chamber and drum treaters have a high degree of correspondence with real experiments.

A methodology for assessing the uniformity of seed surface coating with protective and stimulating agents based on digital image processing of treated seeds in ImageJ optical analysis software was developed. A linear relationship between the dispersion of colour saturation, the parameter for assessing the uniformity of coating and the number of global contacts between grains was established. The highest indicators of coating uniformity are achieved when alternating ring inserts with a width with a friction coefficient of $\mu = 0.3$ in the range $l_1 = 0.25 - 0.30$ m, with a large coefficient of $\mu = 0.7$ in the range $l_2 = 0.15 - 0.25$ m.

Keywords: drum dresser, annular insert, discrete elements, design.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ПРОТРУЙНИКІВ НАСІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР.....	9
РОЗДІЛ 2. АПРІОРНИЙ АНАЛІЗ І ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БАРАБАННОГО ПРОТРУЮВАЧА.....	16
РОЗДІЛ 3. ВИГОТОВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ТА ЇЇ ВИПРОБОВУВАННЯ.....	33
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасні технології обробітку сільськогосподарських культур висувають підвищені вимоги до якості передпосівної підготовки насіння, т.к. мінімізація обробітку ґрунту без загортання поживних залишків, сприяє формуванню у верхніх шарах ґрунту патогенних утворень, що значно знижують можливості отримання повноцінного врожаю [7,10].

Результати фіто-експертизи насіння в зерновиробних регіонах Росії переконливо свідчать про повсюдне збільшення відсотка зараженості сільськогосподарських культур різними хворобами. Наприклад, «відсоток ураженості зернових твердою сажкою збільшився за останні 10 років з 0,01% до 0,4-2,5%, курною сажкою з 0,06% до 0,2-3% [8]. Зараженість зерна збудниками кореневих гнилей (*Helminthosporium* spp., *Fusarium* spp.) раніше становила трохи більше 2 %, нині сягає 40-70 %, а щорічні втрати зерна хвороб у багатьох регіонах перевищили 20% [7].

За результатами проведеної фітоекспертизи 97,7 тис. тонн ярого насіння в республіці Башкортостан середній відсоток зараженого насіння ярої пшениці хворобами становив 17,13%, ячменю -19,53%, вівса - 23,67% [9]. За останні 10-15 років у зв'язку з впровадженням технологій, що використовують мінімальну обробку ґрунту та прямий посів, спостерігається зростання зараженості врожаю хворобами та інфекціями. У зв'язку з цим значно зростає роль протруювання як основного прийому захисту рослин від хвороби та інфекцій.

Основний спосіб захисту насіння зернових культур від хвороб та інфекцій є нанесення на поверхню насіння перед посівом захисно-стимулюючих препаратів. В даний час широко використовуються хімічні препарати, які можуть впливати на зміни видового складу корисних мікроорганізмів, що містяться у ґрунті та рослинах, що призводить до порушення біологічної рівноваги в агроценозах. З огляду на це, актуальним на сьогоднішній день стає

використання біопрепаратів для відновлення симбіотичної мікрофлори ґрунту, стимуляції росту рослин, підвищення їх стійкості до хвороб та несприятливих умов навколишнього середовища тощо. [6, 13].

Однак існуючі технології та конструкції протруювачів орієнтовані на обробку насіння робочими рідинами на основі хімічних препаратів, а біопрепарати наносяться на насіння як доповнення до суміші з хімічними засобами захисту рослин. При цьому не враховується, що на життєздатність мікроорганізмів та кількість травмованого насіння, великий вплив надає інтенсивність механічного впливу під час протруювання.

Нещодавно найбільшою популярністю користувалися шнекові протруйники. В даний час даний вид пристроїв у господарствах практично не використовуються через високий рівень травмування зерен, недостатню рівномірність покриття поверхні насіння препаратом і низьку продуктивність.

В Україні найбільшого поширення набули протруювачі камерного типу, які не повною мірою відповідають сучасним агротехнологічним вимогам до якості протруювання насіння. Основні недоліки - це складність конструкції для потокових ліній та обслуговування, низька продуктивність, високі показники травмування насіння після обробки та ін. Сукупність цих показників, у свою чергу, веде до зниження якості обробки насіння.

На сьогоднішній день на ринку представлено досить велику кількість протручувачів барабанного типу, що мають ряд переваг, порівняно з попередніми конструкціями. Серед яких можна виділити такі, як режими роботи без механічного впливу насіння і, як наслідок, низькі показники травмованості, універсальність з обробки насіння різних сільгосп культур, висока продуктивність. Однак суттєвим недоліком протруйників барабанного типу є складність точного дозування препарату залежно від маси насіння, а також нерівномірність розподілу препарату поверхнею насіння [1].

Найбільшу точність дозування та рівномірність покриття насіння забезпечують протруювачі порційної дії. Насіння подається в протруювач

порціями маса яких зважується з високою точністю. Потім порційним насосом змішувальний ротор, залежно від маси насіння, подається певний обсяг препарату. Після закінчення розподілу препарату на поверхні насіння чергова порція насіння вивантажується. Порційний принцип роботи забезпечує точне дозування та рівномірний розподіл препарату по поверхні насіння, проте значно ускладнюється конструкція протравлювача та знижується продуктивність. Поточний принцип роботи значно підвищує продуктивність протруювання, але знижується якість протруювання. Протруйники барабанного типу прості в конструкції, продуктивні та універсальні, тому що можуть використовуватися для потокового та порційного протруювання насіння зернових культур захисно-стимулюючими препаратами.

Тому можна зробити висновок, що серед різних типів пристроїв для протруювання насіння зернових культур найбільш перспективними для подальшого вдосконалення є протруйники барабанного типу, однак і вони не позбавлені певних недоліків. Це диктує необхідність детального вивчення та розкриття особливості технологічних процесів різних типів протруювачів і на цій основі синтезувати нові конструктивні рішення, що забезпечують високу продуктивність, мінімальне травмування за дотримання необхідних критеріїв якості.

Мета роботи – підвищення якості нанесення захисно-стимулюючих препаратів на поверхню насіння барабанним протруювачем шляхом удосконалення робочого процесу та обґрунтування його раціональних конструктивно-технологічних параметрів.

Для реалізації поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі **завдання**:

- проаналізувати основні напрямки розвитку протруйників насіння сільськогосподарських культур;
- удосконалити робочий процес та обґрунтувати його раціональних конструктивно-технологічних параметрів.

Об'єкт дослідження: технологічний процес барабанного протруювача насіння сільськогосподарських культур.

Предмет дослідження: закономірності робочого процесу нанесення захисно-стимулюючих препаратів на насіння та взаємозв'язку якості протруювання з конструктивно-технологічними параметрами барабанного протруювача.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Боровський В.М. Пижик Я.С. Класифікація та основні напрямки розвитку протруйників насіння сільськогосподарських культур. Збірник тез ІХ-ї всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь». м. Житомир, 5 квітня 2023 року. Житомир : ЖАТФК. С. 237-237.

2. Боровський В.М. Пижик Я.С. Розробка віртуальної моделі робочого процесу протруювача в середовищі EDEM DEM. *Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики*. 19 квітня 2023 р. Житомир : Поліський національний університет, 2023. Т. 3. С. 106-109.

Практичне значення одержаних результатів. Практичний інтерес для підприємств АПК представляє розроблений барабаний протруювач.

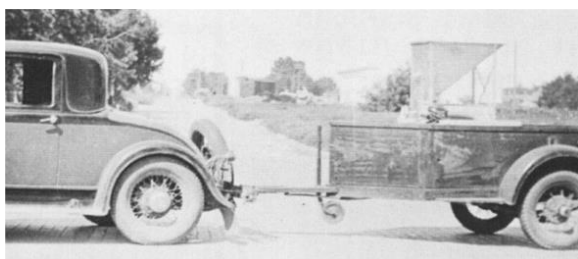
Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 16 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 53 сторінки комп'ютерного тексту, містить 31 рисунок.

РОЗДІЛ 1

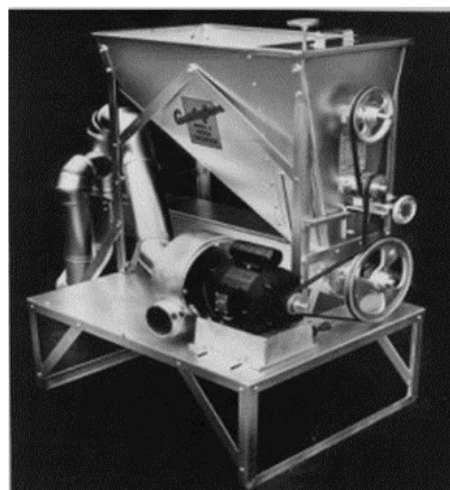
КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ПРОТРУЙНИКІВ НАСІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

З розвитком промислового виробництва, з'являються перші пристрої для протруювання насіння, що являють собою досить прості пристрої

У 1930 році Бен Густафсон патентує і починає комерційний випуск мобільної установки протруювача Model B (рис. 1.1. (а)) для обробки насіння, продуктивністю від 1 до 8 тонн на годину. У 1933 році у виробництво та продаж надходять стаціонарні протруювачі фірми Bayer, де застосовувався протруйник на основі сухих сумішей карбонату міді (рис. 1.1 (б)).



а



б

Рис. 1.1. Протруювач насіння зернових культур Model B (а), Стаціонарний протруювач фірми "Bayer" Model H (б).

З технологічного погляду, основною відмінністю пристроїв для протруювання насіння є спосіб нанесення протруйника на поверхню насіння та особливості конструктивних рішень для його здійснення. Технологічний процес обробки зерна захисно-стимулювальними препаратами в пристроях для протруювання насіння залежить від їхніх конструктивних особливостей, які

виражаються в принципових відмінностях контактної взаємодії препаратів із насінням і способах нанесення того чи іншого препарату на поверхню насіння.

Серед серійно випущених пристроїв для протруювання насіння перед висіванням використовуються пристрої шнекового, камерного і барабанного типу. З огляду на різноманіття технологій і насіння сільськогосподарських культур пропонуються різні класифікації протруювачів, на наш погляд протруювачі насіння можна класифікувати за такими ознаками:

1. За типом локалізації. Мобільні, навісні та стаціонарні.
2. За способом протруювання.
3. Класифікація за технологічним процесом: поділяють на порційної, безперервної та універсальної дії.
4. За типом приводу робочого органу. З ручним приводом, електричним і від двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ).
5. За конструкцією основного робочого органу барабанного, камерного і шнекового типу.

Розглядаючи класифікацію серійно-випущених протруювачів, видно, що основний розподіл відбувається за видом робочого органу.

Шнекові протруювачі здебільшого застосовуються в малих господарствах із невеликими площами. Широкого поширення у вітчизняних підприємствах набули пристрої мобільного типу марок ПС-10А та ПСШ-5 вітчизняного виробництва (рис. 2). Також має місце поширення протруювачів, що виготовлені кустарним способом або існують в одиничному екземплярі як експериментальний зразок. Незважаючи на недоліки, у науковій літературі зустрічаються дослідження вдосконалення конструкції шнекового протруювача. Протруювачі цього типу вирізняються простотою конструкції, швидкістю обслуговування, низькою вартістю. Протруювання насіння хімічними препаратами відбувається під час обертання шнека та взаємного перемішування насіння в поздовжньому та поперечному русі до виходу, де надходить у мішок

або тару. При цьому тривалість перемішування в цих пристроях сягає понад 3 хвилини.

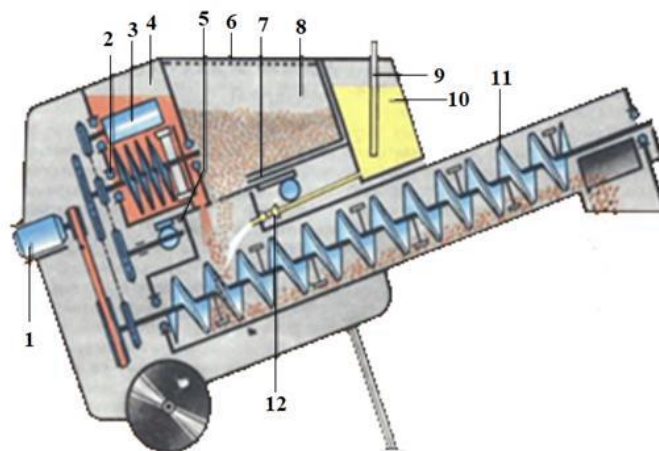


Рис. 1.2. Протруювач насіння шнекового типу ПСШ-3: 1 – електродвигун; 2 – живильник; 3 – ворушилка; 4 – бункер із препаратом; 5 – заслінка дозатора сухого препарату; 6 – сітка; 7 – заслінка дозатора насіння; 8 – бункер із насінням; 9 – вирівнювальна трубка; 10 – резервуар із робочою рідиною; 11 – шнек; 12 – дозувальний кран.

Однак випуск шнекових протруювачів нині скорочується. Основні недоліки протруювачів такого типу - це високий ступінь травмування насіння, нерівномірний розподіл протруйника поверхнею насіння та низька продуктивність.

Пристрої для обробки насіння перед посівом камерного типу (рис. 1.3), перевершують за продуктивністю шнекові протруювачі. Невипадково цей тип протруювачів займає найбільший сегмент ринку. Це зарубіжні - Petkus СТ-10 (Німеччина), Petkus СТ-25 (Німеччина), Cimbria СС150 (Німеччина), Cimbria СС250 (Німеччина), ПС-20 (Україна) та ін. Ці пристрої мають камеру з розташованими в ньому відцентровими розкидачами та розпилювачами, що подають препарат у рідкому вигляді та оброблюваний посівний матеріал.

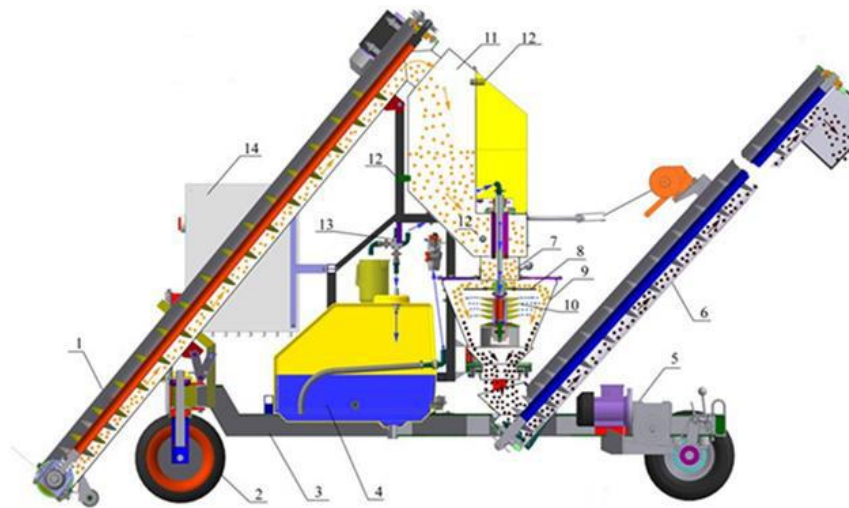


Рис. 1.3. Технологічна схема протруювача ПС-20 : 1 – шнек завантажувальний; 2 – колеса; 3 – рама; 4 – бак із робочою рідиною; 5 – двигун; 6 – шнек для вивантаження; 7 - дозатор насіння; 8 – диск дозатора; 9 – камера протруювання; 10 – форсунка; 11 – бункер; 12 – датчик рівня насіння; 13 – вузол розподілу рідини; 14 – шафа керування.

Основні переваги протруювачів камерного типу - це можливість розпилення рідкого препарату за регульованих витрат рідин і суспензій. Це дає змогу скоротити норму витрати робочої рідини на 25...50%. Основними недоліками даних пристроїв є травмування насіння об стінки камери протруювання через високі швидкості обертання відцентрового диска дозатора, можливість витікання препарату за межі камери протруювання, обмежений вид насіння та низька продуктивність.

Перевага протруювачів порційної дії полягає в тому, що в змішувальну чашу камери протруювання спочатку подається певна кількість насіння, а потім виходячи з ваги даної порції насіння відміряна кількість робочої рідини. Що дає змогу з високою точністю дозувати норму, а тривалістю перебування в змішувальній чаші отримувати високу рівномірність покриття (рис. 1.4.).

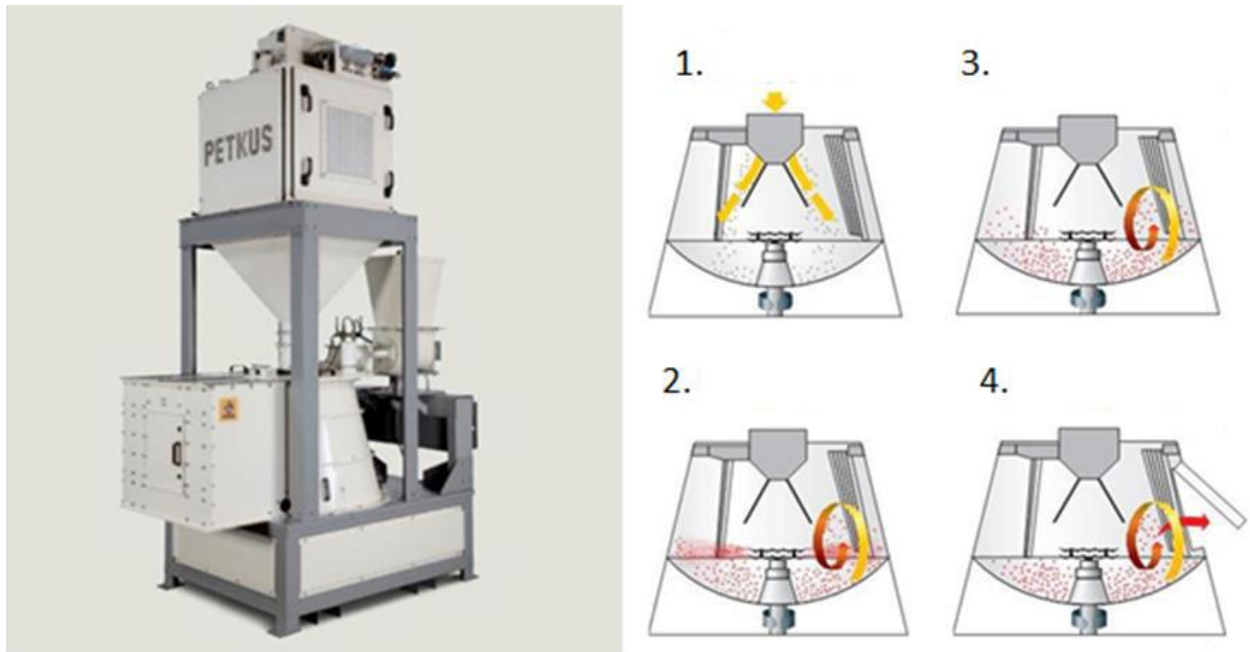


Рис. 1.4. Порційний протруювач камерного типу Petkus CT-100 Порційний протруювач камерного типу Petkus CT-100

Попри всі переваги таких пристроїв їхнім основним недоліком є дискретність робочого процесу, що суттєво знижує продуктивність і ускладнює їхній монтаж у лінії потокової дії.

Найбільш перспективними для подальшого вдосконалення є протруювачі барабанного типу. Барабанні протруювачі конструктивно прості, мають високу продуктивність і мінімальні показники травмування насіння. Протруювачі барабанного типу (рис. 1.5), порівняно з попередніми типами конструкції протруювачів універсальні щодо обробки насіння різних зернових культур, можливість використання під час сухого, напівсухого, дражування, використання в поточкових і порційних лініях.

Відомі різні конструктивні рішення, спрямовані на підвищення якості робочого процесу барабанного протруювача, з розміщеними всередині барабана напрямними елементами для зміщення зернового шару під час протруювання у вигляді лопатей для розподілу твердого протруйника або робочої рідини. Так само є технічні пристрої для протруювання, що складаються з циліндричного барабана, виконаного у вигляді тіл обертання, внутрішня поверхня яких виконана у вигляді гвинтових канавок. Недоліком зазначених пристроїв є те, що

взаємне перемішування насіння здійснюється в площині обертання і значною мірою визначається геометрією та кінематикою барабана без урахування шорсткості внутрішньої поверхні циліндра та без урахування впливу сил тертя, які виникають у оброблюваного насіння. Сили тертя напряму залежать від коефіцієнтів тертя як насіння, так і матеріалу внутрішньої стінки, які мають відмінності за видами зернових культур та їхнім станом, зокрема вологістю, що в процесі протруювання кардинально змінюється.

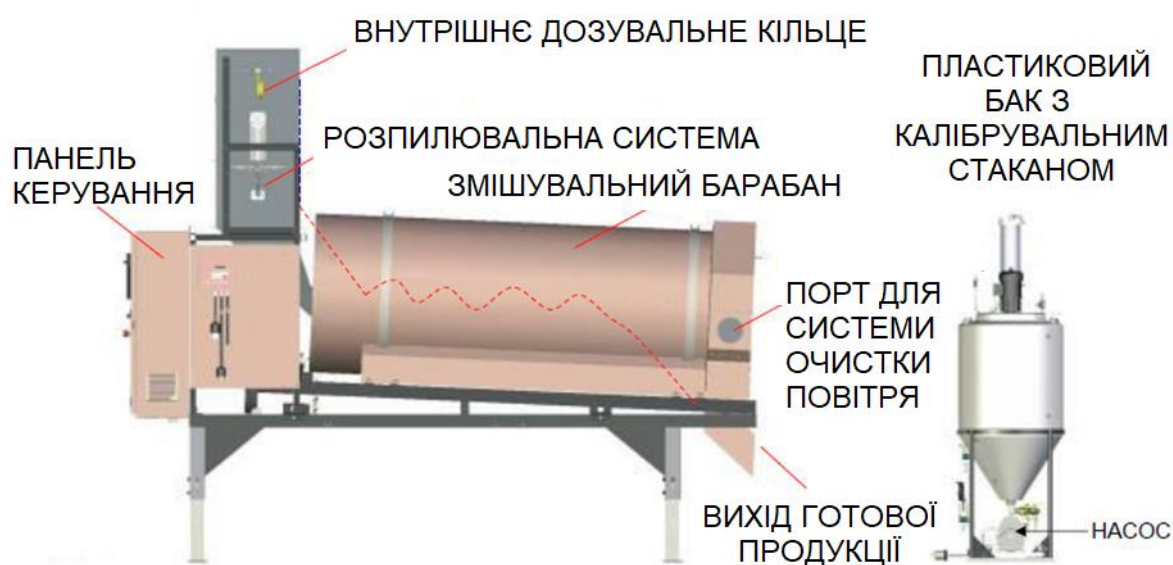


Рис. 1.5. Протруювач насіння барабанного типу потокового типу дії Bayer CF35

Одним із слабких місць протруювача барабанного є недостатня рівномірність покриття протруйника поверхнею насіння та не повною мірою вивчені й використані можливості режимів руху зернового матеріалу внутрішньою поверхнею барабана.

Висновки по розділу

Вважаємо, що серед пристроїв для передпосівного обробітку насіння зернових культур препаратами, найперспективнішими в удосконаленні, за багатьма показниками, є протруювачі барабанного типу. Однак, дані типи протруювачів поступаються за якістю нанесення препаратів на насіння

протруювачам порційної дії. Під час роботи в режимі порційної дії компоненти періодично завантажують у змішувач у точному співвідношенні, що забезпечує стабільну його роботу навіть у разі подавання різної кількості насіння. Барабанні протруювачі працюють у режимі безперервної дії, за якої компоненти транспортуються до розвантажувального люка, одночасно перемішуючись, що дає змогу забезпечити високу продуктивність.

Це впливає на рівномірність нанесення препарату на насіння. Існуючі конструкції пристроїв барабанного типу для передпосівної обробки насіння рідкими препаратами мають конструктивний недолік, виражений у низькій інтенсивності перемішування зерна, що призводить до збільшення норм витрати препарату для виконання агротехнічних вимог. Звідси виникає завдання пошуку рішень для підвищення процесу взаємного перемішування насіння в барабані.

РОЗДІЛ 2

АПРІОРНИЙ АНАЛІЗ І ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ БАРАБАННОГО ПРОТРУЮВАЧА

2.1 Аналіз робочого процесу барабанного протруювача методами класичної механіки

Якісні показники протруювання насіння залежать від фізичних властивостей захисно-стимулюючого препарату, від насінневого матеріалу та конструкції робочих органів, що беруть участь у робочому процесі протруювання. Аналіз існуючих конструкцій пристроїв для обробки насіння зернових культур захисно-стимулюючими протруйниками показав, що мінімальні показники травмування насіння та перспективи подальшого вдосконалення технологічного процесу нанесення препаратів на насіння можна реалізувати у пристроях барабанного типу. Однак основним недоліком даних протруйників є недостатня рівномірність нанесення препарату на поверхню насіння, що здійснюється при контакті взаємодії зерновок внаслідок перемішування. Перемішування можна розглядати як механічний рух, тільки одного тіла, а двох і більше тіл у просторі метою якого є рівномірний розподіл одного тіла щодо іншого. Інакше перемішування безлічі твердих тіл або гранульованого матеріалу – це процес контактної взаємодії частинок гранульованого матеріалу один з одним. Рівномірність такого розподілу визначається однорідністю. Перемішування двох і більше тіл відбувається нерівномірно до досягнення певного максимуму, при якому настає рівномірний розподіл часток у просторі. Однорідність розподілу частинок визначається часом та кількістю контактів частинок гранульованого матеріалів.

У даних пристроях обробка препаратами і переміщення насіння здійснюється всередині обертового барабана за рахунок сил тертя, що виникають, що виникають між внутрішньою поверхнею барабана і

компонентами при вільному ковзанні і падінні останніх без зовнішнього фізичного впливу відповідно до схеми технологічного процесу реалізації передпосівної обробки насіння представленої на рисунку 2.1.

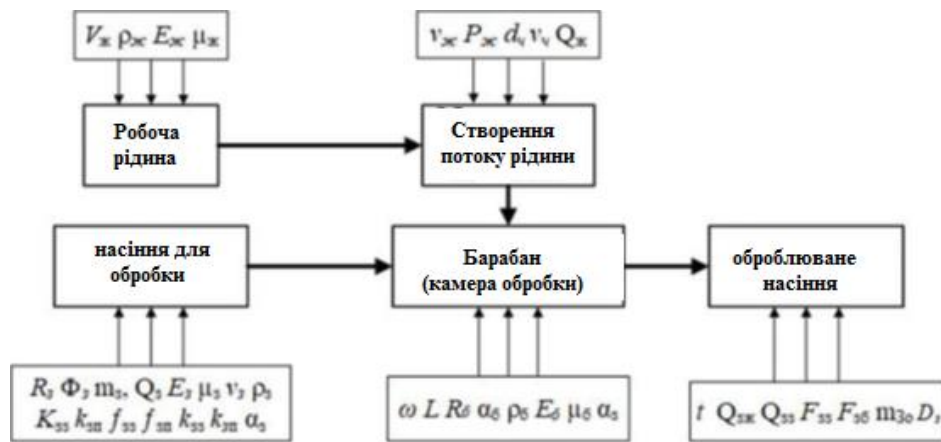


Рис. 2.1. Схема технологічного процесу обробки насіння в барабанному протруювачі

В рамках існуючих теорій основами параметрами, що впливають на технологічний процес протруювання, є: для зерна радіус- R_z , коефіцієнт форми- Φ_z , об'ємна маса - m_z , їх кількість- Q_z , модуль Юнга- E_z , коефіцієнт Пуассона- μ_z , початкова швидкість - v_z , щільність - ρ_z , а також коефіцієнт реституції між зернами K_{zz} і між внутрішньою поверхнею барабана k_{zp} , статичний коефіцієнт тертя f_{zz} і між внутрішньою поверхнею барабана f_{zp} , коефіцієнт тертя кочення між зернами k_{zz} і між внутрішньою поверхнею барабана k_{zp} ; кут природного укусу зерна α_z .

Для робочої рідини вихідними параметрами є: обсяг робочої – $V_{ж}$, щільність – $\rho_{ж}$, модуль Юнга- $E_{ж}$, коефіцієнт – Пуассона $\mu_{ж}$. В освіті робочої рідини, що розпилюється, беруть участь наступні параметри: швидкість руху -- $v_{ж}$, тиск у системі - $P_{ж}$, діаметр частинок - $d_{ч}$, початкова швидкість - $v_{ч}$, кількість рідини $Q_{ж}$, що подається. Частинки, що утворилися аерозолію потрапляючи в барабан починають контактувати з зернами в барабані, що обертається.

Технологічні параметри барабана, наступні: кутова швидкість обертання - ω , довжина - L , радіус - $R_{б}$, кут нахилу до горизонту- $\alpha_{б}$, щільність матеріалу його

внутрішньої поверхні - ρ_6 , модуль Юнга матеріалу внутрішньої поверхні - E_6
 граничний кут підйому насіння- α_3 .

У сукупності перелічені параметри впливають на такі показники, як час перебування насіння в контакті з частинками робочої рідини, загальна кількість контактів частинок рідини і зерен $Q_{зж}$; загальна кількість контактів зерен один з одним $Q_{зз}$; сила контакту зерен друг з одним $F_{зз}$; сила контакту зерен про внутрішню поверхню барабана $F_{зб}$; маса насіння після протруювання тзо і рівномірність покриття D_3 .

Процес перемішування зерновок відбувається таким чином, що при досягненні граничного кута сила тертя об поверхню зменшується, сила, що зрушує, стає більше сили тертя і тіло починає переміщатися вниз. Швидкість зернівки починає падати і за певного значення кута зупиняється. Під дією сили тяжіння зернівка і сили тертя, що виникає, про внутрішню поверхню барабана починає рух уздовж стінки обертового барабана вгору. Траєкторія руху зерновок залежить від ступеня заповнення, швидкості обертання барабана та коефіцієнта тертя внутрішньої поверхні барабана. Численні дослідження в галузі перемішування гранульованих матеріалів підтверджують, що найбільша кількість контактів частинок між собою відбувається під час руху вниз.

Таким чином, обробка зерна в барабанному протруювачі полягає в безперервному русі зерновок вгору, підйомом і на певних режимах сповзанням вниз з наступними повтореннями циклу. Слід враховувати, що при цьому насіння здійснює поперечний та поздовжній рух. Насіння при осипанні забезпечує взаємне перемішування шарів. Найбільш значущими факторами при цьому є значення кута тертя зерновок, що залежить від кута природного укусу про внутрішню поверхню барабана при русі вгору і кут природного укусу при русі вниз [9, 10].

При цьому співвідношення моментів, викликаних силою тяжіння F_g і силами тертя $F_{тр}$, призводять до наступних варіантів руху:

- $F_{тр} < F_g$ сповзають вниз, каскадному русі;

- $F_{mp} \leq F_g$ при водопадному варіанті, насіння починає не тільки сповзати вниз, а й падати;

- $F_{mp} \geq F_g$ насіння рухається вгору разом з барабаном, критичний режим.

На рис. 2.2 представлені варіанти руху насіння в барабані, що обертається.

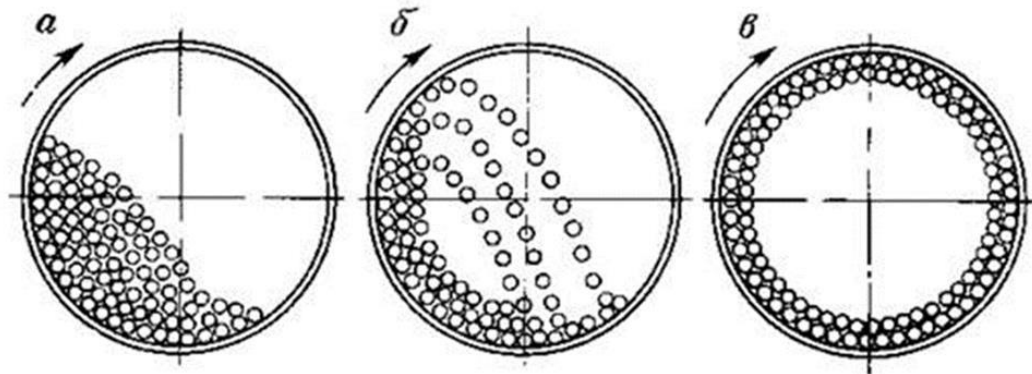


Рис. 2.2. Варіанти руху насіння у барабані: *a*- каскадний рух; *б*-водоспадний рух; *в* – критичний режим руху.

Для інтенсивнішого перемішування і розподілу препарату доцільніше поєднання каскадного і водоспадного руху баз розриву контакту насіння, тобто. при підйомах на кут до 90^0 . Даний варіант на практиці спостерігається у випадки човникового руху, при перехідних режимах у якому динамічні тертя стає значно менше статичного тертя спокою.

Розглянемо сили, що діють на зернівку у барабані, що обертається згідно зі схемою представленою на рисунку 2.3. На зернівку (матеріальна точка M з масою m) при цьому діють такі сили:

F_{mp} - сила тертя насіння об поверхню барабана, спрямована по дотичній до його поверхні у бік обертання барабана;

$$F_{тр} = \mu \times N \quad (2.1)$$

де $\mu = tg \varphi$ – коефіцієнт тертя ковзання частки, який залежить від кута природного укосу;

N – сила реакції опори (стілки барабана).

$$N = G \times \cos \alpha + \Phi_n^e \quad (2.2)$$

де, G – сила тяжіння;

$$G = m \times g, \quad (2.3)$$

де, m – маса насіння, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; α_0 – кут початку скочування вниз шару насіння барабаном; Φ_n^e – нормальна сила інерції;

$$\Phi_n^e = m \times \omega^2 \times R, \quad (2.4)$$

де, R - радіус барабана, м; ω – кутова швидкість обертання барабана, с^{-1} .

Замінюючи значення G з формули і Φ_n^e формули в рівняння отримаємо

$$N = m \times (g \times \cos \alpha_0 + \omega^2 \times R) \quad (2.5)$$

Замінюючи значення N із формули (2.4) на рівняння (2.5) отримаємо

$$F_{\text{тр}} = \mu \times m \times (g \times \cos \alpha_0 + \omega^2 \times R) \quad (2.6)$$

Запишемо умову рівноваги, коли зернівка спочиває щодо стінки барабана. Ця умова зберігається доти, поки тангенціальна складова сили тяжіння дорівнюватиме силі тертя. З урахуванням вищесказаного отримаємо

$$m \times g \cdot \sin \alpha_0 = \mu \times (m \times g \times \cos \alpha_0 + m \times \omega^2 \cdot R) \quad (2.7)$$

Шляхом деяких математичних перетворень отримаємо

$$\sin \alpha_0 = \mu \times (g \times \cos \alpha_0 + \omega^2 \times R) \quad (2.8)$$

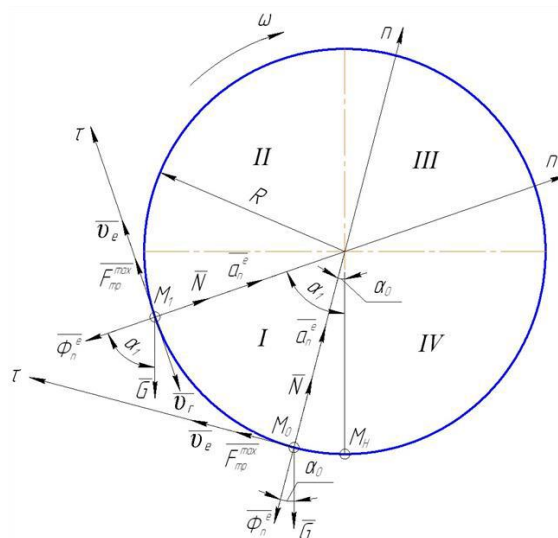


Рис. 2.3. Схема сил, що діють на зернівку в барабані, що рівномірно обертається.

Кут α_0 визначається чисельним рішенням рівняння (2.8) при певних значеннях коефіцієнта тертя μ про внутрішню поверхню барабана, кутової швидкості ω , і радіусі барабана R .

У спрощеному вигляді кут підйому зернового шару в процесі обертання барабана може бути визначений залежно від [9]:

$$\alpha = \varphi + \arcsin \frac{\omega^2 \times R \times \sin \varphi}{g} \quad (2.9)$$

де α - граничний кут підйому шару зерна в барабані, φ - природний кут укусу насіння, R - радіус барабана, ω - кутова швидкість обертання барабана, g - прискорення вільного падіння.

Основа технологічного процесу пристроїв для протруювання барабанного типу полягає в безперервному русі шару зерна до виходу по певній траєкторії спрямованої вгору і схилом частини зерен вниз, тим самим порушується загальний шар з наступними повтореннями циклу. Оброблені зерна контактують з іншими зернами, тим самим забезпечують взаємне перемішування зернового шару в цілому та сприяють рівномірному розподілу препарату по поверхні зерен. При обертанні барабана цикл повторюється. Графіки залежності кутів підйому від кутів скату та сили тертя зернівки про внутрішню поверхню при різних кінематичних режимах роботи барабанного протруювача наведено на рис. 2.4. Кінематичний режим розраховується за формулою $k = \frac{\omega^2 R}{g}$, де ω – кутова швидкість обертання барабана; R – радіус барабана; g – прискорення вільного падіння.

Отже, визначальними значеннями процесу руху насінневого шару є кут тертя зерна про внутрішню поверхню барабана при підйомі вгору і кут природного укусу насіння при зісковзуванні вниз.

При аналізі руху матеріалів по осьовій лінії барабана зернівка, піднявшись по внутрішній бічній поверхні барабана по дузі кола BA_1 в площині перпендикулярної осі обертання до точки A_1 , насіння почне ковзати вниз по лінії найбільшого ската A_1B_1 , що представляє собою ділянку близьку до гвинтової лінії, що відхиляється від вертикалі. на кут ε (рисунк 2.5).

При малих кутах нахилу $\alpha_n = 5-10^\circ$ та вугіллі $\alpha_1 \approx 45^\circ$ кут відхилення ε може бути прийнятий рівним куту нахилу α_n . Так як при цьому внаслідок

безперервного обертання барабана точка B_1 перейде в точку A_2 , відрізок B_1A_2 , аналогічний відрізку BA_1 , буде безпосереднім продовженням відрізка A_1B_1 на внутрішній бічній поверхні барабана.

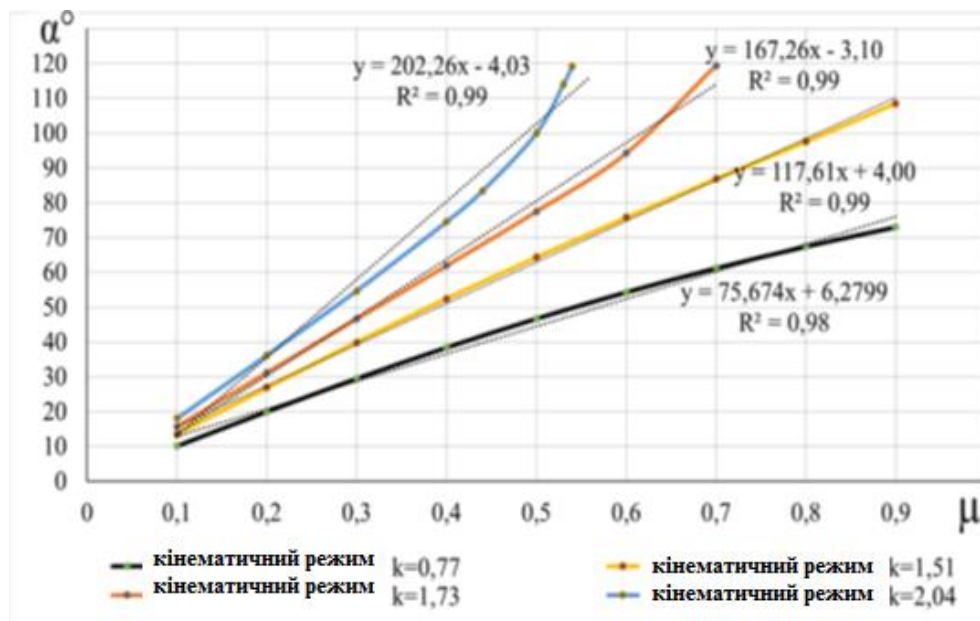


Рис. 2.4. Граничні кути підйому насіння залежно від коефіцієнта тертя про внутрішню поверхню барабана показників кінематичного режиму: 1-0,77; 2-1,51; 3-1,73 та 4- 2,04

Отже, відносну траєкторію насіння на внутрішній поверхні барабана можна розбити на ділянки BA_1 , B_1A_2 , B_2A_3 , B_3A_4 і т.д., що є дугами кола та ділянки A_1B_1 , A_2B_2 , A_3B_3 , A_4B_4 і т.д.

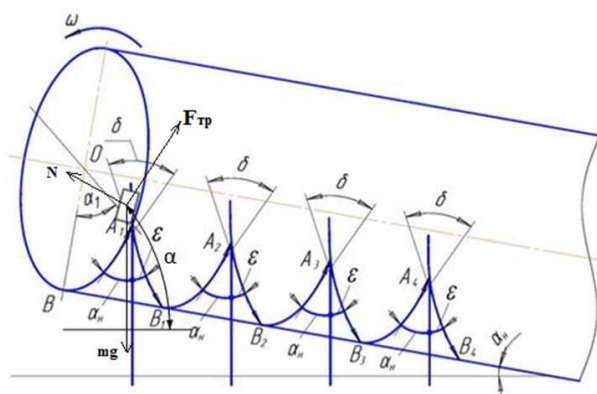


Рис. 2.5. Рух насіння без відриву від поверхні похилого барабана наближені до гвинтової лінії, якими рух насіння відбувається уривчасто з паузами. Паузи відбуваються в кінці підйому насіння вгору в точках A_1 , A_2 , A_3 , A_4 і т.д. і при малому куті нахилу барабана α_n прийняти рівним $2\alpha_n$.

Для підвищення ефективності процесу промішування в барабанному протруювачі, на основі кінематичних законів руху матеріальних тіл і з урахуванням підйому насінневого матеріалу на різні кути, можна використовувати різні режими, тобто передбачити зміну радіуса або кутової швидкості на окремих ділянках за довжиною або чергування їх у часі, що досить складно для технічного втілення. З урахуванням цього нами пропонується рішення, що полягає в установці всередині циліндричного барабана кільцевих вставок з матеріалів, що мають різні коефіцієнти тертя стосовно оброблюваних матеріалів.

Запропоноване рішення дозволяє отримати новий технічний ефект - підвищення інтенсивності перемішування насіння різних культур за рахунок різниці кутів підйому окремих ділянок барабана. Цей ефект досягається тим, що всередині барабана встановлені кільцеві вставки різних матеріалів, ширина і значення коефіцієнтів тертя внутрішніх поверхонь яких вибираються з умови оптимізації режимів роботи окремих ділянок.

Виходимо з передумов, що зерно прискорено рухається вздовж стінки барабана, і переходить з вставки з більшим коефіцієнтом на вставку з меншим коефіцієнтом тертя здійснювався в зоні максимального підйому. А перехід із вставки з меншими на вставку з більшими показниками тертя у найнижчій точці траєкторії. При цьому час переміщення вздовж барабана повинен дорівнювати часу підйому і спуску тіла вниз. Враховуючи неможливість розрахунків з достатньою точністю сипких матеріалів, попередні обчислення виконаємо для одиничного твердого тіла.

Нам дано форму тіла або зернівки, яка рухається по внутрішній поверхні барабана. Для характеристики руху будь-якого тіла потрібно використовувати формулу моменту інерції $I = kmr^2$, коефіцієнт k залежить від характеристик тіла. Також нам відомий кут нахилу барабана і кут на який має піднятися зернівка. Для виконання вищенаведених умов переходу з однієї області в іншу область

необхідно щоб ширина вставки 1 дорівнювала довжині шляху $L_{вст}$ пройдений тілом під час підйому, тобто. $t_{скат}=t_{під}$

Час підйому на кут 90° без урахування кочення становитиме:

$$t_{под} = \frac{\pi N}{2\omega} \quad (2.10)$$

Переміщення тіла зернівки вздовж горизонтальної осі барабана буде визначатися кутом природного укосу під час підйому на кут 90 градусів, тобто. навантаженням.

Ширину вставки з меншим коефіцієнтом тертя розраховуємо виходячи з часу зісковзування твердого тіла по внутрішні стінки барабана.

Сили, що діють на зернівку, рисунку 2.4 при підйомі та спуску.

Для визначення переміщення вздовж осі барабана може бути визначено на підставі загальновідомої залежності:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad v = v_0 + at, \quad (2.11)$$

Сума всіх сил, що діють на зернівку, виражаються через рівняння Ньютона $N + F_{тяж} + F_{тр} = ma$, де N – сила реакції опори, $F_{тяж}$ – сила тяжкості рівне масу m помножене на прискорення a , $F_{тр}$ – сила тертя. Для визначення сил, що діють на зернівку, проводимо осі координат X і Y , споектуємо рівняння Ньютона на вісь координат OX :

$$mg \sin \alpha - F_{тр} = ma \quad (2.12)$$

Проведемо рішення рівнянь сил, що діють по осі координат OY :

$$-mg \cos \alpha + N = 0 \quad (2.13)$$

З урахуванням що вплив сил на тіло по осях координат дорівнюватиме:

$$N_x + F_{тяжx} + F_{трx} = ma_x \quad \text{и} \quad N_y + F_{тяжy} + F_{тры} = ma_y \quad (2.14)$$

Вираз $F_{тр} = \mu N$ записати не буде правильним за відсутності руху зернівки, тоді момент інерції сили тертя буде рівним $M F_{тр} = I \times \omega$, а це можна записати як $M F_{тр} = F_{тр} \times r$, де плечем буде радіус. Тоді $F_{тр} \times r = m r^2 \omega$, при $I = k m r^2$, тоді $F_{тр} = m r \omega$, а $r \omega$ – це тангенціальне прискорення, а при заданих умовах тертя, тому ширину вставок з різними коффіцієнтами тертя порахувати не вийде. Для отримання

ширини вставок нам треба застосувати коефіцієнт тертя μ , а це можливо тільки при русі тіла по внутрішній поверхні барабана. L – шляхи зернівки дорівнюватиме $\frac{at^2}{2}$.

Звідси повертаємось до рівняння Ньютона, тоді після перетворень отримуємо:

$$mgs\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha = ma \quad (2.15)$$

При скороченні m отримуємо $gs\sin\alpha - \mu g\cos\alpha = a$, спрощено, знаходження прискорення для зернівки можна записати так:

$$a = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha) \quad (2.16)$$

Для виконання вищенаведених умов переходу із зони з високим коефіцієнтом тертя в зону з низьким, необхідно, щоб ширина вставки L дорівнювала довжині шляху S пройдений тілом за час підйому t , тобто. $t_{\text{скат}} = t_{\text{під}}$

Виходячи з проведеного аналізу нами пропонується пристрій для передпосівної обробки з кільцевими вставками, загальна схема якого представлена на рис. 2.6 містить встановлений з нахилом барабан, що обертається 6, всередині якого закріплені кільцеві вставки 4, 5, що утворюють суцільну циліндричну поверхню. При цьому кільцеві вставки 4 і 5 можуть мати різну ширину l_1 і l_2 і виконуються з матеріалів, що мають різні коефіцієнти тертя, значення яких вибираються з умови оптимізації режимів роботи окремих ділянок барабана. З піднятого боку барабана 3 встановлений завантажувальний бункер 1 для насіння, розпилювач 3 з нагнітальним трубопроводом 2 для подачі робочої рідини.

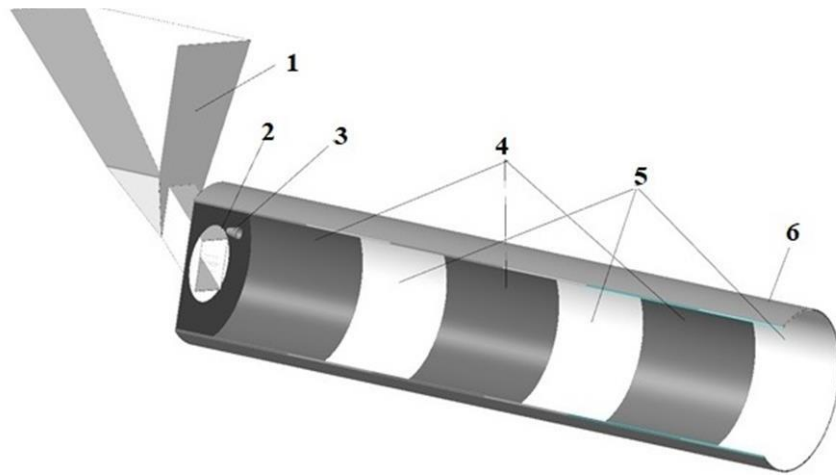


Рис. 2.6. Удосконалений барабанний протруювач з кільцевими вставками: 1 – завантажувальний бункер для насіння; 2 – патрубок; 3 – розпилювач; 4 – кільцеві вставки з більшою силою тертя; 5 – з меншою силою тертя; 6 – барабан

Запропонований пристрій для протруювання насіння зернових культур працює наступним чином. Насіння засипається завантажувальний бункер на суцільну внутрішню циліндричну поверхню, утворену кільцевими вставками 4 і 5, що чергуються, з різними матеріалами. Одночасно до зони падіння насіння подається робоча рідина у вигляді дрібних крапель (аерозолі), утворених розпилювачем 3 внаслідок наявності тиску в нагнітальному трубопроводі. Насіння, що лежить на внутрішній поверхні кільця 4, переміщуються по колу у напрямку обертання барабана 3, захоплюючи за собою верхні шари насіння, при цьому швидкість переміщення верхніх шарів зменшується в міру віддалення від насіння, що лежать на внутрішній поверхні кільцевих вставок 5. Досягши граничного кута під , насіння під дією сил тяжіння починають радіальний рух вниз і утворює в бік нахилу барабана 6. При цьому на кільцевих вставках 4, мають більший коефіцієнт тертя, насіння піднімається на більший кут і, досягнувши граничного кута підйому, при русі в зоні переходу до наступної кільцевої вставці 5 з меншим коефіцієнтом тертя не зустрічаються з насінням, що рухається вгору, т.к. на даних кільцевих вставках 5 кут граничного підйому насіння нижче. Це сприяє взаємному перемішуванню насіння не тільки за

рахунок радіального, а й осьового переміщення, що значно підвищує інтенсивність та рівномірність нанесення препарату на їхню поверхню.

Отримані залежності певною мірою представляють можливість апріорного аналізу процесу протруювання насіння в барабанному протруювачі та визначення його конструктивно-технологічних параметрів. За результатами обчислень методами класичної механіки ширина кільцевих вставок L з коефіцієнтом тертя $\mu=0,7$ (гума) для насіння пшениці склало $l_a = 200$ мм, з коефіцієнтом $\mu=0,3$ (сталі) ширина вставки $l_b = 300$ мм.

Проте найбільш наближені до реальних результатів може бути отримано, як ми вже зазначали, на основі використання сучасних методів віртуального моделювання, зокрема EDEM DEM. Вибір програмного забезпечення для моделювання, EDEM DEM базувався на таких положеннях:

- необхідні для проведення експериментів віртуальні моделі протривачів максимально відповідають натурному об'єкту і можуть проводитися на 3D образах, створених як з використанням вбудованих можливостей побудови геометрії, так і імпортованих з інших CAD-систем для побудови 3D моделей, наприклад, «Компас-3D», Solidworks тощо;

- фізико-механічні властивості насіння та геометрії як маса, щільність, форма, коефіцієнтів тертя і т.д., задаються вручну, або з використанням вбудованого модуля розрахунку на основі заданих параметрів та довідкових даних. - можливістю проведення комплексного аналізу поведінки зернового матеріалу на основі підрахунку швидкості руху, кутової швидкості, визначення траєкторії та положення у 3-х осьовій системі координат, досліджуваної технічної системи;

- наявністю вбудованих обчислювальних ресурсів, заснованих на чисельних методах дискретних елементів з вбудованими системами диференціальних рівнянь, що дозволяють проводити обчислювальні експерименти із зерновими матеріалами;

- можливість змінювати кінематичні параметри під час проведення обчислювального експерименту;
- процес симуляції віртуальної моделі контролюється із завданням часу розрахунку та області контакту з використанням кількох методів розрахунку. Аналіз отриманих результатів надається у графічному та візуальному вигляді, зі збереженням результатів у форматах сторонніх програмних продуктів. А також, можливістю експорту результатів до поширених форматів avi, jpg, doc у будь-який момент часу.

2.2. Розробка віртуальної моделі робочого процесу протруювача в середовищі EDEM DEM

Для моделювання робочого процесу в протруювачах методом дискретних елементів, як уже зазначалося вище, нами обрано програму EDEM DEM Solutions. Ця програма дає змогу враховувати велику різноманітність фізичних законів, швидко змінювати параметри системи під час дослідження. Програма має гнучкий інтерфейс і широкий спектр можливостей візуалізації. З недоліків варто відзначити високу вимогливість до обчислювальних ресурсів. Програма має хороші перспективи для застосування в моделюванні досліджуваних процесів у сільському господарстві.

Віртуальне моделювання в програмному продукті EDEM дає змогу проводити експерименти зі змінюваними параметрами та їхній вплив на робочій процес протруювання насіння. Одна з важливих властивостей віртуального експерименту полягає у візуалізації результатів дослідження. Графічне представлення розрахунків дають глибше розуміння робочих процесів перемішування насіння зернових культур, що протікають. При цьому візуалізація процесів, що відбуваються, дає змогу досліджувати недоступні місця досліджуваного об'єкта, що під час проведення фізичного експерименту буває неможливо. Проведення віртуального моделювання в програмному продукті

EDEM DEM Solutions дає змогу отримати дані, які можуть бути використані для дослідження динаміки насіння зернових культур, а також для оптимізації робочого процесу протруювання.

Для проведення перевірки відповідності поведінки побудованої віртуальної моделі з відповідними даними дійсної поведінки проведено процедуру верифікації та валідації. Загальну схему побудови, взаємодії дійсної та віртуальної моделі, проведення процедури верифікації, валідації та калібрування представлено на рис. 2.7.

Для побудови віртуальної моделі барабанного протруювача нами було створено тривимірну модель у Компас 3D (рис. 2.8) та імпортовано у форматі EDEM. Розміри імпортованих моделей змінити не можна.

У створеному проєкті геометричний образ барабана перетворюється на кінцево елементний об'єкт віртуального експерименту. Встановлюються фізичні зв'язки з гранульованим матеріалом, кінематичні режими, параметри середовища з урахуванням дії сили тяжіння, задані властивості матеріалів і встановлюється контактна модель взаємодії.

Далі запускається симулятор «Simalator», де в налаштуваннях встановлюється час проведення експерименту для збору даних, кількість осередків і розмір сітки апроксимації.

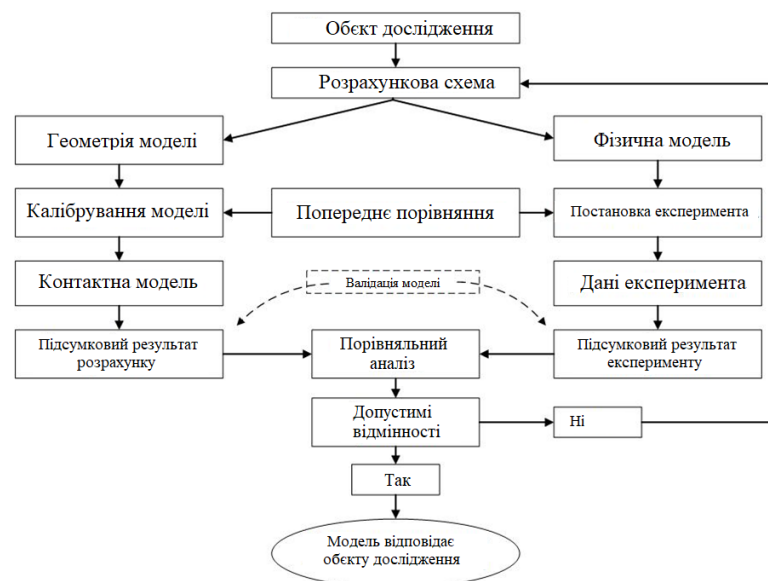
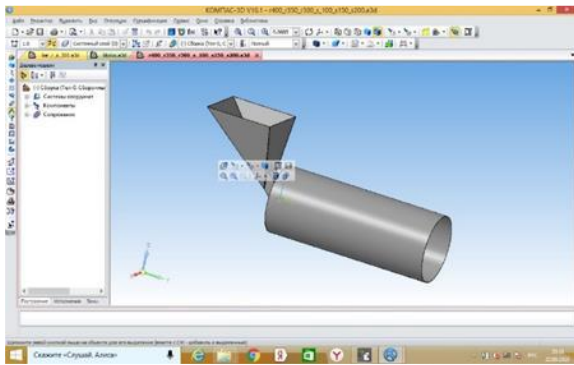
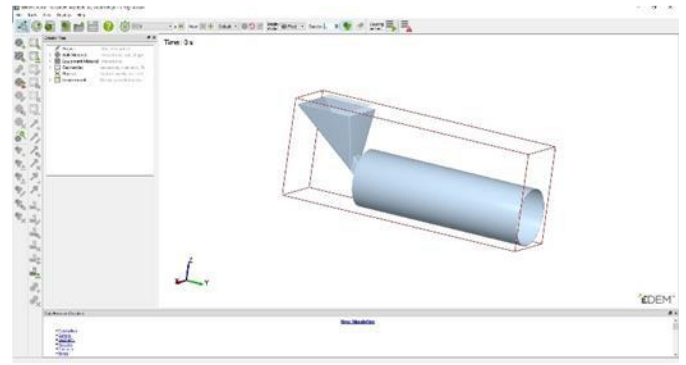


Рис. 2.7. Загальна схема побудови віртуальної моделі

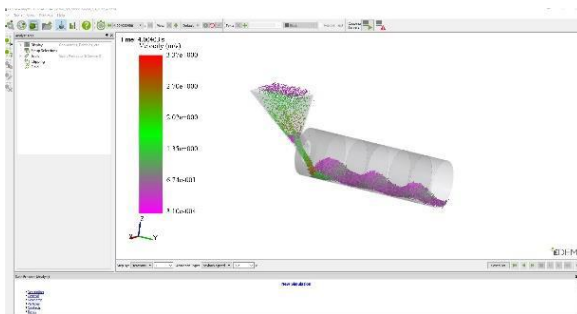


а)

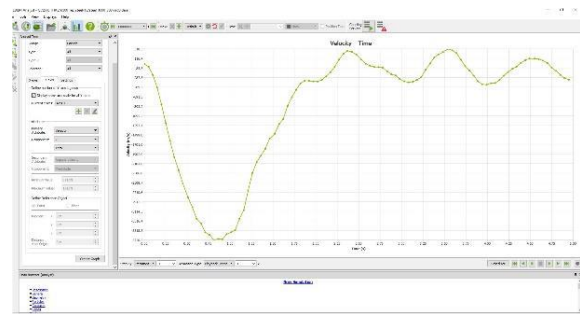


б)

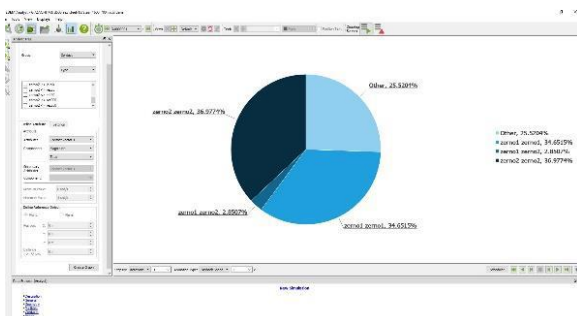
Рис. 2.8. Імпортована в EDEM тривимірна модель барабанного протруювача: а) 3D модель, побудована в КОМПАС 3D; б) імпортована модель в EDEM



а)



б)



в)



г)

Рис. 2.9. Аналіз і виведення отриманих результатів в EDEM; а) візуалізація процесу руху з відображенням швидкості переміщення зернівок у реальному часі; б) виведення графіка; в) виведення кругової діаграми; г) виведення гістограми

Потім, за допомогою вбудованого аналізатора "Analyst" (рисунок 2.9) проводиться аналіз отриманих даних і серія розрахунків із виведенням залежностей і віртуального образу моделі на екран комп'ютера. Виведення гістограми кількості контактів залежно від часу. Кругова діаграма у відсотках контактів взаємодії з об'єктами досліджень. Графік траєкторії руху частинок у системі координат залежно від часу та дистанції.

У віртуальній моделі взаємодії насіння між собою та внутрішньою поверхнею барабана було встановлено такі параметри:

1. Взаємодія (Interaction) зернівки між собою (zerno1) – зернівки (zerno2)

1.1 Коефіцієнт відновлення (Coefficient of Restitution) – 0,5

1.2 Коефіцієнт статичного тертя (Coefficient of Static Friction) – 0,68

1.3 Коефіцієнт тертя обертання (Coefficient of Rolling Friction) – 0,15

2. Взаємодія (Interaction) зернівки з матеріалом із низьким коефіцієнтом тертя, умовно позначимо "Steel"

1.1 Коефіцієнт відновлення (Coefficient of Restitution) – 0,5

1.2 Коефіцієнт статичного тертя (Coefficient of Static Friction) – 0,3

1.3 Коефіцієнт тертя обертання (Coefficient of Rolling Friction) – 0,01

3. Взаємодія (Interaction) зернівки з матеріалом із високим коефіцієнтом тертя, "rezina":

1.4 Коефіцієнт відновлення (Coefficient of Restitution) – 0,5

1.5 Коефіцієнт статичного тертя (Coefficient of Static Friction) – 0,7

1.6 Коефіцієнт тертя обертання (Coefficient of Rolling Friction) – 0,01

Висновки по розділу

Фізичні властивості матеріалу внутрішньої поверхні кільцевих вставок. Встановлено такі параметри для матеріалу "steel": коефіцієнт Пуассона перебуває в діапазоні 0,25...0,33, нами було встановлено 0,25; модуль Юнга 200000 МПа; щільність встановлено 7800 кг/м³.

Для матеріалу "rezina": коефіцієнт Пуассона перебуває в діапазоні 0,4-0,5, нами був встановлений 0,47; модуль Юнга 5 МПа; щільність встановлена 2600 кг/м³.

РОЗДІЛ 3

ВИГОТОВЛЕННЯ УСТАНОВКИ ТА ЇЇ ВИПРОБОВУВАННЯ

Інженерні випробовування проводилися на установці, розробленій та зібраній на кафедрі агроінженерії та технічного сервісу Поліського національного університету. Загальний вигляд установки показано рис. 3.1.



Рис. 3.1. Експериментальне встановлення барабанного протруювача
Відповідність отриманих результатів у реальних умовах із віртуальною моделлю представлена рис. 3.2.

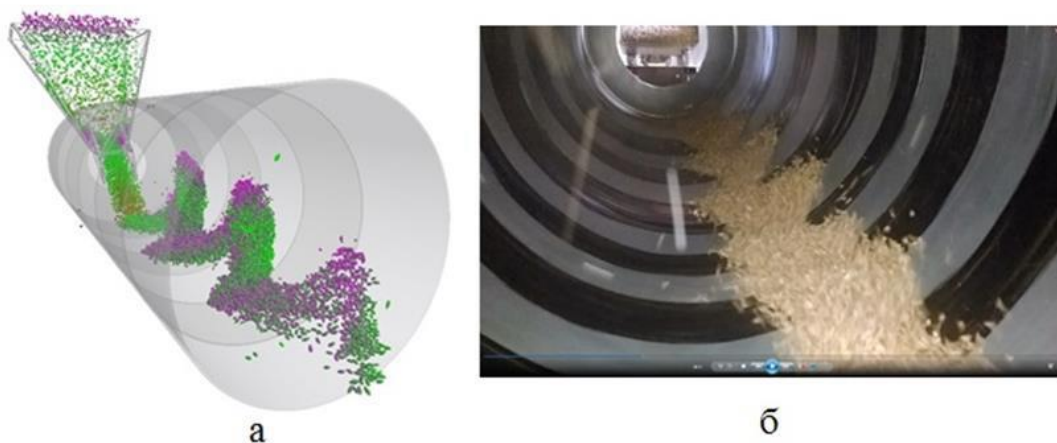


Рис. 3.2. Рух насіннєвого матеріалу у протруювачі барабанного типу: а – у віртуальному середовищі; б – у реальному середовищі

На експериментальній установці проведено експерименти щодо визначення кутів підйому насіння пшениці. Для зміни кутової швидкості обертання застосовувався частотний перетворювач (рис. 3.3).

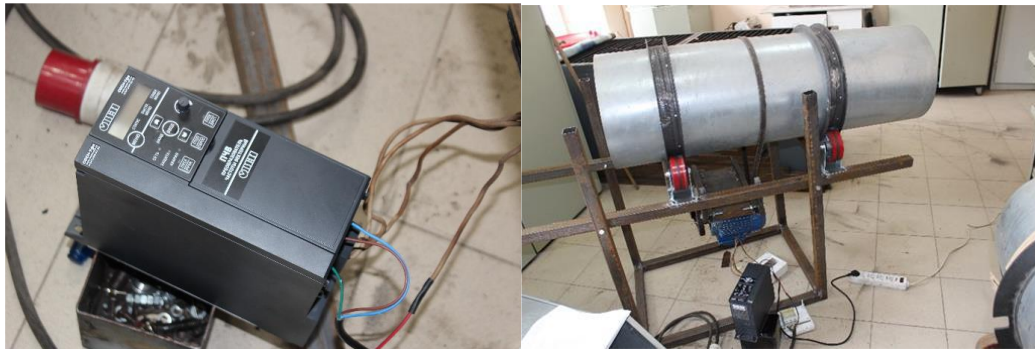


Рис. 3.3. Частотний перетворювач «Овен» ПЛВ

За допомогою частотного перетворювача «Овен» можна змінювати частоту обертання барабанного протравлювача або кутову швидкість обертання, необхідну достовірності завдання кінематичних режимів роботи. Частотний перетворювач має можливість роботи у двох та трифазних електричних мережах змінного струму з напругою 220 та 380 Вольт. Наявність дисплея надає перетворювачу можливість оперативно змінювати його параметри.

Для визначення природних кутів укоосу використовувався прилад 3.4.



Рис. 3.4. Прилад УВТ-3 для визначення природного кута схилу зернових матеріалів

Прилад УВТ-3 є воронкою для утримання сипучого матеріалу, майданчиком із встановленим градуйованим стрижнем. Насінневий матеріал засипається у вирву, потім вирву повільно піднімають вгору. Насінневий матеріал обсипається, утворюючи на майданчику насип (гірку) під певним укосом або кутом нахилу поверхні насипу у вільно насипаному стані (без ущільнення) до горизонтально встановленої площини. По розмітці на стрижні визначається кут природного укоосу.

Для зняття показників експериментальна установка умовно розбита на 14 частин із різними матеріалами та показниками коефіцієнтами тертя (рис. 3.5).

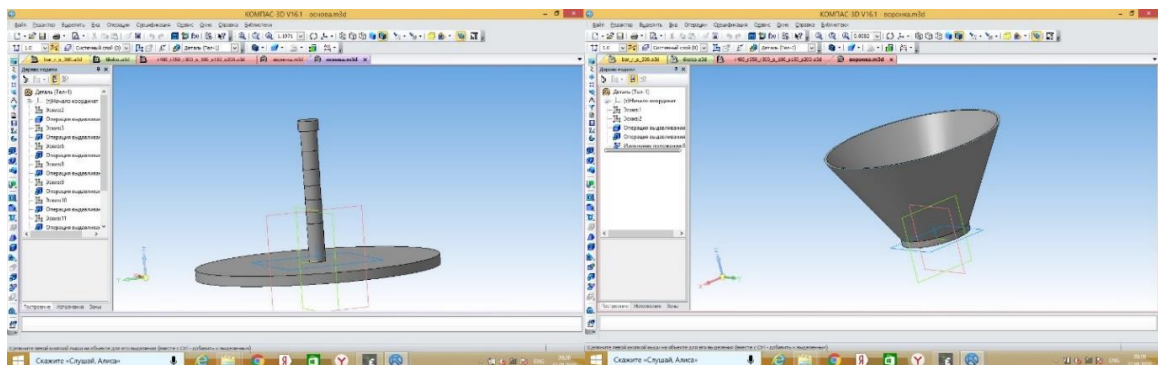


Рис. 3.5. Загальний вид установки поділений на 14 частин

Таким чином, визначені режими та параметри, при яких забезпечується підйом насіння на максимальну висоту без падіння.

Визначено кут нахилу барабанного протруювача до горизонту та частоту обертання за допомогою частотного перетворювача напруги.

Для перевірки відповідності поведінки створених нами моделей проведено верифікацію (model verification), що полягає у зіставленні результатів модельних та натурних експериментів. Для цього в середовищі тривимірного моделювання КОМПАС-3D було викреслено складові деталі приладу УВТ-3 у натуральну величину (рисунок 3.6), а потім у середовищі віртуального моделювання EDEM проведено віртуальні експерименти щодо визначення кутів природного укосу.



а)

б)

Рис. 3.6. Прилад УВТ-3 для визначення кута природного укосу сипучих матеріалів: а) мірний столик; б) обойма

Для проведення аналізу робочого процесу застосуємо методику віртуального моделювання із застосуванням програмного забезпечення для візуального представлення та аналізу динаміки гранульованого матеріалу. Також, при аналізі процесу взято віртуальні образи зернівки пшениці та проведені віртуальні експерименти у різних типах протруювачів. Фізичні показники параметрів зерна пшениці та матеріалів використаних в експерименті були відкалібровані та приведені у відповідність до довідкових.

Для калібрування моделі зернівки в модель були закладені коефіцієнти відповідно до реальних показників, а також здійснено вибір та підбір значень коефіцієнтів, що не мають прямих аналогів або важко визначаються в натурних об'єктах, зокрема ЖКР.

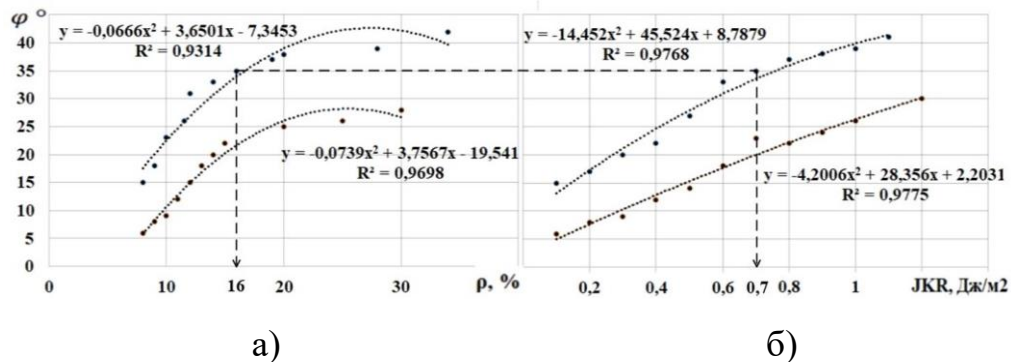


Рис. 3.7. Номограма залежності кута природного укусу від вологості та енергії поверхневого натягу пшениці та ріпаку: а) лабораторні досліді; б) віртуальна модель

ЖКР або енергія поверхневого натягу, Дж/м² зерновок у розглянутій моделі як коефіцієнт взаємної адгезії дискретних елементів (сфер) зернівки, що впливає на вологість зернового матеріалу.

Рис. 3.7 номограми залежності вологості та поверхневої енергії на кут природного укусу. На рис. 3.7, побудованій на підставі даних, отриманих з експериментів на віртуальній моделі та за допомогою приладу УВТ-3, видно, що номограми мають незначні відмінності та фактично ідентичні. Так, кут природного укусу зерновок пшениці становить 30-38 градусів, тоді як поверхнева енергія зерновок пшениці визначається в цьому діапазоні становить

0,5-0,7 Дж/м². При вологості 16% насіння пшениці ЖКР відповідає 0,7 Дж/м², кут природного укосу становить 35°.



Рис. 3.8. Звіряння кута природного схилу насіння пшениці: а) приладом УВТ-3; б) на віртуальній моделі

У нашому випадку показником ЖКР було введено корекцію в модель та здійснено облік вологості зернового матеріалу. Так, при вологості насіння пшениці 16%, прилад УВТ-3 показав кут природного укосу приблизно 35 градусів, тоді як віртуальна модель визначила 35,5 градусів при поверхневій енергії (ЖКР) зерновок пшениці 0,7 Дж/м². При завданні ЖКР 0 Дж/м², кут природного укосу – 35,6. Оскільки для протруювання насіння пшениці потрібна вологість не більше 14%, тому енергія поверхневого натягу ЖКР складе 0,6 Дж/м².

Для прийняття рішення про доцільність подальшого вдосконалення барабанного протруювача нам було проведено аналіз робочих процесів у різних типах протруювачів на ефективність контактної взаємодії

Основним робочим органом шнекового протруювача є спіраль або шнек. Шнек співвісно розміщується в порожнистому циліндрі таким чином, з можливістю обертання навколо осі. У циліндрі розміщується розпилювач для подачі протруйника, засипна та висипна горловина. Зовні знаходиться ємність із протруювачем. Протруювач такого типу, за рахунок своєї спіралеподібної форми шнека та дозованої подачі протруйника, може працювати як безперервно, так і порційно. Насіння подається через засипну горловину в циліндр на лопаті шнека,

що обертається, тим самим відбувається формування шару зерновок. За рахунок власної ваги та сили тертя про внутрішні стінки циліндра та шнека, а також кута нахилу циліндра відбувається переміщення зерновок уздовж внутрішніх стінок циліндра до висипної горловини. В результаті відбувається утворення траєкторії руху шару зерна. На рисунку 3.9. показаний фрагмент віртуального експерименту руху насінневого шару в протруювачі шнекового типу з кутом нахилу циліндра до горизонту +30 градусів.

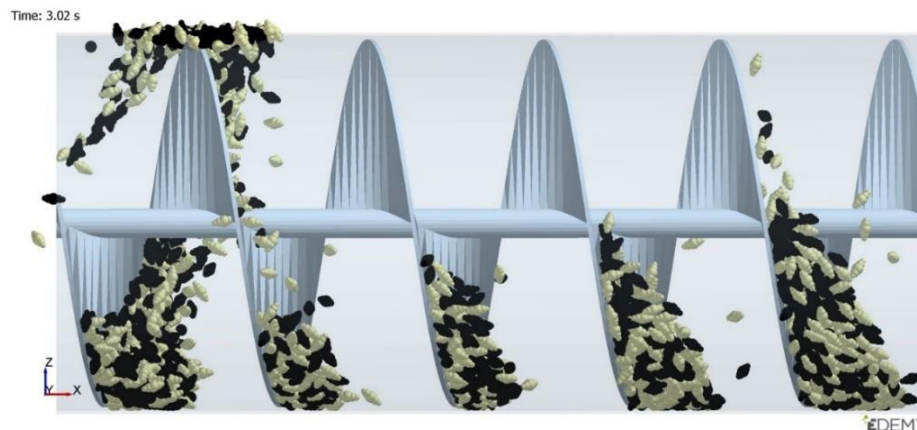


Рис. 3.9. Фрагмент руху шару зерновок у протруювачі шнекового типу

Встановлені характеристики матеріалів та параметри для проведення віртуального експерименту взяті з довідкових даних для типових пристроїв для протруювання насіння шнекового типу. Спрощена віртуальна модель протруювача шнекового типу побудована у програмі «Компас 3D» довжина циліндра становить 2500 мм, діаметр 250 мм та збережена у тривимірному форматі з розширенням stl. Отримана модель імпортована у програмне забезпечення EDEM DEM. Фізичні характеристики матеріалу циліндра і шнека відкалібровані згідно з довідковими даними, отримані з відкритих джерел найбільш близькі до характеристик сталі. Для імпортованої геометрії шнека Shnek (1) та циліндра Shnek (2) встановлюється матеріал steel. Для аналізу перемішування та взаємодії зерновок встановлено формування чергуються частинок zerno1 і zerno2 з однаковими розмірами. Маса однієї зернівки склала 0,00058 кг. Продуктивність встановлена на 12 тонн на годину.

Швидкість обертання постійна шнека встановлена 6 c^{-1} .

За 3 секунди сформовано загальну кількість зерновок 2000 шт., з них 943 zerno1 і zerno2 1057 шт. Загальна кількість контактів зернівок на 3 сек. 486 шт. Аналіз контактів зерновок між собою в середовищі EDEM графічно можна подати у вигляді кругової діаграми, наведеної на малюнку 3.10 (а).

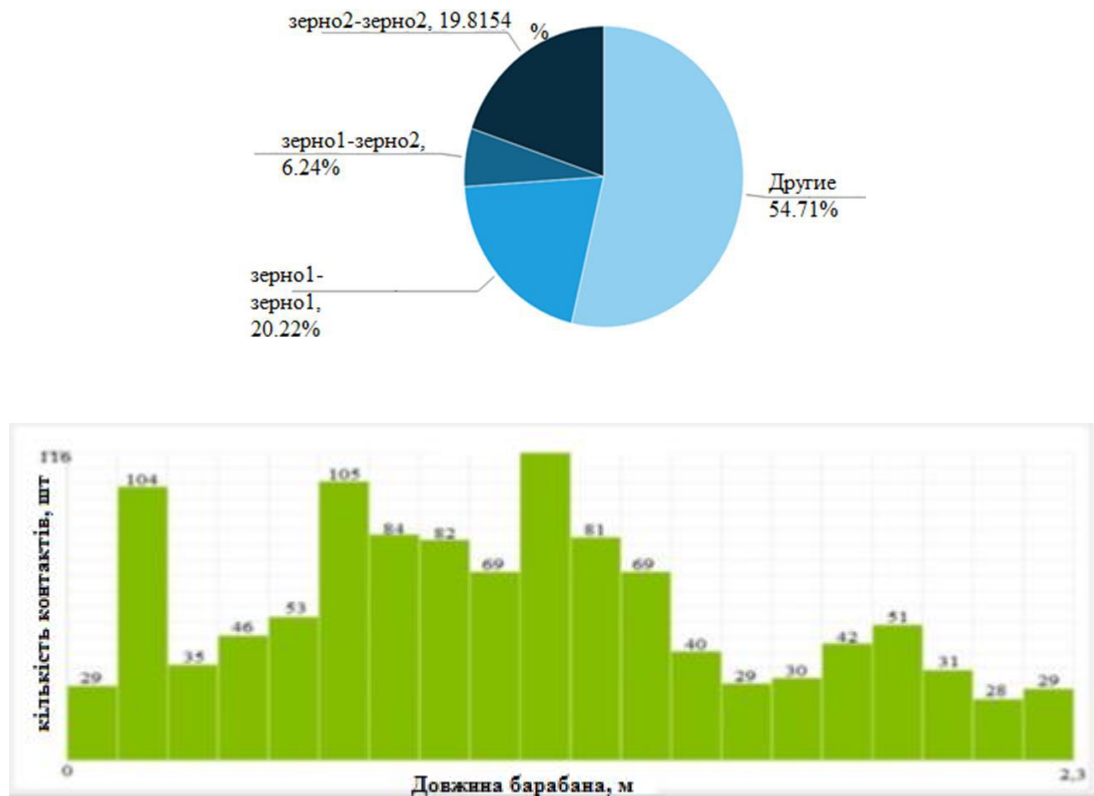


Рис. 3.10. Кількість контактів у протруювачі шнекового типу; а) кількість глобальних контактів у відсотках; б) інтенсивність глобальних контактів за довжиною шнека

Гістограма контактів показана рис. 3.10 показує на якій ділянці циліндра відбувається контактна взаємодія зернівок між собою. Так основні контакти зерновок між собою відбуваються на початку циліндра шнекового протруювача. Пік глобальних контактів посідає ділянці від 0,26 – 1,24 сек м і сягає максимального значення (рис. 3.10). Аналіз показує, що контакти відбуваються по всій довжині циліндра та закінчується на довжині 2,2 м.

Як впливає з отриманих результатів, від загальної кількості контактів зерновок між собою становить близько 45-50 %. Взаємодія зі шнеком та стінками циліндра – в межах 50-55%. Як показує практика, при цьому поверхня зернівки сильно пошкоджується про внутрішні стінки циліндра і шнек

протруювача. Зі збільшенням частоти обертання шнека, контакти зерна скорочуються, тертя стінки тільки збільшуються. Зі зниженням частоти обертання зменшується, але не зникає зовсім. Також слід зазначити як і збільшується час перемішування насіння, що позначається на продуктивності протруювача, так при збільшенні часу експерименту до 9 секунд обробляється тільки близько 4 кг насіння пшениці.

При переміщенні насіння в шнековому протруювачі поверхні зернівки сильно контактують про внутрішні стінки циліндра протруювача.

Траєкторію руху зернового шару показано рис.3.11. Виявлено що на початку обертання шнека відбувається активне формування хвильового шару насіння, де зернівки активно контактують і переміщуються по трьох осях координат перші 2-3 секунди на ділянці циліндра 0-0,8 метра. Після формування зернового шару процес переміщення зерновок припиняється. Проте, верхні шари переміщується лише між собою, тоді як нижні шари фактично перебувають у нерухомому стані і взаємно не контактують, тобто. взаємодія поверхонь зерновок відбувається лише у верхніх шарах зернового шару. Нижній та середній шари просто переміщаються вздовж внутрішніх стінок циліндра і контактна взаємодія поверхонь зерновок не відбувається в належному обсязі. Спостерігається зростання кількості контактів при русі зерновок відразу по трьох осях координат Z, X і Y. Схожі результати аналізу показують, як у дозованому, так і при потоковому перемішуванні насіння пшениці в протруювачі шнекового типу.

При порівнянні безперервної та порційної подачі спостерігаються лише незначні зміни траєкторії переміщення зернового шару та збільшення кількості контактів не більше ніж на 2%.

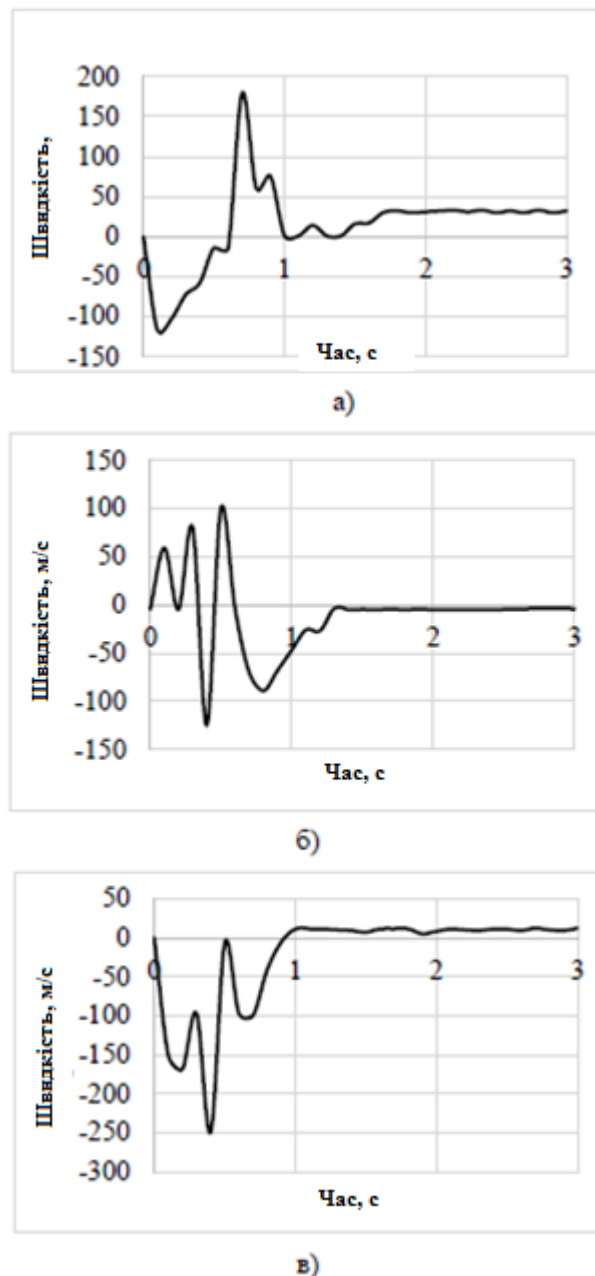


Рис. 3.11. Рух зернового шару пшениці у тривимірному просторі шнекового протруювача: а) по осі X; б) по осі Y; в) по осі Z

З проведених експериментів можна зробити такі висновки:

1. Робочий процес протруювача шнекового типу має високі показники «непотрібних» контактних взаємодій зерновок з іншими компонентами, що беруть участь у цьому процесі (шнек, циліндр), близько 50-55 %. Показують низьку ефективність перемішування та обробки насіння. Під впливом сил тертя виникають між зернівкою та компонентами виникає велика ймовірність нанесення травм зернівкам внаслідок цієї взаємодії.

2. Глобальна контактна взаємодія зерновок ($zerno1-zerno2$) в межах 10-14%, що характеризує взаємодію двокомпонентної системи, що впливає на якість перемішування. Є найнижчим серед аналізованих типів протруювачів. Показує, що робочий процес перемішування відбувається на низькому рівні, взаємодія $zerno1$ та $zerno2$ фактично відсутня.

3. Значна тривалість обробки насіння, як при потоковій обробці, так і порційної, внаслідок низької швидкості переміщення насіння за допомогою шнека вздовж циліндра. За час у 3 сек проведення експерименту зернівки досягли лише 0,96 м і тільки почали перемішування при довжині циліндра 2,5 м. В результаті низька продуктивність.

Загалом шнекові протруйники мають невеликі перспективи в сучасному агропромисловому виробництві для протруювання насіння через їх низьку продуктивність протруювання та травмування для виконання агровимог до насінневого матеріалу для зернових культур та малих показників глобального перемішування.

Основним робочим органом камерного протруювача є напівсфера поєднана з конусом (або циліндром) утворюючи камеру для протруювання і використовується той же принцип контактної взаємодії поверхні зерновок між собою (перемішування) при нанесенні на їх поверхню захисно-стимулюючого протруйника.

Для віртуального моделювання робочого процесу було застосовано спрощену схему протруювання насіння. Спрощена віртуальна модель протруювача камерного типу побудована у програмі «Компас 3D» діаметр напівсфери становить 660 мм, збережена у тривимірному форматі із розширенням stl. Отримана модель імпортована у програмне забезпечення EDEM 2017. Фізичні характеристики матеріалу напівсфери – steel. Імпортовано геометрію з програми «компас 3D»: півсфера – taz_v660 (1) та стінки камери – taz_v660 (2). Модель зернівки змодельована засобами EDEM DEM, ми вже використовували її при верифікації даних. Для аналізу перемішування та

взаємодії зерновок встановлено формування чергуються частинок *zerno1* і *zerno2* з однаковими розмірами. Маса 1 зернівки становила 0,00058 кг. Продуктивність встановлена на 12 тонн на годину.

Фрагмент проведення експерименту показано на рисунку 3.12.

У конструкції камерного протруювача відсутні додаткові компоненти, які перешкоджають вільному переміщенню шару насіння по внутрішній поверхні напівсфери, що позитивно відбивається на рівні травмування насіння.

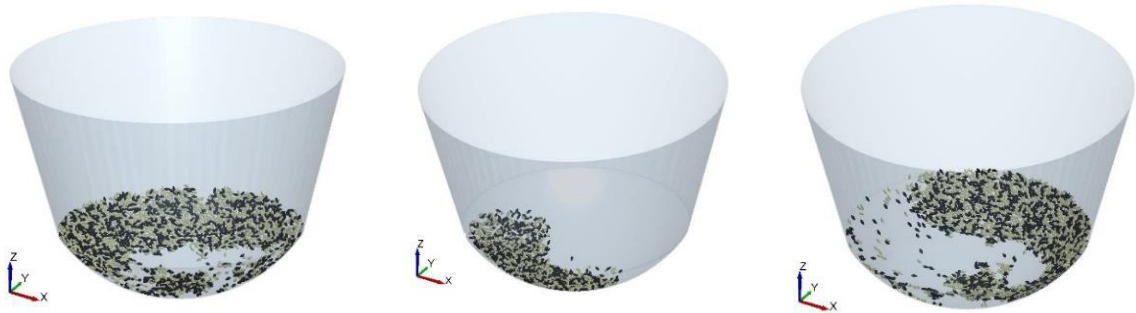


Рис. 3.12. Фрагменти руху шару зерна в протруювачі камерного типу

Зернівки спочатку обсипаються вниз півсфери і в міру обертання починають підніматися вгору по спіралеподібної траєкторії одночасно взаємодіючи між собою. Шар насіння вільно переміщується, фактично лише за рахунок власної ваги, обертання та сил тертя про внутрішню поверхню напівсфери.

Аналіз взаємодії зерновок між собою можна подати у вигляді кругової діаграми, де показано кількість контактів зерновок між собою, що беруть участь у процесі у відсотковому відношенні (рис. 3.12 а)).

Діаграма наочно показує, що кількість усіх контактів зерновок між собою майже сягає понад 60%.

У разі збільшення кількості зерновок траєкторія відрізняється. Кількість контактів при потоковій подачі насіння різко скорочується і наближається до значень 50% і нижче. Таке положення пояснюється зниженням амплітуди переміщення зерновок по осях координат, у міру збільшення кількості зерновок, так при 5000 зерновок загальна кількість контактів зерновок падає до 40%.

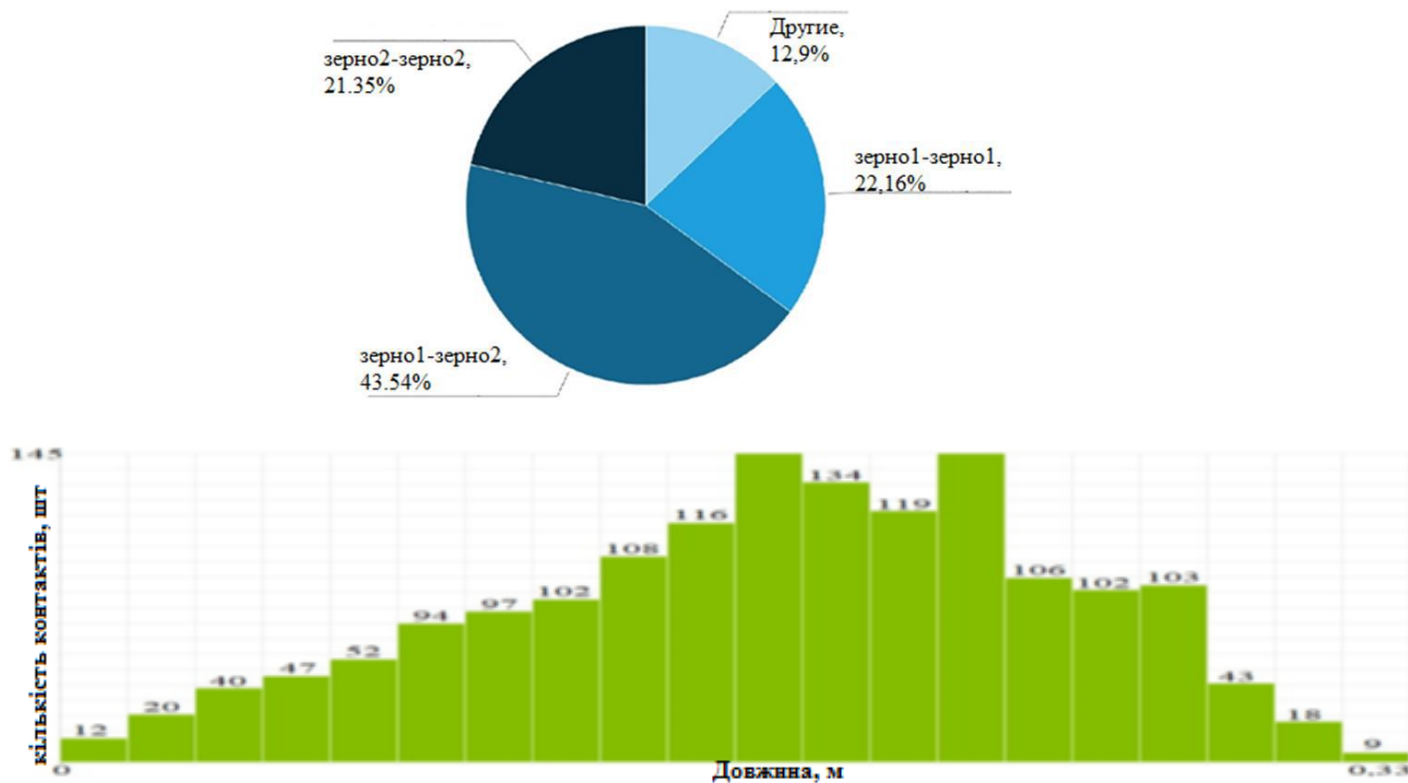
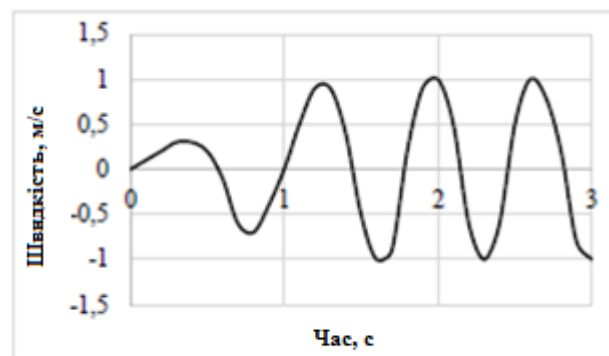


Рис. 3.13. Кількість контактів у протруювачі камерного типу: а) кількість глобальних контактів у відсотках; б) інтенсивність глобальних контактів по дистанції

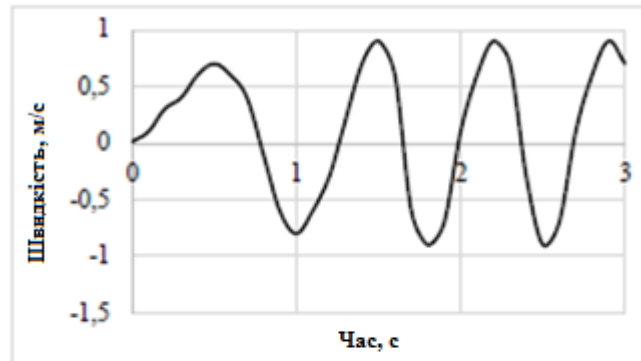
У камерному протруювачі середня кількість контактів за 3 сек. становило 6503 шт. Перший пік активності контактів посідає 0,46 сек., другий пік на 2,9 сек., за кількості контактів 10005 прим. Мінімальні значення контактів 0,15 сек. Піки глобального змішування збігаються з траєкторією руху зерновок по осі Z, тому найбільша інтенсивність взаємодії відбувається на початку та наприкінці експерименту.

При розгляді траєкторії переміщення насіння виявлено (рис. 3.14), що рух маси зернівок має синусоїдальний характер переміщення вздовж осі X та Y, залежно від часу. Графік відчутно показує, що зернівка стабільно переміщається вгору без ривків спостерігається по осі Z. У будь-якому випадку зернівка і шар насіння постійно здійснює плавне переміщення по осі X і Y системи координат в широкому діапазоні значень протягом усього робочого процесу протравлювача камери. Вид траєкторії переміщення шару насіння амплітудою по осях координат показує вплив її на кількість контактів і інтенсивність перемішування.

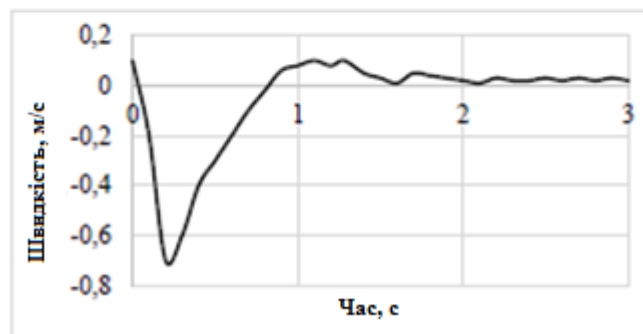
У свою чергу траєкторія залежить від конструкції протравлювача, можливо, цим фактом пояснюється мале переміщення шару насіння по осі Z . Спостерігається висока амплітуда переміщення по осі X , дещо падає значення по осі Y . Однак, по осі Z майже відсутнє переміщення шару насіння. При збільшенні кількості зерновок переміщення припиняється й інших напрямках. Тому в протруювачах камерного типу важливо дотримуватися точного дозування оброблюваного насіння.



а)



б)



в)

Рис. 3.14. Рух зернового шару пшениці у тривимірному просторі камерного протруювача: а) по осі X ; б) по осі Y ; в) по осі Z

З проведених експериментів можна зробити такі висновки:

1. У протруювачі камерного типу збільшується інтенсивність глобальної контактної взаємодії зерновок між собою до 32% по всій дистанції переміщення зерновок. Збільшення показників перемішування пояснюється високими показниками амплітуди переміщення зерновок за двома напрямками осей координат протягом усього часу експерименту. Піки контактів спостерігаються в момент руху зерновок по осі Z вниз на початку та в кінці експерименту

2. При потоковому поданні насіння інтенсивність перемішування різко скорочується (важлива дозована подача насіння, що значно ускладнює процес). Формування хвильового шару відбувається без пошарового розподілу насінневого шару. Пошарове розподіл зерновок спостерігається при порційній подачі насіння за їх достатньої кількості. Можливо, цим фактом пояснюється низька ефективність перемішування у міру збільшення кількості зерновок, оскільки верхні шари починають тиснути на нижні і зі збільшенням тиску переміщення зерновок припиняється.

3. Невисока продуктивність. Тривалість обробки насіння досягає 6-8 сек., При порційній обробці, через низьку швидкість переміщення вздовж внутрішньої поверхні півсфери.

Аналогічні віртуальні експерименти для барабанного протруювача з однорідною характеристикою внутрішньої поверхні.

Тривимірний образ віртуальної моделі протруювача барабанного типу побудована у програмі «Компас 3D» діаметр барабана становить 500 мм, збережена у тривимірному форматі з розширенням stl. Отримана модель імпортована у програмне середовище EDEM. Фізичні характеристики матеріалу барабана – steel. Імпортовано геометрію з програми «компас 3D»: барабан – steel (1). Для аналізу перемішування та взаємодії зерновок встановлено формування чергуються частинок zerno1 і zerno2 з однаковими розмірами. Маса 1 зернівки становила 0,00058 кг. Продуктивність встановлена на 12 тонн на годину.

Швидкість обертання циліндра стала, виходячи з необхідного кінематичного режиму встановлена 6 сек-1. Контактна модель застосована Герца-Міндліна зі злипанням для взаємодії як частинок з частинками, так і частинок з геометрією. Час проведення експерименту 3 секунди, при заданих параметрах.

Фрагмент взаємодії зерновок представлений рис. 3.15.

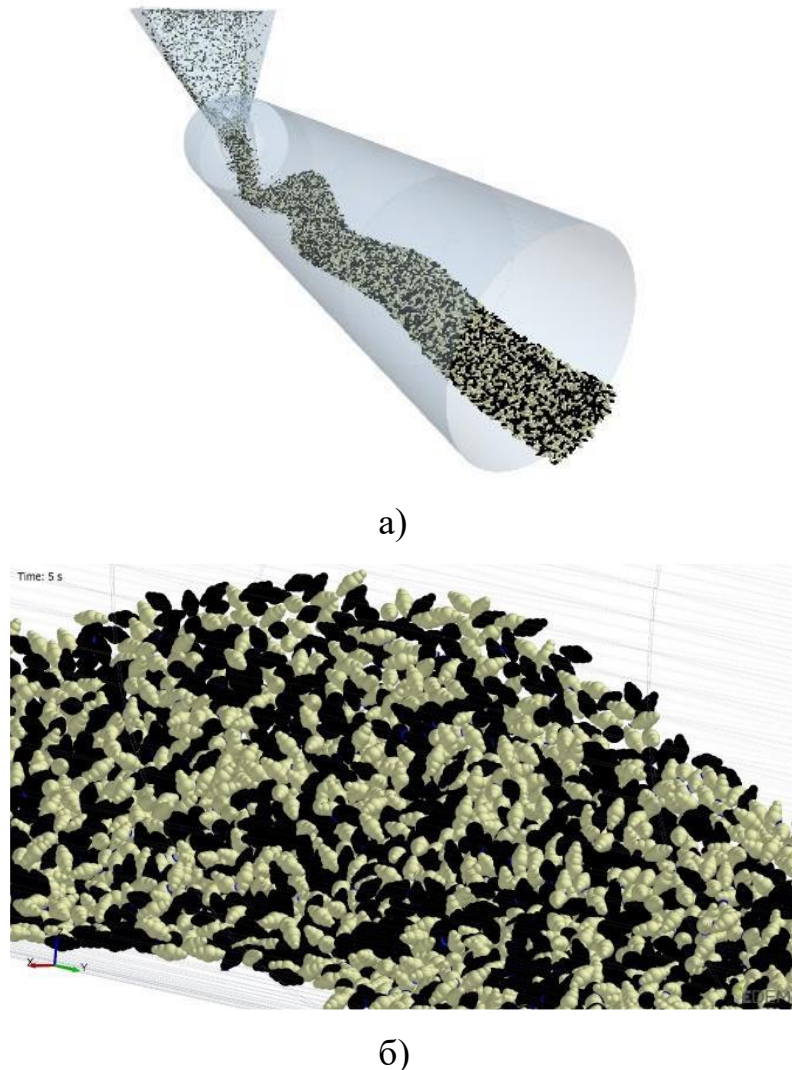


Рис. 3.15. Фрагмент віртуального експерименту руху зерновок пшениці в барабанному протруювачі з матеріалом внутрішньої поверхні з низьким коефіцієнтом тертя: а) загальний вигляд; б) збільшений конструкції барабанного протравлювача також відсутні додаткові компоненти, які перешкоджають вільному переміщенню шару насіння по внутрішній поверхні циліндра, що

позитивно відбивається на кількісному контакті з внутрішньою поверхнею барабана.

Шар насіння вільно переміщається, фактично лише за рахунок власної ваги, сил обертального руху та тертя.

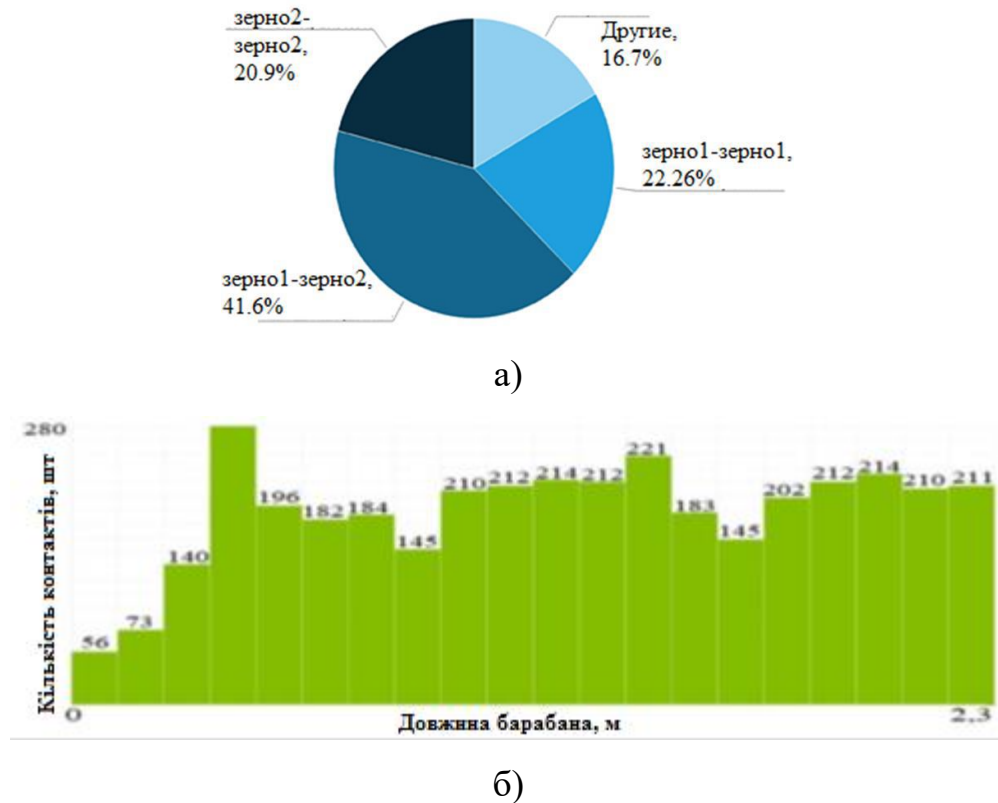


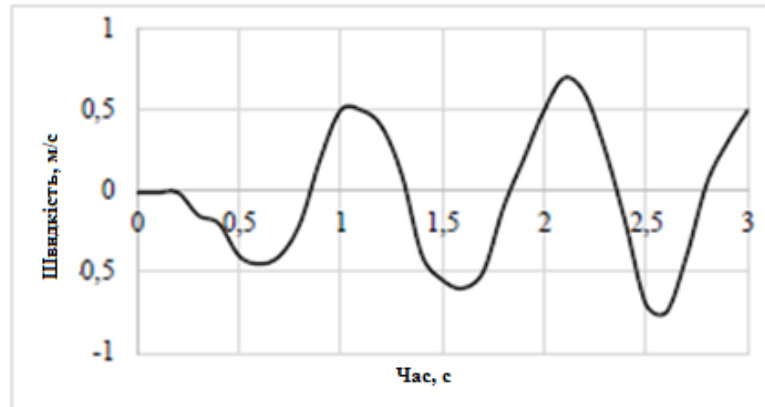
Рис. 3.16. Кількість контактів у барабанному протруювачі без кільцевих вставок: а) кількість глобальних контактів у відсотках; б) інтенсивність глобальних контактів за довжиною барабана

У барабанному протруювачі середня кількість контактів за 3 сек. становило 3702 шт. Перший пік активності контактів посідає 1,5 сек. з кількістю контактів 388 шт., Другий пік на 2,5 сек., При кількості контактів 527 шт. У відсотковому співвідношенні показано на рис. 3.16.

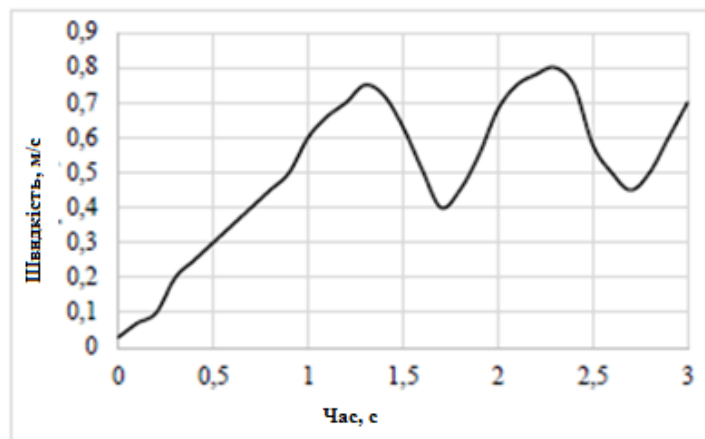
Як впливає з отриманих результатів експериментів барабанного протруювача, загальна кількість контактів зерновок між собою становить близько 80 - 85%. Взаємодія коїться з іншими компонентами системи трохи більше 20%, цим значно знижується кількість «непотрібних контактів». Контакт зерновок зерно1-зерно2 помітно збільшується і становить понад 40%. Також слід

зазначити, що і скорочується час перемішування насіння, що позначається на продуктивності барабанного протруювача. Збільшується інтенсивність контактів zerno1-zerno2.

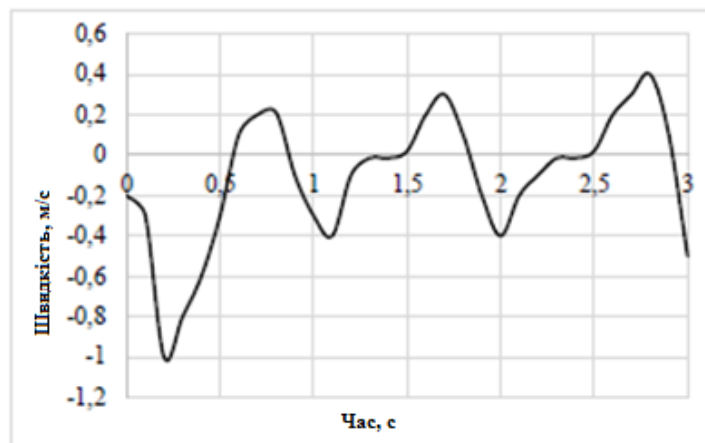
Спостерігається активне переміщення зерновок за трьома напрямками осі координат. Траєкторію руху зернового шару показано на рисунку 3.17.



а)



б)



в)

Рис. 3.17. Рух зернового шару пшениці у тривимірному просторі барабанного протруювача без вставок: а) по осі X; б) по осі Y; в) по осі Z

Середнє значення швидкості руху зерновок становило $-0,1$ м/сек. максимальне значення $0,429$ м/сек та мінімальне $-0,965$ м/сек.

Висновки по розділу

З проведених експериментів можна зробити такі висновки:

1. Глобальна контактна взаємодія зерновок ($zerno1-zerno2$) досягає 37%, що характеризує взаємодію двокomпонентної системи, що впливає на якість перемішування. Робочий процес протруювача барабанного типу має високі показники контактних взаємодій зерновок між собою.

2. Переміщення зернового шару по осях координат відбувається за трьома напрямками системи координат на всій довжині циліндра. Піки показані рисунку 3.16-в також збігаються з піками глобального контактного взаємодії зерновок. Тобто при русі зернівки вниз по осі Z збільшується кількість контактів $zerno1$ та $zerno2$.

3. Мінімальна контактна взаємодія насіння з іншими компонентами, що у робочому процесі (барабан) близько 30 %. Імовірність нанесення травм зернівкам внаслідок цієї взаємодії мінімальна.

4. Аналіз показав високі показники взаємодії насіння та кількість глобального змішування без втрати у продуктивності. Кількість контактів барабанному протравлювачі збігаються з моментом падіння по осі Z, тобто. вниз. З літератури відомо, що найбільше змішування спостерігається під час руху вниз, що визначає пошук рішення інтенсифікації підйому і спуску зерновок уздовж барабана, що можна здійснити установкою кільцевих вставок з різними коефіцієнтами тертя, як було доведено методами класичної механіки у другому розділі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розроблена конструкція барабанного протруювача, що складається з вставок, що чергуються, з різними коефіцієнтами тертя мають різні кінематичні характеристики взаємодії з оброблюваним насінням.

Проведено дослідження робочого процесу барабанного протруювача на основі залежностей класичної механіки, чисельного моделювання з використанням методів дискретних елементів у системі автоматизованого проектування та інженерного аналізу EDEM (DEM) Solution. Встановлено, що дані, отримані на основі віртуальних моделей насіннєвого матеріалу у вигляді зернівки пшениці та робочих процесів шнекового, камерного та барабанного протруювачів, мають високий ступінь відповідності з реальними дослідженнями.

Розроблено методику оцінки рівномірності покриття поверхні насіння захисно-стимулюючими препаратами на основі цифрової обробки зображення протруєного насіння у програму ImageJ оптичного аналізу. Встановлено лінійний взаємозв'язок дисперсії насиченості кольору, параметра оцінки рівномірності покриття та кількості глобальних контактів зерновок між собою. Найбільші показники рівномірності покриття досягаються при чергуванні кільцевих вставок шириною з коефіцієнтом тертя $\mu=0,3$ в діапазоні $l_1=0,25 - 0,30$ м, з великим коефіцієнтом $\mu=0,7$ у діапазоні $l_2=0,15 - 0,25$ м.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сергій К. Комплексне застосування протруйників – надійний захист озимих зернових. *Зерно*. 2016. №7 (124). С. 166-167.
2. Судденко В. В. Посівні якості насіння й врожайність пшениці м'якої ярої залежно від передпосівної обробки протруйниками та добривами. *Хранение и переработка зерна*. 2014. Вип. №12 (189). С. 25-27.
3. Горбань Р. Вдале протруювання – просте рішення розкриття потенціалу культури. *Агроном*. 2013. №1. С. 102-103.
4. Діордієв В. Т. Обробка насіння зернового матеріалу у хмарі зарядженого аерозолю. *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування»*. Київ: НУБіП, 2016 С. 23-25.
5. Новіков Г.В. Електротехнологічний комплекс передпосівної аерозольної обробки насіння зернових. *Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції пам'яті І.І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України»*. Мелітополь: ТДАТУ, 2015. С. 107.
6. Василенко П. М. Основы научных исследований. Механизация сельского хозяйства. Киев : Вища школа. 1985. 265 с.
7. Василенко М. В. Теорія коливань і стійкості руху. Київ : Вища школа. 2004. 525 с.
8. Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. Москва : Колос, 1967. 60 с.
9. Дерев'янка Д.А. Травмування та якість насіння на різних стадіях технологічних процесів. *Інженерія природокористування*. 2014, №1(1). С. 114-123.

10. Санін В. А. Итоги исследований по наземному ультрамалообъемному опрыскиванию. В кн. аэрозоли в защите растений / ВАСХНИЛ. Москва : Колос, 1982. - С. 3.

11. Оптимизация применения инсектицидов / А. А. Ковальский, К. П. Куценогий, В. М. Сахаров, В. И. Макаров // в кн. аэрозоли в защите растений / ВАСХНИЛ. - М.: Колос, 1982. - С. 96.

12. Тимошенко С. П. Протруювання насіння – стан, проблеми і досягнення
Механізація та електрифікація сільського господарства. 2010. Вип. 94. - С. 196-206. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mesg_2010_94_23

13. Смелік В.А. Передпосівна обробка насіння нанесенням штучних оболонки. 2011. 272 с.

14. Мельничук С. Д. Проблеми визначення вмісту залишків пестицидів у зерновій продукції та шляхи їх вирішення. Журнал Хроматографічного товариства. 2009. т. IX. № 1, 2. С. 13-20.

15. Боровський В.М. **Пижик Я.С.** Класифікація та основні напрямки розвитку протруйників насіння сільськогосподарських культур. *Збірник тез ІХ-ї всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. м. Житомир, 5 квітня 2023 року. Житомир : ЖАТФК. С. 237-237.

16. Боровський В.М. **Пижик Я.С.** Розробка віртуальної моделі робочого процесу протруювача в середовищі EDEM DEM. *Наукові читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики*. 19 квітня 2023 р. Житомир : Поліський національний університет, 2023. Т. 3. С. 106-109.