УДК 636.361
№ держреєстрації 0116U002721
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
(ТДАТУ)
72312, Запорізька обл. м Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18
тел. (0619) 42-05-70

**НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
МЕХАНІЗАЦІЇ ЗЕМЛЕРОБСТВА ПІВДНЯ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО АГРОТЕХНОЛОГІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ**

**Відділ "Ресурсозбереження в технологічних процесах АПК"
Науково-дослідна лабораторія " Ресурсовикористання в тваринництві"**

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Проректор з НР д.т.н., проф.
_____ В.Т. Надикто
"_____" _____ 2017 р.

ЗВІТ
ПРО РОБОТУ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ
„ РЕСУРСОВИКОРИСТАННЯ В ТВАРИННИЦТВІ"
(проміжний)

Підпрограма: Розробити технічні засоби для приготування кормів та компостної суміші

Завідувач відділу:
д.т.н., проф. В.А. Дідур

Завідувач лабораторією:
д.т.н., доц. Д.О. Мілько

ТДАТУ, 2017
Результати роботи розглянуто НТР НДІ,
протокол від

2

СПИСОК АВТОРІВ

Відповідальний виконавець – завідувач лабораторії, докт. техн. наук., доцент	Д.О. Мілько (реферат, вступ, розділи 1, 2, 3, висновки)
Канд. техн. наук., професор	О.Г. Скляр (участь у 3.1, 3.2)
Канд. техн. наук., доцент	Б.В. Болтянський (участь у 3.1, 3.2)
Канд. техн. наук., доцент	Р.В. Скляр (участь у 3.1, 3.2)
Канд. техн. наук., доцент	Н.І. Болтянська (участь у 3.1, 3.2)
Старший викладач	С.В. Дереза (участь у 3.1, 3.2)
Асистент	Д.В. Дем'яненко (3.4)
Аспірант	Р.М. Рябов (участь у 3.2)
Інженер	С.М. Григоренко (участь у 3.1, 3.2)
Старший лаборант	О.О. Солодка (участь у 3.1, 3.2)
Технік	А.С. Комар (участь у 3.1, 3.2)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 34 с., 14 рис., 39 посилань.

Об’єкти досліджень:

- Потокова сушарка зерновмісних матеріалів.

Мета роботи: підвищення продуктивності праці, зменшення енергетичних витрат та підвищення якості виконання технологічних процесів утилізації пташиного посліду з отриманням якісного кормового, паливного або добривного матеріалу.

Методи досліджень.

Попередні дослідження проводились шляхом аналізу існуючих конструкцій та технологій виконання запропонованих технологічних процесів. Обробка результатів теоретичних досліджень планується виконуватись із використанням персонального комп’ютера та програмних комплексів MathCad та Statistica.

В результаті проведених досліджень:

- Розроблено технологічну схему сушарки, яка дозволяє зі зміною геометричних параметрів барабану та кінематичних параметрів кількості та форми лопатей забезпечити покращені показники процесу сушіння пташиного посліду для використання його в енергетичних, кормових або добривних цілях;
- проведено аналіз існуючих засобів механізації процесу сушіння сипких матеріалів та розроблено схему потокової сушарки пташиного посліду з урахуванням його фізико-механічних властивостей.

СУШАРКА БАРАБАННА, ПТАШИНИЙ ПОСЛІД, ГРАНУЛЬОВАНИЙ МАТЕРІАЛ, ГРАНУЛИ, ПОТОКОВА СУШАРКА, ЯКІСТЬ СУШКИ.

ЗМІСТ

ВСТУП……..……..5

1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ……6

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ…….…6

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ…….….7

3.1. Сучасний стан теплової обробки зерновмісних сумішей……...7

3.2 Аналіз конструкцій технічних засобів для сушіння сипких матеріалів…13

3.3. Розроблення технологічної схеми потокової лінії сушіння……17

3.4. Теоретичне дослідження руху сипкого матеріалу по нахиленій поверхні……19

ВИСНОВКИ……..30

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……31

ВСТУП

У нових умовах формування економічних відносин на селі та розвитку невеликих фермерських господарств першочергове значення має розробка та впровадження у виробництво енергоощадних малогабаритних засобів механізації, які мають високу експлуатаційну надійність.

Актуальність теми обумовлена тим, що для інтенсифікації галузі тваринництва, зокрема, забезпечення якості та зниження втрат основного продукту комплексну механізацію приготування кормових раціонів слід виконувати на основі застосування передових досліджень в галузі зоотехнії.

Існуючі засоби механізації, які суттєво підвищують продуктивність процесу створення повноцінних кормів та знижують його трудомісткість, мають велику масу, та значну питому енергоємність. Використання цих змішувачів на невеликих фермах призводить до необґрунтованої витрати енергії або паливно-мастильних матеріалів, що підвищує собівартість кормових матеріалів. Це також стосується ситуації з переробкою відходів тваринницьких підприємств. Велика кількість пташиного посліду, яка, до речі, має високу вихідну поживність, не використовується ані на енергетичні властивості ані на кормові. Лише деяка частка, після витримки, може потрапляти до полів у якості добрив.

Для покращення ситуації слід застосовувати потокові технології для попередньої обробки пташиного посліду, які б забезпечували його подальше застосування.

Застосування потокової сушарки з лопатевим барабаном є провідною ідеєю даної роботи. Для створення подібної сушарки в основу покладено використання ідеї створення вихрового потоку теплого повітря в середині барабану, що забезпечить збільшенню часу контактування теплоносія із матеріалом, що піддається сушінню.

В основу досягнення поставленої мети покладено перевірку сформульованої нами **робочої гіпотези,** суть якої полягає у використанні різної геометрії барабану сушарки та застосуванні різної форми лопатей, що дозволяє контролювати фізико-механічні показники матеріалу, який підлягає сушінню.

1 ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Провести аналіз існуючих засобів механізації сушіння сипких матеріалів та використання його фізико-механічних властивостей для створення схеми потокової сушарки з можливістю зміни фізико-механічних показників відходів птахівництва на виході.

1.2. Розробити схему потокової сушарки з урахуванням впливу конструктивно-режимних показників на фізико-механічні показники процесу сушіння відходів птахівництва.

1.3. Провести теоретичне дослідження руху сипкого матеріалу по нахиленій поверхні.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. На основі аналізу енергозберігаючих агрегатів та пріоритетних напрямків розвитку пристроїв для сушіння запропонувати схему потокової сушарки.

2.2. На основі запропонованої схеми потокової сушарки представити варіанти виконання барабану для потокової сушарки з урахуванням фізико-механічних властивостей пташиного посліду.

2.3 Згідно запропонованої схеми потокової сушарки з використанням методів теоретичної механіки представити теоретичне дослідження руху сипкого матеріалу по нахиленій поверхні.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Сучасний стан теплової обробки зерновмісних сумішей

Зазвичай до раціону птахів входить близько 75% зернових. Оскільки близько 30% поживних речовин встигають адсорбуватися кишківником впродовж процесу травлення, послід буде містити приблизно такий самий відсоток зернових, тільки з меншим відсотком поживності. Тому ми вважаємо, що способи сушіння зернових культур можна, із деяким переналагодженням застосовувати і для сушіння пташиного посліду.

Сушіння зернових продуктів, як технологічний прийом, відоме з давніх давен як захід, що запобігає псуванню зерна, яке не знаходило тимчасового збуту і його необхідно було привести до стійкого стану для довгострокового зберігання [1, 2, 3].

Сучасна технологія зерносушіння базується, в основному, на методі теплового сушіння, коли волога із зерна видаляється на його поверхню, а з поверхні випаровується в навколишнє середовище. Тобто в основі способу лежить принцип використання теплоти для переведення води з рідкого стану в газоподібний, що пов’язано із значними витратами теплоти.

Аналіз способів теплового сушіння зернових продуктів подано в узагальнюючих роботах багатьох авторів: А.С. Гінзбурга [4, 5], В.І. Жидко [6, 7], А.П. Гержоя і В.П. Самочетова [8], С.Д. Птицина [9], М.І. Маліна [10], В.І. Атаназевича [11], А.Е. Баума [12], Л.Д. Комишніка [13], Г.М. Станкевича [14], Ю.О. Чурсинова [15] та інших.

У різні роки проходили випробування і виробничу експлуатацію такі методи теплового сушіння зерна:

- сушіння випромінюванням (в тому числі і штучними ІЧ променями);

- нагрівання зерна тепловими променями від нагрітих до різної температури поверхонь, що не мають безпосереднього контакту із зерном [16]; до цього способу відноситься і сонячне сушіння;
- кондуктивний (або контактний) - передача теплової енергії зерну, яке здійснюється від нагрітої поверхні, на якій воно знаходиться [6];
- електричний – токами високої (ВЧ) або надвисокої (СВЧ) частоти [8];
- сублімаційний (молекулярне сушіння) – в умовах глибокого вакууму, при інфрачервоному (ІЧ) або СВЧ енергопідведенні [17];
- конвективний - теплота (енергія) для нагріву зерна передається від нагрітого сушильного агенту [4, 5].

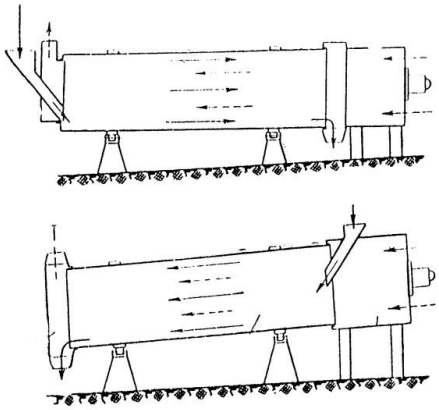
Із зазначених способів сушіння зерна і насіння сільськогосподарських культур найбільш широке застосування знайшов конвективний спосіб, як такий, що найбільш задовольняє технологічні і техніко-економічні вимоги виробництва і найбільш просто реалізується у промислових зерносушарках (рис. 3.1) [6, 12].

У світовій практиці застосовують нові методи сушіння зерна: зневодненим повітрям, адсорбційно-конвективним способом, ВЧ- та ІЧ-випромінюванням, використанням вакууму та ін. [18].

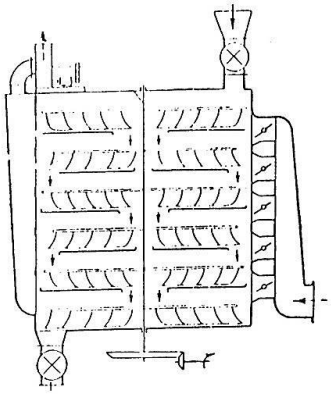
Серед альтернативних нетрадиційних методів зерновмісної суміші можна виділити застосування нагрітих адсорбентів [19]. У Канаді з успіхом пройшли випробування адсорбційного методу сушіння зерна із застосуванням як теплоносія нагрітого піску, солі та бентонину (вид глини для відбілювання). Оптимальний вміст суміші: 1 т піску або солі на 3 т зерна, або 1 т бентонита на 1т зерна. Продуктивність обладнання для сушіння становить 5 т/год., але розробляються і більш потужні. В порівнянні з тепловим сушінням нагрітим повітрям в адсорбційній сушарці зерно висушується в 5-10 разів швидше, а енерговитрати, при цьому на 20% нижчі. В Індії для зниження вологості рису-сирця запропоновано сушіння зерна

(вологістю до 21%) в суміші з гарячим піском при температурі 95...155^{0}С протягом 15 хвилин, з наступним витримуванням 1,5-2 год. У металевому контейнері без охолодження.

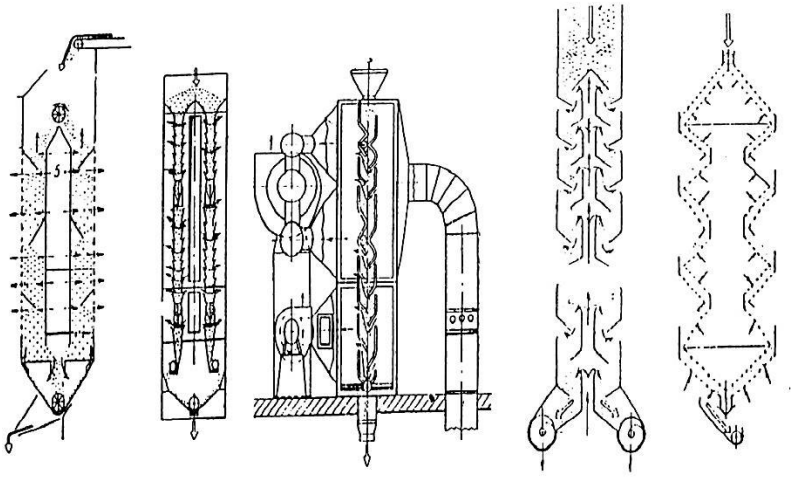
У Росії [20, 21] пройшли випробування адсорбційного способу сушіння зерна, де адсорбентом виступав алюмінієсилікагель.



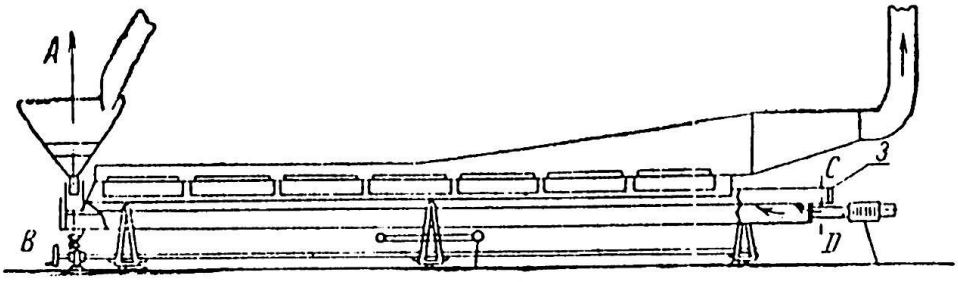
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.1 – Типи конвективних зерносушарок: а) барабанна; б) тарілчаста; в) шахтна; г) лоткова

У нашій країні і за кордоном для конвективного сушіння зерна широкого застосування набули як низькотемпературне сушіння [22, 23], в тому числі і активне вентилювання [22], так і високотемпературне сушіння [1] нагрітим повітрям або сумішшю продуктів згоряння і повітря [32].

При високотемпературному сушінні якість зерна, що оброблюється сушильним агентом, залежить від його температури, питомих витрат, експозиції теплового впливу, швидкості руху відносно зернин та інших факторів, які називають режимами сушіння.

При конвективному підведенні теплоти сушіння зерна проводять у нерухомому шарі (камерні зерносушарки, бункерна установка, напольні, конвейєрні), малорухомому шарі (шахтні зерносушарки, колонкові), падаючому шарі (рециркуляційні зерносушарки), у зрідженому шарі (сушарки “киплячого” і “віброкиплячого” шару) і у режимі пневмотранспорту (труби-сушарки). Знаходить застосування і перспективний комбінований спосіб сушіння [6], який поєднує конвективний і контактний способи підведення енергії: обробка зерна агентом сушки у щільному рухомому і падаючому шарах. Цей спосіб застосовують в зерносушарках “Цілинна” і РД-2х25-70.

Сушіння у щільному нерухомому шарі набуло широкого розповсюдження при використанні бункерів активного вентилювання для сушіння зерна і насіння атмосферним або нагрітим на 5...10^{0}С повітрям [1, 22].

Головним недоліком сушіння зерна в бункерах активного вентилювання або бункерних установках з плоским днищем атмосферним або нагрітим в електрокалорифері повітрі (на 5…10^{0}С) є значна експозиція сушіння (час доведення вологості зерна до кондиційного значення 15%). Так, наприклад, [23, 24] при вологості зерна 22% і відносній вологості повітря 55-65% на сушіння в бункері К-878 (Німеччина) витрачається біля 100 годин.

У зв’язку з цим заслуговує на увагу вентилювання зерна повітрям, нагрітим до 35...40^{0}С (в тепловентиляційних агрегатах). У бункерах прискореного сушіння вологість зерна знижується від 20 до 14% за 23...25 годин, тобто в 7 разів швидше ніж за звичайних умов [22, 25].

Але основним недоліком сушіння в нерухомому шарі є нерівномірність нагрівання, що призводить до перевитрат енергії. Сушіння зерна в малорухомому гравітаційному щільному шарі отримало найбільше розповсюдження в шахтних зерносушарках з коробами для підведення та відведення повітря, встановленими у шаховому порядку або рядами.

При продуванні агентом сушіння зерна в шарі (200...250 мм) утворюються зони активного вентилювання зерна (ці зони розміщені біля коробів, що підводять сушильний агент, який діє на них з максимальною температурою). У зоні затухаючого впливу [1, 31], що розміщена біля коробів, які відводять сушильний агент, температура є мінімальною. Негативний вплив цих зон згладжується завдяки розташуванню коробів у шаховому порядку. Після сушіння в сушильній шахті зерно охолоджується в охолоджувальній шахті або у виносному апараті [11, 26]. Основним недоліком такого способу сушіння є обмеження витрат сушильного агенту, що обумовлено його швидкістю у коробах, що відводять. Перевищення швидкості сушильного агенту над швидкістю витання в цій зоні призводить до виносу зерна [27, 18] з шахти.

Комбінований спосіб сушіння складається з двох операцій: конвективне підведення теплоти в малорухомому щільному шарі і падаючому шарі та контактне при забезпеченні рециркуляції між вологим холодним зерном і нагрітим сухим. У падаючому шарі реалізується режим протитечійного сушіння при температурі 200...350°С. Але незначне видалення вологи при сушінні в падаючому шарі не дозволяє використовувати цей спосіб як самостійний при створенні сушильних агрегатів [2].

Для забезпечення більшого вологонапруження процесу сушіння застосовують комбінований спосіб сушіння, конвективно-сорбційний [20] з використанням як сорбента сухого зерна, що циркулює разом із сирим зерном в сушарці за замкненим циклом (контуром). Теплота при цьому підводиться до зерна конвективним шляхом але в подальшому проходить її перерозподіл контактним способом при взаємодії нагрітого рециркуляційного і холодного зерна.

Процес сушіння зерна в рециркуляційних зерносушарках складається з циклів, в яких застосовують такі операції: короткочасне нагрівання з частковим поверхневим підсушуванням, контактний тепло-і вологообмін між сухим і рециркулюючим зерном і часткове охолодження зерна [28]. Усі цикли повторюються багаторазово в залежності від початкової і кінцевої вологості зерна. Чергування циклів нагрівання, відлежування, охолодження запобігає перегріванню і погіршенню якості зерна. Але багаторазове охолодження зерна призводить до зниження швидкості сушіння і збільшення витрат енергії.

Найбільш ефективний варіант проведення рециркуляційного сушіння передбачає нагрівання вологого зерна контактним способом до крайової температури, тепловологообмін регулюється частковим охолодженням зерна, додаткове нагрівання здійснюється при температурі (140...200^{0}С). Ізотермічний режим сушіння, що реалізується при цьому варіанті, забезпечує максимальну продуктивність при високих економічних показниках.

При ізотермічному режимі проводять нагрівання зерна до крайової температури вже на першій стадії сушіння, а на наступних стадіях підтримують температуру зерна на постійному рівні, що забезпечує максимальну швидкість видалення вологи [6, 7]. Такий спосіб отримав назву рециркуляційно-ізотермічного.

3.2 Аналіз конструкцій технічних засобів для сушіння сипких матеріалів

Технічні засоби для сушіння сипких матеріалів набули дуже широкого розповсюдження, що пов’язано з підвищенням якості зберігання продукції. Зниження вологості затримує розвиток пліснявих бактерій та клітинне дихання (стосується зернових культур).

При погодних умовах, які не дозволяють проводити сушіння зернових маетріалів на відкритому повітрі застосовують універсальні зерносушарки шахтного типу СЗШ-8, СЗШ-16А, СЗШ-50А, ДСП-10, 20, 25, 35, ЖСП-30 (рис. 3.2), рідкіше застосовують пересувні сушарки СЗПБ-2,4, СЗПБ-8. Для сушіння зернових також можуть бути застосовані установки активного вентилювання, такі як вентильовані бункери БВ-12,5, БО-25, або їх секції ОБВ-100 [29, 30, 31, 32]

а)

б)

Рисунок 3.2 – Зерносушарки тунельного типу: а) СЗШ-8; б) СЗШ16А

Значного розповсюдження останніми роками набувають сушарки закордонного виробництва, такі як Farm Fans, Deluxe (рис. 3.3), Master drier Pedrotty, GSI (рис. 3.4), Sukup (рис. 3.5) та ін..

а) б)

Рисунок 3.3 – Зерносушарки: а) Farm Fans; б) Deluxe

Однак найбільшого розповсюдження у сільськогосподарському виробництві набули шахтні сушарки безперервної дії.

а) б)

Рисунок 3.4 – Зерносушарки: а) Master drier Pedrotty; б) GSI

Рисунок 3.5 – Зерносушарка «Sukup»

Зазвичай їх сушильна камера виконана у вигляді високої вежі. В процесі роботи, зерновий матеріал рухається зверху до низу і охоплюється сушильним агентом (наприклад гарячим повітрям). Швидкість руху матеріалу може варіюватися завдяки випускному пристрою внизу шахти. Конструктивно сушарки можуть бути виконані або періодичної дії або безперервної [33, 34].

На сьогоднішній день подібні сушарки мають низку переваг, які і дозволяють широко застосовувати їх у сільськогосподарському виробництві. Однією з переваг є те, що шар зерна у шахті трохи розпушений і зернини мають змогу змінювати свою траєкторію пересування, а це в свою чергу дозволяє покращити взаємодію із сушильним агентом та прискорити зниження вологості зернових культур. Конструкція підвідних та відвідних коробів дозволяє рівномірно розподіляти загальний об’єм теплоносія в середині сушарки з найменшим опором його проходження.

Також слід вказати і про недоліки шахтних сушарок. Найважливішим слід відмітити обмежене відведення вологи за один прохід зерна через шахту

– він складає, по різних даних від 4 до 6%. Саме це примушує проводити обробку зернових культур в декілька прийомів, що погано впливає на вихідну якість зернової сировини.

Гарних результатів отримують при застосуванні вентильованих бункерів (рис. 3.6).

Рисунок 3.6 – Бункер активного вентилювання БВ - 25

Перевагами застосування таких бункерів є повна механізація завантаження і вивантаження, що забезпечує високу економічну ефективність. Однак до недоліків бункерів слід віднести збільшений відсоток руйнування зернової сировини впродовж завантаження та вивантаження, що обмежує сферу його застосування.

3.3 Розроблення технологічної схеми потокової лінії сушіння

Враховуючи потреби, на які планується використання висушеного матеріалу, слід вказати на розбіжності в технологіях для його подальшого застосування, а саме на паливні, кормові або добривні цілі. У разі використання сировини для обігріву, тобто для спалювання у твердопаливних котлах, технологічна схема лінії сушіння буде виглядати наступним чином (рис. 3.7).

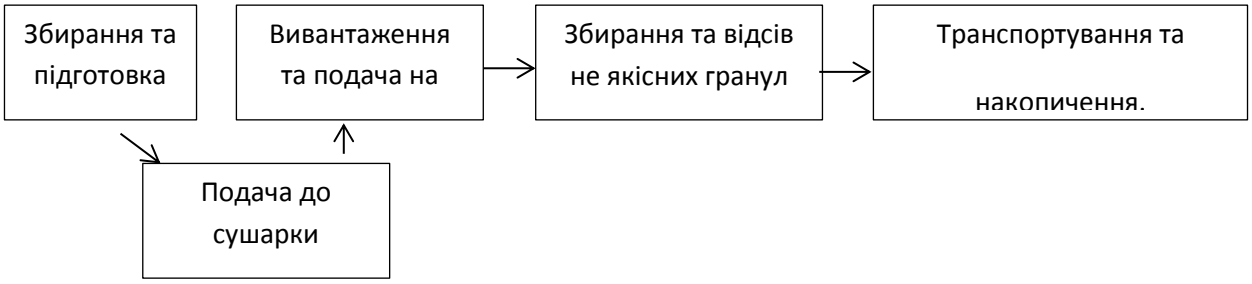


Рисунок 3.7 Технологічна схема процесу виробництва паливних гранул

На представленій схемі відсутня операція бактеріологічного знезараження, враховуючи той факт, що вихідні гранулі при згорянні знешкодять патогенну мікрофлору.

На відміну від попередньої схеми, спрощена технологія виробництва кормової сировини буде виглядати наступним чином (рис. 3.8).

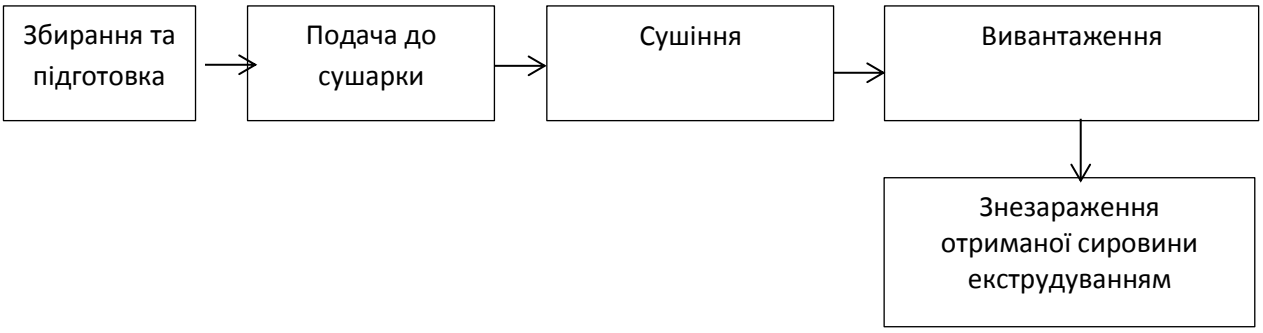


Рисунок 3.8 Технологічна схема процесу виробництва кормової сировини

Представлена на рис. 3.8 технологічна схема є достатньо умовною, оскільки знешкодження може відбуватися як в процесі збирання та

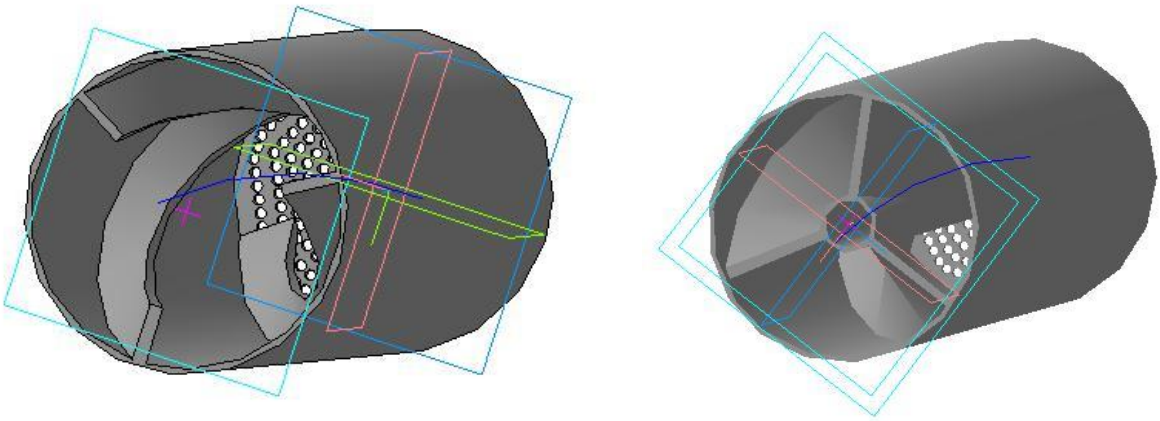
підготовки сировини, так і безпосередньо в процесі екструдування, при певних параметрах. Оскільки тертя сировини всередині екструдера можна використати як джерело тепла для знешкодження патогенної мікрофлори.

Для використання пташиного посліду як добрива можна застосовувати декілька варіантів в залежності від культури під яку вноситься послід та способу удобрення. Наприклад для підкормки рослин достатньо вносити свіжий послід розведений у концентрації 1:10 із водою та витриманий впродовж трьох діб у теплому місті. Припустимо внесення безпосередньо під кущі зелених рослин але із концентрацією 1:15. Для внесення пташиного посліду як добрива бажано використовувати гранулят, який краще зберігається не має неприємного запаху та повільніше розщеплюється.

Для покращення процесу сушіння нами було запропоновано конструктивне доопрацювання барабанної сушарки (рис. 3.9), встановленням додаткових внутрішніх лопатей, що дозволяють збільшити час контактування теплоносія із зерновмісним продуктом, який підлягає зневодненню.

Рисунок 3.9 – Дослідний зразок барабанної сушарки: 1 – вентилятор відцентровий; 2 – рама; 3 – барабан; 4 – дифузор; 5 – нагрівальний елемент.

Можливі виконання барабану сушарки з внутрішніми лопатями представлено на рис. 3.10.



а) б)

Рисунок 3.10 – Варіанти виконання барабану сушарки: а) без основний; б) на осевій основі

За основну наукову гіпотезу слід вважати використанні різної геометрії барабану сушарки та застосуванні різної форми лопатей, що дозволяє підвищити термін контакту теплоносія із зерновмісною сумішшю та контролювати її фізико-механічні показники.

3.4 Теоретичне дослідження руху сипкого матеріалу по нахиленій поверхні

Проблема створення технічних засобів для сушіння сипкого матеріалу, що ефективно вписується в технологічні лінії виробництва комбікормів, полягає у відносно високій енергоємності процесу і відсутності якісного одношарового розподілу сипкого матеріалу по поверхні впродовж термічної обробки. Тому дослідження, спрямовані на зниження енергоємності процесу за рахунок підвищення якості одношарового розподілу сипкого матеріалу з одночасним його перевертанням, є актуальним.

Створення математичних моделей процесів формування та одношарового переміщення зернового матеріалу по похилій круговій поверхні під дією власної ваги є досить перспективним дослідженням для

підвищення якості здійснення процесу сушіння і актуальним − для зниження його енергоємності.

Для моделювання поведінки твердих тіл, що складають сипкий матеріал, доцільно використовувати метод дискретних елементів (МДЕ) [35], заснований на додатку законів Ньютона і контактної механіки, висока ефективність якого обумовлена його універсальністю і практично необмеженими можливостями діагностики модельованих явищ [36].

При моделюванні процесу переміщення часток корму по похилій круговій поверхні приймаємо наступні допущення:

- зерновий матеріал являє собою сукупність з N відособлених пружних частинок сферичної форми радіуса R_i;

- переміщення всієї маси частинок здійснюється при стохастичному взаємному переміщенні частинок зі збільшенням їх кількості в наступних елементарних шарах на шість одиниць кормового матеріалу середнього розміру;

- одна частинка переміщується по поверхні при одночасному переміщенні щодо чотирьох розташованих в зіткненні часток;

- за елементарний шар приймаємо шар матеріалу шириною рівною середньому розміру частинок сипучого матеріалу;

- тиск маси матеріалу, розташованого вище елементарного шару, здійснюється між частинками, що містяться в зоні взаємного перетину частинок сусідніх елементарних шарів.

Якість розподілу часток на поверхні залежить як від форми цієї поверхні, її кінематичних параметрів, так і фізико-механічних властивостей зернового матеріалу, що оброблюється.

Форма кругової похилої поверхні описується системою рівнянь, де, послідовно, починаючи з α_o кут нахилу поверхні, зменшується на $\Delta\alpha_{hi}$ з кроком h_i

$$\begin{cases} x_{h_i} = 0,5d + \sum_{i=1}^{h} \left\{ d_{h_i} \cos\left[\alpha_o - \sum_{i=1}^{h_i} \Delta\alpha \left(h_i - 1 \right) \right] \right\} \\ y_{h_i} = \sqrt{R_{h_i}^2 - x_{h\,i}^2} \\ z_{h_i} = 0,5d + \sum_{i=1}^{h} \left\{ d_{h_i} \sin\left[\alpha_o - \sum_{i=1}^{h_i} \Delta\alpha \left(h_i - 1 \right) \right] \right\} \end{cases} . \qquad (3.1)$$

Форма поверхні визначиться виходячи із залежності швидкості переміщення зернового матеріалу по похилій поверхні від кута нахилу цієї поверхні на кожному кроці h_i.

Рух столу описується рівняннями гармонійних коливань (y=Asin(ωt+ +φo)), де амплітуда A по осі x становить $R_{hi}(1-\cos\varphi)$, а по осі y − $R_{hi}\sin\varphi$, тоді рух столу описується системою рівнянь

$$\begin{cases} x_n(t) = R_{hi}(1-\cos\phi)\cos(\omega t + \phi_0) \\ y_n(t) = R_{hi}\sin\phi\sin(\omega t + \phi_0) \end{cases}, \qquad (3.2)$$

де ω − кругова частота коливань, ω=2π/T (T − період коливань);

$\omega t + \varphi_0$ − фаза коливань;

φ_0 − початкова фаза в момент часу t = 0.

Задаючись необхідним прискоренням площини столу, можна знайти амплітуду і частоту коливань кругової похилої поверхні, диференціюючи $y_n(t)$

$$v_n(t) = y'(t) = -A\omega\sin(\omega t + \phi_0). \qquad (3.3)$$

На частку зернового матеріалу, що знаходиться на круговій поверхні, та що здійснює кругові горизонтальні коливання, крім квазіпружних сил і сил тертя між частинками, діє сила F_t тертя частинок зернового матеріалу по поверхні столу, яка є зовнішньою силою, що змушує частинки переміщуватися з перекочуванням і змінюється згідно виразу

$$F_t = F_o \cos \omega t. \qquad (3.4)$$

де F_0 − сила тертя при куті відхилення φ_o та швидкості переміщення поверхні, що дорівнює $v_{n\phi_o}(t) = -A\omega_t \sin\phi_0$;

ω_t – кругова частота коливань.

Разом з тим відомо, що при невеликих амплітудах і частотах коливань сила тертя обернено пропорційна швидкості руху $F_t = m_ч k_v v/t$, де k_v − коефіцієнт тертя, що залежить від швидкості переміщення частинки по поверхні столу.

Рух кожної і-ї частинки повністю визначається координатами її центру ваги x_i (видалення від центру кругової поверхні), z_i (положення по вертикалі щодо центру кругової поверхні) і кутом ψ відхилення від радіальної прямої (умовно визначеним на круговій поверхні), (Рис. 3.11).

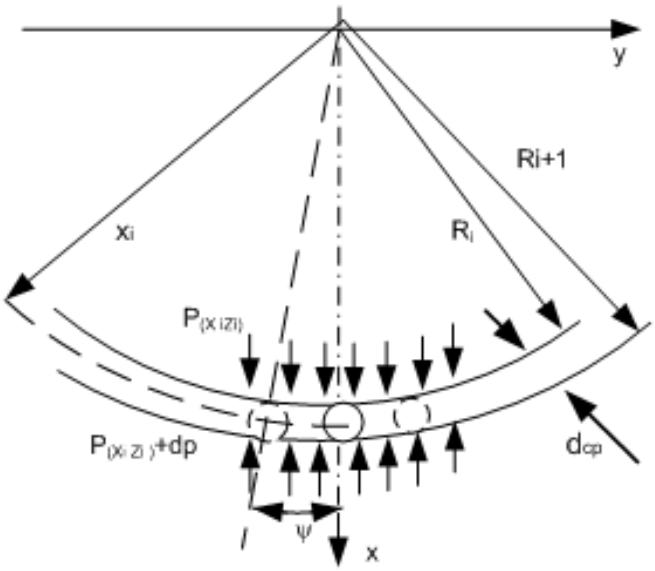


Рисунок 3.11 - Схема розташування матеріалу на похилій круговій поверхні

Останнє залежить від моменту сил, прикладених до кожної частинки та забезпечує їх обертання на кут Θ навколо її центру тяжіння.

Система рівнянь руху для кожного елемента в прямокутній декартовій системі координат має такий вигляд:

$$\begin{cases} m_i \dfrac{d^2 x_i}{dt^2} = F_{x_i} \\ m_i \dfrac{d^2 y_i}{dt^2} = F_{y_i} \\ m_i \dfrac{d^2 z_i}{dt^2} = F_{z_i} \\ J_i \dfrac{d^2 \theta_i}{dt^2} = M_i \end{cases}, \qquad (3.5)$$

де t – час здійснення процесу, на певному кроці;

m_i – маса і-й частинки;

J_i – момент інерції і-й частинки;

F_i – сума сил, що діють на контактах частинок (включаючи силу тертя по похилій круговій поверхні);

M_i – момент сил $F_{ij\Sigma}$ відносно центра і– й частинки.

Сума сил Σ_{pihi}, діючих на контактах елементарних шарів частинок, що знаходяться на похилій круговій поверхні (Рис. 3.11), визначається виразом

$$\sum p_{ih_i} = \sum_{i=1}^{n_{hi}} m_ч \cos\alpha_i \cos\left(\frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2} - \alpha_i\right) + \\ + \sum_{i=n_н/6}^{h_{i-1}} \left\{ \sum_{i=1}^{n_{h-1}} \left[p_{ih_i} \cos\left(\frac{\alpha_{i-} - \alpha_{i+1}}{2}\right) - mg \sin\alpha_i f_t - p_{ih_{i-1}} \sin\left(\frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2} - \alpha_i\right) f_t \right] \right\}, \qquad (3.6)$$

де $\sum_{i=1}^{n} p_{ih_i}$ – тиск маси матеріалу, розташованого над h_i шаром;

p_i – питомий тиск на одну частинку;

n_{hi} – кількість частинок h_i шару.

Для визначення сил, діючих на і-ю частинку в шарі від частинок, розташованих вище елементарного шару, необхідно визначити зону контакту суміжних шарів (Рис. 3.12).

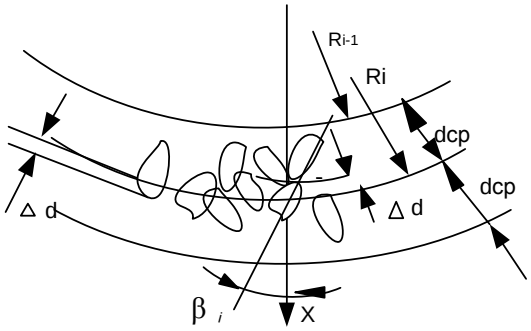


Рисунок 3.12 - Схема взаємного перетину частинок контактуючих шарів

Для цього розглянемо ймовірність перетину частинками площини, що умовно розділяє суміжні шари шириною d_{cp}.

На підставі завдання Бюффона [37] виявимо ймовірність перетину площиною, перпендикулярної осі X, частинками шару шириною d_{cp}, часток, розмір яких менше ширини d_{cp}.

$$P_{d_i \le d_{cp}} = \frac{4}{\pi \mathrm{d}_{cp}} \int_0^{0,5\pi} \mathrm{d}\beta \int_0^{0,5 d_i \cos\phi} dx, \qquad (3.7)$$

де β – кут між віссю x і напрямом вектора переміщення матеріалу.

Для випадку, коли довжина частинок перевищує висоту елементарного шару, ймовірність перетину умовною площиною поділу елементарних шарів частинок суміжних шарів визначається виразом [38]

$$P_{d_i \ge d_{cp}} = \frac{4}{\pi \mathrm{d}_{cp}} \int_0^{0,5 d_{cp}} \mathrm{dx} \int_0^{\arccos 2z_i / d_i} d\beta. \qquad (3.8)$$

Математичне сподівання кількості n_{ci} частинок h_i шару, що перетинаються площиною, що розділяють суміжні шари сипучого матеріалу, визначається за виразом

$$n_i^c = P_{d_i} n_{h_i}, \tag{3.9}$$

де P_{di} – ймовірність перетину частинок площиною.

Кількість часток в елементарних шарах h_i, розташованих на різному видаленні від осі Z, не є постійною через збільшення кількості частинок в шарі з віддаленням від вертикальної осі Z і залежить від розміру частинок кормового матеріалу і радіусу умовних кіл кругової поверхні, що обмежують цей h_i шар.

Компактне розташування частинок першого шару навколо однієї частинки, розташованої в центрі кола, визначає радіус кола, по якому відбувається зіткнення частинок

$$x_{h_1} = (r_0 + r_1)\cos\xi_{h_1}, \tag{3.10}$$

де r_0, r_1 – радіуси, відповідно, центральної частинки і частинок першого шару;

ξ – центральний кут обхвату частинки першого h1 шару.

Беручи до уваги, що частинки наступних шарів розташовуються з перетином умовних кіл, що визначають їх h_i шар, то радіус їх розташування визначається за виразом

$$x_{h_i} = x_{h_1} + d_{h_i} h_i \cos\xi_{h_i} k_{nv}, \tag{3.11}$$

де d – діаметр частинок h_i шару;

ξ_{hi} – центральний кут обхвату частинки h_i шару;

$k_{пv}$ – коефіцієнт збільшення обсягу розташування частинок ($k_{пv}$= =1,10…1,12).

Кут обхвату частинки h_i шару зменшується з видаленням шару від центру і визначається виразом

$$\xi_{h_i} = 2arctg\frac{0,5d_{h_i}}{x_{h_i}}. \qquad (3.12)$$

Тоді кількість частинок h_i шару

$$n_{dh_i} = \frac{2\pi}{\xi_{h_i}} = \frac{2\pi}{2arctg\dfrac{0,5d}{x_{h_i} + d_{h_i}h_i\cos\xi_{h_i}k_{nv}}}. \qquad (3.13)$$

При рівних діаметрах частинок кількість їх в h_i шарі можна визначати за формулою

$$n_{dh_i} = \frac{2\pi}{2arctg\dfrac{0,5d}{0,866d_{h_i}\left[1+\left(h_i-1\right)k_{nv}\right]}}. \qquad (3.14)$$

Аналіз формули (3.14) показує, що кількість частинок в шарах, починаючи з 8 ряду до 77, змінюється зі збільшенням від 5,9909 до 5,9986 і далі, до тисячного знака, зберігає це значення. Отже, можна с незначним допущенням прийняти, що кількість частинок в h_i шарі визначаться добутком $n_{dh_i} = 6h_i$.

З умови рівності подач по всім шарам ($q_{i-1} = q_i = q_{i+1}$), і, як наслідок, справедливості вираження $n_{dhi-1}v_{dhi-1} = n_{dhi}v_{dhi} = n_{dhi+1}v_{dhi+1}$, визначається швидкість переміщення частинок у кожному шарі

$$v_{h_i} = \frac{n_{dh_{i+1}}}{n_{dh_i}} v_{dh_{i+1}}. \qquad (3.15)$$

Проекція Δd перетину частини частки, впровадженої в сусідній елементарний шар (Рис. 3.11) залежить від розміру частинки і кута розташування між віссю частинки і віссю x.

Математичне сподівання впровадженої частини часток визначається з умови, що величина x змінюється в межах [0; $0{,}5d_{cp}$], а кут β – з деяким допущенням, в межах [0; 0,5π]. Тоді величина впровадження Δd_{cp} визначається за виразом

$$\Delta d_{cp} = \frac{4}{\pi \mathrm{d}_{cp}} \int_0^{0,5\mathrm{d}_{cp}} \int_0^{0,5\pi} \mathrm{d}_{cp} \cos\beta dx d\beta. \qquad (3.16)$$

Виходячи з отриманого, можливо визначити відносне розташування контактуючих частинок в радіальному напрямку і напрямок зусиль, як наслідок цієї взаємодії.

Композиція розташування частинок різних фракцій (Рис. 3.13) визначається з умови (допущення) рівномірного розташування частинок в зоні взаємного перетину сусідніх елементарних шарів, а кількість частинок в кожній фракції визначається за виразом (3.13).

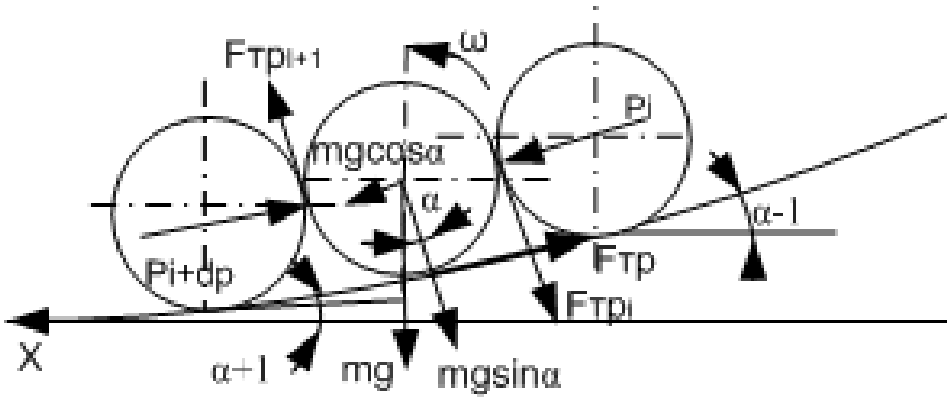


Рисунок 3.13 - Схема сил, що діють на частинку і-го шару в радіальному напрямку

Тиск на кожну частку поширюється пропорційно площі, що займає і-а частинка в зоні тиску. Площа, яку займає частинка в зоні перетину частинок, визначається як 0,25 $\pi d_{ср}^2$.

Умова руху частинок в радіальному напрямку визначається нерівністю, яке відображає перевищення складових сил тяжіння над силами тертя між частинками та по площині похилої кругової поверхні

$$mg\cos\alpha\sin\alpha(1-f_t)+p_i\cos\left(\pi-\frac{\alpha_{i-1}+\alpha_i}{2}\right)\geq\left(p_i+dp\right)\times$$
$$\times\cos\left(\pi-\frac{\alpha_i+\alpha_{i+1}}{2}\right)f_t^{вн}+F_{от}\sin\psi, \qquad (3.17)$$

де p_i – питомий тиск на одну частинку;

m – маса частинки;

α_i , α_{i-1} – кути нахилу поверхні на x_i і x_i-1окружності до горизонту;

$F_{оті}$ – сила відштовхування, що виникає при зіткненні частинок;

Ψ – кут між напрямком сили тертя при взаємодії частинок і віссю у.

Для визначення умов переміщення часток по колах похилій поверхні розглянемо схему дії зусиль на частинку сипучого матеріалу при кругових горизонтальних коливаннях похилої поверхні в одну сторону.

Основною рушійною силою в цьому випадку виступає сила тертя частинки об похилу поверхню, яка повинна перевищувати зусилля від взаємодії контактуючих частинок (Рис. 3.14)

$$mgf_t \geq (2p_i + dp_t) f_t^{вн} + F_{от} \cos\psi. \qquad (3.18)$$

Момент M_i сил відносно центра і-ї частинки визначається як сума моментів для всіх сил

$$M_{x_i} = [mg \sin\alpha_i f_t - p_i f_t^{вн} - (p_i + dp) f_t^{вн}] r R_i \qquad (3.19)$$

$$M_{y_i} = [mgf_t - p_i f_t^{вн} \sin\psi - (p_i + dp) f_t^{вн} \sin\psi] R_i \qquad (3.20)$$

Сила відштовхування $F_{от}$ виникає між сусідніми частинками за умови виникнення пружної деформації при зіткненні ($\delta_{ij} > 0$) і спрямована по нормалі, що сполучає центри частинок. Для її визначення використовуємо пружну модель співудару [39].

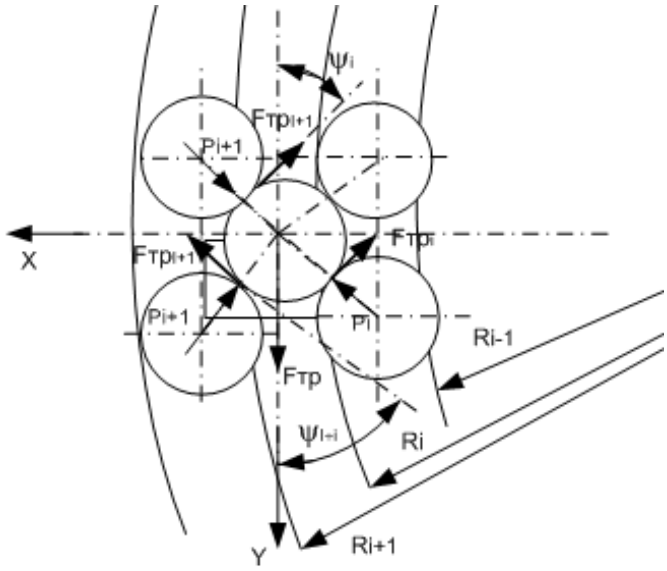


Рисунок 3.14 - Схеми сил, що діють на частинку при круговому русі похилій поверхні в одну сторону.

Згідно Дж. Герцу пружна сила відштовхування $F_{от}$ дорівнює

$$F_{от} = \frac{4}{3} \frac{E_i E_j}{(1 - v_i^2) E_j + (1 - v_j^2) E_i} \sqrt{\frac{R_i R_j}{R_i + R_j}} \delta_{ij}^{\frac{3}{2}} \qquad (3.21)$$

де v_i – коефіцієнт Пуассона;

E_i – модуль пружності частинки.

Чисельне рішення системи диференціальних рівнянь для кожної частки за час t, яке визначається для кожного кроку переходу часток з одного умовного кола однорядного розташування частинок в інший, дає можливість визначити задані технологією обробки параметри переміщення зернового матеріалу і параметри похилої кругової поверхні.

Отримана модель одношарового переміщення зернового матеріалу по нахиленій круговій поверхні дозволяє визначити рух з обертанням і зіткненням сукупності пружних частинок, що моделюють дискретне середовище і параметри сушарки з похилою круговою поверхнею.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз існуючих конструкцій сушарок дозволив виявити їх конструктивні особливості, завдяки яким було сформовано напрямок створення обладнання для потокової лінії сушки зерновмісних матеріалів;

2. Розроблено загальну технологічну схему потокової лінії сушіння, яка відрізняється наявністю внутрішніх лопатей і може застосовуватися при виготовленні кормових, паливних або добривних гранул;

3. Огляд сучасних конструкції сушарок зернових матеріалів дозволив виявити недоліки та оцінити переваги деяких конструкцій, які і будуть покладені в основу майбутніх теоретичних досліджень;

4. Проведені теоретичні дослідження руху часток по нахиленій круговій поверхні дозволяють визначити рух з обертанням і зіткненням сукупності пружних частинок, що моделюють дискретне середовище і параметри сушарки з нахиленою круговою поверхнею.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1 Анискин В.И. Консервация влажного зерна. / В.И. Анискин - М.: Колос.-1968.-286с.

2 Гинзбург А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое. / А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков – М.: Пищевая промышленность. – 1966. – 106с.

3 Боуманс Г. Эффективная обработка и хранение зерна / Г. Боуманс Пер. с англ. В.И. Дашевского. – М.: Агропромиздат, 1991. – 608 с.

4 Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. / А.С. Гинзбург – М.: Пищевая промышленность. – 1973 – 527с.

5 Гинзбург А.С. Расчёт и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. / А.С. Гинзбург – М.:Агропромиздат. – 1985. – 336с.

6 Жидко В.И. Зерносушение и зерносушилки / В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов – М.: Колос, 1982.– 239с.

7 Жидко В. И. Исследование процесса сушки зерна в связи с его автоматизацией: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" / Жидко В. И. – Одесса, 1970. – 58 с.

8 Гержой А.П. Зерносушение / А.П. Гержой, В.Д. Самочетов – М.: Заготиздат. – 1951. – 323с.

9 Птицын С.Д. Зерносушилки / С.Д. Птицын – М.: Машиностроение, 1966. – 184 с.

10 Малин Н.И. Снижение затрат на сушку зерна. / Н.И. Малин – М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов. – 1991. – 45 с.

11 Атаназевич В.И. Сушка зерна. / В.И. Антаназевич М.:Агропромиздат.-1989 - 244с.

12 Баум А.Е. Сушка зерна. / А.Е. Баум, В.А. Резчиков - М.- Колос. – 1983-223с.

13 Резчиков В.А. Математическое моделирование процесса сушки предварительно нагретого зерна / В.А. Резчиков, Р.П. Дубиничева // Тр. ВНИИЗ - М.: -1985.- Вып. 108. – С. 1-15.

14 Станкевич Г.М. Сушка зерна. / Г.М. Станкевич, Т.В. Страхова, В.И. Атаназевич – К.: Либідь. – 1997. – 351 с.

15 Чурсинов Ю.А. Анализ технологических решений и оборудования по сушке зерновых продуктов / Ю.А. Чурсинов // Хранение и переработка зерна. – 2000. - № 11. – С.27-30.

16 Гарькавий А.Д. Методом активного вентилювання / А.Д. Гарькавий, М.П. Камінський, Д.Г. Кондратюк // Механізація сільського господарства, 1988. - №5. – С.22.

17 Остапчук Н.В. Эффективности сушки зерна. / Н.В. Остапчук, А.Б. Шашкин, В.Д. Каминский – К.: Урожай, 1988. – 132 с.

18 Окунь Г.С. Установка для сушки зерна за рубежом / Г.С. Окунь, С.Д. Птицын, А.Г. Чижиков – М.: Сельхозиздат. – 1963. – 114 с.

19 Загоруйко В.А. Моделирование и метод расчёта кинетики процесса сушки зернистых материалов. / В.А. Загоруйко, Ю.И. Кривошеев, А.В. Соколовская // Промышленная теплотехника. – 1980.- Т. 2. - №2. – С.81-90.

20 Боноев П.А. Обоснование поточной технологии адсорбционно-контактной сушки зерна: Автореф. дисс. … канд. техн. наук. - Новосиб.: - 1990.-17с.

21 Ильин Л.И. Повышение эффективности зерносушилок. / Л.И. Ильин //Хлебопродукты. – 1989. - №12. – С.24-28.

22 Анискин В.И. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием. / В.И. Анискин, В.А. Рыбарук - М. ВИМ. – 1972. – 200с.

23 Гірник М.Л. Механізація і автоматизація післязбиральної обробки зерна./ М.Л. Гірник.- К. Урожай. – 1970.- 190с.

24 Мальтри А. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения. / А. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер – М.: Машиностроение. – 1979. – 524 с.

25 Ровный Г.А. Состояние и перспективы развития сельскохозяйственных сушилок за рубежом / Г.А. Ровный, А.В. Авдеев, В.Н. Полуэктов // Обзорная информация. – М.: ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш. – 1981. – 65 с.

26 Авдеев А.В. Механико-технические основы расчёта и проектирования сельскохозяйственных зерносушильных машин: автореф. дисс. докт. техн. наук. - М.: - 1992.- 39с.

27 Наймушилин М.И. Пути снижения энергозатрат и повышения производительности сушильных установок с плотным слоем. / М.И. Наймушилин // ТР. ЛСХИ.- 1981. – С. 65-69.

28 Малин Н.И. Снижение затрат на сушку зерна. / Н.И. Малин –М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов. – 1991. – 45 с.

29 Подпрятов Г. І. Зберігання і переробка продукції рослинництва / Г. І. Подпрятов, Л. Ф. Скалецька, А. М. Сеньков, В. С. Хилевич. – К.: Мета, 2002. – 495 с.

30 Карпенко А. Н. Сельскохозяйственные машины [Текст]: учеб. для вузов / А.Н.Карпенко, В. М. Халанский. – М. Агропромиздат, 1989. – 527 с.

31 Гержой А.П. Зерносушение и зерносушилки / А.П. Гержой, В.Ф. Самочетов – М.: Колос, 1967. – с.338.

32 Птицын С.Д. Зерносушилки / С.Д. Птицин – М.: Машиностроение, 1966. – 180 с.

33 Цугленок, Н.В. Функциональное описание процесса сушки зерна / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.Н. Конусов//Вестн. КрасГАУ. – 2005. – № 8. – С. 217 – 221.

34 Манасян, С.К. Синтез сушильной камеры шахтной зерносушилки как объекта управления // Вестн. КрасГАУ. - 2004. -№ 4. – С. 151 – 156.

35 Клишин С.В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале // Горный информационно-аналитический бюллетень.(научно-технический журнал), 2009, №12, С.273-277.

36 Гмурман В.Е. Теория вероятности / В.Е. Гмурман – 9-е изд., стер.— М.: Высшая школа, 2003.— 479 с.

37 Карлин С. Основы теории случайных процессов / С. Карлин /Пер. с анг., Под редакц. Коваленко И.Н./ М. Мир. 1971.- С.61.

38 Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц: Пер. с англ. — М.: Мир, 1987. — 640 с.

39 Тимошенко СП. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Гудьер Дж.: Пер. с англ. — М.: Наука, 1975. — 576 с.