

**ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ ТА АВТОМАТИКИ
АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ**

КОТОВ Б.І., СТЕПАНЕНКО С.П., КАЛІНІЧЕНКО Р.А.

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЦЕСАХ
ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ, ЗБЕРІГАННЯ І
ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНА**

МОНОГРАФІЯ

2026

<https://doi.org/10.37204/978-617-640-750-8>

УДК 631.365:664.723(075.8)

К 73

Рецензенти:

Алієв Є.Б. – д.т.н., професор, Дніпровський державний аграрно-економічний університет;

Мироненко В.Г. – д.т.н., професор, Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України;

Яропуд В.М. – д.т.н., доцент, Вінницький національний аграрний університет.

Котов Б.І., Степаненко С.П., Калініченко Р.А.

К 73 Електротехнології в процесах післязбиральної обробки, зберігання і переробки зерна: Монографія / Б.І. Котов, С.П. Степаненко, Р.А. Калініченко - Ніжин. : Видавець ПП Лисенко М.М., 2026. – 391 с.:іл.
ISBN 978-617-640-750-8

Рекомендовано до видання Вченою радою Інституту механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України (протокол № 4 від 9 квітня 2026 року).

У монографії викладено теоретичні основи та практичні аспекти застосування електротехнологій у процесах післязбиральної обробки, зберігання та переробки зерна. Розглянуто фізичні механізми впливу електричної енергії на зернові матеріали, методи інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів, а також сучасні технічні рішення та обладнання. Особливу увагу приділено підвищенню енергоефективності технологічних процесів і забезпеченню якості продукції. Монографія призначена для науковців, інженерів-практиків, викладачів, аспірантів і здобувачів вищої освіти спеціальностей G3 «Електрична інженерія», H7 «Агроінженерія» та G11 Машинобудування (за спеціалізацією G11.03 Технологічні машини та обладнання).

УДК 631.365:664.723(075.8)

© Котов Б.І., Степаненко С.П., Калініченко Р.А.

ІМА АПВ НААН, 2026

ISBN 978-617-640-750-8

© Видавець Лисенко М.М., 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	10
1.1 Процеси на основі електронно-іонної технологій	10
1.2. Застосування коронного розряду в процесах електронно-іонної технології	15
1.3. Застосування тихого електричного розряду в процесах електронно-іонної технології	26
1.4. Аналіз способів електросепарації зернових матеріалів	30
1.5. Фізичні основи поділу зернових матеріалів в електричному полі.....	33
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ДІЇ.....	50
2.1. Математичний опис процесів електричної сепарації зерна	50
2.2. Огляд математичного опису процесів електротермічної обробки зернових матеріалів	91
2.2.1. Характеристика і аналіз об'ємних методів теплової обробки	91
2.2.2. Математична модель сушіння при електромагнітному підведенні енергії	105
2.2.3. Математичні моделі теплопереносу в рухомому щільному шарі матеріала	114
2.2.4 Математичне моделювання мікрохвильово-конвективного сушіння зернових культур у рухомому шарі.	120
2.2.5 Математичне моделювання внутрішніх нестационарних полів температури та вологовмісту зернової сировини під час інфрачервоного випромінювання	127

2.2.6 Математичне моделювання нестационарних температурних полів у плоскому шарі зерна під час інфрачервоної термообробки.....	132
2.2.7. Моделювання повітрянодинамічних характеристик та температурних полів індукційного нагрівача.....	140
2.2.8 Математичне моделювання контактного нагріву для сушіння насіння у вакуумі	145
РОЗДІЛ 3 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ТА СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ	
151	
3.1. Фракціонування зернових матеріалів у вертикальному кільцевому повітряному каналі при накладанні електричного поля	151
3.2. Модель процесу електро-пневматичного фракціонування насіннєвих матеріалів в електрокоронному сепараторі.....	165
3.3. Моделювання процесу фракціонування зерна в пневматичних каналах при накладеному електричному полі	171
РОЗДІЛ 4 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИХ СПОСОБІВ СУШІННЯ ЗЕРНА.....	
183	
4.1. Ідентифікація закономірностей і моделювання енергозберігаючих режимів мікронізації зерна	183
4.2 Математична модель теплоенергетичних режимів теплонасосної сушильної установки	211
4.3. Математичне моделювання режимів сушіння зернонасіннєвих матеріалів в установках з індукційним підведенням енергії.....	222
4.4. Дослідження руху зернівки у барабанній сушарці з ІЧ-енергопідведенням по скатній лінійчатій мінімальній поверхні.....	233

4.5. Аналітичне дослідження температурного поля зернівки при імпульсно-періодичному підведенні енергії інфрачервоним випромінюванням	244
4.6. Моделювання та розрахунок процесу радіаційно-конвективного сушіння насіння у лотковій вібраційній установці періодичної дії (з контуром циркуляції матеріалу)	266
4.7. Математичне моделювання та ідентифікація процесів тепломасообміну у вібраційній сушарці з ІЧ-енергопідведенням	277
4.8. Моделювання і розрахунок енергозберігаючих режимів сушіння зернових матеріалів під дією енергетичних полів	293
4.9. Математичне моделювання та ідентифікація тепломасопереносу в рослинному дисперсному матеріалі при сушінні і нагріванні електромагнітним полем надвисокої частоти	303
4.10. Кінетика сушіння зерноматеріалів в установках з переміжним підведенням енергії мікрохвильовим та інфрачервоним випромінюванням	315
4.11. Моделювання тепло-і масопереносу в процесах сушіння зерна під впливом електромагнітного поля	326
4.12. Математичне моделювання нестационарних теплових процесів прес-екструдера з індукційним обігрівом як об'єкта з розподіленими параметрами.....	338
4.13. Використання робочого органу універсального вібротолкача для сушіння зернового матеріалу.....	342
4.14. Ідентифікація динаміки електричних установок термообробки фуражного зерна при виробництві комбікормів	360
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	367

ВСТУП

Зерно після збирання потребує ретельної обробки, адже це впливає не лише на забезпечення зростаючих потреб населення у продуктах харчування, але й на створення стабільної кормової бази для тваринництва. Мета післязбиральної обробки зерна – підготовка якісного насіння і харчового зерна.

Після збирання врожаю комбайнами зернова маса містить не лише насіння основної культури, а й насіння інших сільськогосподарських рослин, бур'яни, частини стебел і колосків, полову, землю тощо. Висока вологість зерна та домішок може призвести до його перегрівання, що робить зерно непридатним для посіву та вживання в їжу.

Для отримання високоякісного насіння з такої зернової маси необхідно здійснити ряд дій: Видалення домішок і, якщо потрібно, сушіння до необхідного рівня вологості; Сортуння за біологічними параметрами; Обробка протруйниками; Обробка мікроелементними солями та бактеріальними препаратами [1].

Очищення зерна полягає у видаленні різних домішок, які погіршують його посівні та харчові властивості. Очищення насіння також є важливим заходом для боротьби з забур'яненням полів.

Насіння сільськогосподарських культур, навіть вирощене за однаковою агротехнікою, є біологічно неоднорідним. Тому виникає потреба виділяти з зернової маси найцінніше з біологічної точки зору насіння, що досягається шляхом сортування.

На сьогодні не існує машин, здатних сортувати насіння за біологічними властивостями безпосередньо. Тому сучасні сортувальні машини розподіляють зернові суміші на основі фізико-механічних відмінностей окремих зерен.

Наукові дослідження та практика показують, що вага і розміри зерен мають найбільший зв'язок з їх біологічними властивостями. Велике, важке насіння має кращу схожість та енергію проростання, а рослини, вирощені з такого насіння, є стійкішими до несприятливих умов, дають більший урожай і дозрівають на три-п'ять днів раніше, ніж рослини, вирощені з несортованого насіння. Важливим чинником, що впливає на врожай, є також рівномірність посівного матеріалу за розмірами та вагою зерен.

Насіннєвий матеріал і продовольче зерно можуть зберігатися тривалий час без втрати якості за умови підтримання певного рівня вологості. Найоптимальніша вологість для зберігання насіння становить 14-15%. При цьому зменшується життєдіяльність зерен та зупиняється розвиток шкідників і мікроорганізмів.

Вологість насіння знижується під час сушіння [2]. Правильно і своєчасно проведене сушіння прискорює дозрівання насіння після збирання, підвищує його схожість і енергію проростання. Важливо пам'ятати, що порушення режимів сушіння може значно знизити посівні якості насіння.

Для боротьби з хворобами сільськогосподарських культур важливо застосовувати хімічну та термічну обробки насіння. Це особливо актуально для культур, у яких захворювання передаються через насіння, таких як зернові, зернобобові, льон, коноплі, соняшник, цукровий буряк та інші.

Звідси виникає необхідність протруювання насіння, а також очистки та дезінфекції зерноосховищ, зерноочисних машин, сівалок та іншого обладнання, що використовується для підготовки насіння. Практика показує, що своєчасно і правильно проведене протруювання є важливим методом боротьби за високі врожаї зернових культур.

Насіння сільськогосподарських культур, очищене від домішок, висушене та відсортоване, повинно відповідати стандартам для посівного матеріалу. В залежності від чистоти

та схожості, насіння зернових, зернобобових, олійних культур, а також бобових і злакових трав розподіляється на три класи.

За сортовими якостями насіння зернових, зернобобових та інших культур поділяється на категорії. Елітне насіння пшениці, ячменю, вівса, проса, рису, гороху, квасолі та інших культур повинно мати сортову чистоту не нижче 99,8%.

Існують три основні випадки поділу зернової суміші на складові частини: повний поділ, частковий поділ і неможливість поділу. Якщо всі домішки повністю відрізняються від зерен основної культури за фізико-механічними властивостями, можна здійснити повний поділ. У разі, коли лише частина домішок відрізняється від зерен основної культури, можливий частковий поділ, але при цьому деяка кількість зерен може втрачатися разом з домішками. Якщо ж властивості домішок і зерен основної культури збігаються, поділ стає неможливим.

Наприклад, суміш насіння озимої пшениці та лободи можна повністю розділити за розмірами. Суміш насіння пшениці та вівсюга частково розділяється за шириною часток і повністю - за довжиною. Проте суміш насіння озимої пшениці та жита не можна повністю розділити за розмірами.

В реальних умовах зерновий ворох очищується за кількома ознаками одночасно. Тому важливо ретельно вивчати складові частини вороху, визначати найоптимальніші ознаки для поділу суміші та відповідно налаштовувати робочі органи зерноочисних машин.

Сортування насіння має бути виконано з урахуванням ознак, які найбільш точно відображають біологічні властивості зерен [1-3]. Для насіння зернових, зернобобових та інших культур такими ознаками є розміри (товщина) та вага (густина) зерен.

Якість очищення та сортування насіння суттєво залежить від правильного визначення ознак і використання відповідних механічних засобів для поділу суміші. Зернова суміш

поділяється за розмірами часток за допомогою решіт та трієрів. При цьому кожна частка зернової суміші має три основних розміри: товщину (а), ширину (б) та довжину (в).

Схема основних технологічних операцій у процесах післязбиральної обробки зернових матеріалів представлена на рис. 1.0.

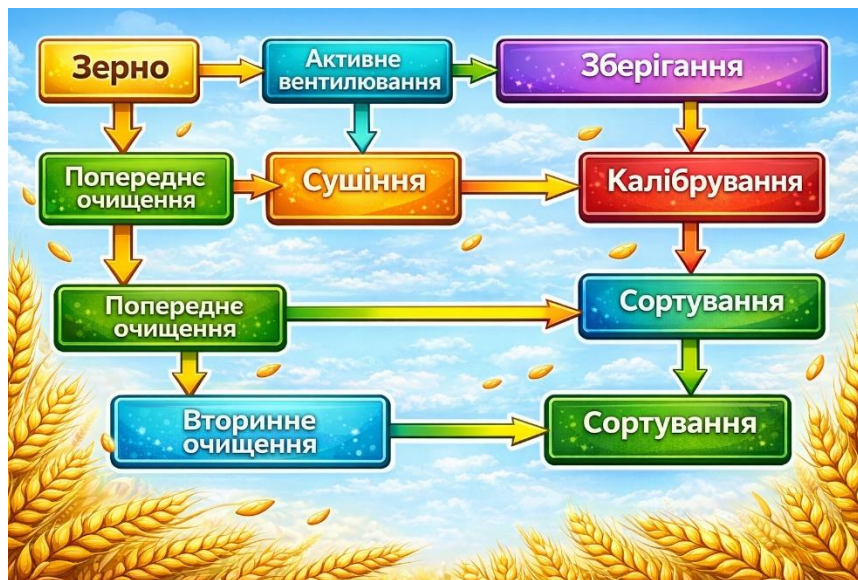


Рис. 1.0. Схема процесів післязбиральної обробки зернових матеріалів.

Аналізом існуючих сепараторів зерна, конструктивних схем організації процесів поділу зернового матеріалу за механічними, аеродинамічними та електричними властивостями, встановлено доцільні шляхи вдосконалення зерноочисної техніки і інтенсифікації процесів сепарації з метою створення технологічно нових принципів обробки на основі використання комплексної дії силових полів (електромагнітних, іскрових, аеродинамічних, механічних та інших видів впливу). Це обґрунтовує актуальність дії різних видів впливу на компоненти розділу матеріалів за комплексом фізико-механічних та біологічних властивостей.

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Процеси на основі електронно-іонної технології

Електричне поле є частковим випадком електромагнітного поля. Електричне поле у даній області простору проявляється, зокрема, у виникненні механічної сили, що діє на пробний електричний заряд, внесений у цю область. Основою теорії електричного поля є закон Кулона, згідно з яким абсолютна величина сили F відштовхування двох однакових або притягування двох різних зарядів e_1 і e_2 - розміри яких значно менше відстані r між ними, прямо пропорційна (добутку величин цих зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними:

$$\bar{F} = K \frac{e_1 e_2}{r^2}; \quad (1.1)$$

де K — коефіцієнт пропорційності, що залежить від вибору одиниць виміру.

Сила $\bar{F}$ спрямована по прямій, що з'єднує обидва заряди. Якщо електричні заряди знаходяться в повітрі або рідкому середовищі і відстань між ними велика порівняно з відстанями між атомами (або молекулами) середовища, то сила взаємодії між зарядами залежить від відстані так само, як і в вакуумі, але зменшується у ε раз:

$$\bar{F} = \frac{K}{\varepsilon} \frac{e_1 e_2}{r^2}; \quad (1.2)$$

Величина ε характеризує властивості середовища і називається відносною діелектричною проникливістю.

Електричне поле в вакуумі повністю визначається векторною величиною - напруженістю поля, яка чисельно дорівнює силі, що діє на одиничний пробний заряд, внесений у дану точку поля. Знаючи напруженість поля в будь-якій точці, можна визначити силу, що діє на заряд q , внесений у дану точку поля.

Ця сила:

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (1.3)$$

Якщо поле створюється певною кількістю зарядів, то можна знайти напруженість поля в даній точці, яку створює кожен з них окремо, а потім, склавши їх векторно, визначити результативну напруженість поля, застосовуючи теорему Гауса, тобто потік вектора напруженості поля через замкнуту поверхню S у вакуумі за наступною формулою:

$$\psi = \int_S (\vec{E}_n) dS = 4\pi \sum_{j=1}^1 q_j; \quad (1.4)$$

де $d\psi = (\vec{E}_n) dS$ – потік вектора $\vec{E}$ через елемент поверхні dS , n – одиничний вектор, орієнтований за зовнішньою нормаллю до S на елементі dS .

При рівновазі зарядів в провідному тілі $E=0$. Тому згідно з виразом (4) всі заряди повинні концентруватися на поверхні провідників.

В електростатиці напруженість поля завжди нормальна до поверхні провідних тіл і визначається щільністю зарядів в точці поверхні, що розглядається $E=4\pi a$, де a - поверхнева щільність зарядів.

Робота, витрачена на переміщення одиничного пробного заряду з однієї точки в іншу, залежить від координат цих точок і не залежить від шляху, по якому рухається заряд. Тому електричне поле характеризується скалярною функцією – потенціалом електростатичного поля $\phi(x,y,z)$, або різницею

потенціалів між двома точками поля, чисельно рівною роботі з протилежним знаком, яку виконують сили поля при переміщенні одиничного додатнього заряду з однієї точки в іншу:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = - \int_1^2 (\bar{E}_n) dl; \quad (1.5)$$

Інтеграл береться вздовж довільної кривої, що з'єднує дві точки цієї кривої, а dl - елемент довжини цієї кривої. З виразу (5) випливає: якщо dl перпендикулярно $\bar{E}$, то різниця потенціалів дорівнює нулю; якщо елементарне переміщення здійснюється в напрямку нормалі до поверхні рівного потенціалу, тому $d\varphi = -\bar{E}dn$, звідки:

$$\frac{d\varphi}{dn} n = -\bar{E}; \quad (1.6)$$

де n - одиничний вектор, перпендикулярний до поверхні рівного потенціалу.

Величину $\frac{d\varphi}{dn} n$ – називають градієнтом потенціалу. Отже, напруженість поля дорівнює взятому зі зворотним знаком градієнту потенціалу.

Для повного опису поля достатньо знати одну скалярну функцію φ замість одного векторного $\bar{E}(x,y,z)$.

Для визначення поля при відомій величині та розташуванні зарядів розв'язується рівняння Пуассона:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{d^2\varphi}{dy^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} = -4\pi\rho; \quad (1.7)$$

де $\rho = f(x, y, z)$ - просторове розподіл об'ємного заряду.

Знайдене рішення визначає різницю потенціалів, а отже, дозволяє знайти напруженість поля. В електростатиці відрізняють два типи зарядів: вільні та зв'язані. Вище йшлося

про вільні заряди, вони зміщуються під дією зовнішнього електричного поля.

Заряди, що входять у нейтральну молекулу, можуть зміщуватись відносно свого положення рівноваги під впливом зовнішнього поля і тому називаються зв'язаними. У цьому випадку йдеться про поляризацію діелектриків.

Якщо в першому наближенні прийняти за елементарну частинку ізольованої середовища модель Резерфорда, то процес заряджання під впливом поля буде відбуватися за такою схемою. Під дією зовнішнього поля $\vec{E}$ елементарна частинка деформується, тобто колова орбіта електрона стає еліптичною з нахилом осі до нормалі на певний кут α (рис. 1.1).

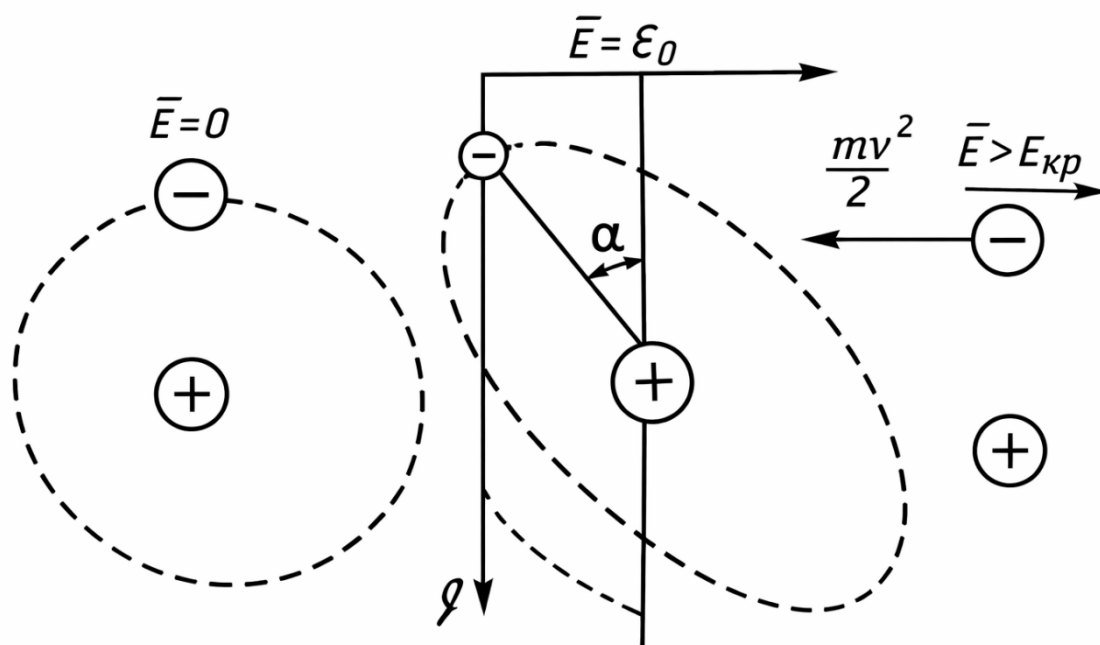


Рис. 1.1. Схема процесу заряджання тіла.

Процес деформації вищої орбіти електрона призводить до виникнення моменту сил між протонами та електроном частинок. Це сприяє виникненню у елементарної частинки власного поля, тобто відбувається процес поляризації або зарядження.

Зі зростанням прикладеного зовнішнього поля $\vec{E}$ зміцнюється деформація орбіти електрона, і елементарна

частинка руйнується: електрон, набуваючи певну кінетичну енергію $\frac{mv^2}{2}$, де m та u - маса і швидкість електрона із зарядом q , відкривається, що призводить до іонізації, тобто елементарна частинка несе позитивний заряд при приєднанні вільного електрона до нейтральної частинки, утворюючи від'ємний іон.

Після накладання зовнішнього поля $\vec{E}$ електричний стан діелектрика характеризується вектором поляризації речовини $P(x,y,z)$, який дорівнює електричному моменту речовини в одиниці об'єму:

$$P = \sum_{n=1}^m q_n r_n; \quad (1.8)$$

де, $q_n r_n$ – електричний момент заряду q_n відносно довільного центра;

r_n – відстань цього центру від розглядуваного заряду.

У ізотропних діелектриках поляризація прямо пропорційна збуджуючому зовнішньому полю $\vec{E}$:

$$P = \chi \vec{E}; \quad (1.9)$$

де χ - заряди (електрони, іони і ядра);

Якщо у полі присутні діелектрики, то потенціал поля дорівнює сумі потенціалів:

$$\varphi = \varphi_{\text{вільн}} + \varphi_{\text{зв'язан}}; \quad (1.10)$$

де $\varphi_{\text{вільн}}$ – потенціал, збуджуємий вільними зарядами; $\varphi_{\text{зв'язан}}$ – потенціал, обумовлений зв'язаними зарядами.

Вектор електричного зміщення $\vec{D}$ характеризує результуюче поле вільних і зв'язаних зарядів, тобто $\vec{D} = \vec{E} + 4\pi P$ або з урахуванням виразу (1.9):

$$\bar{D} = (1 + 4\pi\chi)\bar{E} = \varepsilon\bar{E}; \quad (1.11)$$

де ε - відносна діелектрична проникність (у вакуумі $\varepsilon=1$).

Знайти електростатичне поле прямим розв'язанням рівняння Пуассона вдається лише у рідких випадках. Зазвичай топографія поля визначається експериментально в електричній ванні, яка є пристроєм, що діє на принципі аналогії між законом розподілу потенціалу та законами струму в електроліті.

Вивчення електричних полів відіграє велику роль у процесах електронно-іонної технології (EIT) та в електроапаратобудуванні.

1.2. Застосування коронного розряду в процесах електронно-іонної технології

Коронний розряд застосовується в пристроях EIT та як основний засіб передачі електричного заряду пилоподібним частинкам у газі, а також для підсилення електричного поля в зоні руху та осідання частинок.

Коронний розряд – це вид стаціонарного електричного розряду в газі достатньої густини, що виникає в сильному нерівномірному електричному полі.

Іонізація та збудження нейтральних частинок газу лавинами електронів локалізовані в обмеженій зоні (оболонці корони або зоні іонізації) сильного електричного поля поблизу електрода з малим радіусом кривизни.

Коронний розряд супроводжується рухом частинок газу від коронуючого електрода - так званим електричним вітром з утворенням озону та оксидів азоту у повітрі.

За межами оболонки корони в зовнішню зону рухається потік носіїв заряду, знак якого збігається з знаком заряду коронуючого електрода.

Рух частинок в електричному полі корони пов'язаний із зарядами частинок та впливом електричних сил коронного розряду на заряджені частинки.

На заряджену частинку електричне поле коронного розряду діє з силою F (у ньютонах), що визначається зарядом частинки Q (у кулонах) та напруженістю електричного поля E (у В/м).

$$F = QE; \quad (1.12)$$

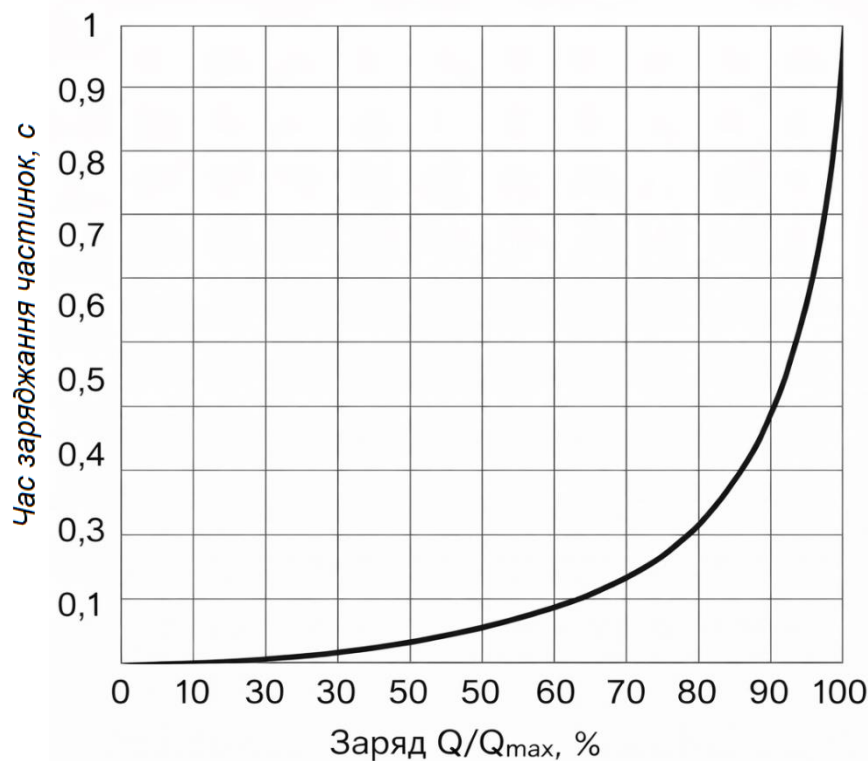


Рис. 1.2. Залежність величини заряду частинок від часу перебування в зоні коронного розряду

Заряд частинки досягає значення, близького до максимального, за дуже короткий час, а рух частинок зазвичай триває протягом декількох секунд.

Залежність величини заряду частинки від часу перебування її в зоні коронного розряду подана на рис. 1.2. Як

видно з кривої, за час 0,1 с частинка кульової форми набуває заряд, близький до максимального Q_{max} .

Тому можна приймати, що заряд частинки має постійне, не залежне від часу значення.

Зарядження частинок в електричному полі коронного розряду відбувається внаслідок адсорбції іонів у зовнішній зоні коронного розряду, на поверхні твердих або рідких частинок, що знаходяться у газі, а також при зіткненні з іонами, що рухаються внаслідок дії електричних сил і внаслідок дифузії, зумовленої зміною концентрації іонів біля поверхні частинок.

Величина потоку іонів до поверхні частинки (в іонах/с), що визначає процес зарядження, може бути розрахована із загального дифузійного рівняння:

$$\frac{dN}{dt} l_0 = K \cdot E_n - D \cdot \text{grad } n; \quad (1.13)$$

де N – число іонів, що припадають на одиницю поверхні частинки (1 м^2);

K – рухливість іонів, м/с (В/м);

E_n – напруженість електричного поля частинки, В/м;

D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;

l_0 – одиничний вектор.

Складність вирішення загального рівняння змушує спрощувати завдання, розглядаючи окремо зарядження малих та відносно великих частинок. Для частинок, радіус яких порівняний з довжиною вільного пробігу іонів, можна вважати відтік іонів з розрядного проміжку на частинку дуже малим.

Тому в першому наближенні приймають, що:

$$\frac{dN}{dt} \approx 0. \quad (1.14)$$

В такому випадку із виразу (1.14):

$$n = n_0 e^{-\frac{e\varphi}{RT}}; \quad (1.15)$$

де $\frac{K}{D} = \frac{e}{RT}$; R – стала Больцмана, Вт/(м²·К⁴); T – абсолютна температура; n_0 – початкова концентрація іонів коронного розряду; e – заряд іона (в кулонах).

Навколо частинки встановлюється больцманівський розподіл іонів з потенціалом поля $\varphi = \int E dR$.

Можливе ще більше спрощення (1.15). Приймають, що потенціал φ в ближній околиці частинки визначається лише зарядом самої частинки $\varphi = \frac{Q}{R}$ і отримують закон заряджання малих частинок, відповідно до якого Q (в кулонах) буде:

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 \frac{Q}{e} KT \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi\varepsilon_0}{4} \right) \left(\sqrt{\frac{2\pi}{mKT}} 2\rho\pi e^2 t \right); \quad (1.16)$$

де, ρ – радіус частинок, м; m – маса іона, кг; ε_0 – діелектрична проникність вакууму ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ К/(В·м)).

Незважаючи на грубе наближення, формула (1.16) дає задовільне співпадіння з експериментальними значеннями малих частинок $\rho < 1$ мкм.

Для відносно великих частинок можна наближено вважати, що концентрація іонів n постійна, тобто:

$$\text{grad } n = 0, \quad n = n_0 \quad \text{та} \quad \frac{dN}{dt} = KEn_0. \quad (1.17)$$

Зарядка великої частинки триває до стану, при якому сумарне електричне поле на всій поверхні стає близьким до нуля.

Як показали розрахунки, до цього часу частинка набуває максимальний заряд (в кулонах):

$$Q_m = 4\pi\varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2} \right) E_0 \rho^2; \quad (1.18)$$

де, ε – діелектрична проникність речовини частинки; E_0 – напруженість поля коронного розряду в околі знаходження частинки, В/м.

Закон кінетики заряджання великих частинок матиме вигляд:

$$Q = Q_m \frac{\pi \cdot K \cdot n_0 \cdot e \cdot t}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 + \pi \cdot K \cdot n_0 \cdot e \cdot t}. \quad (1.19)$$

При нормальних концентраціях іонів у коронному розряді ($n_0 \approx 10^{14}$ іони/м³) швидкість заряджання висока, і за 0.1 секунди частинка набуває 96% від максимального заряду, тому для великих і малих частинок застосовні обидва закони заряджання. Якщо напруженість електричного поля в зовнішній області корони дорівнює 30 кВ/м < E_0 < 150 кВ/м, то час перебування частинки в цій зоні не перевищує 3 с.

Ці умови виконуються при промисловому використанні коронного розряду. У всіх випадках необхідно застосовувати вираз для комбінованого заряджання, де приблизно враховуються як дрібні, так і великі механізми заряджання частинок.

Формули (1.16) і (1.18) прийнятні для обчислення малих концентрацій частинок, коли всмоктування іонів на частинки незначно змінює середню густину в коронному розряді.

При великому числі частинок в газі заряд визначається не тільки початковою концентрацією іонів, але і просторовим зарядом оточуючих її частинок PQ , де P – концентрація частинок, а Q – заряд однієї частинки.

Заряд частинки з $\rho \gg 1$ мкм становитиме:

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} K n_0 e \cdot t = \frac{1}{1-\xi} \cdot \frac{\nu}{1-\nu} + \frac{\xi}{(1-\xi)^2} \ln \left(\frac{1-\nu}{1-\xi\nu} \right); \quad (1.20)$$

де, $\xi = \frac{P \cdot Q_m}{n_0 \cdot e}$ – відносна концентрація частинок в газі; $\nu = \frac{Q}{Q_m}$ – відносний заряд частинки.

Неважко помітити, що існує три малих концентрації частинок, коли $\xi=0$, формула (1.20) перетворюється на формулу (1.18). Якщо концентрація частинок висока і $\xi=1$, то майже всі іони розподіляються між частинками. Відбувається так зване замикання корони, при якому всі заряди переносяться повільними частинками.

Концентрація аерозолі може бути настільки високою, що частинки не можуть отримати максимальний заряд, і в цьому випадку їх граничний заряд буде становити:

$$Q_{\text{гр}} = \frac{n_0 \cdot e}{P}. \quad (1.21)$$

Рух частинок в електричному полі визначається не тільки величиною їх заряду, але і дією механічної сили, викликаній зарядами, індукованими електричним полем:

$$f = 4\pi\varepsilon_0 \frac{\varepsilon^{-1}}{\varepsilon+2} \rho^3 \bar{E} \frac{dE}{dx}; \quad (1.22)$$

де, x – координата, що співпадає за напрямком з електричним полем.

У різних точках проміжку напруженість електричного поля E має різні значення. Однак для більшої частини зовнішньої зони коронного розряду вона майже не змінюється, а в найпростішому випадку корона в циліндричному конденсаторі навіть може з достатнім наближенням вважатися постійною та рівною:

$$\bar{E} = \bar{E}_0 \sqrt{\frac{I}{2\pi\varepsilon_0 K}}; \quad (1.23)$$

де, I – лінійна густина струму корони, А/м.

K – рухливість іонів, $\text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$.

Оскільки, в цій області $\frac{d\bar{E}}{dx} \approx 0$, то силою f можна знехтувати, і основною силою, що діє на частинку в полі корони, є:

$$\bar{F} = Q_m \bar{E}_0. \quad (1.24)$$

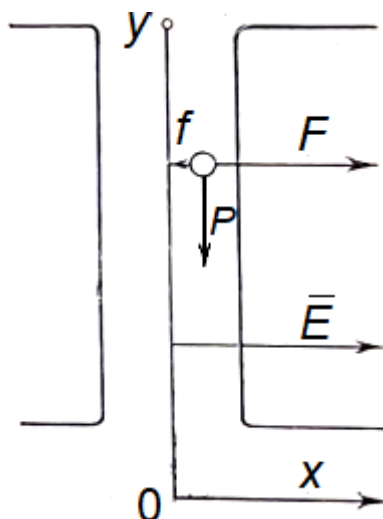


Рис. 1.3. Вектори сил, що діють на частинку в полі коронного розряду коаксіальних циліндрів

Це справедливо для випадків, коли $\left(\frac{d\bar{E}}{dx}\right) \ll \left(\frac{d\bar{E}}{d\rho}\right)$ і лише в невеликому околі навколо коронуючого електроду напруженість поля змінюється дуже сильно і $\frac{d\bar{E}}{dx}$ приймає велике від'ємне значення.

У цій області дрібні частинки можуть рухатися до коронуючого електроду, де і осідаються. У промислових пристроях коронуючі електроди очищаються шляхом встряхування.

Рух частинок спрямований вздовж електричного поля від коронуючого до некоронуючого осідального електроду. На рис. 1.3 зображені вектори сил, що діють на сферичну частинку, що знаходиться в просторі між коронуючим та осідальним електродами коаксіальних циліндрів. На рис. 1.3 коронуючий електрод розміщений вздовж осі y , а вектор електричного поля $\bar{E}$ направлений вздовж осі x .

Швидкість і відстань, що пройшла частинку під дією електромагнітного поля, визначається співвідношеннями [5-8, 125, 236]:

$$v = v_k \operatorname{th} \frac{Q_m \cdot E_0}{m \cdot v_k} f; \quad (1.25)$$

$$x = b + \frac{m \cdot v_k^2}{Q_m E_0} \ln \operatorname{ch} \frac{Q_m \cdot E_0}{m \cdot v_k} f; \quad (1.26)$$

де, b – початкові координати частинки, м; m – маса частинки, кг; v_k – кінцева швидкість руху частинки, що встановлюється у в'язкому середовищі, м/с.

Кінцева швидкість не може бути виражена аналітичною функцією і обчислюється з урахуванням числа Рейнольдса для даного випадку руху:

$$v_k = 10 \frac{\operatorname{Re} \cdot \eta}{2 \cdot \gamma}; \quad (1.27)$$

де γ – густина газу, кг/м³; η – в'язкість газу, Па·с.

Число Рейнольдса Re можна знайти з емпіричної діаграми Релея. Для цього потрібно знати значення коефіцієнта φ , який обчислюється з виразу:

$$\varphi = \frac{Q_m E_0}{4 \rho^2 v_k}. \quad (1.28)$$

Залежність $\operatorname{Re} = f(\operatorname{Re}^2 \varphi)$ є перетвореною діаграмою Релея. Значення $\operatorname{Re}^2 \varphi$ визначається з формул (1.27) і (1.28).

Наведені рівняння придатні для наближених розрахунків руху сферичних частинок $s \cdot \rho > 1$ мкм під дією сил електричного поля.

В апаратах ЕІТ, в яких використовується коронний розряд (електрофільтри, електросепаратори, тощо), рух частинок визначається не тільки силами електричного поля, але і

гравітаційними, аеродинамічними, електричними та іншими силами.

Розробка і вдосконалення методів управління рухом частинок в електричному полі вимагають вирішення системи нелінійних диференціальних рівнянь. Наближені аналітичні рішення цієї системи рівнянь при русі частинок в одній площині можуть бути отримані тільки в тих випадках, коли тангенціальною складовою сили інерції можна знехтувати.

В загальному випадку проблему вирішив Л. Н. Палкін за допомогою ЕОМ. Їм створені алгоритми розв'язання рівнянь руху частинок у полі уніполярної корони, які дозволяють розраховувати не одну, а сімейство траєкторій руху частинок при різних значеннях технологічних параметрів. Зокрема, знайдено теоретичні розподіли товщини покриття на поверхні виробу складного профілю при електрофарбуванні.

Для побудови кривих розподілу поля і траєкторії руху частинок при електрофарбуванні асиметричної металевої деталі за допомогою чашкового розпилювача використовувалося рівняння руху частинки у векторній формі:

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} + C(\text{Re}) S \frac{\sigma \bar{v}}{2} = q \bar{E}; \quad (1.29)$$

де, m – маса частинки; q – заряд частинки; S – площа поперечного перерізу частинки; σ – густина середовища; $\bar{E}$ – напруженість поля; $\bar{v}$ – швидкість руху частинки; C – коефіцієнт опору середовища, що є функцією числа Рейнольдса, приймаючи, що [15-18, 127-138, 216-267]:

$$C(\text{Re}) = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}}}. \quad (1.30)$$

Формула (1.30) в інтервалі чисел Рейнольдса 1–20 дає відхилення від табличних значень C , що не перевищує – 2%.

Напруженість електричного поля в кожній точці міжелектродного простору при складній конфігурації електродів приблизно визначається за методикою, розробленою В. І. Попковим.

Рівняння (1.30) і (1.29) для сферичних частинок приймають вигляд:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{q}{m} E - \frac{6\pi\eta}{m} \bar{v} - \frac{n\eta\rho}{m} \left(\frac{2\rho}{\zeta}\right)^{2/3} v^{2/3} \bar{v}; \quad (1.31)$$

де η – динамічна в'язкість середовища; ζ – кінематична в'язкість середовища; ρ – радіус частинок.

При електрофарбуванні необхідно, щоб частинки рухалися уздовж силових ліній поля при відсутності тангенціальної складової сили інерції. Ці дві умови виконуються в середовищі міжелектродного проміжку. При цьому диференціальне рівняння (1.29) перетворюється в алгебраїчне ірраціональне рівняння виду:

$$\frac{q}{6\pi\eta\rho v_0} E - \frac{1}{6} \left(\frac{2\rho}{\zeta}\right)^{\frac{2}{3}} v_0^{\frac{2}{3}} - 1 = 0. \quad (1.32)$$

Рівняння (1.32) легко розв'язується за допомогою ЕОМ. Для того щоб перейти від формули (1.29), виведеної для сферичної частинки, до виразу, що визначає величину заряду на циліндричній частинці (волокні), необхідно виключити площу поверхні сфери у виразі (1.29), замінивши її площею поверхні циліндра.

Оскільки, діаметр d волокна в багато разів менший його довжини l , то площа основ циліндрів не враховується. Тому величину заряду волокна можна визначити за формулою:

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 \left(1 + 2\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}\right) Eld \frac{\pi neKt}{4\pi\varepsilon_0 + \pi neKt}. \quad (1.33)$$

Максимальний заряд волокна при підстановці ε_0 визначають за рівнянням:

$$Q_m = 2.7810^{-11} \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \right) Eld. \quad (1.34)$$

Нижче приведені результати розрахунку кінетики утворення заряду на волокні у відповідності з формулою (1.33).

Кінетика заряджання волокна в зовнішній зоні коронного розряду приведена в табл. 1.1

Таблиця 1.1

Тривалість заряджання, с	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	2	3
Максимальний заряд, %	1.61	14.1	62.2	94.3	99.5	99.7	99.8

Максимальний заряд волокна практично досягається за 0.1 с.

При електроантисептуванні швидкість осадження газоподібних, дисперсних твердих і рідких частинок визначається двома процесами: дифузійним і конвективним (незарядженими частинками).

Швидкість осадження незаряджених частинок (молекулярного розміру) на харчові продукти визначають за формулою [35-48, 107-128, 186-197]:

$$v_1 = \frac{DC}{\delta}; \quad (1.35)$$

де, D – коефіцієнт молекулярної дифузії частинок; C – концентрація частинок в оточуючому середовищі; δ – товщина шару частинок біля поверхні обробляемого продукту, де здійснюється молекулярна дифузія.

При осадженні незаряджених частинок на поверхні продукту велике значення має різниця температур середовища і поверхні продукту (термодифузія).

Якщо продуктам, як електроду, надати заряд і на деякій відстані від нього розмістити другий електрод протилежного знаку і при цьому створити значну різницю потенціалів, то заряджені частинки оточуючого середовища отримають направлений рух, і осадження їх на поверхні значно пришвидшиться. Швидкість осадження заряджених частинок:

$$v_2 = \frac{neE}{6\pi\eta\rho}; \quad (1.36)$$

де, e – елементарний електричний заряд; E – напруженість поля; η – в'язкість середовища; ρ – радіус частинки; n – кількість елементарних зарядів.

Швидкість осадження заряджених частинок $v_2 = 8 \cdot 10^{-6}$ см/с.

Рух заряджених частинок з поверхні продуктів всередину їх характеризується формулою:

$$Q_t = D\sigma\Delta t; \quad (1.37)$$

де, Q_t – кількість антисептуючої речовини, що проникає в середину; D – коефіцієнт внутрішньої дифузії; σ – коефіцієнт термодифузії; Δt – різниця температур між поверхнею і внутрішніми шарами продукту.

1.3. Застосування тихого електричного розряду в процесах електронно-іонної технології

Тихий розряд здійснюється між діелектричними електродами, на які подається напруга змінного струму. Цей розряд є однією з найскладніших форм електричних розрядів.

Він характеризується малими інтервалами розряду і відносно високим тиском: важливу роль в його утворенні відіграють діелектричні електроди.

Процеси, що відбуваються на поверхні цих електродів, практично повністю не вивчені ні з точки зору механізму вторинних процесів утворення заряджених частинок, ні з точки зору ролі поверхневої провідності в розвитку розряду.

Встановлено, що тихий розряд має дискретний характер, тобто складається з окремих локальних розрядів, рівномірно розподілених по поверхні електродів. Однак форма і характер локальних розрядів залишаються невивченими. Кінетика хімічних реакцій в тихому розряді може бути основана на теорії, запропонованій [4-6], відповідно до якої, до таких реакцій застосовні закони кінетики звичайних стаціонарних реакцій із заміною часу в кінетичних рівняннях на коефіцієнт питомої енергії. Рівняння кінетики хімічних реакцій, що протікають в електричних розрядах, мають вигляд:

$$X = X_{\text{ст}} \left(1 - e^{-K_1 \frac{U}{v_{\text{об}}}} \right); \quad (1.38)$$

де, X – концентрація продукту реакції; $X_{\text{ст}}$ – стаціонарна концентрація продукту; K_1 – константа швидкості розкладання продукту; U – потужність тихого розряду; $v_{\text{об}}$ – об'ємна швидкість газу.

Кінетикв реакцій в електричних розрядах найкраще вивчена для реакцій:



Ці реакції в основному будуть враховуватися у зв'язку з впливом продуктів синтезу на харчові продукти при їх електроантисептуванні або електростимуляції біологічних процесів.

Синтез озону в тихому розряді є єдиним економічно ефективним способом виробництва цього універсального антисептика. В тихому розряді можна отримати до 16 об. % озону або досягти енергетичного виходу до 250 мг/(кВт·год).

Відомо, що збільшення концентрації озону, що утворюється, неминуче призводить до зниження енергетичного виходу і пропорційно йому продуктивності озонатора. Тому на практиці необхідно прагнути до можливості використання малих концентрацій озону. Крім фактору питомої енергії ефективність синтезу озону залежить від багатьох параметрів.

Встановлено, що зі зниженням температури електродів збільшується вихід озону, а зі збільшенням швидкості потоку газу концентрація озону зменшується. Потужність тихого розряду є одним з головних параметрів, що визначають процес синтезу озону. Основний вплив потужності враховується фактором питомої енергії. При значному збільшенні потужності спостерігається зниження концентрації озону. Це пов'язано з підвищенням температури газу в проміжку розряду, а отже, і з константи розкладання озону.

Вплив величини розрядного проміжку на синтез озону пов'язаний зі збільшенням різниці температур в газі при збільшенні розрядного проміжку, тому вихід озону тим більше, чим менше розрядний проміжок, і практично не залежить від питомої енергії в діапазоні від 10 до 40 (Вт·год)/л. При розрядному проміжку 1 мм концентрація озону складає 10 об. %, а при розрядному проміжку 4 мм концентрація озону при всіх рівних умовах наближається до 5 об. %, тобто зменшується в 2 рази. Проміжні значення значень розрядних проміжків забезпечують відповідний вихід озону в заданих межах.

Зі збільшенням частоти струму збільшується потужність тихого розряду, зі збільшенням потужності розряду спочатку

зростають концентрація і вихід озону, а потім, пройшовши максимум, зменшуються.

При підвищенні тиску в інтервалі розряду до 1,5 МПа (15 кгс/см²) концентрація озону зростає, при тиску нижче 8 кПа (60 мм рт. ст.) утворення озону припиняється.

На синтез озону впливає і концентрація азоту в повітрі. При додаванні азоту до кисню концентрація озону підвищується, це пов'язано з активізуючою дією азоту. При концентрації азоту 80 об. %, тобто близькою за складом до повітря, концентрація озону зменшується. Цим пояснюється більш низька ефективність синтезу озону з повітря в порівнянні з його синтезом з кисню. У літературі є дані про сприятливий вплив добавок вуглекислого газу на синтез озону, при цьому слід враховувати утворення озону з самого вуглекислого газу.

Механізм утворення озону вивчений недостатньо, а іонна теорія не може пояснити ряд явищ, в тому числі вона не узгоджується з сенсibiliзуючим впливом деяких добавок на хімічні реакції в розрядах. Отже, основну роль в утворенні озону в розряді грають не іони, а електрони - збуджені молекули, що утворюються при зіткненні молекул з електродами. При цьому утворення озону може протікати за наступною схемою:



Значну роль у механізмі синтезу відіграють процеси розкладання озону:



$O_3 + O \rightarrow 2O_2$ (реакція взаємодії молекул озону з атомами кисню),



або озонові реакції, при яких не відбувається регенерація атомів кисню.

При тихому розряді вуглекислий газ також дисоціює, і утворюється озон з концентрацією до 1.5 об. %. Механізм дисоціації CO₂ здійснюється збудженням молекул CO₂ при їх зіткненні з електронами, тобто:



Здатність озону легко розкладатися з утворенням кисню робить його одним з найсильніших окислювачів. Під впливом озону відбувається окислення до вищих окислювальних станів. Реакція озону з органічними сполуками представляє великий практичний інтерес. Коли озон вступає в реакцію з ненасиченими органічними речовинами відбувається приєднання озону за місцем розриву подвійного зв'язку і утворення озоніду. Під час гідролізу, відновленні тощо озоніди розкладаються з утворенням альдегідів, кетонів або карбонільних кислот з подальшими реакціями утворення складних ефірів. При взаємодії озону з поліетиленом утворюються альдегіди і кетони.

1.4. Аналіз способів електросепарації зернових матеріалів

Сільське господарство та елеваторна індустрія використовують різноманітні машини для очищення зерна, які функціонують на основі фізико-механічних властивостей насіння культурних рослин і бур'янів.

Розділення зернових сумішей за товщиною і шириною здійснюється на решетах з прямокутними або круглими отворами. Однак, використання таких решет не дозволяє

ефективно відокремити деякі бур'яни. Наприклад, насіння куколю, овсюга, гречішки залишається разом із пшеницею, а насіння костриці ржаного - з житом.

Насіння, довжина якого значно перевищує діаметр отворів, часто проходить через решето, навіть якщо його ширина менша за діаметр отворів. Такі частки рідко приймають вертикальне положення при горизонтальному русі решета. Багато бур'янів мають змінні контури, що перетинають контури культурних рослин, що веде або до поганої якості очищення, або до значних втрат зерна.

Розділення насіння за вагою і парусності виконується за допомогою повітряного потоку. Частина насіння бур'янів має особливості, які впливають на цей процес.

Серед насіння бур'янів, яке має ту ж парусність, що і насіння культурних рослин, потрібен надто сильний повітряний потік для їх відокремлення.

Трієри, що розподіляють зернову суміш за довжиною, стали досить поширеними. Вони ефективні для виділення як довгих, так і коротких домішок. Проте розподіл за довжиною не є ефективним для деяких культур. Наприклад, овсюг не відокремлюється від вівса, костриця - від жита і пшениці, а жито - від споришу, кукуля - від льону. Важко також відокремити ячмінь від вівсюга, клевер і тимофіївку від щавеля.

Найпростіший метод розділення насіння за густиною базується на принципі спливання зерен у розчинах з густиною менше, ніж у насіння. Даний метод на даний час знаходить широкого практичного застосування, не дивлячись на низьку.

Розділення зерна за густиною на рефлекторних сортувальних столах обмежене через вплив численних факторів, які важко врахувати.

Пневматичні сортувальні столи є технічно досконалішими, але найбільш енергозатратними серед всіх механічних машин для очищення зерна.

Відоме також, сортування за формою насіння за

допомогою спіральної сортувальної машини типу "Змійка" засноване на різниці відцентрових сил при обертанні плоских і сферичних зерен на спіральній поверхні. Технічні засоби типу "Гірка" використовують відмінності в властивостях поверхні насіння і його домішок. На "Гірках" очищають насіння гороху, льону, буряка, а іноді і вівса від овсюга.

Однак машини "Змійка" і "Гірка" мають низьку продуктивність (150 і 250 кг/год відповідно).

Електромагнітні сепаратори використовують властивості шорсткої поверхні деяких насіннин або бур'янів, які обволікуються магнітним порошком. Електромагнітні машини складні в конструкції, менш надійні в роботі порівняно з іншими машинами, мають високе споживання електроенергії на одиницю продукції і підходять лише для деяких культур. Наприклад, при роботі електромагнітного сепаратора витрати магнітного порошку на тонну очищеного насіння досягають 20 кг, а електроенергії майже 17-18 кВт-год.

Огляд можливостей існуючих зерноочисних машин показує, що їх технологічні процеси базуються лише на механічних властивостях матеріалу. Це визначає конструкцію та кінематику механічних зерноочисних машин, їх енергетику та можливість автоматичного управління.

Подальший прогрес у відомих методах очищення та розділення зерна зосереджений в основному на вдосконаленні конструкцій існуючих машин, без змін у принципах їх роботи.

Аналіз ефективності сучасних зерноочисних машин дозволяє зробити наступні висновки:

1. Сучасні зерноочисні машини недостатньо універсальні. Очищення від різних типів бур'янів вимагає застосування численних типів обладнання, які різняться за принципом роботи, конструкцією, продуктивністю та енергетичними показниками. Чисельна кількість видів бур'янів не можуть бути відокремлені від культурних рослин, використовуючи лише механічні властивості зернової суміші.

2. На даний момент не існує ідеального комплексу машин для відбору насіннєвого матеріалу за його якісними характеристиками або для покращення цих властивостей через стимуляцію.

Тому існує необхідність у розробці та впровадженні нових, вдосконалених методів і технологій для розділення зернових сумішей, які відповідатимуть сучасним вимогам агрономії та мукомольно-елеваторній промисловості.

Однією з перспективних технологій може бути електронно-іонна технологія. Широке використання електричної енергії в агропромисловості створює можливості для її застосування в технологічних операціях під час обробки зерна як для насіннєвих, так і для продовольчих цілей.

1.5. Фізичні основи поділу зернових матеріалів в електричному полі

Усі методи розділення зернових матеріалів, включаючи очищення і сортування зерна, ґрунтуються на розбіжностях у фізичних та електричних властивостях частинок суміші. Ці відмінності дозволяють здійснювати ефективне розділення.

Механічні методи поділу базуються на розбіжностях у розмірах, густині та стані поверхні часток. В електричних методах використовуються відмінності в електричній провідності, діелектричній проникності, поляризованості та здатності накопичувати і віддавати заряд. Важливо відзначити, що електричні властивості матеріалу тісно пов'язані з його механічними характеристиками і біологічною структурою.

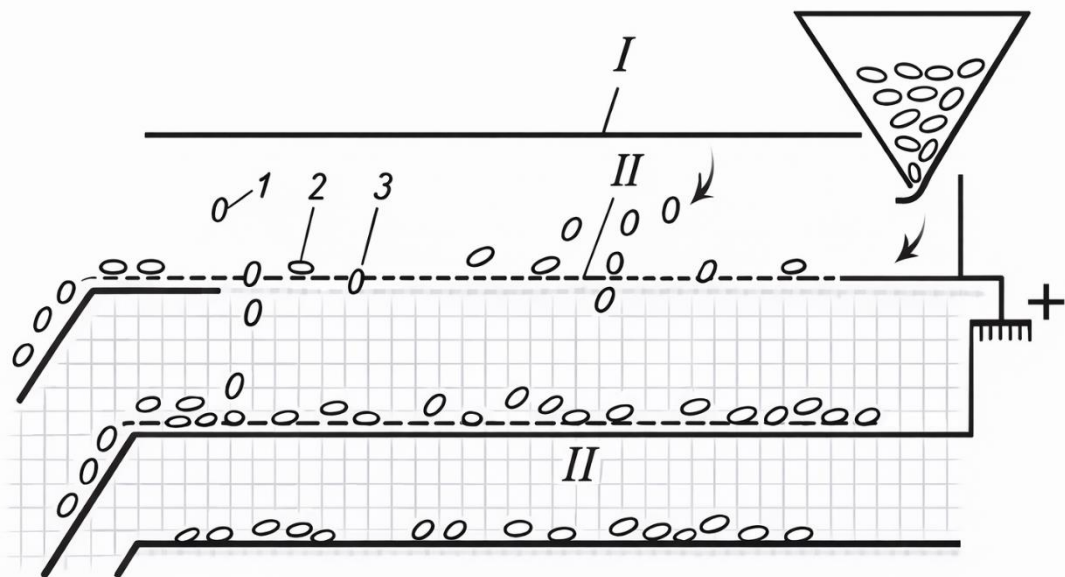
З електростатики відомо, що частинки з однаковим зарядом відштовхуються одна від одної, а з протилежним зарядом притягуються. Взаємодія заряджених частинок залежить від їх форми, розмірів та відстані між ними. Навколо

заряджених частинок утворюється електричне поле, яке необхідне для розділення матеріалів за електричними властивостями. Це поле може створюватися як самими частинками, так і зовнішніми джерелами енергії.

Особливим випадком електричного поля є електростатичне поле, в якому немає об'ємних зарядів. Якщо одну з обкладок конденсатора заземлити, а до іншої підключити напругу, то між обкладками виникає однорідне електростатичне поле. Зрозуміло, що незаряджені частки не переміщуються в такому полі. Проте під впливом поля відбувається перерасподіл зарядів на частинках, як вільних, так і зв'язаних. Від'ємні заряди переміщуються до позитивного електроду, через що сторона частинки, що звернена до негативного електроду, стає позитивно зарядженою. Це перерозподіл зарядів на витягнутих частках створює обертовий момент, який намагається вирівняти частинку уздовж силових ліній поля.

Якщо замінити нижню частину системи на решето і забезпечити вертикальне переміщення всього агрегату, це дозволить зернам краще орієнтуватися в розрідженому шарі під впливом електричного поля. Це підвищить ймовірність проходження зерна через решета з круглими отворами в порівнянні з традиційними механічними зерноочисними машинами.

Застосування електростатичного поля у поєднанні з різницями в електричних та механічних властивостях частинок зернової суміші відкриває можливість створення нової технології для очищення зерна за допомогою решіт. Основний принцип розділення зерна за допомогою решіт і електростатичного поля показано на рис. 1.4.



I - плоский електрод; II - заземлене решето (електрод);
 1 - зерно, яке орієнтується в електричному полі; 2 - зерно, що не набуває орієнтації в полі; 3 - орієнтоване зерно, яке пройшло через круглий отвір, діаметр якого відповідає ширині зерна.

Рис. 1.4. Схема розділення зерна за допомогою решета з електростатичним полем

Електростатичні зерноочисні машини з решітним робочим органом використовують електричні принципи для очищення зерна. Коли нейтральне діелектричне тіло потрапляє в електричне поле, заряд всередині нього перерозподіляється, що викликає обертовий момент, спрямований на те, щоб довга вісь тіла орієнтувалася уздовж ліній електричного поля. Це призводить до зміни енергії поля в об'ємі тіла.

Формула для визначення зміни енергії поля в об'ємі діелектрика виглядає так:

$$W = - \frac{E^2 V \varepsilon_0 K_\epsilon}{2\pi}; \quad (1.47)$$

де: E - напруженість електричного поля (В/м); V - об'єм діелектрика (м^3); K_ϵ - коефіцієнт, що враховує зменшення енергії поля у об'ємі, заповненому поляризованим

діелектричним еліпсоїдом обертання, залежно від кута γ нахилу великої осі еліпсоїда до площини електродів; ε_0 - відносна діелектрична проникність діелектрика.

Мінус у формулі вказує на те, що енергія зовнішнього поля зменшується при введенні діелектричного еліпсоїда. Коефіцієнт K_ϵ змінюється в залежності від кута нахилу великої осі еліпсоїда обертання до площини електродів, що створюють поле рис. 1.5. Цю функцію можна побачити на відповідних графіках для різних значень K_ϵ та ε_0 [34, 45].

Аналіз залежності $K_\epsilon = f(\gamma)$ показує, що при збільшенні кута нахилу до 90° коефіцієнт K_ϵ досягає максимальних значень. Найбільше зменшення енергії поля спостерігається при кутах нахилу близько $\gamma = 90^\circ$.

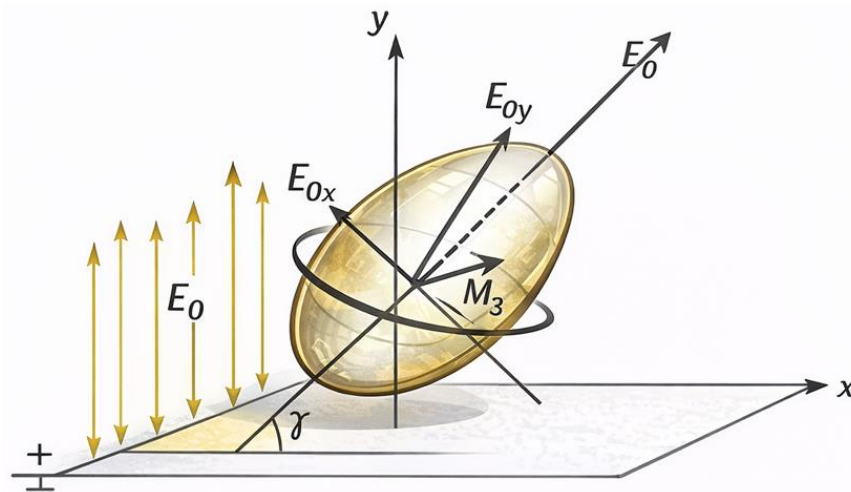


Рис. 1.5. Діелектричний обертовий еліпсоїд у однорідному електростатичному полі.

Таким чином, діелектричний еліпсоїд, розміщений в електричному полі, прагне орієнтувати свою довгу вісь уздовж силових ліній. Поворот тіла викликаний обертовим моментом, що виникає завдяки електричному полю.

При цьому відбувається виконання елементарної роботи:

$$dA = M_z d\gamma; \quad (1.48)$$

Зменшення потенційної енергії поля в обсязі зерна компенсується внаслідок його дії.

$$-dW = dA = M_z d\gamma; \quad (1.49)$$

Звідки

$$M_z = -\frac{dW}{d\gamma}; \quad (1.50)$$

Математичні розрахунки дозволяють отримати аналітичну формулу для електричного моменту поля (Н м) [34]:

$$M_z = \frac{E^2 V \varepsilon_0 K_\epsilon}{8\pi} \sin(2\gamma); \quad (1.51)$$

Залежність (1.51) показує функцію K_ϵ у залежності від діелектричної проникності та демонструє, що електричний момент M_z збільшується зі зростанням діелектричної проникності. Він досягає максимальних значень при кутах $\gamma = 45^\circ$ та $\gamma = 135^\circ$ а нульових – при кутах $\gamma = 0^\circ$, $\gamma = 90^\circ$ та $\gamma = 180^\circ$.

Аналіз показує, що зерна з низькими значеннями K_ϵ підлягають більшому обертovому моменту в електричному полі при сталих значеннях E та ε_0 , ніж зерна з високими значеннями E (пшениця, ячмінь). Це вказує на те, що при заданій напрузі електричного поля зерна з меншим K_ϵ можуть краще орієнтуватися в полі, ніж зерна з більшим K_ϵ . Подібний ефект також спостерігається, коли зерна в потоці відрізняються не тільки коефіцієнтами сферичності K , але й діелектричними проникностями ε_0 , які суттєво впливають на електричний момент. Це дозволяє здійснювати розділення часток зернової суміші через решета під впливом електростатичного поля, при цьому решета можуть мати коливальні рухи.

Якщо електричне поле має неоднорідний характер, це може викликати переміщення незаряджених часток в зонах з найбільшою напругою через пондеромоторну силу [56], що

виникає в результаті поляризації часток. Поляризація призводить до утворення вільних і зв'язаних зарядів різних знаків на протилежних сторонах частинок. Оскільки частка має певні розміри, а поле є неоднорідним, сили, що впливають на заряди різних знаків, варіюються.

Внаслідок цього частка в середовищі буде рухатися у напрямку до областей з більшою концентрацією силових ліній, при цьому сила, що діє на частку, пропорційна градієнту напруги, який характеризує неоднорідність поля.

Вплив електричного поля на заряджену частку визначається її зарядом Q та інтенсивністю електричного поля E . Цю залежність можна виразити через формулу:

$$F = QE; \quad (1.52)$$

Найпростіший метод заряджання частинок - це електризація тертям. Коли різні тіла здійснюють тертя одне об одне, вони набирають заряди однакової величини, але протилежного знаку. Хоча процес електризації тертям добре відомий, його повна природа ще не досліджена, і це питання активно вивчається.

При переміщенні сипучих матеріалів через певний шлях частинки, які здійснювали тертя одне об одне і об стінки контейнера, отримували певний заряд. Якщо частинки суміші набирають заряди різних знаків, їх можна розділити за допомогою трибозарядних сепараторів. В таких системах частинки потрапляють у простір між двома електродами: позитивно заряджені частинки притягуються до негативного електрода, а негативно заряджені - до позитивного. Цей метод добре підходить для очищення дрібного насіння, таких як тимофіївка, клевер або зернові культури, від легких домішок тощо.

Встановлено, що величина заряду, отриманого внаслідок тертя, зростає з підвищенням швидкості

переміщення частинок і площі їхніх поверхонь. Величина заряду залежить від матеріалу та стану поверхонь тертя, а також від щільності контакту. Проте трибозарядні сепаратори не отримали широкого застосування через невелику величину заряду тертя.

Іншим методом є заряджання частинок безпосередньо через контакт з зарядженим металевим електродом. Частинки, що контактують з електродом, отримують заряд того ж знаку, що й електрод. Частинки з високою електропровідністю отримують більше заряду і відштовхуються від електрода, тоді як частинки з низькою електропровідністю залишаються незарядженими і не змінюють напрямку в сепараторі. Цей метод може використовуватися для розділення зерна за рівнем вологості.

Найбільш ефективний метод заряджання частинок здійснюється за допомогою коронного розряду. Коронний розряд виникає в електричному полі навколо тонкого провідника при збільшенні напруги, якщо відстань між електродами значно більша за радіус одного з них. Коронний розряд можна вважати неповним пробоем газу, при якому на коронуючому електроді утворюються різні заряджені частинки, включаючи вільні електрони.

Під час коронного розряду виникають заряджені частинки, отримані в результаті розпаду молекул повітря на позитивні та негативні іони. Коли електрод з негативним потенціалом з'єднаний з джерелом струму, позитивні іони осідають на цьому електроді, тоді як негативні іони рухаються до заземленого позитивного електрода, заповнюючи простір між електродами зарядженими частинками. При позитивному коронному розряді простір між електродами заповнюється позитивними іонами.

Дослідження доводять, що для електродів малого діаметра коронний розряд з'являється при меншому напруженні, коли електрод має негативний потенціал, ніж при

позитивному потенціалі. Іншими словами, поріг напруження для негативної корони є нижчим. Тому в практичному використанні переважають установки з негативною короною. Позитивні іони мають меншу мобільність і менше підлягають впливу змін атмосферних умов. Іони, що рухаються до заземленого електрода, заряджають частинки, які потрапляють у міжелектродний простір, змушуючи їх також рухатися до осаджувального (заземленого) електрода під дією електричного поля та отриманого заряду.

Використання коронних полів для сепарації сипучих сумішей відкриває нові можливості для розробки безрешітних сепараторів для зерна. Найпростішим варіантом є трубчастий електросепаратор, в якому частинки проходять через поле корони. Такий сепаратор оснащений двома електродами: осаджувальний електрод має форму циліндра, а коронний електрод - дріт, натягнутий уздовж осі циліндра.

У цьому сепараторі ефективність розділення частинок залежить від складної комбінації таких факторів, як густина частинок, їх діелектрична проникність або провідність, а також їх форма і розмір.

На рис. 1.6. наведена діаграма сил, які діють на частинку з умов вільного падіння в полі коронного розряду.

Рівняння руху вздовж осі z можна записати в наступному вигляді:

$$Z = v_{0z}t + \frac{gt^2}{2}; \quad (1.53)$$

де: g – прискорення вільного падіння; t – час руху; v_{0z} – складова початкової швидкості вздовж осі z .

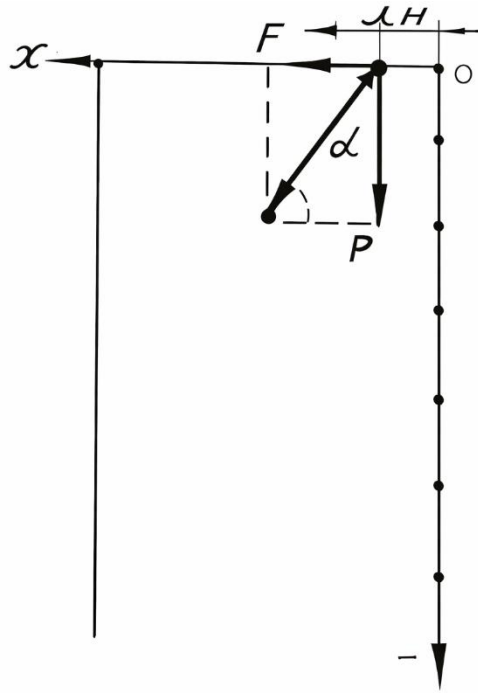


Рис. 1.6. Діаграма сил, які діють на частинку з умов вільного падіння в полі коронного розряду

Рівняння руху вздовж осі x (за умови миттєвого зарядження частинки) буде мати наступний вигляд [78]:

$$\frac{md^2x}{dt^2} = F = QE = \frac{E^2 \varepsilon_0 \theta}{4k_f}; \quad (1.54)$$

де: m – маса частинки; F – сила поля; E – напруженість поля; Q – заряд частинки; k_f – коефіцієнт форми; θ – добуток осей еліпсоїда, розташованого в площині, перпендикулярній напрямку напруженості поля.

Розв'язуючи рівняння (1.54), отримаємо:

$$x = x_p + v_{0x}t + \frac{E^2 \varepsilon_0 \theta t^2}{8mk_f}; \quad (1.55)$$

де: x_p – початкова координата частинки (вимірювана від коронуючого електрода).

Підставивши масу як добуток густини частинки та її об'єму, а також врахувавши, що еліпсоїд у електричному полі

прагне орієнтуватися довгою віссю уздовж поля, ми отримаємо:

$$x = x_p + v_{0x}t + \frac{3E^2\varepsilon_0\theta t^2}{4\pi\gamma a k_f}; \quad (1.56)$$

де: a – довжина більшої вісі еліпсоїда.

Виключаючи час t з рівнянь (1.53) та (1.56), отримаємо рівняння траєкторії частинки:

$$x = x_p + \left(1,5 \frac{E^2\varepsilon_0}{\pi\gamma a k_f} \cdot \frac{v_{0z}^2}{g^2} - \frac{v_{0x}v_{0z}}{g}\right) - \\ - \left(1,5 \frac{E^2\varepsilon_0}{\pi\gamma a k_f} \cdot \frac{v_{0z}^2}{g^2} - \frac{v_{0x}v_{0z}}{g}\right) \sqrt{1 + \frac{2gz}{v_{0z}^2}} + 1,5 \frac{E^2\varepsilon_0}{\pi\gamma a k_f g} \cdot z; \quad (1.57)$$

Розглянемо частковий випадок, з умови:

$$v_{0x} = 0; v_{0z} = 0; \quad (1.58)$$

Тоді отримаємо:

$$x = x_p + 1,5 \frac{E^2\varepsilon_0}{\pi\gamma a k_f g} \cdot z; \quad (1.59)$$

Якщо початкова швидкість відсутня, то траєкторія частинки буде прямою лінією, а її нахил до вертикалі розраховується за формулою:

$$\tan \alpha = 1,5 \frac{E^2\varepsilon_0}{\pi\gamma a k_f g} = \frac{E}{\rho g}; \quad (1.60)$$

де E – сила електричного поля; ρ – густина частинки; g – прискорення вільного падіння.

У цьому випадку шлях частинки визначається її

характеристиками та інтенсивністю поля. Для даного рівня напруженості поля тангенс кута нахилу траєкторії еліпсоїда, який довгою віссю розташований уздовж поля, можна визначити за наведеним рівнянням.

Як видно з рівняння (1.60), деякий параметр C пропорційний значенню:

$$C = \frac{1}{\gamma a k_f}; \quad (1.61)$$

Цей параметр служить критерієм для розділення частинок несферичної форми.

Для оцінки можливості розділення двох культур потрібно знати, в яких межах змінюється їхній C . Якщо ці діапазони не перетинаються, можливе повне розділення культур. Якщо ж вони частково перекриваються, розділення буде лише частковим. Критерій розділення є числовим вираженням комбінації фізико-механічних і електричних властивостей, що визначає можливість розділення матеріалів в електричному полі. Це специфічна електрична характеристика частинки, що описує її поведінку в полі коронного розряду, подібно до того, як розмір зерна визначає його розділення за шириною чи товщиною.

Коронний сепаратор камерного типу відрізняється від трубчатого своїм дизайном і розташуванням електродів. Тут осадовий електрод виконаний у формі площини, а коронуючий електрод складається з дротів, розташованих у площині, паралельній до осадового електрода.

Розподіл сил, які діють на частинки, і основна схема камерного коронного сепаратора зображені на рис. 1.7.

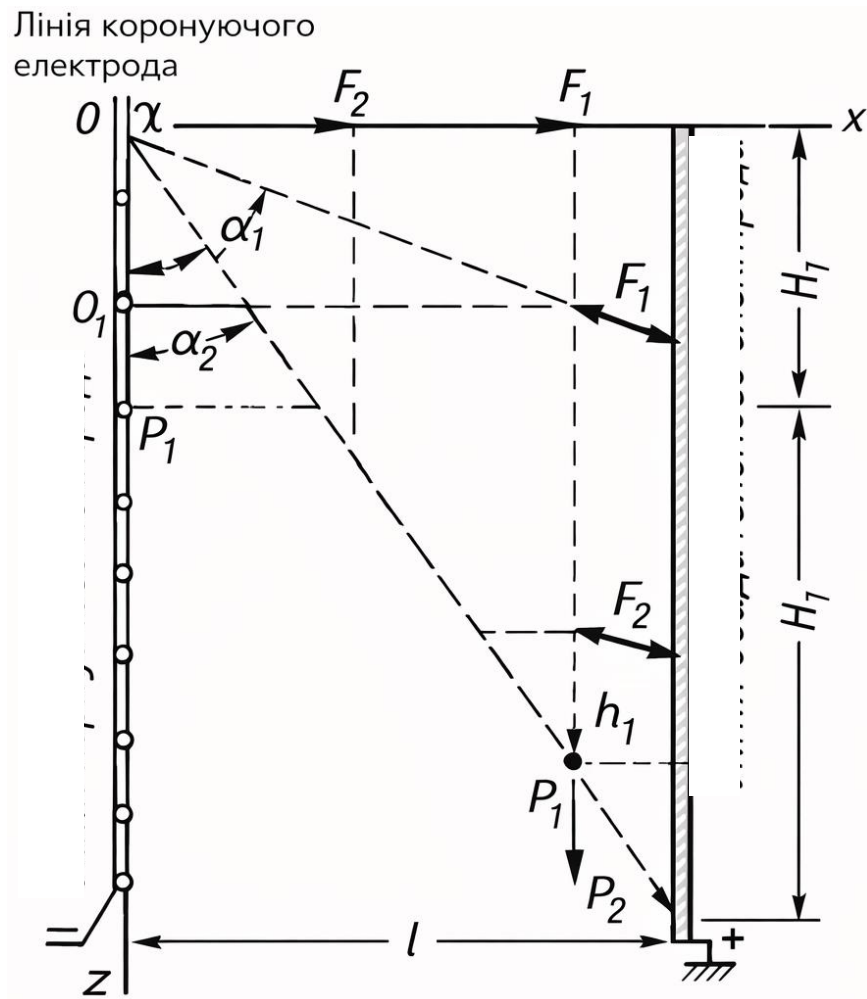


Рис. 1.7. Принципова схема камерного коронного сепаратора: O - початкова координата; O_1 - точка початку траєкторії частинки; x_n - початкова координата частинки; H - відстань між електродами; P_1 і P_2 - вага першої та наступної частинки; F_1 і F_2 - сила поля, що діє на першу та наступну частинку; h_1 і h_2 - шлях, пройдений частинками по вертикалі; l - відстань між розділюваними частинками.

У цьому випадку рух частинок зернової суміші, що отримали заряд у міжелектродному просторі поля коронного розряду, визначається переважно взаємодією сил притягання $F = QE$ та сили тяжіння $P = mg$. На рис. 1.7. також схематично показані траєкторії частинок під час їх розділення. Частинка в міжелектродному просторі під дією сили тяжіння P падає вниз і одночасно переміщується до осадового електрода під дією

кулонівської сили F .

При певній величині та формі поля траєкторія частинки залежить виключно від її властивостей; в залежності від цих властивостей частинка потрапить вище або нижче на електрод, що створює можливість розділення матеріалу в електричному полі.

В електрокоронному сепараторі барабанного типу, схематично зображеному на рис. 1.8, з іншим виглядом коронуючого та осаджувального електродів, частинка, що потрапляє на обертний заземлений електрод-барабан з нульовою швидкістю, отримує заряд від іонів, що рухаються від коронуючого електрода до барабана. На частинку діють чотири активні сили: сила поля F_1 , сила взаємодії зарядженої частинки з поверхнею барабана F_2 , сила тяжіння P і відцентрова сила P_V .

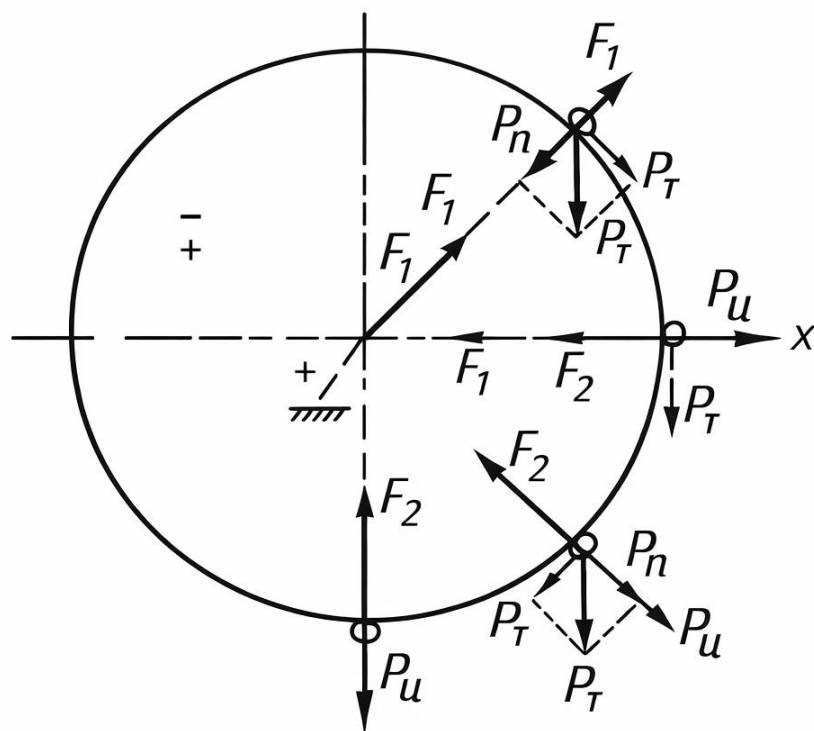


Рис. 1.8. Принципова схема електрокоронного сепаратора

Перші дві сили притискають частинку до поверхні барабана, відцентрова сила відштовхує її, а сила тяжіння у верхній частині півциліндра притискає частинку до барабана, в нижній - відриває від нього. В залежності від сукупного впливу сил, деякі частинки одразу відштовхуються від поверхні барабана, інші - тільки в нижній частині півциліндра, треті - поза зоною дії поля, і, нарешті, решта частинок так міцно прилипають до барабана, що можуть бути відокремлені від нього лише спеціальними щітками, розташованими на протилежному боці від коронуючого електрода.

Частинки, що мають більший розмір та вагу (густину), з кращою провідністю (наприклад, вологість), відриваються від поверхні барабана швидше.

Критерій розділення для машин барабанного типу визначається по-іншому. У той час як для камерного сепаратора важливо знати траєкторію руху зерна, у випадку з барабанними машинами ключовим параметром є кут, під яким зерно відривається від поверхні барабана.

Умова відриву частинки, яка знаходиться на барабані в зоні коронного розряду, можна виразити (рис. 1.8.) таким рівнянням:

$$F_1 + F_2 + P \cos \alpha = P_V; \quad (1.62)$$

де F_1 - сила електричного поля; P - сила тяжіння; P_V - відцентрова сила, що діє на частинку під час обертання барабана; F_2 - сила відображення заряду частинки на поверхні; α - кут відхилення частинки на барабані відносно вертикалі.

Порушення цієї умови призводить до відриву частинки від барабана-електрода. Кут відриву можна визначити з рівняння (1.62):

$$\cos \alpha = \frac{P_V - F_1 + F_2}{P}; \quad (1.62)$$

Розглянемо значення кожної з сил, що входять у формулу (1.62).

Відцентрова сила:

$$P_V = \frac{m \cdot V_z^2}{R_b}; \quad (1.63)$$

де V_z - швидкість руху зерна на барабані; R_b - радіус барабана.

Силу електричного поля можна знайти з виразу (1.54), враховуючи, що на барабанному сепараторі частинка розташовується малою віссю вздовж поля. Крім того, слід врахувати, що одночасно з зарядженою частинкою відбувається її розрядка на землю, що веде до зменшення заряду. Тоді:

$$F_1 = \frac{E^2 \varepsilon_0 a b}{4 k_f} \mu[R]; \quad (1.64)$$

де $\mu[R]$ - показник розрядки, що залежить від ємності частинки та її контактної і власної опору; чим більше цей опір, тим краще утримується заряд, тим більше значення $\mu[R]$ (за умови $R \rightarrow \infty$; $\mu[R] = 1$, за умови $R = 0$; $\mu[R] = 0$; a, b - відповідно довжина великої та малої осі еліпсоїда.

Сила відображення заряду F_2 - це сила взаємодії заряду частинки з заземленим електродом. Вона визначається, як:

$$F_2 = \frac{Q^2}{4 \rho_0^2 \varepsilon_0}; \quad (1.65)$$

де ρ_0 - відстань від електрода до центру заряду частинки.

Оскільки $\rho_0 = 0,25b$, то:

$$F_2 = \frac{E^2 \varepsilon_0 a^2 b}{4k_f^2} \mu^2[R]; \quad (1.66)$$

Підставляючи вирази (1.63), (1.64) та (1.66) у формулу (1.62), отримуємо:

$$\cos \alpha = \frac{\frac{m \cdot V_z^2}{R_b} - \frac{E^2 \varepsilon_0 a b}{4k_f} \mu[R] + \frac{E^2 \varepsilon_0 a^2 b}{4k_f^2} \mu^2[R]}{mg}; \quad (1.67)$$

де:

$$m = \frac{\pi a b^2 \gamma}{6} = \frac{\pi a^3 k^2 \gamma}{6} = \frac{\pi a^2 b k \gamma}{6}; \quad (1.68)$$

де $k = \frac{b}{a}$ - коефіцієнт сферичності.

Отримуємо остаточний вираз:

$$\cos \alpha = \frac{V_z^2}{R_b g} - 1,5 \frac{E^2 \varepsilon_0 \mu[R]}{\pi g b \gamma k_f} \left[1 + \frac{\mu[R]}{k_f k} \right]; \quad (1.69)$$

За заданих швидкості руху частинок, радіусі барабана і напруженості поля, тобто факторах, що не залежать від властивостей частинок, можливість розділення сипучої суміші визначається залежністю:

$$C_{\rho b} = \frac{\mu[R]}{b \gamma k_f} \left[1 + \frac{\mu[R]}{k_f k} \right]; \quad (1.70)$$

Якщо величина $C_{\rho b}$ для різних частинок різна, вони можуть бути розділені на барабанному сепараторі.

1.6. Висновки до розділу.

Проведені дослідження дозволяють зробити попередні висновки:

1. На поведінку частинок у полі коронного розряду впливають не лише їх розмір, густина та проникність, але й форма частинок, а на барабанному сепараторі - також провідність частинок.

2. Відмінності у формі частинок мають суттєвий вплив на розділення, покращуючи його в одних випадках і погіршуючи в інших; за певних умов може бути досягнуто розділення частинок за формою.

3. При великих значеннях діелектричної проникності коефіцієнт форми, за умов розташування довгої осі вздовж поля, майже пропорційний коефіцієнту сферичності $ak_f = ak = b$, що дозволяє визначити процес розділення частинок в камерному сепараторі за величиною $b\gamma$, що може бути використано для сортування насіння.

4. Коли довга вісь частинок орієнтована перпендикулярно до електричного поля, коефіцієнт форми незначно змінюється від сферичності частинок $b k_f = b$. Це дозволяє стверджувати, що розділення частинок з подібною формою на барабанному сепараторі визначається величиною $C_{\rho b}$, що підтверджує можливість застосування такого обладнання для сортування.

5. Для частинок з близькими формами, барабанний сепаратор повинен забезпечити ефективне розділення частинок за формою.

6. За високої вологості матеріалу розділення на барабанному сепараторі здебільшого визначається рівнем вологості, що свідчить про придатність цього типу машини для розділення зерна за вологістю.

7. Вологість зерна має менший вплив на процес розділення у камерному сепараторі.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ДІЇ

2.1. Математичний опис процесів електричної сепарації зерна

Лавровим Й.М. здійснено теоретичні дослідження поведінки еліпсоїда обертання в вертикальному повітряному потоці в умовах нахилоного електростатичного поля. Розроблено рівняння руху еліпсоїда обертання в системі координат, що нерухомо зв'язана. Враховуючи, що зерно, апроксимоване еліпсоїдом обертання, перебуває в повітряному потоці, для нього визначені сили та моменти, що діють.

Для опису руху центру мас еліпсоїда необхідно використовувати систему з трьох рівнянь Ейлера, що характеризують обертальний рух навколо нерухомої точки (центру мас). До цих рівнянь додаються три рівняння для опису руху центру мас відносно нерухомої системи координат. Після спрощення залишаються два рівняння, які описують обертальний рух, та два рівняння для руху центру мас відносно нерухомої осі координат.

$$I_{y1} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \cos(\gamma) - I_{z1} \frac{d\gamma}{dt} \frac{d\alpha}{dt} \sin(\gamma) = M_y. \quad (2.1)$$

$$I_{z1} \frac{d^2 \gamma}{dt^2} \cos(\gamma) + I_{y1} \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \sin(\gamma) \cos(\gamma) = M_z. \quad (2.2)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} \cos(\gamma) = \pm F_k - F_c. \quad (2.3)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} \cos(\gamma) = F_a - F_T. \quad (2.4)$$

На частинку обертання, що перебуває в повітряному потоці під дією однорідного електричного поля, впливають такі сили та моменти:

$$F_c = c_{op} S \frac{\rho v^2}{2}. \quad (2.5)$$

де F_c – сила опору повітряного середовища; c_{op} - коефіцієнт аеродинамічного опору; S - середнє значення Міделєвого перерізу зерна; ρ - щільність повітря; v - швидкість повітряного потоку.

Сила тяжіння:

$$F_T = mg. \quad (2.6)$$

Архімедова сила:

$$F_a = \rho V_t g. \quad (2.7)$$

де V_t – обєм тіла.

Кулонова сила:

$$F_k = qE. \quad (2.8)$$

де q – заряд тіла; E – напруженість електростатичного поля.

Опрокидувальний момент, який діє на еліпсоїд обертання з боку повітряного потоку:

$$M_O = [k_2 - k_1] V_t \frac{\rho v^2}{2} \sin(2\gamma). \quad (2.9)$$

де k_2, k_1 - поперечний і поздовжній коефіцієнти інерції тіла обертання, що рухається в повітрі; γ - кут між напрямком руху та великою віссю еліпсоїда обертання.

Опрокидувальний момент спрямований таким чином, щоб зорієнтувати еліпсоїд обертання великою віссю поперек напрямку руху повітряного потоку.

Момент електричного поля:

$$M_E = V_t \frac{e_0 E^2}{2} F_f \sin(2\gamma). \quad (2.10)$$

де e_0 - електрична стала; F_f - діелектричний коефіцієнт форми.

Момент опору середовища:

$$M_c = c_{op} S l \frac{\rho v^2}{2}. \quad (2.11)$$

де l - довжина тіла.

Знаючи величини сил і моментів, а також користуючись рівняннями (2.1) та (2.2), можна визначити час орієнтації еліпсоїда обертання та його траєкторію руху. Час орієнтації насіння є важливим параметром при їх сепарації.

Розв'язання системи рівнянь (2.1) дозволяє отримати:

$$I \frac{d^2\gamma}{dt^2} = [M_O + M_E] \sin(2\gamma). \quad (2.12)$$

Звідси, після відповідних перетворень, було отримано:

$$t = \sqrt{\frac{I}{2[M_O + M_E]}} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\sqrt{a^2 (\cos \theta_0)^2 + (\sin \theta_0)^2 - (\sin \theta)^2}}. \quad (2.13)$$

Позначимо $t_o = \sqrt{\frac{1}{2}} \int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\sqrt{a^2(\cos \theta_0)^2 + (\sin \theta_0)^2 - (\sin \theta)^2}}$ – критерій часу орієнтації.

Час орієнтації зерна з коефіцієнтом сферичності $K = \frac{b}{a} = 0,5$ майже вдвічі більший, ніж у тіла з коефіцієнтом сферичності $K = 0,2$, тут b, a - мала й велика осі еліпсоїда обертання.

При потраплянні еліпсоїда обертання в однорідне електростатичне поле у зваженому стані, під впливом опрокидувального та електричного моментів, еліпсоїд орієнтується вздовж силових ліній поля, тобто встановлюється великою віссю перпендикулярно до електродів, що утворюють поле.

Під дією електростатичного поля вільні заряди на поверхні тіла перерозподіляються. На діаметрально протилежних поверхнях частинки накопичуються рівні за величиною заряди різних знаків.

Якщо радіуси кривизни діаметрально протилежних поверхонь неоднакові, то густина зарядів на них розподіляється обернено пропорційно до квадратів радіусів кривизни:

$$\sigma_1 R_1^2 = \sigma_2 R_2^2. \quad (2.14)$$

де σ – щільність заряду.

Зі збільшенням напруженості поля можуть виникнути умови, за яких частина еліпсоїда обертання з меншим радіусом кривизни почне коронувати, тобто втрачати заряд, і вся частинка загалом набуде заряду.

Подальше зростання напруженості поля викличе коронування частини еліпсоїда обертання з більшим радіусом кривизни. Заряд почне зменшуватися і на цій частині, причому, оскільки радіус кривизни більшої коронуючої частини більший,

то і втрачання заряду відбуватиметься швидше, що призведе до загального зменшення заряду частинки.

Процес заряджання та розряджання описується наступними рівняннями:

$$q_z = q_1 - \left[E_n^{max} - \frac{E_0 \varepsilon_r}{1 + (\varepsilon_r - 1) F_f} \right] 4\pi R_1^2 \varepsilon_0. \quad (2.15)$$

де $E_n^{max} = E_s + E_c$ - максимальна напруженість на поверхні частинки при коронуванні; E_s - напруженість електричного поля на поверхні частинки, створена зв'язаними зарядами; E_c - напруженість електричного поля на поверхні частинки, викликана вільними зарядами; ε_r - відносна діелектрична проникність частинки.

Вираз, який описує процес заряджання еліпсоїда обертання з різними радіусами кривизни діаметрально протилежних поверхонь $R_1 < R_2$, можна представити таким чином:

$$q = \left[[E_{n2}^{max} - k_2 E_0] R_2^2 - [E_{n1}^{max} - k_1 E_0] R_1^2 \right] 4\pi \varepsilon_0 \quad (2.16)$$

$$\text{де } k = \frac{\varepsilon_r}{1 + (\varepsilon_r - 1) F_f}.$$

Максимальний заряд обмежується вологістю зернових частинок, вологістю навколишнього середовища та різницею радіусів кривизни діаметрально протилежних коронуючих поверхонь. Слід зазначити, що спочатку заряд збільшується, але при досягненні певної напруженості зовнішнього поля починає зменшуватись.

Більша величина позитивного заряду частинки порівняно з негативним пояснюється різною рухливістю позитивних і негативних зарядів. Потрапляючи в однорідне електростатичне поле, частинка заряджається і під дією поля

прямує до одного з електродів, залежно від знака заряду. Якщо електрод покритий діелектриком, обміну вільними зарядами не відбувається, і частинка залишається біля електрода в скоординованому положенні. Швидкість її руху зростає, оскільки повітряному потоку необхідно подолати додаткову силу тертя в місці контакту частинки з електродом.

Отже розглянуто сили, що діють на частинку, яка знаходиться в повітряному потоці біля вертикальної діелектричної стінки електропневмоканалу за наявності накладеного електростатичного поля. Визначено електричну силу, необхідну для утримання частинки біля вертикальної стінки в рівноважному стані для трьох різних положень:

$$1. \gamma = 90 - \Delta\gamma = \frac{\pi}{2} - \Delta\gamma \quad (2.17)$$

$$2. \gamma = 90 = \frac{\pi}{2} \quad (2.18)$$

$$3. \gamma = 90 + \Delta\gamma = \frac{\pi}{2} + \Delta\gamma \quad (2.19)$$

де γ - кут між великою віссю частинки та електродом.

Виведені вирази для електричної сили:

Для першого положення:

$$F_E = \frac{2[M_E - M_O + aF_T \sin \gamma \left(\frac{1-p}{2(1+p)} \right)]}{a(\cos \gamma + f \sin \gamma)} \quad (2.20)$$

Для другого положення:

$$F_E = \frac{F_T \frac{1-p}{(1+p)}}{f} \quad (2.21)$$

Для третього положення:

$$F_E = \frac{2[M_E + M_O + aF_T \sin \gamma \left(\frac{1-p}{2(1+p)}\right)]}{a(\cos \gamma - f \sin \gamma)} \quad (2.22)$$

де p - коефіцієнт симетрії центру тяжіння частинки; f - коефіцієнт тертя.

Для розрахунку залежностей, що визначають процес сепарації насіння повітряним потоком під дією електростатичного поля, необхідно вивчити аеродинамічні властивості як основної культури, так і її забруднювача.

Розподіл зарядів запропоновано визначати оптико-метричним методом. Швидкість вітання вимірювалася на спеціальному пристрої, який складався з пневмоканалу з вентилятором, торсійних ваг, мікроманометра з трубкою Піто-Прандтля. Швидкість повітряного потоку регулювалася в межах від 0 до 16 м/с шляхом зміни частоти обертання двигуна вентилятора. Швидкість вітання визначалася при фіксованій орієнтації частинок (за показаннями торсійних ваг та подальшим вимірюванням швидкості повітряного потоку). Таким же методом визначався коефіцієнт аеродинамічного опору, а також виявлена його залежність від швидкості повітряного потоку.

Метод визначення заряду базується на відхиленні зарядженого тіла в однорідному електростатичному полі. Розроблений пристрій дозволив розширити діапазон вимірювання напруженості поля та величини заряду. Пристрій представляє собою систему з діелектричного матеріалу, на якій жорстко закріплені електроди, що створюють однорідне електростатичне поле. Система закріплена на горизонтальній осі. Частинка, що підлягає дослідженню, підвішується на нитці, яка також кріпиться до горизонтальної осі маятника. У процесі заряджання частинка відхиляється від вертикалі. Система з електродами також відхиляється за допомогою важеля або спеціального пристрою, щоб частинка завжди залишалася в середині між електродного простору.

За результатами наукових досліджень Дадаком В.О., встановлено, що для вертикального пневмосепараційного каналу з накладеним електричним полем можна створити однорідне електричне поле, що вплине на компоненти дрібнонасінневих сумішей. Дадак В.О. провів теоретичне та експериментальне дослідження сили впливу на частинки під час сепарації і обґрунтував параметри та режими роботи пневмоелектросепаратора, а також створив умови для розробки його удосконаленої конструкції.

Для визначення закономірностей поведінки частинок дрібнонасінневої суміші еліпсоїдної форми проведено математичне моделювання їх переміщення під дією повітряного потоку, гравітаційної та електростатичної сил (рис. 2.1).

Взаємодія частинки еліпсоїдної форми з повітряним потоком значною мірою залежить від площі поперечного перерізу S_m , яка визначає проекцію площі частинки на площину, перпендикулярну до напрямку повітряного потоку. Цю площу обчислюють за формулою:

$$S_m = \pi a \sqrt{(a \sin \varphi)^2 + (b \cos \varphi)^2}. \quad (2.23)$$

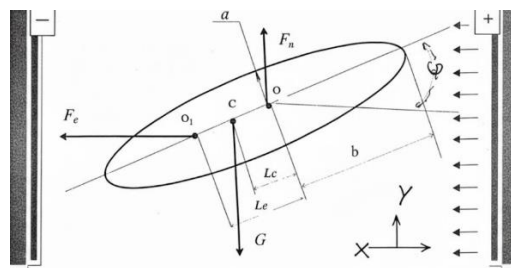


Рис. 2.1. Схема дії сил на насінину еліпсоїдної форми в пневмоелектричному каналі: F_e - електростатична сила; F_T - сила тяжіння; F_p - сила повітряного потоку; C - центр маси частинки; O_1 - центр заряду; O - геометричний центр; L_c - відстань від геометричного центру O до центру маси C ; L_e - відстань від геометричного центру O до центру заряду O_1 ; a, b - півосі еліпсоїдної частинки; φ - кут між піввіссю b і горизонталлю.

Значення S_m значною мірою визначається впливом електростатичного поля, яке створюється між пластинами пневмоелектричного каналу і орієнтує частинки довшою віссю уздовж силових ліній. Насінини культурних рослин і бур'янів мають різні електричні властивості та по-різному реагують на електричне поле. Це призводить до того, що в каналі насінини основної культури і бур'янів орієнтуються під різними кутами, змінюючи площу поперечного перерізу та по-різному сприймають силу повітряного потоку. Таким чином, пневмоелектросепарування дозволяє ефективно розділити насінини культурних рослин і бур'янів, особливо еліпсоїдної форми.

Для оптимізації розділення важливо дослідити геометричні координати частинок насінневої суміші відносно нерухомої системи координат XOY , які описують їх переміщення в каналі. Для цього розроблено диференціальні рівняння руху центру мас насінини, враховуючи її зіткнення з стінкою каналу та обертальний рух:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x_c}{dt^2} = -F_e - K S_{m2} \frac{dx_c}{dt} \\ m \frac{d^2 y_c}{dt^2} = -mg + K S_m \left[V_p - \frac{dy_c}{dt} \right] \\ I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = K S_{m1} L_e \cos \varphi \left[V_p - \frac{dy_c}{dt} \right] - F_e L_e \sin \varphi - \frac{d\varphi}{dt} K H + K S_{m2} L_e \sin \varphi \frac{dx_c}{dt} \end{cases} \quad (2.24)$$

де m - маса частинки; K - коефіцієнт опору середовища; V_p - швидкість повітряного потоку; S_{m2} - проекція площі міделевого перерізу на вісь x ; $S_{m1} = S_m$.

$$H = 2a \int_{-b+L_e}^{b+L_e} y^2 \sqrt{1 - \frac{(y-L_e)^2}{b^2}} dy = \frac{\pi ab}{4} (4L_e^2 + b^2) \quad (2.25)$$

Інтегрування цих рівнянь дозволяє визначити координати траєкторій частинок у будь-який момент часу, що допомагає проаналізувати їх можливість розділення.

Ефективність сепарування забезпечується різницею в траєкторіях руху між якісними насінинами, насінням без зародків і бур'янами. Це необхідно для визначення оптимальних умов роботи сепаратора, зокрема, використання повітряного потоку та електростатичного поля.

Для вивчення поведінки частинок еліпсоїдної форми Дадаком В.О. розроблено моделі, що відображають реальні насінини:

Якісні насінини культур $L_e > L_c > 0$:

$$M_1 = f(m_1, a_1, b_1, L_{e1}, L_{c1}, V_p, F_e) \quad (2.26)$$

Неякісні насінини (без зародка) $L_e = L_c = 0$:

$$M_2 = f(m_2, a_2, b_2, L_{e2}, L_{c2}, V_p, F_e) \quad (2.27)$$

Якісні насінини бур'яну $L_e > L_c > 0$:

$$M_3 = f(m_3, a_3, b_3, L_{e3}, L_{c3}, V_p, F_e) \quad (2.28)$$

Якісні насінини іншої культури:

$$M_4 = f(m_3, a_3, b_3, L_{e3}, L_{c3}, V_p, F_e) \quad (2.29)$$

Для частинок насінневої суміші, що моделюються як M_2 , всі сили, що на них діють, проходять через геометричний центр O отже, $L_e = L_c = 0$. Тому диференціальні рівняння руху мають вигляд:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x_c}{dt^2} = -F_e - K S_{m2} \frac{dx_c}{dt} \\ m \frac{d^2 y_c}{dt^2} = -mg + K S_m \left[V_p - \frac{dy_c}{dt} \right] \\ I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -\frac{d\varphi}{dt} K H_1 \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\text{де } H_1 = \frac{\pi a b^3}{4}.$$

Розв'язавши ці рівняння числовим методом у середовищі MATLAB, були визначені координати траєкторій руху частинок та вивчено вплив регульованих факторів: швидкості повітряного потоку та сили електростатичного поля.

Аналіз траєкторій показав, що при $V_p = 4,5$ м/с частинки всіх чотирьох груп рухаються вниз, а при $V_p = 5,5$ м/с - переміщуються вгору, що ускладнює їх розділення.

Напруженість електричного поля між електропровідними пластинами вертикального каналу значно впливає на траєкторію руху частинок. Вона визначає величину електростатичної сили, що є ключовим фактором у процесі сепарування. Збільшення електричної сили дозволяє краще враховувати біологічний стан частинок та їх поверхневий стан, що розширює функціональні можливості пневмоелектросепараторів. Це дає змогу ефективніше відокремлювати важковідокремлювані домішки та неякісні насінини з суміші посівного матеріалу культурних рослин.

Для оцінки якості сепарації насіння вертикальним повітряним потоком з урахуванням електростатичного поля використовуються моделі безконтактної сепарації запропановані Паніним Б.Д. Ці моделі дозволяють аналізувати технічну здійсненність процесів без взаємодії між насінням і визначити ознаки розділення окремих насінин. Виходячи з варіаційних кривих, можна визначити технологічні параметри

якості сепарації та об'єднати їх в єдину методику прогнозування.

В узагальненій моделі безконтактної сепарації пропонується описувати поведінку будь-якої довільно взятої еліпсоїдної частинки за допомогою взаємопов'язаних рівнянь:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} = R(\gamma) \sin \theta - F_k(g) \sin \beta \\ \frac{dq}{dt} = e \int^S \bar{f}(e) dS \\ I \frac{d^2\gamma}{dt^2} = M_a(\gamma) \pm M_z(\varphi) \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\begin{cases} m \frac{d^2y}{dt^2} = R(\gamma) \cos \theta + F_k(g) \cos \beta - G \\ \frac{dq}{dt} = e \int^S \bar{f}(e) dS \\ I \frac{d^2\gamma}{dt^2} = M_a(\gamma) \pm M_z(\varphi) \end{cases} \quad (2.32)$$

де $R(\gamma)$ - сила аеродинамічного опору; $F_k(g)$ - кулонівська сила; G - сила тяжіння; $M_a(\gamma)$ - аеродинамічний обертовий момент; $M_z(\varphi)$ - електростатичний обертовий момент; θ - кут між віссю y і вектором швидкості повітряного потоку $\bar{V}$; γ - кут між вектором $\bar{V}$ і довгою віссю насінини b ; β - кут між вектором напруженості електростатичного поля $\bar{E}$ і віссю a ; φ - кут між вектором $\bar{E}$ і довгою віссю b насіння; m - маса насіння; I - момент інерції насіння; q - поточне значення заряду насіння; e - заряд іона; $\bar{f}(e)$ - вектор потоку іонів; S - площа поверхні насіння; x, y - поточні значення декартової системи координат.

Ці рівняння дозволяють прогнозувати поведінку частинок у процесі сепарації та оцінювати вплив різних параметрів системи, таких як швидкість повітряного потоку та сила електростатичного поля.

При відповідних початкових умовах системи цих рівнянь дозволяють описати різні процеси, в тому числі і раніше не

вивчені, такі як безконтактна сепарація. Аналіз показав, що в деяких випадках моделі відомих процесів сепарації повніше враховують реальні фізичні умови.

В узагальненій моделі безконтактної сепарації прийнято допущення про відсутність взаємодії частинок під дією електричного поля. Фізичні умови відсутності такої взаємодії досліджені на прикладі двох незаряджених проводячих сфер, поміщених в однорідне електростатичне поле. Показано, що в області, прилеглої до електродів, приваблювання незаряджених частинок обумовлене силою диполь-дипольної взаємодії з подальшим іскровим розрядом. В області, де відстань між сферами і електродом (h) перевищує три радіуси сфер ($3R$), взаємодія обумовлена іскровим розрядом, що призводить до перекриття всього міжелектродного проміжку. При цьому із збільшенням відстані перший механізм взаємодії переходить у другий, а напруженість зовнішнього поля, необхідна для взаємодії, швидко зростає і в кінцевому підсумку прагне до пробивної напруженості повітря.

Оскільки пробивна міцність повітря є природним обмеженням усіх електростатичних процесів, фізичною умовою відсутності електростатичної взаємодії для незаряджених частинок є перехід від диполь-дипольного механізму взаємодії до іскрового. Це умова була записана за допомогою відомого виразу. З методологічної точки зору це є межею застосовності детермінованих моделей процесів безконтактної сепарації, а з практичної - умовою забезпечення електростатичної орієнтації насіння без порушення процесу сепарації вертикальним повітряним потоком.

Для реального втілення даної умови було необхідно, щоб подаючий пристрій при незмінній продуктивності електросепаратора забезпечував подачу насіння в повітряний канал не щільним шаром (де $h < 5R$), а в диспергованому стані (де $h > 5R$).

Динамічна модель процесу сепарації вертикальним повітряним потоком з електростатичною орієнтацією насіння отримана як частковий випадок узагальненої моделі за таких початкових умов: $\theta = 0$; $\beta = \frac{\pi}{2}$; $\varphi = \frac{\pi}{2} + \gamma$; $E \neq 0$; $e = 0$; $q = 0$; $V \approx W$:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \\ I \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = M_a(\gamma) \pm M_z(\varphi) \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} m \frac{d^2 y}{dt^2} = R(\gamma) - G \\ I \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = M_a(\gamma) \pm M_z(\varphi) \end{cases} \quad (2.34)$$

В рамках цієї моделі була знайдена швидкість обертання як показник здатності до сепарації одиночного насіння. Функціональна залежність цього показника від параметрів сепарації представлена у наступному вигляді:

$$W = \sqrt{\frac{2mg}{C_x \rho_V S_m}} = \sqrt{\frac{4g}{3C_x \rho_V} \cdot \frac{ac\rho_n}{c-(a-c)(\sin \gamma)^2}} \quad (2.35)$$

$$W = \sqrt{\frac{4gac\rho_n}{3C_x \rho_V \left\{ c-(a-c)\sin^2 \left[\gamma_0 \pm \frac{\omega_0}{2}\tau + \frac{k \sin 2\gamma}{6}\tau^2 \pm \dots \right] \right\}}} \quad (2.36)$$

де g – прискорення сили тяжіння; ρ_V – щільність повітря; C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору насіння; S_m – площа міделєвого перерізу насіння; a - довжина насіння; c - товщина насіння; ρ_n - щільність (густина) насіння; γ_0, ω_0 - кут орієнтації насіння і його кутова швидкість при введенні в канал; k - функція, що залежить від швидкості повітряного потоку і напруженості електростатичного поля; τ - час перебування насіння в зоні розділення.

Дослідженням процесу сепарації в електростатичному полі також приділив багато уваги Міщенко В.І. Ним були проведені теоретичні дослідження процесу розділення частинок, зокрема, коли вони потрапляють на циліндричний барабан і піддаються дії електростатичного поля.

Встановлено, що при внесенні незарядженого діелектричного тіла в електростатичне поле зміна запасу енергії поля в об'ємі тіла визначається виразом:

$$W = \frac{1-\varepsilon_r}{8\pi} \int_V \bar{E} \bar{E}_0 dV \quad (2.37)$$

де W - зміна енергії поля в об'ємі тіла; $\bar{E}$ - результуюча напруженість поля всередині діелектрика; $\bar{E}_0$ - напруженість поля вільного простору; V - об'єм діелектричного тіла; ε_r - відносна діелектрична проникність.

Тіло має стійку рівновагу при мінімумі потенційної енергії, тому, коли його довільним чином поміщають в електростатичне поле, воно прагне розташуватися довгою віссю вздовж поля.

Коли частинки стикаються з одним із електродів, як у нашому випадку, вони набувають електричного заряду, через що на них, окрім механічних, діють також електричні сили.

Для складання диференціальних рівнянь, які описують рух насіння в електростатичному полі, розглянуто векторні діаграми сил, що діють на насіння в різних точках їхнього знаходження. Якщо складова сили (рис. 2.2) тяжіння P_2 перевищує, або дорівнює силі тертя F_T , пластинки починають ковзати по поверхні барабана та відриваються від нього за умови $P_1 \leq F_{\text{ц}} + F_e + F_z$; де P_1 – нормальна складова ваги насінини; $F_{\text{ц}}$ – відцентрова сила; F_e - сила електричного поля; F_z – сила дзеркального відображення.

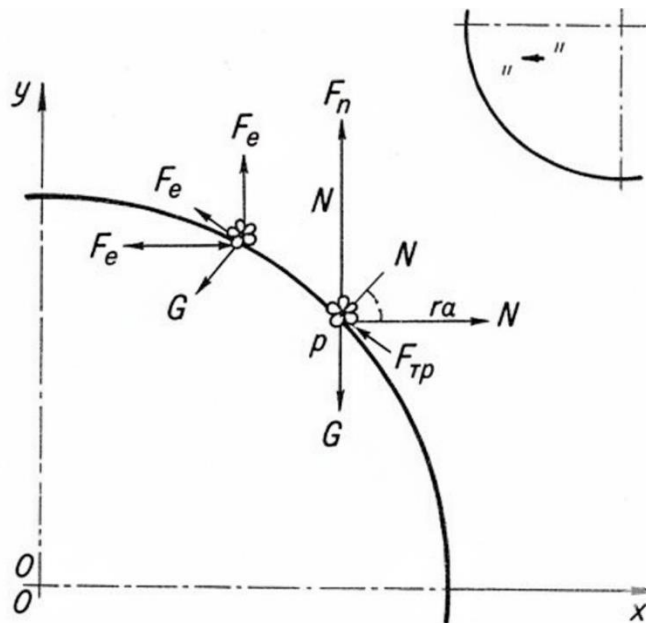


Рис. 2.2. Векторна діаграма сил, що діють на насіння при їх знаходженні на поверхні барабана та в електростатичному полі

Виходячи з наведених умов, проведені теоретичні дослідження, і отримані аналітичні вирази для визначення величин кутів ковзання і відриву насіння від поверхні барабана.

Подальший рух насіння відбувається в електростатичному полі, де основними силами, що діють на насіння, є сила електростатичного поля F_e і сила ваги P .

Сили, викликані поляризацією насіння, нерівномірністю електростатичного поля і опором повітря, порівняно з основними силами, незначні. Тому траєкторія руху насіння в електростатичному полі визначається співвідношенням сили електростатичного поля F_e до сили ваги P .

За відсутності електростатичного поля між барабанами-електродами, траєкторія руху насіння визначається рівнянням:

$$y = y_0 \pm \left[x \tan \alpha_0 + \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2(\alpha_0)} \right]. \quad (2.38)$$

де v_0 - початкова швидкість; y_0 - початкова координата; α_0 - кут вкидання насіння відносно горизонту.

При русі насіння в електростатичному полі, диференціальні рівняння по осях координат набувають вигляду:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_e \cos(\bar{F}_e, \bar{x}) + G \cos(\bar{G}, \bar{x}). \quad (2.39)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = F_e \cos(\bar{F}_e, \bar{y}) + G \cos(\bar{G}, \bar{y}). \quad (2.40)$$

де $(\bar{F}_e, \bar{x})$ - кут між напрямком сили електричного поля $\bar{F}_e$ і віссю $\bar{x}$; $(\bar{G}, \bar{x})$ – кут між напрямком сили ваги $\bar{G}$ і віссю $\bar{x}$; $(\bar{F}_e, \bar{y})$ - кут між напрямком сили електричного поля $\bar{F}_e$ і віссю $\bar{y}$; $(\bar{G}, \bar{y})$ – кут між напрямком сили ваги $\bar{G}$ і віссю $\bar{y}$.

У результаті розв'язання диференціальних рівнянь було отримано загальний вираз для траєкторії руху насіння.

$$y = y_0 - \left(\frac{F_e}{m} \cos \alpha - g \right) \left[\frac{\vartheta_{0x}^2}{\left[\frac{F_e}{m} \sin \alpha \right]^2} - \frac{\vartheta_{0x}^2 \sqrt{1 + 2 \frac{F_e x \sin \alpha}{m \vartheta_{0x}^2}}}{\left[\frac{F_e}{m} \sin \alpha \right]^2} + \frac{x}{\frac{F_e}{m} \sin \alpha} \right] + \frac{\vartheta_{0x} \vartheta_{0y}}{\frac{F_e}{m} \sin \alpha} \left[1 - \sqrt{1 + 2 \frac{F_e x \sin \alpha}{m \vartheta_{0x}^2}} \right]. \quad (2.41)$$

де m - маса окремого насіння; α - кут відриву насіння від поверхні барабана; g - прискорення вільного падіння.

Розглянемо окремий випадок, коли початкова швидкість насіння дорівнює нулю, тобто $\vartheta_{0x} = 0$; $\vartheta_{0y} = 0$:

Тоді рівняння (2.41) приймає наступний вигляд:

$$y = y_0 - \left[\cot \alpha + \frac{mg}{F_e \sin \alpha} \right] \quad (2.42)$$

З отриманого рівняння (2.42) видно, що при відсутності початкової швидкості руху насіння, траєкторія являє собою пряму лінію в межах поля постійної напруженості, тангенс кута нахилу якої дорівнює:

$$\tan \beta = \left[\cot \alpha + \frac{mg}{F_e \sin \alpha} \right] \quad (2.43)$$

Таким чином, у результаті проведених досліджень Міщенком В.І. були отримані основні аналітичні залежності, які характеризують сутність процесу розділення насіння в електростатичному полі.

Для отримання аналітичних виразів електричних зарядів зернової частинки в робочій зоні електросепаратора Сахневич В.Г. визначає межі ділянок, де частинка зазнає різних режимів руху: переносної швидкості, кочення та ковзання по поверхні барабана-електрода. Зона, де частинка рухається з переносною швидкістю, визначається кутом α , за якого частинка, після подачі на поверхню барабана електросепаратора, залишається нерухомою до початку кочення. У цій зоні на частинку впливають сили: G , N , $F_{вц}$, F_{α} , F_3 (рис. 2.3.).



Рис. 2.3. Схематичний рух зернової частинки в різних кінематичних зонах електросепаратора по поверхні барабана: 1 - ізолюваний електрод; 2 - заземлений барабан-електрод; 3 - зернова частинка. N - сила реакції опори; $F_{вц1}, F_{вц2}$ -

відцентрові сили переносної та відносної швидкості; F_3, F_T - сили зчеплення та тертя кочення; $F_\alpha, F_\beta, F_\varphi$ - результуючі електричні сили на межах зон переносної швидкості, кочення та ковзання частинки; G - сила тяжіння; V_p, V_V - переносна та відносна швидкості частинки; V_a - абсолютна швидкість частинки; α, β, φ - кути меж зон переносної швидкості, кочення та ковзання частинки; E напруженість електростатичного поля електродної системи.

Автором встановлені умови для початку кочення частинки відповідають нерівностям:

$$M_K(G_2, F_3) \geq M_O(N, G_1) \quad (2.44)$$

$$G_2 r \geq N \delta \quad (2.45)$$

$$\frac{G_2}{N} \geq \frac{\delta}{r} = \tan \alpha = K_0 \quad (2.46)$$

де r - радіус частинки; δ - коефіцієнт тертя кочення; M_K - момент кочення частинки; M_O - момент опору частинки при коченні; G_1 і G_2 - складові сили тяжіння; K_0 - коефіцієнт, що характеризує фізико-механічні властивості частинки.

З рівняння (2.46) отримано тригонометричне рівняння:

$$K_0 \cos \alpha - \sin \alpha = \frac{K_0}{G} (F_{\text{вц}1} + F_\alpha) \quad (2.47)$$

В результаті розв'язання рівняння (2.47) отримано вираз для визначення межі кута зони переносної швидкості (α):

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left[\sqrt{\frac{1 + K_0^2 - (K_0 G^{-1} (F_{\text{вц}1} + F_\alpha))^2}{(K_0 + K_0 G^{-1} (F_{\text{вц}1} + F_\alpha))^2}} - \frac{1}{K_0 + K_0 G^{-1} (F_{\text{вц}1} + F_\alpha)} \right] \quad (2.48)$$

Електрична сила F_α , що діє на зернову частинку в зоні кута α , визначається за формулою:

$$F_{\alpha} = G(\cos \alpha - K_0 \sin \alpha) - \frac{mV_p^2}{R} \quad (2.49)$$

Межа зони кочення характеризується кутом β , при якому частинка, починаючи рух по поверхні барабана і до моменту ковзання, має також відносну швидкість. В зоні кочення на частинку діють сили: G , N , $F_{\text{вц}}$, F_{α} , F_3 .

Швидкість зерна V_Z в зоні кочення дорівнює:

$$V_Z = V_p + V_V \quad (2.50)$$

де V_p - переносна швидкість зерна; V_V - відносна швидкість зерна.

Диференціальні рівняння руху частинки в зоні кочення, як зазначає автор, мають наступний вигляд:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -F_3 + G \sin \beta. \quad (2.51)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = N - G \cos \beta + F_{\text{вц}2} + F_{\text{вц}1} - F_{\beta}. \quad (2.52)$$

$$I_z \frac{d^2\psi}{dt^2} = \sum M_i = -F_3 r. \quad (2.53)$$

$$\frac{d^2 E_A}{dt^2} = -r \frac{d^2 \psi}{dt^2}. \quad (2.54)$$

де I_z - момент інерції частинки відносно осі; M_i - кінематичний момент інерції частинки; ψ - кут повороту частинки; F_3 - сила зчеплення; x, y - координати центра ваги частинки.

Момент інерції частинки відносно осі z визначається за формулою:

$$I_z = \frac{mr^2}{2}. \quad (2.55)$$

На підставі рівнянь руху отримано вирази для визначення прискорення a_c та відносної швидкості V_V частинки, а також сили її зчеплення F_3 на межі зони кочення:

$$a_c = \frac{2}{3} g \sin \beta. \quad (2.56)$$

$$V_V = \sqrt{\frac{2}{3} g R \sin \beta}. \quad (2.57)$$

$$F_3 = \frac{1}{3} G \sin \beta. \quad (2.58)$$

Кут межі зони кочення β визначено з умов динаміки руху частинки по поверхні барабана-електросепаратора:

$$F_3 \leq F_3^{max} = N f_3. \quad (2.59)$$

Або

$$\frac{1}{3} G \sin \beta \leq \left[G \cos \beta - \left(\frac{m}{R} V_p^2 + \frac{m}{R} V_V^2 \right) + F_\beta \right] f_3. \quad (2.60)$$

де f_3 - коефіцієнт зчеплення частинки з поверхнею барабана.

З нерівності (2.60) автором отримано тригонометричне рівняння:

$$\frac{3f_3}{1-2f_3} \cos \beta - \sin \beta = \frac{3f_3}{1-2f_3} \left[\frac{V_p^2}{Rg} - \frac{F_\beta}{mR} \right] \quad (2.61)$$

$$\text{де } K = \frac{3f_3}{1-2f_3}.$$

Розв'язання цього тригонометричного рівняння дозволило отримати вираз для визначення кута, який окреслює межу зони кочення (β):

$$\beta = 2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{1+K^2-K^2\left(\frac{V_p^2}{Rg}-\frac{F_\beta}{mR}\right)^2}{\left[K+K\left(\frac{V_p^2}{Rg}-\frac{F_\beta}{mR}\right)\right]^2}} - \left[K+K\left(\frac{V_p^2}{Rg}-\frac{F_\beta}{mR}\right)\right]^{-1}. \quad (2.62)$$

Електрична сила (F_β), що впливає на зернову частинку на межі зони кочення, згідно з рівнянням (2.61) визначається так:

$$F_\beta = \frac{GR(K \cos \beta - \sin \beta) - K m V_p^2}{1 - 2f_3} \quad (2.63)$$

Подальший рух зернової частинки по поверхні барабана супроводжується її переходом із зони кочення в зону сковзання. На межі цієї зони, що відповідає моменту відриву частинки від поверхні барабана, на неї діють сили: G , $F_{\text{вц}2}$, F_φ .

Основне рівняння динаміки для системи сил, що діють на частинку, має вигляд:

$$m\bar{a} = \bar{G} + \bar{F}_{\text{вц}2} + \bar{F}_\varphi \quad (2.64)$$

Рівняння руху частинки прийме вигляд:

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = G \sin \varphi \quad (2.65)$$

$$m \frac{V_3}{R} = G \cos \varphi + F_\varphi \quad (2.66)$$

З рівнянь (2.65) та (2.66) отримані вирази для визначення кута межі зони сковзання частинки (φ) та її швидкості (V_3) у момент відриву від поверхні барабана:

$$\varphi = \cos^{-1} \left[\frac{1}{3g} \left(\frac{V_p^2}{R} + \frac{F_\varphi}{m} \right) + \frac{2}{3} \right]. \quad (2.67)$$

$$V_3 = \sqrt{V_p^2 + 2Rg(1 - \cos \alpha)} \quad (2.68)$$

Електрична сила (F_φ), яка діє на частинку на межі зони ковзання, визначається з рівняння (2.67):

$$F_\varphi = G(3 \cos \varphi - 2) - \frac{mV_p^2}{R} \quad (2.69)$$

Абсолютну величину електричного заряду зернової частинки на межах зон - переносної швидкості (Q_α), кочення (Q_β) та ковзання (Q_φ) визначали за відповідними виразами:

$$|Q_\alpha| = \frac{|F_\alpha|}{E} \quad (2.70)$$

$$|Q_\beta| = \frac{|F_\beta|}{E} \quad (2.71)$$

$$|Q_\varphi| = \frac{|F_\varphi|}{E} \quad (2.72)$$

Автором були проведені розрахунки кутів зон переносної швидкості, кочення та ковзання частинок на поверхні барабана, а також встановлені їх взаємозв'язки. Згідно з аналізом отриманих залежностей, збільшення переносної швидкості зернової частинки від 0,1 до 0,6 м/с при обертанні заземленого барабана електрода з частотою від 2 до 40 об/хв призводить до зміни її кутових переміщень для граничних зон переносної швидкості від 8° до 6°, кочення - від 12,5° до 9,3°, а також ковзання - від 48,2° до 41,5°. Встановлено, що існує взаємозв'язок між кутовими переміщеннями частинки в зоні ковзання та зонами переносної швидкості і кочення.

За умов підвищення швидкості обертання барабана зростають відцентрові сили, що діють на частинку, через що зменшуються її коефіцієнти тертя спокою і кочення, а відповідно і кутові переміщення. За допомогою отриманих виразів, були встановлені залежності зарядки зернової

частинки в електричному полі електросепаратора від кутів граничних зон переносної швидкості, кочення та сковзання на поверхні барабана. Їх аналіз демонструє, що із збільшенням меж зон кутового переміщення частинки для переносної швидкості від $5,9^\circ$ до 8° , її електричний заряд зростає від $6,4 \times 10^{-10}$ Кл до $16,8 \times 10^{-10}$ Кл, що пояснюється довшим перебуванням частинки в електричному полі.

Ковалишиним С.Й. проведено дослідження процесів сепарування насіння в електричному полі на похилій коливальній площині та представлені відповідні результати дослідження, щодо розділення насіння на сепарувальній площині. Вони включають математичне моделювання поведінки частинок, які є компонентами насінневої суміші, під час електровібросепарування. Основна увага приділяється визначенню основних характеристик цього процесу, зокрема, геометричних координат траєкторії частинок відносно рухомої ($x_r o_r y_r z_r$) та нерухомої ($x o y z$) систем відліку.

Відносний рух частинок описується диференціальними рівняннями, вихідні умови для яких ілюструються на рис. 2.4.

Оскільки розглядається безперервний рух $-\frac{d^2 z_r}{dt^2} = 0$.

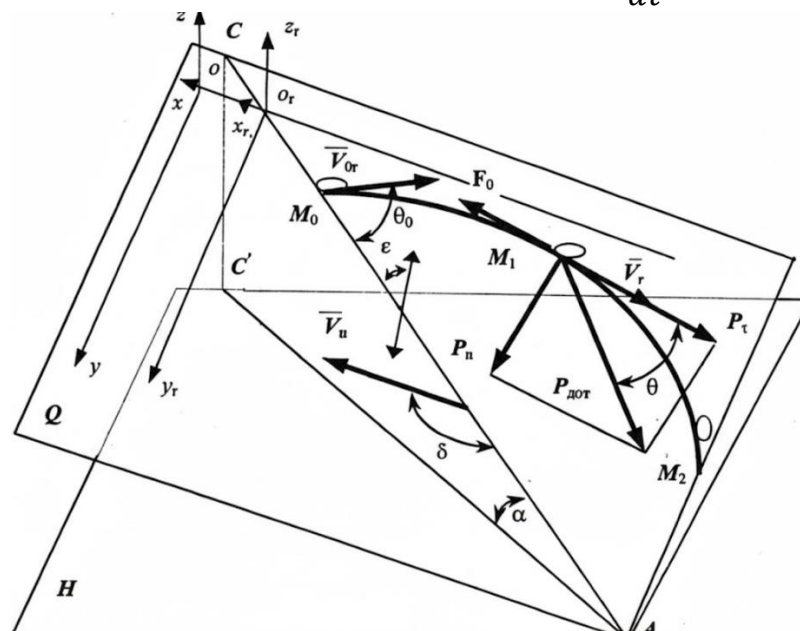


Рис. 2.4 Траєкторія відносного руху насінини на похилій площині, яка перебуває в електричному полі

Так на рис. 2.4. наведені наступні позначення: Q - Похила площина; H - Горизонтальна площина; AC - Лінія найбільшого нахилу площини Q ; $M_0M_1M_2$ - Траєкторія руху частинки; $\bar{V}_\Pi$ - Напрямок плоскопаралельного переміщення площини (Q); $\bar{V}_r$ - Вектор миттєвої відносної швидкості; $x \ o \ y \ z$ - Нерухома система координат; $x_r \ o_r \ y_r \ z_r$ - Рухома система координат (жорстко з'єднана з площиною Q); δ - Кут між лінією найбільшого нахилу і напрямком руху площини Q ; θ - Миттєвий кут між дотичною до траєкторії та лінією нахилу; α - Кут нахилу площини до горизонту; ε - Кут спрямованості коливань.

Частинка, яка перебуває в електричному полі на похилій коливальній площині, зазнає дії наступних сил: тяжіння (P), додаткової електричної сили ($F_{\text{ел}}$), сили тертя (F_0), сили інерції (I) і нормальної реакції (N).

Узагальнена модель, яка описує поведінку будь-якої частинки насінневої суміші під час електровібросепарування на зазначеній площині, за умови плоскопаралельного руху по нормалі до напрямку коливань, задається системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_r}{dt} = V_r [\cos \theta \cos \delta - \sin \theta \sin \delta] \\ \frac{dy_r}{dt} = V_r [\sin \theta \cos \delta + \cos \theta \sin \delta] \\ \frac{dV_r}{dt} = g \sin \alpha \cos \theta - f g (\cos \alpha + k_0) + A \omega^2 \sin[\omega t + \varphi_0] \\ \frac{d\theta}{dt} = - \frac{g \sin \alpha \sin \theta}{V_r} \end{array} \right. \quad (2.73)$$

де x_r, y_r - Координати відносного руху частинки; V_r - Миттєва відносна швидкість частинки; A - Амплітуда коливань; ω - кругова частота коливань; g - Прискорення вільного падіння; f - коефіцієнт тертя; $k_0 = \frac{F_{\text{ел}}}{P}$ - кратність електричної сили; φ_0 - початкова фаза коливань; δ - Кут між лінією

найбільшого нахилу та напрямом руху площини ; θ - миттєвий кут між дотичною до траєкторії та лінією найбільшого нахилу; α - кут нахилу площини до горизонту.

Розв'язання системи диференціальних рівнянь (2.73) дало остаточні вирази для визначення координат точки у рухомій системі координат, яка рухається паралельно нерухомій системі з постійною швидкістю V_{Π} :

$$x_r = x_{0r} + [d_1(T) + d_1(T_0)] \cos \delta - [d_2(T) + d_2(T_0)] \sin \delta \quad (2.74)$$

$$y_r = y_{0r} + [d_1(T) - d_1(T_0)] \sin \delta + [d_2(T) + d_2(T_0)] \cos \delta \quad (2.75)$$

де d_1, d_2 - скорочені записи розв'язків інтегралів, $\int V_r \cos \theta dt$ та $\int V_r \sin \theta dt$; $T(T_0) = \tan\left(\frac{\theta, \theta_0}{2}\right)$ - підстановка при інтегруванні; x_{0r}, y_{0r} - початкові координати частинки на площині.

Траєкторія руху частинки у параметричній формі відносно нерухомої системи координат x о y записується як:

$$x = V_{\Pi} + x_r \quad (2.76)$$

$$y = y_r \quad (2.77)$$

де V_{Π} - швидкість плоскопаралельного руху площини.

З використанням отриманих рівнянь, які описують безвідривний рух частинок у електричному полі на похилій коливальній площині, та застосуванням методу числового розв'язку Рунге-Кутта, було розроблено алгоритм і програму для розрахунку основних кінематичних елементів цього руху. Реалізація програми дозволяє отримувати значення миттєвої

відносної швидкості, координат та інших кінематичних параметрів.

Координати відносного та абсолютного руху частинок, що входять до складу насінневої суміші, залежать від таких вхідних параметрів, як амплітуда та частота коливань, кратність електричної сили, швидкість руху площини, куту її нахилу до горизонту, а також куту між напрямом руху площини і лінією найбільшого нахилу.

Аналізуючи систему (2.73), можна зробити висновок, що кінематичні характеристики переміщення частинки в електричному полі на похилій коливальній площині, яка рухається плоскопаралельно, залежать від сукупності електричних і фізико-механічних властивостей, що визначаються відповідно кратністю електричної сили і коефіцієнтом тертя.

Фізико-механічні властивості компонентів досліджуваних насінневих сумішей трав схожі між собою. Проте насіння культурних рослин і бур'янів належать до різних видів, що обумовлює відмінності в їхніх біологічних і, як наслідок, електричних властивостях. Тому найбільший вплив на траєкторію руху насінини на цій площині має саме кратність електричної сили. Це підтверджують розрахункові траєкторії, отримані при зміні значень цього параметра від 0,6 до 1,20.

Аналіз взаємозалежностей показує, що збільшення кратності електричної сили суттєво впливає на координати точки сходу насінин. Для різних компонентів насінневої суміші можна досягти різних значень цього параметра шляхом регулювання напруженості електричного поля, амплітуди та частоти коливань площини, що забезпечує ефективне їх сепарування.

Інтегральним показником у процесі сепарування, який об'єднує параметри траєкторії руху насінини та враховує вплив усіх сил, що діють на неї, є кут рівноваги. Цей кут, при якому насінина перебуває у стані спокою або рухається без

прискорення, також виступає універсальним критерієм для визначення оптимальних режимів електровібросепарування у пристрої, де як робочий орган використовується рухома в електричному полі похила коливальна площина, що здійснює плоскопаралельний рух.

Математичний вираз кута рівноваги насіння на коливальній похилій площині має наступний вигляд:

$$\alpha_r = \varphi + \sin^{-1}[(k_0 - k_1) \sin \varphi] \quad (2.78)$$

де φ - динамічний кут тертя; k_1 - коефіцієнт, що відображає співвідношення між прискоренням коливального руху та прискоренням вільного падіння.

Кути рівноваги та траєкторії руху компонентів насінневої суміші під час електровібросепарування, за умови незначного впливу опору середовища, визначаються балансом сил тертя, інерції, та електричної сили. Сила тертя залежить від таких характеристик насіння, як форма, розмір, шорсткість та матеріал поверхні, що виражається через кут тертя. Сила інерції залежить від параметрів коливального руху (амплітуда та частота), представлених коефіцієнтом k_1 , а електрична сила залежить від характеристик електричного поля та електричних властивостей насінини і виражається кратністю електричної сили k_0 .

На думку Ковалишина С.Й., регулюючи параметри електричного поля та коливального руху, можна управляти процесом електровібросепарування, змінюючи коефіцієнти k_1 та k_0 , що впливає на кут рівноваги α_r . При цьому можливі такі умови:

$$k_0 = k_1 \Rightarrow \alpha_r = \varphi; \quad (2.79)$$

$$k_0 > k_1 \Rightarrow \alpha_r > \varphi; \quad (2.80)$$

$$k_0 < k_1 \Rightarrow \alpha_r < \varphi; \quad (2.81)$$

З метою інтенсифікації процесу, найбільш перспективними є режими, коли для одного компонента насінневої суміші виконується умова: $k_0 > k_1 \Rightarrow \alpha_r > \varphi$, а для іншого - $k_0 < k_1 \Rightarrow \alpha_r < \varphi$. У такому разі різниця в кутах рівноваги компонентів суміші буде максимальною, що сприятиме найбільш ефективному їх розділенню.

Оптимальні режими електровібросепарування визначаються шляхом встановлення кута нахилу площини до горизонту згідно з умовою:

$$\alpha_{pr} < \alpha < \alpha_{pz} \quad (2.82)$$

де α_{pr}, α_{pz} - відповідно, кути рівноваги насіння культурних рослин і засмічувачів.

Це рівняння є важливою умовою для оптимізації процесу сепарування. Конкретні значення нахилу площини визначаються на основі аналізу інтегральних кривих розподілу насіння культури та засмічувача за кутом рівноваги, а також допустимим вмістом насіння бур'яну в посівному матеріалі, з подальшою експериментальною перевіркою.

Утешив У.І. в рамках поставлених задач наукового дослідження, дослідив закон руху зернової частинки по зовнішній поверхні обертового сітчастого барабана з некоронаційним електродом при одночасному впливі додаткових сил від коронного розряду і повітряного потоку. Виявлено, як поведінка зерна впливає на якість сепарації, та проаналізовано можливість використання цього комбінованого методу для сепарації крупнооб'ємних культур, зокрема сої.

Зернова суміш потрапляє на обертову сітчасту поверхню барабана (рис. 2.5) і переміщується разом з ним в зону сепарації, де діють електричне поле і повітряний потік. Процес сепарації відбувається в двох зонах, кожна з яких має своє математичне описання.

Перша зона охоплює рух частинки по сітчастій поверхні обертового барабана до її відриву та потрапляння в область коронного електрода і всмоктування повітряним потоком. Друга зона розглядає рух частинки вже за межами області коронного електрода та повітряного потоку.

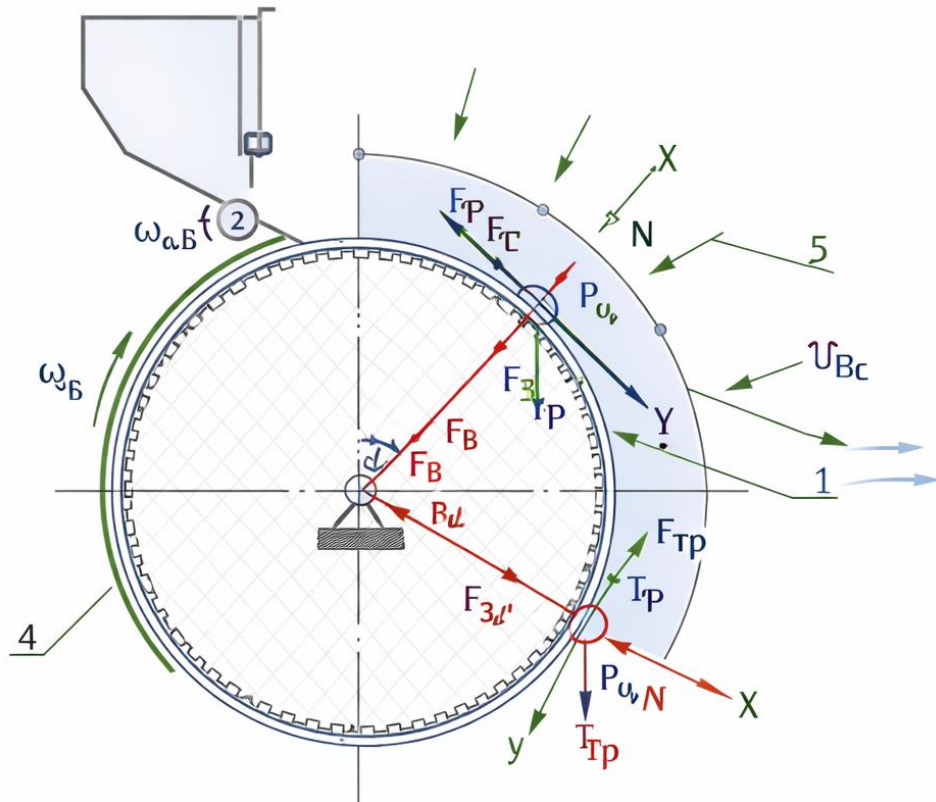


Рис. 2.5. Схема сил, що діють на частинку.

1 - коронуючий електрод; 2 - обертовий сітчастий некоронаційний електрод; 3 і 4 - зовнішній і внутрішній екрани;
5 - напрямок повітряного потоку.

Схема сил, що діють на частинку, представлена на рис. 2.5, розшифруємо основні складові силової взаємодії: N - нормальна реакція поверхні; P - сила тяжіння частинки; F_T - сила тертя; F_I - нормальна сила інерції; F_t - тангенціальна сила інерції; F_E - сила електричного поля; F_Z - сила взаємодії між частинкою та коронним електродом; F_P - сила повітряного потоку; F_Z^* - результуюча електричних сил, яка відповідає куту поворота барабана α^* ; F_{Z0} - результуюча електричних сил, на початку зони обробки.

$$F_I = m\omega_r^2 R_B \quad (2.83)$$

$$F_\tau = mR_B \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.84)$$

$$F_E = \frac{\pi\varepsilon_0 E_0^2 ab\mu}{K_f} \quad (2.85)$$

$$F_Z = \frac{\pi\varepsilon_0 E_0^2 b^2 \mu^2}{K_f^2} \quad (2.86)$$

$$F_P = k_1 k_2 n_0 q \rho_s \quad (2.87)$$

$$F_Z^* = F_{Z0}(1 - A\alpha^* + B[\alpha^*]^2) \quad (2.88)$$

де, параметри, що враховуються: m - маса частинки; f - коефіцієнт тертя; φ - кут тертя; ω_r - кутова швидкість частинки навколо осі барабана; R_B - радіус барабана; ε_0 - електрична постійна; E_0 - напруженість електричного поля; a, b - довжина і ширина частинки; K_f - коефіцієнт форми, що залежить від співвідношення осей і діелектричної проникності частинки; μ - показник розрядки, що залежить від електричного опору частинки R , її ємності C і інтенсивності коронного розряду; n_0 - кількість отворів сітчастого барабана, що перекриваються частинкою; q - площа одного отвору сітчастого барабана; k_1 - коефіцієнт, що враховує ступінь перекриття отворів барабана частинкою; k_2 - коефіцієнт, що враховує механічну складову повітряного потоку; ρ_s - надлишковий статичний тиск всередині барабана; α^* - кут повороту частинки, виміряний від горизонталі.

Ці параметри використовуються для комплексного аналізу поведінки зернової частинки під час сепарації.

$$A = \frac{0,8364 R_B^{0,4} U^{0,01}}{\omega_B^{0,43} (RC)^{0,4} h^{0,33}} \quad (2.89)$$

$$B = \frac{0,206 R_B^{0,8} U^{0,02}}{\omega_B^{0,8} (RC)^{0,8} h^{0,8}} \quad (2.90)$$

де U - напруга на коронуючому електроді; (RC) - постійна часу зарядки частинки; h - між електродна відстань.

Закон руху частинки по поверхні обертового сітчастого циліндричного некоронаційного електрода був розглянутий з урахуванням сил, показаних на рис. 2.5 та залежностей (2.83)-(2.90). В зоні розташування коронуючого електрода та всмоктування повітря частинка рухається з відставанням:

$$\frac{\omega_B^2 R_B}{g} = \frac{2 \cos \varepsilon}{\cos \varphi} \cos[\alpha_2 + \varphi + \varepsilon] + (mg)^{-1} \left[\frac{\pi \varepsilon_0 E_0^2 ab \mu}{K_f} + \frac{\pi \varepsilon_0 E_0^2 b^2 \mu^2}{K_f^2} + k_1 k_2 n_0 q \rho_s \right] + \frac{R_B}{g} C_1 e^{-2f(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (2.91)$$

де α_1 - кут подачі зерна до барабана; α_2 - кут початку спільного руху частинки і барабана; $2f = \tan \varepsilon$.

Кут α_3 початок ковзання частинки в заданій зоні рис. 2.6.:

$$\sin(\alpha_3 - \varphi) = \left[(mg)^{-1} \left[\frac{\pi \varepsilon_0 E_0^2 ab \mu}{K_f} + \frac{\pi \varepsilon_0 E_0^2 b^2 \mu^2}{K_f^2} + k_1 k_2 n_0 q \rho_s \right] - \frac{\omega_B^2 R_B}{g} \right] \sin \varphi \quad (2.92)$$

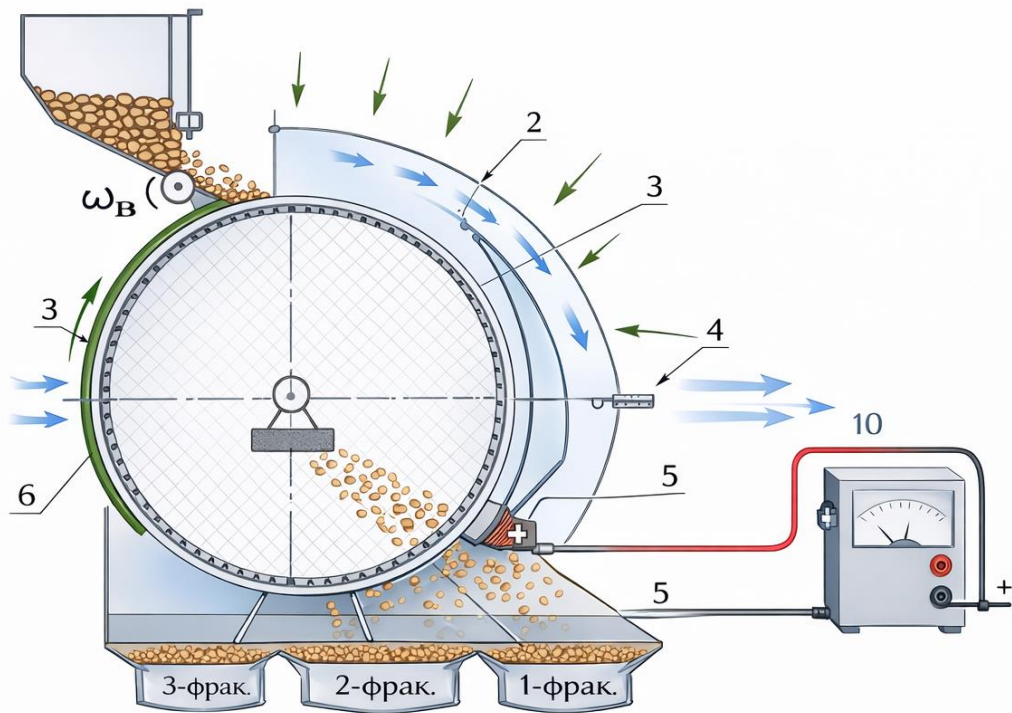


Рис. 2.6. Схема обладнання: 1 - коронуючий електрод; 2 - сітчастий некоронуючий електрод; 3 і 4 - зовнішній та внутрішній екрани; 5 - щітка; 6 - завантажувальний бункер; 7 - приймальний бункер; 8 - розподілювачі; 9 - високовольтний випрямляч; 10 - напрямок повітряного потоку.

Узагальнене рівняння для визначення кута відриву α_4 частинки від барабана в зоні дослідження має вигляд:

$$\cos \alpha_4 + \frac{2 \cos \varepsilon}{\cos \varphi} \cos[\alpha_4 - (\varphi + \varepsilon)] = \frac{R_B}{g} C_2 e^{2f(\alpha_4 - \alpha_3)} \quad (2.93)$$

де α_4 - кут відриву частинки від барабана.

За межами зони розташування коронуючого електрода і всмоктування повітряного потоку, кут початку ковзання частинки з урахуванням електричних сил визначається за виразом:

$$\cos(\alpha_3^* - \varphi) + \frac{F_E}{mg} [A\alpha_3^* + B[\alpha_3^*]^2] \sin \varphi = \left[\frac{F_E}{mg} - \frac{\omega_B^2 R_B}{g} \right] \sin \varphi \quad (2.94)$$

Рівняння руху частинки з випередженням у досліджуваній зоні має вигляд:

$$\sin(\alpha_4^*) + \frac{2 \cos \varepsilon}{\cos \varphi} \sin[\alpha_4^* - (\varphi + \varepsilon)] + \frac{F_E}{mg} \left[\frac{B}{2f^2} - \frac{A}{2f} + \frac{B[\alpha_4^*]}{f} \right] = \frac{R_B}{g} C_3 e^{2f(\alpha_4^* - \alpha_3^*)} \quad (2.95)$$

де α_4^* - кут відриву частинки в досліджуваній зоні.

Встановлені рівняння автором для визначення кутів початку спільного руху частинки й барабана, початку її ковзання та відриву від барабана за різних значень результуючої сили електричного поля та повітряного потоку, кута тертя частинки, кута подачі частинки на барабан і кутової швидкості барабана. При цьому радіус барабана приймався постійним і становив 0,2 м.

Аналіз зміни кутів (рис. 2.6.) показує, що поведінка зерна на поверхні сітчастого барабана залежить від механічних, електричних і аеродинамічних факторів. З'ясовано, що основним фактором, що визначає поведінку зерна, є результуюча сила поля коронного розряду й повітряного потоку, яка притискає зерно до поверхні барабана.

При збільшенні цієї сили кут початку спільного руху частинки й барабана зменшується, а кути початку її ковзання та відриву збільшуються, що сприяє покращенню точності розділення компонентів зернової суміші. Також виявлено, що зі збільшенням кута подачі кут початку спільного руху частинки й барабана зменшується. Встановлено, що для покращення процесу сепарації результуюча сила електричного поля та повітряного потоку в зоні до 90° повинна бути в кілька разів більшою, ніж за межами цієї зони. Вперше пояснено можливість використання цього комбінованого способу для сепарації насінневих культур, зокрема сої.

Дослідження Паранюка В.О. присвячені розробці математичних моделей для опису руху насіння в електричному полі на площині, яка рухається з постійною швидкістю під нахилом, а також обґрунтуванню оптимальних параметрів сепарування насіннєвих сумішей.

З цією метою були вивчені траєкторії руху насіння, що потрапляє на зазначену площину з довільної точки міжелектродного простору. При вивченні траєкторій були прийняті наступні умови: насіння розглядається як однорідна сфера або матеріальна частинка нескінченно малих розмірів; вплив електричного поля на процес руху насіння оцінюється результуючою силою F_E , яка діє перпендикулярно до площини. В полі коронного розряду ця сила притискає насіння до площини і має позитивний напрямок. Електростатичне поле надає силі негативний напрямок. У процесі руху насіння сила F_E залишається постійною у часі та просторі.

Похила площина Q розташовувалася в просторі так, що кут δ між вектором швидкості руху V_{Π} цієї площини і напрямком її нахилу, мав будь-яке заздалегідь задане значення рис. 2.7. Для отримання рівнянь траєкторії в зручному для практичного використання вигляді запропоновано коефіцієнт траєкторії:

$$K = 1 \pm \frac{F_E}{mg \cos \alpha} \quad (2.96)$$

де m - маса насіння; g - прискорення вільного падіння; α - кут нахилу площини до горизонту.

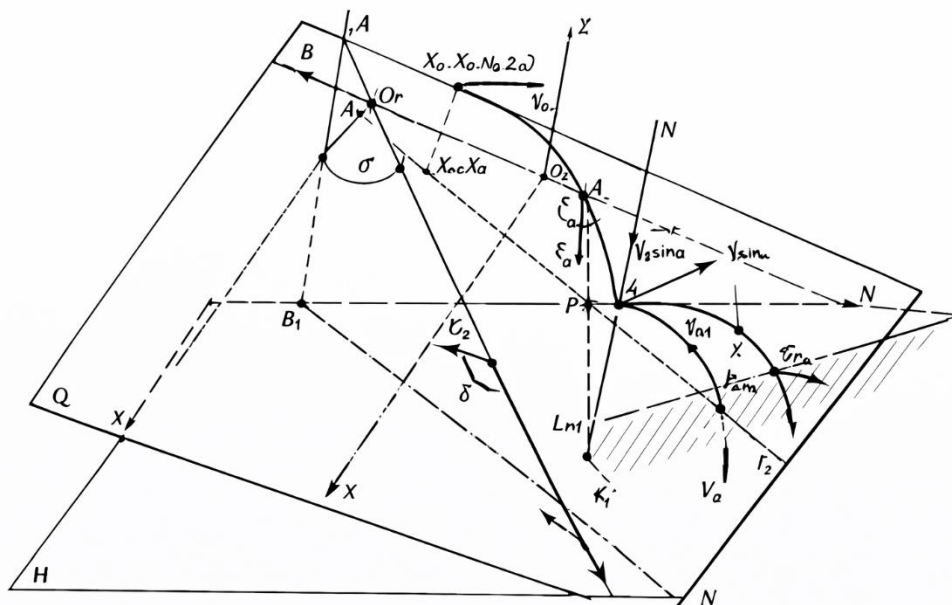


Рис. 2.7. Стрибкоподібний рух насіння по нахиленій площині: BN - лінія найбільшого спаду на нахиленій площині; H - горизонтальна площина; $A_0A_1A_2$ - траєкторія стрибкоподібного руху насіння; α - кут нахилу площини.

Траєкторії руху насіння досліджувалися для двох крайніх випадків: 1) насіння переміщується по нахиленій площині стрибкоподібно; 2) насіння ковзає по площині без стрибків. Рух частинки (насіння) спочатку розглядалося в відносних координатах, жорстко пов'язаних з площиною Q і рухається разом з нею, а потім в нерухомій у просторі абсолютній системі координат. В обох системах абсциса і ордината знаходяться на площині, причому в відносній системі ордината направлена протилежно вектору швидкості, а в абсолютній - співпадає з ним по напрямку. Абсциса і апліката також співпадають по напрямку в обох системах координат.

Траєкторія частинки в першому випадку, коли насіння переміщується стрибкоподібно, відповідає положенню рухомої частинки в міжелектродному просторі.

Початкові диференціальні рівняння руху частинки (насіння) мали вигляд:

$$m\ddot{x} = P_x \quad (2.97)$$

$$m\ddot{y} = P_y \quad (2.98)$$

$$m\ddot{z} = -P_z \pm F_E \quad (2.99)$$

де P_x, P_y, P_z - позначення проєкцій сили P на осі координат.

В результаті інтегрування цих рівнянь були отримані рівняння відносного та абсолютного руху частинки (насіння). Для визначення швидкості, з якою частинка продовжує свій рух після зіткнення, були виведені наступні вирази:

$$v_{01} = \sqrt{v_{01k}^2 + v_{01n}^2} \quad (2.100)$$

$$v_{01k} = (1 - kf)v_{1k} \quad (2.101)$$

$$v_{01n} = (1 - k - k_v k)v_{1k} \quad (2.102)$$

$$v_{1k} = [v_{0x}^2 + v_{0y}^2 + 2L(v_{0x} \sin \delta - v_{0y} \cos \delta + L^2)]^{0,5} \quad (2.103)$$

$$v_{1n} = v_{0z} - kL \csc \alpha \quad (2.104)$$

де v_{01}, v_{01k}, v_{01n} - швидкість частинки після відскоку, її проєкції на площину Q і нормальна складова; f - коефіцієнт тертя частинки об площину; k_v - коефіцієнт відновлення при зіткненні, що враховує вплив електричного поля; L - прирости проєкцій на площину за час руху від точки A_0 до точки A_1 .

У другому випадку вектор початкової швидкості лежить на площині Q і утворює з напрямком нахилу цієї площини довільний кут θ_0 , який може змінюватися від 0 до 90. Таким чином, під час ковзання частинки вектор її миттєвої швидкості змінює свій кут нахилу до площини в межах від θ_0 до 0.

У процесі руху на частинку діють сили F_C та P_k , що змінюються відповідно до рівнянь відносного руху:

$$F_C = kfP \cos \alpha \quad (2.105)$$

$$P_k = P \sin \alpha \quad (2.106)$$

де F_C - сила опору ковзання частинки.

Були прийняті такі вихідні рівняння руху частинки:

$$m \frac{dv}{dt} = P_\tau - F_C \quad (2.107)$$

$$-mv \frac{d\theta}{dt} = P_n \quad (2.108)$$

де P_τ, P_n - складові сили P_k , сенс яких пояснюється на рис. 2.7.

Для траєкторії абсолютного руху були отримані рівняння:

$$x = x_0 + \frac{v_0^2 T^{2k\Delta-2}}{g \sin \alpha (1-T^2)^2} \left[\frac{1}{2} (d_{02} - d_2) \sin \delta - 2(d_1 - d_{01}) \cos \delta \right] \quad (2.109)$$

$$y = y_0 - \frac{v_\Pi v_0 T(d_0 - d)}{g \sin \alpha (1+T_0^2) T_0^{k\Delta}} - \frac{v_\Pi^2 T^{2k\Delta-2}}{g \sin \alpha (1+T^2)^2} \left[\frac{1}{2} (d_{02} - d_2) \cos \delta - 2(d_1 - d_{01}) \sin \delta \right] \quad (2.110)$$

Ці рівняння дозволяють описати траєкторію руху частинки як у випадку стрибкоподібного переміщення, так і в разі плавного ковзання по нахиленій площині.

$$T_0 = \tan \frac{\theta_0}{2} \quad (2.111)$$

$$\Delta = \frac{f}{\tan \alpha} \quad (2.112)$$

$$d = \frac{T^{k\Delta-1}}{k\Delta-1} + \frac{T^{k\Delta+1}}{k\Delta+1} \quad (2.113)$$

$$d_1 = \frac{T^{2k\Delta-1}}{2k\Delta-1} + \frac{T^{2k\Delta+1}}{2k\Delta+1} \quad (2.114)$$

$$d_2 = \frac{T^{2k\Delta-2}}{k\Delta-1} + \frac{T^{2k\Delta+2}}{k\Delta+1} \quad (2.115)$$

$$T = \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.116)$$

На основі аналізу рівнянь (2.109)-(2.116) отримана математична модель руху насіння в електричному полі на нахиленій площині представлена рівняннями:

$$x = \mu_1 \mu_2 \left[\frac{1}{2} (d_{02} - d_2) \sin \delta - 2(d_1 - d_{01}) \cos \delta \right] \quad (2.117)$$

$$y = \mu_1 \mu_2 \left[(d_0 - d) \frac{T^{k\Delta}}{\sin \delta} - \frac{1}{2} (d_{02} - d_2) \cos \delta - 2(d_1 - d_{01}) \sin \delta \right] \quad (2.118)$$

де μ_1 - масштабний множник, що дозволяють розраховувати траєкторії руху насіння в відносних одиницях:

$$\mu_1 = \frac{v_{\Pi}^2 (\sin \delta)^2}{4g \sin \alpha} \quad (2.119)$$

де μ_2 - множник, який враховує зниження швидкості насіння в результаті його удару об площину, незалежно від розмірів насіння:

$$\mu_2 = \frac{1 - k\Delta \tan \alpha}{T_0^{k\Delta}} \quad (2.120)$$

Для практичного використання рівнянь розроблено графо-аналітичний метод їх розв'язання. Суть цього методу полягає в наступному: за формулою

$$d = d_0 - \frac{g T_0^{k\Delta-1} \sin \alpha (1 - T_0^2)}{v_{\Pi} (1 - k\Delta \tan \alpha)} t \quad (2.121)$$

задаючись різними значеннями часу перебування насіння на площині, знайдено відповідні значення функції d , які, у свою чергу, представлені як аргументи функцій d_1 та d_2 . Підставляючи знайдені значення d , d_1 та d_2 в рівняння (2.117) і (2.118), обчислюють координати руху насіння.

Застосовність рівнянь (2.117) і (2.118) для адекватного опису поведінки насіння залежить від наявності методики вимірювання параметра $k\Delta$, який називається показником сепарування. Для цього представлено формулу, яка виражає цей параметр через вимірювані характеристики насіння:

$$k\Delta = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} - \frac{\sin(\alpha_p - \varphi)}{\sin \alpha \cos \varphi} \quad (2.122)$$

де φ - кут рівноваги насіння на нахиленій площині; α_p - кут рівноваги насіння на нахиленій площині з електричним полем.

Отже аналіз рівнянь (2.117) показав, що траєкторії абсолютного руху насіння найбільше віддалені одна від одної в тій області нахиленої площини, де проходить траєкторія насіння з параметром $k\Delta = 1$. Це свідчить про те, що оптимізація процесу розділення суміші може бути досягнута регулюванням кута нахилу площини та інших факторів, які впливають на величину кута рівноваги (параметрів електричного поля, швидкості руху площини та ін.). Межа розділення суміші на фракції в цьому випадку буде проходити в околиці значень $k\Delta$, близьких до одиниці.

За допомогою рівнянь (2.117) і (2.117) були знайдені основні параметри сепаратора, що розділяє насіннєві суміші за допомогою електричного поля, накладеного на рухому з постійною швидкістю нахилену площину. Для виявлення співвідношення між довжиною та шириною нахиленої площини рівняння (2.117) диференціювалися за аргументом.

Аналіз цієї функції за умов найбільшого розходження траєкторій дозволив знайти залежність довжини l_{Π} площини від її ширини b_{Π} :

$$l_{\Pi} = \frac{b_{\Pi}}{\tan \frac{\delta}{2} (\sin \delta)^2} \quad (2.123)$$

При комбінованому нахилі площини, тобто коли $90^\circ < \delta < 180$, частинки з однорідними значеннями $k\Delta$ мають розкид траєкторій, визначений довжиною лінії надходження частинок на площину. Цей розкид буде мінімальним, якщо розташувати відповідним чином зазначену лінію відносно напрямку руху площини.

Для розрахунку оптимального розташування лінії надходження насіння на площину були використані рівняння (2.117). Після математичних перетворень отримано вираз:

$$y_{\varepsilon 0} = x_{\varepsilon 0} + y_n + B_n - D_3 + 2\sqrt{D_1 - D_2(B_n - x_{\varepsilon 0})} \quad (2.124)$$

$$D_1 = 2 \frac{4(k\Delta)^2 - 3(2k\Delta - \cos \delta) \cos \delta - 1}{(4(k\Delta)^2 - 1)(k\Delta + 1)(k\Delta - 1)^2} \quad (2.125)$$

$$D_2 = \frac{2}{(k\Delta - 1) \sin \delta} \quad (2.126)$$

$$D_3 = 4k\Delta \frac{2(k\Delta)^2 - 3k\Delta \cos \delta - 1}{(4(k\Delta)^2 - 1)((k\Delta)^2 - 1)} \quad (2.127)$$

де $x_{\varepsilon 0}$ та $y_{\varepsilon 0}$ - координати лінії надходження насіння на площину; D_1, D_2, D_3 - коефіцієнти, що залежать від $k\Delta$ та розташування площини в просторі; B_n, y_n - ширина похилої площини та ордината сходження з неї насіння.

Значення $x_{\varepsilon 0}, y_{\varepsilon 0}$ у рівнянні (2.124) представлені у відносних одиницях. Для переходу до дійсних значень їх потрібно поділити на масштабний множник μ_0 .

2.2. Огляд математичного опису процесів електротермічної обробки зернових матеріалів

2.2.1. Характеристика і аналіз об'ємних методів теплової обробки

Серед різноманітних фізичних методів теплового впливу на харчові продукти, які застосовуються для досягнення необхідних технологічних результатів, найбільш поширеними в харчовій промисловості та закладах громадського харчування є такі чотири методи:

а) Обробка матеріала електромагнітним полем надвисокої частоти (НВЧ-нагрів); зазвичай використовується частота 2375 (або 2450) МГц. Фізична природа процесів, що відбуваються при цьому, детально описана в багатьох книгах [1-7, 15-18, 34-65, 127-138, 216-267];

б) Вплив на продукт постійного або змінного струму (промислової або підвищеної частоти), що викликає виділення тепла в продукті згідно із законом Джоуля-Ленца — електроконтактний (ЕК) нагрів (або нагрів ТВЧ); цей метод відрізняється найбільшою простотою технологічного обладнання і його можливості досліджуються вже досить давно [8-17, 27-38, 121-126];

в) Вплив на продукт вихрових електричних струмів, що виникають у товщі матеріала, який знаходиться в змінному магнітному полі (індукційний нагрів); цей метод теплової обробки ще не знайшов широкого застосування в закладах громадського харчування, але має значний потенціал;

г) Вплив на продукт потоку інфрачервоного випромінювання (ІЧ-нагрів) з довжиною хвилі 1...1,5 мкм; цей метод широко використовується як самостійний технологічний процес, так і в комбінації з іншими методами теплового впливу, тобто як складова частина комбінованих методів обробки продуктів. Фізичні основи ІЧ-нагріву описані в ряді книг і не розглядаються далі [268-301].

Перед тим як розглянути специфічні особливості зазначених основних методів об'ємної теплової обробки продуктів, варто зазначити можливість застосування деяких інших фізичних впливів. Зокрема, перспективним методом є вплив лазерного випромінювання. Для його впровадження необхідно оптимізувати основний фізичний параметр - щільність потоку енергії випромінювання, що падає на поверхню матеріала. Наприклад, лазерне опромінення успішно застосовується у бродильному виробництві для впливу на пінну структуру, у пивоварній промисловості для обробки ячмінного солоду тощо.

Для стерилізації (асептичної обробки) продуктів використовують гамма-випромінювання, електричний (коронний) розряд, електроантисептування у сильних полях (зокрема, в молочній промисловості). При гарячому копченні риби застосовують її обробку в електростатичному полі високої напруги з подальшим впливом інфрачервоного випромінювання великої інтенсивності. Електростатичне поле низької напруги використовується для виробництва консервованого вершкового масла тощо. Проте всі ці процеси поки що не стали поширеними у закладах громадського харчування, і наявні дані недостатні для їх порівняльної характеристики та детального аналізу можливостей застосування.

2.2.1.1. Надвисокочастотний нагрів.

Використання електромагнітного поля НВЧ дозволяє значно прискорити процеси термообробки харчових продуктів порівняно з традиційними методами. Це обумовлено об'ємним характером нагріву, що нейтралізує негативний вплив низької теплопровідності продуктів. Рівномірність нагріву всередині НВЧ-поля практично виключає «перегриви» матеріала, які зазвичай виникають при поверхневих методах обробки, що підвищує якість кінцевого матеріала. НВЧ-нагрів може

використовуватися як на стадії доведення початкового матеріала до необхідної температури, так і на стадії витримки матеріала при цій температурі до досягнення повної кулінарної готовності. Крім того, НВЧ-нагрів може застосовуватися для попередньої обробки напівфабрикату, наприклад, для розморожування заморожених напівфабрикатів тощо.

Зупинимось детальніше на особливостях тепломасопереносу в продукті під час НВЧ-нагріву, які мають ключове значення для його технологічного застосування. При цьому об'ємному методі теплопередачі температура внутрішніх шарів матеріала перевищує температуру його поверхні (на якій, на відміну від традиційних методів, не відбувається підведення, а навпаки, віддача тепла в навколишнє середовище — повітря в НВЧ-апараті). Це спрямовує основний тепловий потік зсередини матеріала до його поверхні. У тому ж напрямку рухається і потік вологи — під впливом градієнта вмісту вологи, а також термодифузії (витіснення вологи нагрітим повітрям всередині матеріала) та надлишкового тиску, що виникає через швидке випаровування вологи в зоні максимальних температур. Як зазначалося у ряді досліджень, у продукті з високим вмістом вологи (овочі, м'ясні продукти) під час НВЧ-нагріву може відбуватися кипіння вологи у мікрооб'ємах структури, нагрітих до 100°C, у той час як у інших, більш "сухих" місцях матеріала, температура ще не досягла цього рівня. Це явище відіграє важливу роль у формуванні надлишкового тиску та потоку вологи з матеріала. Збіг напрямків теплових і вологих потоків всередині матеріала кардинально відрізняє НВЧ-нагрів від традиційних методів теплової обробки, де ці напрямки протилежні.

Утворення надлишкового тиску всередині матеріала є ще однією відмінністю НВЧ-нагріву, що значно ускладнює кінетику процесів тепломасопереносу в продукті та їх теоретичне дослідження. Однак приблизний опис цих процесів необхідний для практичного застосування технологій, зокрема для вибору

режимів НВЧ-обробки та відповідного розрахунку апаратів НВЧ-нагріву, про що вже згадувалося у Вступі.

Згідно з А. В. Ликовим, повна система рівнянь тепломасопереносу в капілярно-пористому тілі (зокрема, у харчовому продукті) в умовах НВЧ-нагріву записується у вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \Delta t + \frac{\mu r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{Q_v}{c \rho_0} \quad (2.128)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_{m2} \Delta u + a_{m2} \delta_2 \Delta t + \mu \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (2.129)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = a_p \Delta p - \frac{\mu}{c_V} \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (2.130)$$

де t, u, p - температура, вміст вологи та надлишковий тиск, відповідно; $a = \frac{\lambda}{c \rho_0}$ - коефіцієнт температуропровідності; λ - коефіцієнт теплопровідності; ρ_0 - щільність "сухих речовин" матеріалу; c - приведена питома теплоємність матеріалу, яка обчислюється за формулою $c = c_0 + c_0^* u$; c_0 - питома теплоємність сухих речовин; c_0^* - питома теплоємність вологи у продукті; u - середній вміст вологи під час нагрівання; μ - коефіцієнт фазового переходу рідина - пара (часто в розрахунках приймається $\mu = 0,5$), r - питома теплота випаровування; a_{m2} - коефіцієнт дифузії рідкої вологи в матеріалі (продукті); δ_2 - відносний коефіцієнт термодифузії; $a_p = \frac{K_p}{c_V \rho_0}$ - коефіцієнт конвективної дифузії; K_p - коефіцієнт фільтраційного переносу; c_V - ємність капілярно-пористого матеріалу стосовно насиченого повітря.

Значення Q_v визначає питому потужність тепловиділення в об'ємі матеріала під час НВЧ-нагрівання і у випадку повністю рівномірного об'ємного нагрівання обчислюється за формулою:

$$Q_v = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon^* f E^2 \quad (2.131)$$

де f – частота; E - діюче значення напруженості електромагнітного поля; ε_0 - електрична стала; ε^* - уявна частина комплексної діелектричної проникності $\varepsilon^* = \varepsilon^{**} - i\varepsilon^{***}$; $\varepsilon^{***} = \varepsilon^{**} \tan \delta$; ε^{***} - дійсна частина діелектричної проникності; $\tan \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат.

Для багатьох зернових продуктів електричні характеристики ε^* , ε^{**} , $\tan \delta$ вже детально вивчені та наведені в довідковій літературі залежно від частоти поля, температури та вмісту вологи продуктів.

Якщо основний внесок в ε^{***} вносить активна (іонна та електролітична) електрична провідність σ матеріала:

$$\varepsilon^{***} \approx \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0 f}; \quad \tan \delta \approx \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0 f \varepsilon^*} \quad (2.132)$$

Електромагнітне поле НВЧ під час одномірного геометричного нагріву $E = E(x)$ (таке припущення зазвичай приблизно застосовується в умовах обробки продуктів у серійних вітчизняних НВЧ-шафах) загасає вглиб матеріала за експоненціальним законом:

$$E = E_0 e^{-\frac{x}{\Delta}}; \quad (2.133)$$

де $E_0 = E(x = 0)$; Δ - глибина проникнення НВЧ-поля в продукт, яка визначається за формулою:

$$\Delta = \frac{c}{\pi f \tan \delta \sqrt{\varepsilon^{**}}}; \quad (2.134)$$

Типове значення Δ при робочій частоті 2450 МГц (також допускаються робочі частоти 433 і 915 МГц). Як видно з (2.133), для дотримання умови повністю рівномірного НВЧ-нагрівання товщина оброблюваного виробу повинна бути малою порівняно з Δ ; це умова на практиці дотримується не завжди; в

інших випадках це припущення виконується лише приблизно і застосовується тільки для приблизних розрахунків та оцінок.

Для більш точних розрахунків необхідно враховувати залежність $E(x)$ згідно з формулою (2.133) і відповідну залежність Q_v , яка впливає з неї згідно з (2.131):

$$Q_v(x) = Q_{v0} e^{-\frac{2x}{\Delta}} \quad (2.135)$$

Зокрема, при товщині виробу, що значно перевищує $\Delta/2$, можна розглядати інший граничний випадок нагрівання "напівобмеженого тіла".

Розв'язання системи рівнянь (2.128) - (2.130), навіть при прийнятті припущення про сталість теплофізичних властивостей оброблюваного матеріала та простої геометрії виробу (пластина, циліндр тощо), представляє значні труднощі і може бути отримане тільки чисельними методами для конкретних умов НВЧ-нагрівання. Однак таке рішення не володіє достатньою "гнучкістю", яка необхідна через те, що значення параметрів μ, a_{m2}, δ на практиці відомі з низькою точністю (часто лише за порядком величини). Тому наближені аналітичні розв'язки системи рівнянь (2.128) - (2.130) мають більшу практичну цінність, ніж чисельні рішення для конкретних умов обробки зернових продуктів.

Із впровадженням різних спрощень були здійснені спроби спростити математичні моделі, що описують процеси тепломасопереносу при НВЧ-нагріванні. Згідно з підходом [24-28, 34-45, 127, 158-167], надлишковий тиск p у продукті можна виразити через його температуру та вологовміст, використовуючи рівняння стану газу (що передбачає застосування до насиченої водяної пари). Це дозволяє звести початкову систему рівнянь до двох рівнянь, що описують "одновимірний" нагрів у критеріальній формі.

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial N^2} + \xi Ko \frac{\partial U}{\partial Fo} + W(N, Fo) \quad (2.136)$$

$$\frac{\partial U}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 U}{\partial Fo^2} + Pn \frac{\partial^2 T}{\partial N^2} \quad (2.137)$$

де

$$T = \frac{t(x, \tau)}{t_0}; U = \frac{u(x, \tau)}{u_0}; N = \frac{x}{R}; Fo = \frac{a\tau}{R^2}; W = \frac{Q_v R^2}{c\rho_0 t_0 a}. \quad (2.138)$$

Рівняння (2.136) та (2.138) можуть бути записані в критеріальній формі, де фігурують такі параметри, як характерні значення температури t_0 і вологовмісту u_0 , а також комплексний критерій Коссовича та термоградієнтний критерій Поснова.

Попри спрощення, навіть така форма рівнянь ще не дає достатньо точних аналітичних виразів для інженерних розрахунків. Проте аналіз цих рівнянь порівняно з експериментальними даними, який провела [34], дозволив зробити кілька важливих висновків. Наприклад, було встановлено, що параметри, які впливають на процеси тепломасопереносу, змінюються складним чином у процесі НВЧ-обробки через внутрішні тепловиділення в структурі матеріала. Значення параметра Fo зазвичай не перевищує 0,01 через високу швидкість нагріву, що робить процес явно нестационарним.

Для спрощення розрахунків пропонується ввести кілька додаткових спрощень до початкової системи рівнянь. Наприклад, вміст вологи в продукті при НВЧ-нагріванні змінюється значно повільніше, ніж температура. Тому один із членів рівняння (1.128) можна виключити, оскільки його вплив є незначним у порівнянні з іншими складовими.

Фізичний сенс цього припущення полягає в тому, що тепловий ефект, пов'язаний з випаровуванням вологи з матеріала, вважається незначним порівняно з загальним

тепловим впливом НВЧ-поля на продукт (це припущення може бути підтверджене й приблизними кількісними оцінками).

На основі експериментальних даних з тепломасопереносу в нехарчових матеріалах зі схожою структурою, узагальнених А.В. Ликовим, можна припустити, що член $a_{m2}\delta_2\Delta t$ у рівнянні (2.129) незначний у порівнянні з іншими складовими, тобто процес термодифузії не суттєво впливає на темп вологообміну в продукті.

Надлишковий тиск у продукті під час НВЧ-нагрівання, згідно з експериментальними даними, в основному залежить від часу й мало змінюється по об'єму матеріала. Ця залежність визначається процесом інтенсивного фазового перетворення рідини в пар (зокрема, через згадане вище кипіння рідини в мікрооб'ємах матеріала), який кількісно характеризується членом $\frac{\mu}{c_V} \frac{\partial u}{\partial \tau}$ у рівнянні (2.130). Тому під час нагрівання другий член у правій частині рівняння (2.130) можна виключити. Водночас, у період релаксації надлишкового тиску після припинення НВЧ-нагрівання основну роль відіграє саме член $a_p \Delta p$; ці умови далі не розглядаються, оскільки вони не мають великого практичного значення.

З урахуванням припущень рівняння (2.128)-(2.130) можна переписати у вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\Delta t + \frac{Q_v}{c\rho_0} \quad (2.139)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{a_{m2}}{1-\mu} \Delta u \quad (2.140)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = -\frac{\mu}{c_V} \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (2.141)$$

Ця система рівнянь є значно простішою за початкову і, що ще важливіше, «розв'язаною», тобто рівняння для температури t і вологовмісту u можна вирішувати незалежно одне від одного, а в рівнянні для тиску p використовувати вже отримані рішення для температури та вологовмісту.

Як зазначалося раніше, існує два граничні випадки НВЧ-нагріву:

- 1) теплове оброблення в умовах експоненційного спаду потужності тепловиділення всередину зразка;
- 2) оброблення в умовах рівномірного об'ємного нагріву, коли товщина зразка є малою порівняно з глибиною проникнення поля. Ці ситуації можна назвати випадками "товстих" і "тонких" зернових виробів, відповідно, і розглядати їх окремо.

Задача нагріву «товстих» виробів зводиться до розв'язання рівнянь (2.139)-(2.141) у випадку одномірного розгляду, тобто коли $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2}$, щоб знайти функції:

$$t = t(x, \tau); u = u(x, \tau); p = p(x, \tau). \quad (2.142)$$

Для досягнення цієї мети необхідно правильно поставити відповідні початкові та граничні умови.

Початкові умови можна обрати в найпростішій формі:

$$t(x, 0) = 0; u(x, 0) = u_0; p(x, 0) = 0. \quad (2.143)$$

Якщо початкова температура відмінна від нуля, то до отриманих рішень можна просто додати t_0 . Величина початкової вологості $u_0 = \frac{w_0}{1-w_0}$ вважається відомою, w_0 – початкова вологість. Питання щодо постановки граничних умов, особливо для t , є складнішим і вимагає додаткового розгляду.

По-перше, за великої товщини, що значно перевищує розрахункове значення глибини проникнення Δ , найлегше розглядати умови нагріву як поширення тепла (та вологи) в напівнескінченному тілі. Це дозволяє обмежитися постановкою лише однієї граничної умови на поверхні виробу, $x = 0$. Реальні

умови тепло- та масообміну на межі між продуктом і навколишнім середовищем (повітря в НВЧ-печі) є проміжними між двома крайніми випадками: а) рівність температур матеріала та середовища (гранична умова I роду); б) теплоізолювана поверхня матеріала («нульова» гранична умова II роду). Близькість реальної ситуації до одного з цих випадків залежить від багатьох факторів, повний облік яких неможливий. Тому природно припустити, що реальні залежності $t(x, \tau)$; $u(x, \tau)$; будуть близькі до усереднених функцій:

$$\bar{t}(x, \tau) = \frac{1}{2} [t_a(x, \tau) + t_b(x, \tau)]; \quad (2.144)$$

$$\bar{u}(x, \tau) = \frac{1}{2} [u_a(x, \tau) + u_b(x, \tau)]; \quad (2.145)$$

де t_a, u_a, t_b, u_b - відповідають рішенням рівнянь (2.139) та (2.141) з початковими умовами (2.143) і граничними умовами відповідно. Вибір «нульових» граничних умов принципового значення не має.

Методи розв'язання крайових задач подібного типу добре відомі в літературі [28, 34-39, 78, 128]. Використовуючи позначення $\frac{Q_{v0}}{c\rho_0} = A$, $\frac{2}{\Delta} = k$ для температури $t_a(x, \tau)$ можна отримати остаточне рішення:

$$t_a(x, \tau) = \frac{A}{k^2 a} \left\{ -kx \cdot \left[\begin{aligned} &1 - F\left(\frac{x}{2\tau\sqrt{a}}\right) - e^{-kx} + \\ &+ 0,5e^{ak^2\tau} \left[1 - F\left(-\frac{x}{2\tau\sqrt{a}} + k\tau\sqrt{a}\right) \right] + \\ &+ e^{ak^2\tau+kx} \left[1 - F\left(\frac{x}{2\tau\sqrt{a}} + k\tau\sqrt{a}\right) \right] \end{aligned} \right] + \left[\begin{aligned} &+ \frac{2}{\sqrt{\pi}} k\tau\sqrt{a} e^{-\frac{x^2}{4a\tau}} \end{aligned} \right] \right\} \quad (2.146)$$

$$t_b(x, \tau) = \frac{A}{k^2 a} \left\{ \begin{aligned} &1 - F\left(\frac{x}{2\tau\sqrt{a}}\right) - e^{-kx} + \\ &+ e^{ak^2\tau - kx} \left[\begin{aligned} &1 - F\left(-\frac{x}{2\tau\sqrt{a}} + k\tau\sqrt{a}\right) - \\ &- e^{ak^2\tau + kx} \left[1 - F\left(\frac{x}{2\tau\sqrt{a}} + k\tau\sqrt{a}\right) \right] \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.147)$$

$$\bar{t}(x, \tau) = \frac{A}{k^2 a} \left\{ \begin{aligned} &\frac{1-kx}{2} \left[1 - F\left(\frac{x}{2\tau\sqrt{a}}\right) \right] - \\ &- e^{-kx} + 0,5 e^{ak^2\tau - kx} \left[1 - F\left(-\frac{x}{2\tau\sqrt{a}} + k\tau\sqrt{a}\right) \right] + \\ &+ \frac{k\tau\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{x^2}{4a\tau}} \end{aligned} \right\} \quad (2.148)$$

де $F(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\mu^2} d\mu$ – табульована функція.

В критеріальній формі:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{t}(x, \tau)}{C} \equiv T &= \frac{1-N}{2} \left[1 - F\left(\frac{x}{2\tau\sqrt{a}}\right) \right] - e^{-N} + \\ &+ 0,5 e^{Fo-N} \left[1 - F\left(-\frac{N}{2\sqrt{Fo}} + \sqrt{Fo}\right) \right] + \frac{\sqrt{Fo}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{N^2}{4Fo}} \end{aligned} \quad (2.149)$$

де

$$Fo = \frac{a\tau}{R^2}; N = \frac{x}{R}; C = \frac{A}{k^2 a}; R = \frac{1}{k} = \frac{\Delta}{2}; \quad (2.150)$$

У граничному випадку великих значень x , тобто для глибинних шарів, з урахуванням того, що функція $F(z) \rightarrow 1$ при $(z) \rightarrow \pm\infty$, отримуємо:

$$\bar{t}(x, \tau) = \frac{A}{k^2 a} [e^{ak^2\tau} - 1] e^{-kx} \quad (2.151)$$

$$\frac{\bar{t}(x, \tau)}{C} \equiv T = [e^{Fo} - 1] e^{-N} \quad (2.152)$$

На початковому етапі нагрівання (при малих τ і Fo) маємо:

$$\bar{t}(x, \tau) \approx A \cdot \tau \cdot e^{-kx} \quad (2.153)$$

$$T \approx Fo \cdot e^{-N} \quad (2.154)$$

Таким чином, на початковому етапі НВЧ-нагрівання температура глибинних шарів зростає зі збільшенням часу за лінійним законом.

Розглянемо тепер випадок «тонких» матеріалів, для яких НВЧ-нагрів можна вважати рівномірним по всьому об'єму. На основі наявних експериментальних даних в цьому випадку можна прийняти такі спрощуючі припущення:

1. У досить тонкому зразку градієнти температури t і вологості u є незначними, тому замість функцій $t(x, \tau)$; $u(x, \tau)$ можна розглядати усереднені по об'єму залежності $\bar{t}(\tau)$; $\bar{u}(\tau)$.
2. Надлишковий тиск у досить тонких зразках не виникає, тому його можна виключити з розгляду.
3. Для досить тонких зразків замість залежності електричного поля $E(x)$ можна ввести усереднене по об'єму значення $\bar{E}$, яке пов'язане з усередненою потужністю нагрівання Q_{v0} .

З огляду на ці припущення, для визначення залежностей $\bar{t}(\tau)$; $\bar{u}(\tau)$ можна скористатися інтегральним рівнянням А. В. Ликова:

$$q(\tau) = r\rho_0 R_v \left[-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right] + c\rho_0 R_v \left[\frac{d\bar{t}}{d\tau} \right] \quad (2.155)$$

де $q(\tau)$ - потік теплової потужності через поверхню нагрітого виробу; R_v - відношення площі відкритої поверхні до об'єму виробу. Знак мінус у виразі $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ вводиться тому, що $\frac{d\bar{u}}{d\tau} < 0$ у процесі нагрівання. Це рівняння фактично виражає умову теплового балансу на поверхні матеріалу, тобто є спеціальною формою граничної умови.

Якщо умови нагрівання (зокрема, електрофізичні та теплофізичні властивості матеріалу) не змінюються, то

потужність нагріву можна вважати постійною, і тоді рівняння (2.155) можна переписати у вигляді:

$$r\rho_0 \left[-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right] + c\rho_0 \left[\frac{d\bar{t}}{d\tau} \right] = \bar{P} \quad (2.156)$$

Спеціальні дослідження показали, що в першому наближенні величину $r\rho_0 \left[-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right]$ можна вважати постійною у процесі нагрівання тонких зернових матеріалів. Згідно з іншими експериментальними даними, тонкий зразок зернових матеріалів, вилучений із НВЧ-печі після досягнення кінцевої температури нагрівання, близької до 100°C, у процесі охолодження до кімнатної температури втрачає через випаровування вологи не більше ніж 2% своєї маси, незважаючи на те, що середня температура значно перевищує цей показник.

Температура залишається високою ще досить тривалий час. Це підтверджує вже висловлене припущення, що втрата вологи продуктом у період НВЧ-нагріву в основному обумовлена інтенсивним кипінням вологи в мікрооб'ємах зразка, температура яких досягає 100°C при ще «холодній» масі матеріала. Швидкість випаровування вологи, тобто кількість рідини, яка переходить у пар за одиницю часу, визначається відомою формулою:

$$\frac{dm_b}{d\tau} = A \frac{S}{\rho_0} [\rho_p - p] \quad (2.157)$$

де A - геометричний множник для даного матеріалу; S - площа його «відкритої» (для випаровування) поверхні; ρ_0 - зовнішній барометричний тиск (зазвичай близький до 10^5 Па); ρ_p - тиск насиченої пари, що залежить від температури; p - тиск пари над вільною поверхнею рідини.

В умовах НВЧ-нагріву тонких матеріалів $\rho_p \approx \rho_0, p \approx 0$ то для першого доданку в (2.156) маємо:

$$r\rho_0 \left[-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right] = \text{const} = C_1; C_1 = r\rho_0 \frac{AS}{m_c} \quad (2.158)$$

Оскільки величина A підлягає визначенню для виробів конкретної форми та розмірів, то C_1 є феноменологічним параметром теорії, який визначається з експериментальних даних. З (2.158) випливає:

$$c\rho_0 \left[\frac{d\bar{t}}{d\tau} \right] = \text{const} = C_2; C_2 = \bar{P} - C_1. \quad (2.159)$$

Константа C_2 є другим феноменологічним параметром теорії. За початкових умов:

$$\bar{t}(\tau = 0) = t_0; \bar{u}(\tau = 0) = u_0; \quad (2.160)$$

розв'язання диференціальних рівнянь (2.158) і (2.159) дає:

$$\bar{t} = t_0 + \frac{C_2}{c\rho_0} \tau; \bar{u} = u_0 - \frac{C_1}{r\rho_0} \tau; \quad (2.161)$$

У цьому найпростішому випадку залежності $\bar{t}$ і $\bar{u}$ є лінійними; цей висновок був підтверджений експериментальними даними. Відношення:

$$\frac{C_2}{C_1} = \left| \frac{c}{r} \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \right| \equiv Rb; \quad (2.162)$$

можна ототожнити з відомим критерієм Ребіндера для розглянутого процесу, що характеризує відношення теплових витрат на нагрівання матеріалу і на випаровування з нього вологи.

Для оцінки ефективності використання теплової потужності при доведенні тонких зернових матеріалів можна застосовувати критерій $P Rb = const$. Величина:

$$\eta_T = \frac{C_2}{P} = \frac{C_2}{C_2 + C_1} = \frac{Rb}{1 + Rb}; \quad (2.163)$$

визначає "тепловий к.к.д." процесу і показує співвідношення між потужністю, витраченою на нагрівання матеріалу, і загальною поглиненою тепловою потужністю. Згідно з експериментальними даними для зразків матеріалу з відношенням товщини до поперечного розміру не більше 0,2, було отримано наступні значення: $C_1 = 6,4 \cdot 10^6$; $C_2 = 0,59 \cdot 10^6$; $Rb = 0,09$; $\eta_T = 0,085$.

Це свідчить про те, що при термічній обробці тонких матеріалів мікрохвильовий нагрів стає не економічним процесом; через низькі значення Rb . Щоб частково вирішити цю проблему, можна використовувати закритий посуд, проникний для електромагнітного поля, що зменшить тепловтрати через випаровування вологи з виробу. У таких випадках доцільніше застосовувати інші види нагріву або комбінувати мікрохвильову обробку з іншими методами теплової обробки.

2.2.2. Математична модель сушіння при електромагнітному підведенні енергії

Найбільшою практичною цінністю є стрічкові сушильні установки, де матеріал обробляється тонким шаром, як зазначає автор Бурдо О.Г. [79]. Фізичну схему сушіння представлено на рис. 2.8. Матеріал переміщується по стрічці з певною швидкістю w , а повітряний потік, що рухається відносно матеріала, має швидкість v , із зазором каналу δ_b .

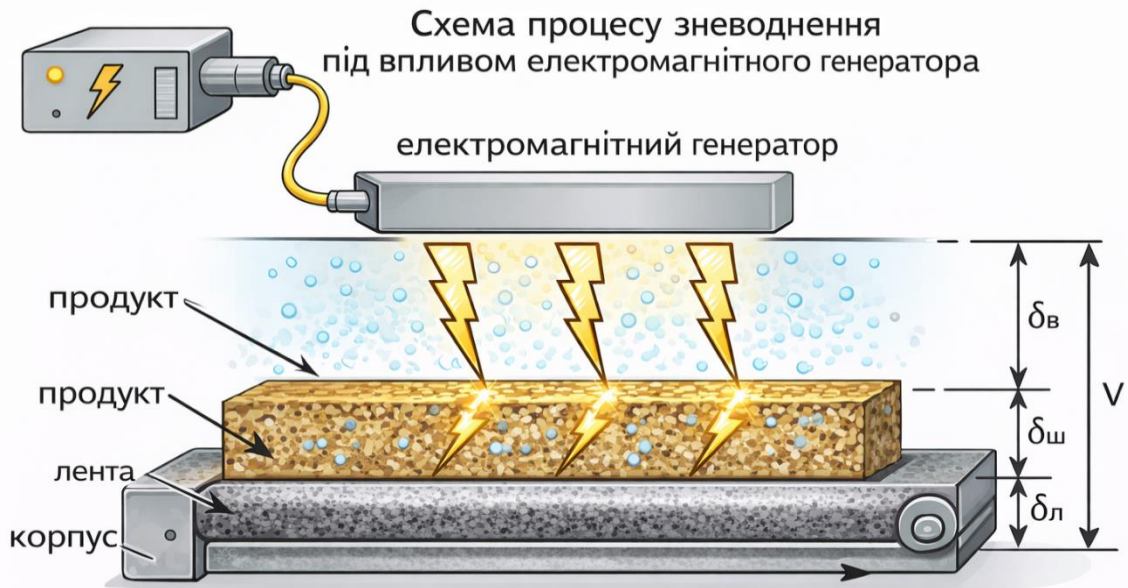


Рис.2.8. Схема процесу зневоднення під впливом електромагнітного генератора.

Повітря, що проходить через канал над матеріалом, практично не поглинає електромагнітні хвилі. Отже, шар матеріала з товщиною δ_p поглинає випромінювану енергію. Це дозволяє розглядати продукт як об'ємне джерело енергії з потужністю N та питомою об'ємною щільністю q_V . Стрічка транспортера, яка має товщину δ_l , може бути радіопрозорою або електрично з'єднаною з корпусом, що виключає поглинання енергії випромінювання стрічкою. Вона взаємодіє з матеріалом, що нагрівається, відповідно до граничних умов IV роду, тоді як поверхня матеріала взаємодіє з повітрям за умовами III роду. При поглинанні вологи матеріала повітря нагрівається, якщо його температура нижча, ніж у матеріала.

Особливістю підведення енергії електромагнітним методом є те, що максимальні значення температури та вологовмісту розташовані всередині матеріала. Це суттєво відрізняється від традиційних (конвективних і кондуктивних) способів підведення енергії, що дозволяє значно знизити енергетичні витрати на зневоднення [8, 26, 45, 59, 137, 247]. Рівень енергетичних витрат залежить від узгодження

параметрів електромагнітного поля, структури матеріала, швидкості його переміщення і параметрів повітряного середовища. Ключовим фактором є схема ініціювання потоку вологи з матеріала при максимальних значеннях рушійної сили процесу вологообміну.

Відповідно до фізичної схеми (рис. 2.8), формулюється математична модель. В області дії електромагнітного випромінювання рівняння енергії має вигляд:

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(t)) + r\gamma\rho_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} + N_E. \quad (2.164)$$

В цьому співвідношенні прийнято наступні позначення: c - теплоємність матеріала; ρ_0 - густина сухої частини матеріала; r - теплота фазового переходу води в пару; γ - частка води, що перейшла в пару; N_E - об'ємна щільність внутрішніх джерел теплоти (відповідна поглинанню проникаючого електромагнітного випромінювання).

В цій же області кінетика вологообміну визначається відповідними рушійними силами. Зазвичай найбільший інтерес викликають процеси видалення поверхневої та капілярної вологи.

Для області дії електромагнітного випромінювання рівняння енергії можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial U_p}{\partial \tau} = \operatorname{div}(D_p \cdot \operatorname{grad}(U_p)). \quad (2.165)$$

$$\frac{\partial U_k}{\partial \tau} = \operatorname{div}(D_T \cdot \operatorname{grad}(T) + D_B \cdot \operatorname{grad}(P_k)). \quad (2.166)$$

де D_p, D_T, D_B - коефіцієнти конвективної дифузії, термодифузії та бародифузії відповідно.

В контексті стрічкової сушарки (рис. 2.8) рівняння разом із відповідними рівняннями зв'язку слід записати для всіх n зон активної довжини сушильної камери L_A . В кожній зоні діє своє джерело електромагнітної енергії N_i , $i = 1, 2, 3 \dots n$:

$$\sum_{i=1}^n x_i = L_A. \quad (2.167)$$

$$\sum_{i=1}^n N_i = N_E. \quad (2.168)$$

При розгляді кожної зони враховують такі припущення:

1. На початковий момент часу температура матеріала (t_p), стінок (t_s) та всіх конструктивних елементів установки є однаковою і дорівнює температурі навколишнього середовища (t_{os}).
2. Фізичні параметри матеріала в межах кожної зони постійні і беруться як середні значення (середня температура матеріала в зоні t_p , його вологість U_p).
3. Витрати повітря (L_B), матеріала (G_p) і потужність випромінювання (N) в межах кожної зони є постійними.
4. Швидкість руху стрічки (w) постійна, тобто питоме навантаження на поверхню стрічки в межах кожної зони постійне.
5. Процес вважається квазістаціонарним.
6. Теплопровідність в шарі матеріала вздовж осі x можна не враховувати.
7. На поверхні матеріала товщина гідродинамічного прикордонного шару дорівнює товщині теплового і дифузійного прикордонних шарів.

З урахуванням сформульованих припущень на верхній поверхні сушарки ($y = y_B$):

1. При $\tau = 0$:
 - Температура матеріала (t_p) дорівнює температурі навколишнього середовища (t_{os}).

- Джерело електромагнітної енергії (N) дорівнює нулю.
- 2. При $\tau > 0$:
 - На поверхні матеріала граничні умови II роду: $N = N_i = \text{const.}$
 - Для повітряного каналу: $y_V < y < y_B$.

Для потоку повітря:

1. При $\tau = 0$:
 - Температура повітря (t_V) дорівнює температурі навколишнього середовища (t_{os}).
2. При $\tau > 0$:

$$Q_V = L_B(i_0 - i_1) = \alpha_B F_i(t_p - t_V); F_i = l_i b_i. \quad (2.169)$$

- Зволоження повітря визначиться, як:

$$J_w = L_B(X_0 - X_1). \quad (2.170)$$

Гідродинаміка повітряного потоку. Рівняння Нав'є-Стокса в одномірному наближенні:

$$\rho_v v_v \frac{\partial v_v}{\partial x} = \rho_v g - \frac{\partial P_v}{\partial x} + \mu_v \frac{\partial^2 v_v}{\partial x^2}. \quad (2.171)$$

де ρ_v - щільність повітря; μ_v - динамічний коефіцієнт в'язкості повітря; α_B - коефіцієнт теплообміну від матеріала до повітря; i_0, i_1 - ентальпії повітря на вході і виході з зони; F_i - площа поверхні матеріала; b_i - ширина матеріала; l_i - довжина матеріала в межах зони; J_w - потік вологості з матеріала; v_v - відносна швидкість повітря; P_v - тиск повітря; Q_V - теплообмін між матеріалом і повітрям; g - гравітаційна константа.

Основні процеси відбуваються в об'ємі матеріала, в межах $y_l < y < y_p$.

При $\tau = 0$:

Температура t_p дорівнює початковій температурі матеріала.

При $\tau > 0$:

- Для шару матеріала діє рівняння Фур'є-Кірхгофа:

$$\frac{\partial t_p}{\partial x} = \alpha_p \left(\frac{\partial^2 t_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_p}{\partial y^2} \right). \quad (2.172)$$

При граничних умовах III роду на межі $y = y_p$:

$$-\lambda_p \frac{\partial t_p}{\partial y} = \alpha_B (t_p - t_B). \quad (2.173)$$

Енергетичний баланс у шарі матеріала враховує:

1. Нагрівання сухої частини матеріала (Q_C);
2. Вологи (Q_U);
3. Перетворення частини рідини на пару (Q_J);
4. Теплообмін з повітрям (Q_B);
5. Теплообмін з транспортерною стрічкою (Q_L);
6. Поглинання проникаючого електромагнітного випромінювання (N_E).

$$Q_C + Q_U + Q_J + Q_B + Q_L + N_E = 0. \quad (2.174)$$

або:

$$G_C c_{pc} (\Delta t_{pi}) + G_U c_{pu} (\Delta t_{pi}) + r \gamma G_U + L_B (\Delta i_B) + Q_L + N_E b \delta_p l_i = 0 \quad (2.175)$$

Потік вологи з матеріала складається з: Конвективного потоку (J_k); Термодифузійного потоку (J_T); Бародифузійного

потоків (J_B) - при відповідних коефіцієнтах масовіддачі ($\beta_k, \beta_T, \beta_B$) на поверхнях фазового контакту (F_i, F_{ki}, F_{bi}) та різниці парціальних тисків ($\Delta P_p, \Delta P_T, \Delta P_B$).

Рівняння для потоку вологи в матеріалі виглядає наступним чином:

$$J = J_K + J_T + J_B = \beta_k F_i \Delta P_p + \beta_T F_{ki} \Delta P_T + \beta_B F_{bi} \Delta P_B \quad (2.176)$$

На межі матеріале та транспортерної стрічки (при $y = y_l$) відбувається теплообмін згідно з граничними умовами IV роду:

$$\lambda_p \frac{\partial t_p}{\partial y} + \lambda_l \frac{\partial t_l}{\partial y} = 0. \quad (2.177)$$

Аналогічно, при контакті стрічки з корпусом (при $y = 0$):

$$\lambda_{ke} \frac{\partial t_k}{\partial y} + \lambda_l \frac{\partial t_l}{\partial y} = 0. \quad (2.178)$$

Оскільки цей теплообмін відбувається за наявності контактної теплової опору R_{Tk} , використовується значення ефективного коефіцієнта теплопровідності:

$$\lambda_{ke} = [\lambda_l^{-1} + R_{Tk}]^{-1} \quad (2.179)$$

При наявності шару теплоізоляції на корпусі, рівняння для теплопровідності виглядає так $\tau > 0$:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_i}{\partial y^2} \right). \quad (2.180)$$

Умови однозначності при $\tau = 0$, $t_i = t_{os}$.

Вплив навколишнього середовища:

Теплообмін між ізолюваною поверхнею сушарки та навколишнім середовищем відбувається згідно з граничними умовами III роду:

$$\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial y} + \alpha_c(t_{os} - t_i) = 0. \quad (2.181)$$

Систему рівнянь завершають залежності теплофізичних властивостей матеріала, повітря, стрічки та ізоляції від температури:

$$\lambda_p = \lambda(t_p, U_p); \lambda_B = \lambda(t_B, X_B); \lambda_l = \lambda(t_l); \lambda_i = \lambda(t_i). \quad (2.182)$$

$$a_p = a(t_p, U_p); a_B = a(t_B, X_B); a_l = a(t_l); a_i = a(t_i). \quad (2.183)$$

$$\rho_p = \rho(t_p, U_p); \rho_B = \rho(t_B, X_B); \rho_l = \rho(t_l); \rho_i = \rho(t_i). \quad (2.184)$$

Основні труднощі з практичною реалізацією математичної моделі (2.182)-(2.184) пов'язані з рівняннями (2.71) та (2.76). Це підкреслює необхідність використання методів теорії подібності та створення адекватної моделі в узагальнених числах подібності.

Гідродинамічну ситуацію в повітряному каналі сушарки можна представити класичним числом Рейнольдса: $Re = vl_i\rho\mu^{-1}$. Для оцінки впливу потужності електромагнітного випромінювання на кінетику сушіння застосовується число енергетичного впливу, яке показує співвідношення між поглинутою матеріалом енергією N_E та тією енергією, яка необхідна для перетворення в пар усієї видаленої вологи:

$$Bu = N_E(r\gamma G_U)^{-1}. \quad (2.185)$$

Значення Bu , наближене до 1, характеризує "ідеальне" теплове сушіння, коли вся енергія, підведена до матеріала,

витрачається лише на перетворення вологи в пар. Однак ефективна організація бародифузійних процесів дозволяє видаляти частину вологи у вигляді туману. Таким чином, число Bu може служити мірою бародифузійного перенесення вологи.

Розрахунок коефіцієнтів масовіддачі β проводиться на основі рівнянь в узагальнених змінних, як залежність числа Шервуда від чисел Рейнольдса і Шмідта. Для умов сушіння в нерухомому шарі можна рекомендувати рівняння в узагальнених змінних:

$$Sh = A(Re)^n(Sc)^m(Bu)^k. \quad (2.186)$$

Для стрічкових сушарок, як стверджує Бурдо О.Г., більш перспективним може бути узагальнення з використанням масообмінного числа Стантона:

$$St_m \equiv \frac{\beta}{w} = A(Re)^h(Sc)^p(Bu)^q. \quad (2.187)$$

Константи в рівняннях визначаються шляхом обробки масивів експериментальних даних.

Числа Шервуда і Стантона представляють собою дві різні безрозмірні форми коефіцієнта масовіддачі, кожна з яких має свої переваги. Число Шервуда не містить режимних параметрів, але включає характеристичний розмір системи та коефіцієнт дифузії. Число Стантона безпосередньо пов'язане з дифузійним опором і не залежить від уявлення про пристінний прикордонний шар як область дії молекулярного механізму масопереносу. Вважається, що число St_m є більш характерним для аналізу кінетики процесів сушіння з бародифузійним перенесенням вологи.

Запропонований підхід дозволяє розраховувати кінетику сушіння за відомими режимними параметрами і структурними

характеристиками матеріала, обґрунтовувати та оптимізувати процеси сушіння з використанням електромагнітної енергії.

2.2.3. Математичні моделі теплопереносу в рухомому щільному шарі матеріала

Математичні моделі теплопереносу в щільному шарі під час мікрохвильової та мікрохвильово-конвективної сушки описують процес зневоднення дисперсного матеріалу у вертикальному каналі. Цей канал заповнюється матеріалом, що надходить із завантажувального бункера і рухається в вигляді щільного шару завдяки випускному механізму, розташованому внизу. У верхній частині каналу знаходяться магнетрони, які генерують необхідний тепловий потік, а сушильний агент подається через це ж місце, проходячи через шар і видаляючись через нижній отвір.

Під час сушіння частинки нагріваються і волога випаровується завдяки поглиненню мікрохвильової енергії та передачі тепла від сушильного агента. Для досягнення необхідного рівня вологості на виході регулюють такі параметри, як потужність магнетронів, температура та швидкість сушильного агента, швидкість руху шару і висота каналу.

При розробці математичної моделі теплопереносу враховуються такі положення:

1. Щільний продувний шар розглядається як система, що складається з твердих частинок і газоподібного сушильного агента, між якими відбувається тепломасообмін.
2. Мікрохвильова енергія, що поглинається частинками, є внутрішнім джерелом тепла в твердому компоненті. Інтенсивність цього джерела зменшується експоненційно з віддаленням від верхнього січення, де подається мікрохвильова енергія.

3. Тепло, що витрачається на випаровування вологи, враховується як негативне джерело тепла у твердому компоненті. Інтенсивність цього джерела залишається постійною на етапі сталої швидкості сушіння і зменшується по висоті каналу за експоненціальним законом на етапі зниженої швидкості.

Для спрощення моделі прийняті такі припущення:

- Властивості компонентів (температура, вологовміст) залишаються незмінними протягом часу.
- Мікрохвильова енергія, температура і швидкість компонентів рівномірно розподілені по перерізу каналу.
- Тепловтрати через стінки каналу настільки малі, що ними можна знехтувати.

За таких умов температури компонентів змінюються лише по висоті каналу, тому температурні поля є одномірними.

Математична модель теплопереносу включає рівняння енергії для газоподібного і твердого компонентів, а також граничні умови. На етапі зниженої швидкості сушіння рівняння приймають наступний вигляд, якщо не враховувати продольне перенесення тепла кондукцією:

$$\rho_g c_g w_g (1 - \beta) \frac{dv_g}{dx} = \alpha_m a (v_m - v_g). \quad (2.188)$$

$$\rho_m c_m w_m \beta \frac{dv_m}{dx} = \alpha_m a (v_g - v_m) + q_{v1} e^{mx} + q_{v2} e^{nx}. \quad (2.189)$$

Граничні умови на вході (при $x = 0$):

$$v_g = v_{g0} = 0; \quad t_m = t_{m0}; \quad v_m = v_{m0}; \quad (2.190)$$

де $v_g = t_g - t_{g0}$; $v_m = t_m - t_{g0}$; $v_{m0} = t_{m0} - t_{g0}$ - температури газового і твердого компонентів відповідно;

q_{v1}, q_{v2} – продуктивність внутрішнього випромінювача на вході в канал.

Ця модель дозволяє аналізувати розподіл температур у шарі і прогнозувати ефективність сушіння матеріалу при різних режимах роботи сушарки.

Продуктивність джерела, що обумовлено випаровуванням води, визначається за формулою:

$$q_{v2} = \rho_c r \frac{d\bar{u}}{d\tau} \quad (2.191)$$

Рішення системи рівнянь (2.188, 2.189) з граничними умовами (2.190) дозволило отримати наступні залежності для розподілу температур компонентів на ділянці падаючої швидкості сушіння:

$$v_g = -\frac{B_1 v_{m0}}{P_2} + \frac{B_1}{P_2} \left(v_{m0} + \frac{H_1}{P_2 - m} + \frac{H_2}{P_2 - n} \right) e^{P_2 x} + \frac{H_1 B_1}{m} \left(\frac{e^{mx}}{m - P_2} + \frac{1}{P_2} \right) + \frac{H_2 B_1}{n} \left(\frac{e^{nx}}{n - P_2} + \frac{1}{P_2} \right) \quad (2.192)$$

$$v_m = v_g + \left(v_{m0} + \frac{H_1}{P_2 - m} + \frac{H_2}{P_2 - n} \right) e^{P_2 x} + \frac{H_1 e^{mx}}{m - P_2} + \frac{H_2 e^{nx}}{n - P_2} \quad (2.193)$$

де

$$B_1 = \frac{\alpha_m a}{\rho_g c_g (1 - \beta) w_g} \quad (2.194)$$

$$B_2 = \frac{\alpha_m a}{\rho_m c_m \beta w_m} \quad (2.195)$$

$$H_1 = \frac{q_{v1}}{\rho_m c_m \beta w_m} \quad (2.196)$$

$$H_2 = \frac{q_{v2}}{\rho_m c_m \beta w_m} \quad (2.197)$$

$$P_2 = -(B_1 + B_2) \quad (2.198)$$

де P_2 - корінь характеристичного рівняння.

Як видно з (2.192, 2.193), температури компонентів та їх зміна по висоті сушарки залежать від кількох факторів:

- інтенсивності внутрішніх джерел тепла (позитивного, зумовленого поглинанням мікрохвильової енергії вологими частинками, і негативного, що викликається витратою тепла на випаровування вологи, тобто швидкістю сушіння);
- закону зміни інтенсивності джерел по висоті;
- температур компонентів на вході;
- швидкості компонентів;
- інтенсивності міжкомпонентного теплообміну;
- розміру частинок;
- фізичних характеристик компонентів.

В одному і тому ж перерізі температури компонентів різняться. При $x = idem$ різниця цих температур визначається наступним виразом:

$$v_m - v_g = \left(v_{m0} + \frac{H_1}{P_2 - m} + \frac{H_2}{P_2 - n} \right) e^{P_2 x} + \frac{H_1 e^{mx}}{m - P_2} + \frac{H_2 e^{nx}}{n - P_2} \quad (2.199)$$

Це залежить від різниці температур на вході (при $x = 0$), інтенсивності джерел і абсолютного значення P_2 . З виразів (2.192, 2.193) видно, що абсолютне значення $|P_2|$ тим менше, чим нижчий тепловий потік, що переноситься в процесі міжкомпонентного теплообміну, у порівнянні з тепловим потоком, що переноситься компонентами конвекцією. По висоті сушарки різниця температур зменшується.

На ділянці постійної швидкості сушіння ($n = 0$) розподіл температур компонентів описується наступними залежностями:

$$v_g = \frac{B_1 v_{m0}}{P_2} (e^{P_2 x} - 1) + H_1 \left(\frac{e^{P_2 x}}{(P_2 - m)P_2} + \frac{e^{mx}}{(m - P_2)m} + \frac{1}{P_2 m} \right) + H_2 \left(\frac{e^{P_2 x}}{P_2^2} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right) \quad (2.200)$$

$$v_m = v_g + v_{m0}e^{P_2x} + \frac{H_1(e^{mx} - e^{P_2x})}{m - P_2} - \frac{H_1(1 - e^{P_2x})}{P_2} \quad (2.201)$$

Можливі випадки, коли джерело, зумовлене поглинанням мікрохвильової енергії, також не змінюється по висоті каналу (коли коефіцієнт ослаблення потоку енергії в шарі малий або магнетрони розташовані в кількох перерізах по висоті на невеликій відстані один від одного). У таких випадках рівняння набувають наступного вигляду:

$$v_g = \frac{B_1 v_{m0}}{P_2} (e^{P_2x} - 1) + B_1 (H_1 + H_2) \left(\frac{e^{P_2x}}{P_2^2} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right) \quad (2.202)$$

$$v_m = v_g + v_{m0}e^{P_2x} + \frac{(H_1 + H_2)(e^{P_2x} - 1)}{P_2} \quad (2.203)$$

Якщо в шарі відсутні внутрішні джерела, то температури компонентів визначаються лише умовами міжкомпонентного теплообміну, і їх зміна по висоті каналу описується наступними залежностями:

$$v_g = \frac{B_1 v_{m0}}{P_2} (e^{P_2x} - 1) \quad (2.204)$$

$$v_m = v_g + v_{m0}e^{P_2x} \quad (2.205)$$

При режимах, коли тепловий потік, обумовлений міжкомпонентним теплообміном, значно перевищує тепловий потік, що переноситься компонентами конвекцією, температури компонентів при $x = idem$ практично однакові ($e^{P_2x} \rightarrow 0, v_m = v_g$).

Слід відмітити і часткові випадки:

а) Теплоперенос у рухомому шарі при мікрохвильовій сушці.

В даному випадку відсутнє продування сушильного агента через шар, і процес сушіння здійснюється виключно за рахунок мікрохвильової енергії. Використовується модель з одним компонентом, де непродувний щільний шар розглядається як квазігомогенна середа з ефективними характеристиками - густиною $\rho_{sl} = \rho_m \beta$, теплоємністю $\bar{c}_{sl} = \rho_g c_g (1 - \beta) + \rho_m c_m \beta \approx \rho_{sl} c_m$.

Рівняння енергетичного балансу шару для ділянки зі зниженою швидкістю сушіння:

$$\rho_{sl} c_m w_{sl} \frac{dv_{sl}}{dx} = q_{v1} e^{mx} + q_{v2} e^{nx} \quad (2.206)$$

Зміна температури шару по висоті каналу визначається наступною залежністю:

$$v_{sl} = \frac{H_1}{m} (e^{mx} - 1) + \frac{H_2}{n} (e^{nx} - 1) \quad (2.207)$$

Для ділянки з постійною швидкістю сушіння ($n = 0$) розподіл температури шару можна визначити за формулою:

$$v_{sl} = \frac{H_1}{m} (e^{mx} - 1) + \frac{H_2}{n} x \quad (2.208)$$

У цих формулах:

$$H_1 = \frac{q_{v1}}{\rho_{sl} c_m w_{sl}} \quad (2.209)$$

$$H_2 = \frac{q_{v2}}{\rho_{sl} c_m w_{sl}} \quad (2.210)$$

$$v_{sl} = t_{sl} - t_{sl0} \quad (2.211)$$

б) теплоперенос в нерухомому шарі мікрохвильовому-конвективному сушінні.

Математична модель процесу набуде наступного значення:

$$\rho_g c_g w_g (1 - \beta) \frac{dv_g}{dx} = \alpha_m a (v_m - v_g) \quad (2.212)$$

$$\alpha_m a (v_g - v_m) + q_{v1} e^{-mx} + q_{v2} e^{-nx} = 0 \quad (2.213)$$

Температури компонентів на ділянці згасаючої швидкості процесу сушіння визначаються, як:

$$v_g = \frac{q_{v1}}{Dm} (e^{mx} - 1) + \frac{q_{v2}}{Dn} (e^{nx} - 1) \quad (2.214)$$

$$v_m = v_g + \frac{q_{v1} e^{mx}}{B} + \frac{q_{v2} e^{nx}}{B} \quad (2.215)$$

де

$$B = \alpha_m a; D = \rho_g c_g w_g (1 - \beta). \quad (2.216)$$

Температурна різниця компонентів в одному перерізі $x = idem$:

$$v_m - v_g = \frac{q_{v1} e^{mx}}{B} + \frac{q_{v2} e^{nx}}{B} \quad (2.217)$$

Для температур компонентів на ділянці сталої швидкості процесу сушіння $n = 0$:

$$v_g = \frac{q_{v1}}{Dm} (e^{mx} - 1) + \frac{q_{v2} x}{D} \quad (2.217)$$

$$v_m = v_g + \frac{q_{v1} e^{mx}}{B} + \frac{q_{v2}}{B} \quad (2.218)$$

2.2.4 Математичне моделювання мікрохвильово-конвективного сушіння зернових культур у рухомому шарі.

На схемі установки, представленої на рис. 2.9, зображено завантажувальний бункер, розташований зверху шахтної сушарки. З боків сушарки знаходяться відсіки, в яких

розміщені мікрохвильові модулі, що складаються з магнетронів, хвилеводів і антен. Відсіки з мікрохвильовими модулями герметично захищені від вологи та ізольовані від внутрішньої частини сушарки за допомогою радіопрозорої перегородки. Для підтримки необхідного теплового режиму мікрохвильових модулів застосовується система примусового охолодження повітрям. Під сушаркою знаходиться охолоджувач для матеріалу, що пройшов сушіння, а нижче – випускний механізм, який контролює витрати матеріалу та забезпечує його переміщення у щільному шарі. Усередині завантажувального бункера встановлено трубчастий підігрівач, який працює за принципом рекуперації тепла для підігріву вологого матеріалу.

Повітропроводи з'єднують охолоджувач, сушарку та рекуперативний підігрівач для забезпечення послідовної циркуляції повітря за допомогою вентилятора. У центральній частині сушарки та охолоджувача передбачений вертикальний канал, який спрямовує потік повітря з охолоджувача назад у сушарку. Через систему жалюзі повітря потрапляє у шар матеріалу, що рухається у правій та лівій частинах сушарки, забезпечуючи його горизонтальне продування, після чого відводиться через додаткові жалюзі у повітропроводи. Далі повітря проходить через систему повітропроводів до рекуперативного підігрівача. Висушений матеріал опускається з сушарки в охолоджувач, де продувається повітрям, забраним з навколишнього середовища. Повітря надходить в охолоджувач через дифузори та жалюзі, продуває матеріал і через вертикальний канал повертається назад до сушарки. Після охолодження матеріал спрямовується у випускний пристрій, а потім – у нижній бункер (умовно не показаний).

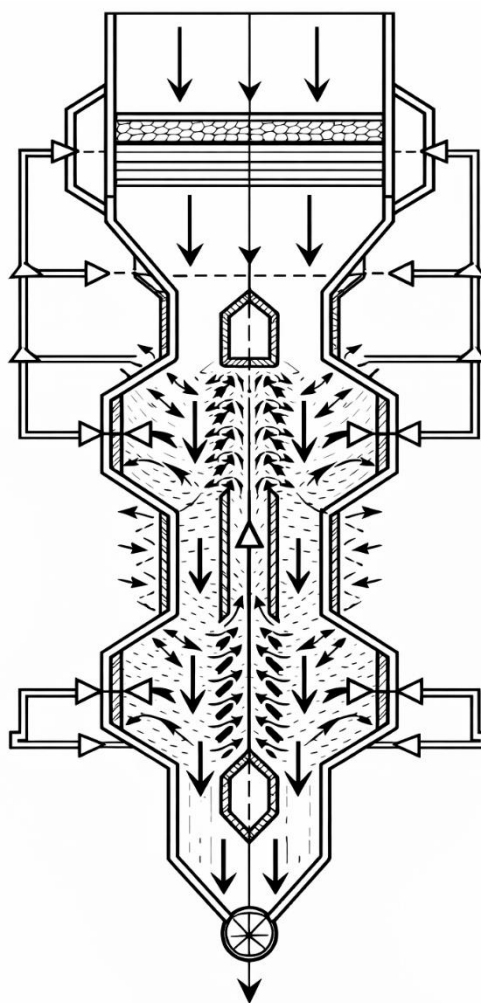


Рис. 2.9. Установа для мікрохвильово-конвективного сушіння матеріалів у щільному рухомому шарі

Для оцінки ефективності установки розроблені методика та програма розрахунків [5-8, 17-38, 116-167], а також виконані варіантні розрахунки. Методика базується на емпіричних формулах для швидкості мікрохвильово-конвективного сушіння, узагальнених залежностях, що описують зміну середнього вологосовмісту матеріала в процесі сушіння [117-143], а також аналітичних залежностях для розподілу температур компонентів по висоті сушарки [145-169].

Вхідні дані для розрахунку установки: тип матеріалу; тип сушильного агента; продуктивність установки по вологому матеріалу; вологосовміст матеріалу на вході і на виході з сушарки; температура матеріалу на вході в установку;

максимально допустима температура матеріалу; температура сушильного агента на вході в охолоджувач.

Слід виділити необхідні параметри для розрахунків: температура матеріалу на виході з охолоджувача, на вході в сушарку (на виході з охолоджувача), на виході з сушарки; швидкість руху шару матеріалу в сушарці; щільність приведенного теплового потоку; температура сушильного агента (повітря) на виході з охолоджувача.

Послідовність розрахунків полягає в наступному:

1. Визначити тепловий потік, який потрібно відвести від висушеного матеріалу в охолоджувачі:

$$Q_o = G_m \frac{1+u_k}{1+u_0} c_m (t_{m2} - t_{m3}) \quad (2.219)$$

2. Визначити витрати охолоджуючого повітря:

$$G_o = G_m \frac{Q_o}{\bar{c}_p (t_{p0} - t_{p1})} \quad (2.220)$$

3. Визначити площу поперечного перерізу сушарки:

$$F_o = \frac{G_m}{\rho_m (1-\varepsilon) w_m} \quad (2.221)$$

4. Визначити швидкість повітря в сушарці, число Рейнольдса:

$$w_p = \frac{G_o}{\rho_m F_o}; Re = \frac{w_p d}{\nu} \quad (2.222)$$

5. Знайти швидкість сушіння в періоді постійної швидкості за прийнятим значенням щільності приведенного теплового потоку:

$$N_1 = 1,57 \cdot 10^{-7} (q_n)^{1,17} (1 + 0,006 Re) \frac{t_{\rho 1}}{t_{\rho 0}} \quad (2.223)$$

6. Розрахувати безрозмірний комплекс $A = \frac{N_1 \tau}{u_0}$ з узагальненого рівняння для вологовмісту:

$$U_k = 1,016 - 0,332A - 1,449A^2 + 1,09A^3 \quad (2.224)$$

7. Визначити необхідний час сушіння τ :

$$\tau = \frac{Au_0}{N_1} \quad (2.225)$$

8. Визначити висоту і об'єм сушарки:

$$h = w_m \tau \quad (2.226)$$

$$V_c = F_0 h \quad (2.227)$$

9. Знайти масу матеріалу в сушарці

$$M_m = \rho_m (1 - \varepsilon) V_c \quad (2.228)$$

10. Розрахувати корисний тепловий потік, поданий до матеріалу в сушарці від магнетронів:

$$Q_n = G_m \bar{c}_m (t_{m2} - t_{m0}) + \frac{G_m r}{1 + u_0} (u_0 - u_k) \quad (2.229)$$

11. Знаходження значення потужності позитивного джерела тепла в шарі, спричиненого поглинанням енергії вологим матеріалом:

$$q_{v1} = \frac{Q_n}{V_c} \quad (2.230)$$

12. Знаходження щільності приведенного теплового потоку. У разі розходження з прийнятим значенням, потрібно заново задатися значенням q_n та повторити розрахунок до досягнення прийнятного узгодження.
13. Знаходження значення потужності негативного джерела тепла в шарі, спричиненого випаровуванням вологи:

$$q_{v2} = -N_1 r \left[\rho_m \frac{(1-\varepsilon)}{(1+u_0)} \right] \quad (2.231)$$

14. Знаходження розподілу температур компонентів (твердого і газового) по висоті сушарки, включаючи вихідний переріз ($x = h$), взявши за основу:

$$v_g = \frac{B_1 v_{m0}}{P_2} (e^{P_2 x} - 1) + B_1 (H_1 + H_2) \left(\frac{e^{P_2 x}}{P_2^2} - \frac{1}{P_2^2} - \frac{x}{P_2} \right) \quad (2.232)$$

$$v_m = v_g + v_{m0} e^{P_2 x} + \frac{(H_1 + H_2)(e^{P_2 x} - 1)}{P_2} \quad (2.233)$$

15. Порівняння отриманих значень температур компонентів на виході з сушарки з прийнятими. У разі незадовільного узгодження повторити розрахунки.
16. Визначення вологовідбір:

$$\Delta G_m = \frac{G_m}{1+u_0} (u_0 - u_k) \quad (2.234)$$

17. Визначення сумарної потужності магнетронів, питомого об'ємного вологовідбору та питомих витрат тепла на 1 кг випареної вологи:

$$P = \frac{Q_n}{\eta_k \eta_m} \quad (2.235)$$

де η_k, η_m – коефіцієнт корисної дії сушильної камери та магнетронів.

$$G_w^u = \frac{G_w}{V_c} \quad (2.236)$$

$$Q_u = \frac{P}{G_w} \quad (2.237)$$

Розрахунок рекуперативного підігрівача та контактного охолоджувача здійснювався відповідно до рекомендацій [94-117, 127-138,]. У розрахунках змінювалися значення швидкості руху матеріалу від 0,5 до 1,5 мм/с, а температура продувного повітря на вході в сушарку - від 20 до 50 °С.

Зі збільшенням швидкості шару при $G_m = idem$ зменшується поперечний переріз сушарки і час перебування матеріалу в ній. Щоб забезпечити необхідний час для досягнення заданого кінцевого вологовідбору, доводиться збільшувати висоту сушарки. Зменшення площі поперечного перерізу сушарки підвищує швидкість повітря в шарі, що сприяє незначній інтенсифікації процесу сушіння та збільшенню питомого вологовідбору. Питомі енерговитрати практично не залежать від швидкості шару. Значення швидкості шару повинно забезпечувати оптимальне співвідношення між розмірами поперечного перерізу та висотою сушарки.

Для підвищення температури повітря на вході в сушарку необхідно знизити його витрату через охолоджувач, що зменшує швидкість у шарі. Зниження швидкості повітря призводить до зменшення швидкості сушіння, але підвищення температури повітря – навпаки, збільшує її. Протилежний вплив цих факторів забезпечує незначне збільшення швидкості сушіння, зменшення висоти та об'єму сушарки.

2.2.5 Математичне моделювання внутрішніх нестационарних полів температури та вологовмісту зернової сировини під час інфрачервоного випромінювання

Останніми роками велика увага приділяється впровадженню різних фізичних методів у технологію харчового виробництва, зокрема, інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, ультразвуку, струмів високої та надвисокої частоти тощо. Застосування ІЧ-випромінювання для обробки зерна залишається актуальним питанням, яке викликає значний інтерес у науковців різних країн. Однак впровадження методу волого-теплової обробки зерна за допомогою ІЧ-випромінювання відбувається повільно. Це пояснюється кількома факторами.

Зерно є складним об'єктом як за хімічним складом, так і за структурою. Воно має невеликі розміри та яскраво виражену анізотропію, тобто нерівномірну зміну фізико-хімічних і структурно-механічних властивостей у різних напрямках. Невеликі розміри зерна значно ускладнюють експериментальні дослідження несталих полів температури та вологовмісту всередині нього. Проте науково обґрунтований вибір режимних параметрів волого-теплової обробки зерна із застосуванням ІЧ-випромінювання та інженерний розрахунок відповідного обладнання потребують аналізу розподілу та змін внутрішніх полів температури і вологості у часі.

Аналітичний метод є перспективним підходом до вирішення цієї проблеми. Для аналізу розподілу та зміни внутрішніх полів температури і вологовмісту зерна при різних режимних параметрах необхідно вирішити систему диференціальних рівнянь, що описують внутрішнє тепломасоперенесення в зерні з урахуванням умов волого-теплової обробки при ІЧ-опроміненні.

Завдяки проведеному комп'ютерному моделюванню, на основі розрахунків рішень цих рівнянь, стає можливим аналізувати вплив різних режимних параметрів волого-теплової обробки на внутрішнє тепломасоперенесення. Також можна розрахувати несталеві поля температури та вологовмісту в зерні. Порівняння цих полів з експериментальними даними про фізико-хімічні та біохімічні реакції, що відбуваються в зерні, дозволяє визначити залежності властивостей зерна від внутрішніх полів температури та вологості.

Ці залежності дають змогу вирішити такі завдання:

1. За результатами попередніх досліджень визначити оптимальні режимні параметри волого-теплової обробки зерна, при цьому експерименти будуть мати перевірочний характер.
2. Виявлені залежності для одного виду зерна можна екстраполювати на інші види зерна, що відрізняються розмірами, вологістю та теплофізичними властивостями, хоча оптимальні режимні параметри будуть різними.

Аналітичні рішення для внутрішнього тепломасоперенесення зазвичай отримують для тіл класичної форми (куля, циліндр, необмежена пластина тощо). Хоча зерно не є еталонним тілом, його форму можна умовно вважати кулястою.

Цілеспрямовано представляти систему диференціальних рівнянь у безрозмірній формі, що дозволяє скоротити кількість змінних, спростити розв'язання та зменшити обсяг розрахунків, роблячи номограми для інженерних розрахунків більш зручними.

У роботах [45-48, 227-238] надано рішення системи диференціальних рівнянь для кулі в загальному вигляді, що описують явища тепломасоперенесення за граничних умов другого роду, які відповідають умовам волого-теплової обробки зерна інфрачервоним випромінюванням.

Було проведено експериментальні дослідження волого-теплової обробки пшениці при ІЧ-опроміненні, які показали, що на першій стадії фазовими перетвореннями можна знехтувати, оскільки максимальний вологовміст окремого зерна досягається при температурі 70 °С. З урахуванням цього отримано часткове рішення, що описує несталеві поля температури $T(x, Fo)$ і вологовмісту $\theta(x, Fo)$ у зерні на першій стадії термообробки у вигляді рівнянь [45-48, 227-238]:

$$T(x, Fo) = (3Fo + 0,5x^2 - 0,3)Ki_q - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 \frac{2}{\mu_n^2 \sin(\mu_n)} c_i^q \frac{\sin(\mu_n x)}{x} e^{-\mu_n^2 v_i^2 Lu Fo} \quad (2.238)$$

$$\theta(x, Fo) = 3Ki_m Lu Fo - 0,1(3 - 5x^2)(Pn Ki_q + Ki_m) - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 \frac{2}{\mu_n^2 \sin(\mu_n)} c_i^m \frac{\sin(\mu_n x)}{x} e^{-\mu_n^2 v_i^2 Lu Fo} \quad (2.239)$$

де Fo - критерій Фур'є; x - безрозмірна координата розглянутої точки в зерні; Ki_q - критерій Кирпичова для теплопередачі; Ki_m - критерій Кирпичова для масообміну; Lu - критерій Ликова; μ_n - корені характеристичного рівняння.

$$v_i^2 = 0,5 \left[1 + Ko Pn + Lu^{-1} + (-1)^i \sqrt{(1 + Ko Pn + Lu^{-1})^2 - 4Lu^{-1}} \right] \quad (2.240)$$

$$c_1^q = \frac{Ki_q(v_2^2 - Lu^{-1}) + Ko Ki_m}{v_2^2 - v_1^2} \quad (2.241)$$

$$c_2^q = \frac{Ki_q(v_1^2 - Lu^{-1}) + Ko Ki_m}{v_2^2 - v_1^2} \quad (2.242)$$

$$c_1^m = \frac{Pn Ki_q v_2^2 - (1 - v_2^2) Ki_m}{v_2^2 - v_1^2} \quad (2.243)$$

$$c_2^m = \frac{Pn Ki_q v_1^2 - (1 - v_1^2) Ki_m}{v_2^2 - v_1^2} \quad (2.244)$$

де $i = 1, 2$; Ko - критерій Коссовича; Pn - критерій Поснова.

На другому етапі термовологої обробки зерна частина вологи перетворюється на пар, що призводить до її зменшення в зерні. Крім того, при розв'язуванні системи диференціальних рівнянь потрібно враховувати початковий нерівномірний розподіл полів температури та вологості в зерні. Експериментальні дослідження показали, що температурне поле в зерні залежить від проникнення випромінювання в глибину зерна за законом Бугера і набуває експоненційного характеру на завершальному етапі першої стадії. Для пшениці безрозмірний комплекс $F_1(x)$ описується рівнянням:

$$F_1(x) = \frac{t(x) - t_0(x)}{t_0(x)} = 0,062e^{1,62x} \quad (2.245)$$

де $t(x)$ - розмірне значення температури при безрозмірній координаті x досліджуваної точки; $t_0(x)$ - початкова температура зерна.

Безрозмірний комплекс $F_2(x)$, який характеризує розподіл вологи в зерні, має більш складний характер. Однак з достатньою для інженерних розрахунків точністю його також можна описати експоненційною залежністю. У даній роботі отримані залежності функцій P_{1i} та P_{2i} від режимних параметрів термовологісної обробки зерна інфрачервоним випромінюванням:

$$P_{1i} = 3A \left[\alpha^{-1} e^{\alpha} \left(1 - \frac{2}{\alpha} \right) + 2\alpha^{-3} (e^{\alpha} - 1) \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} F_1 \frac{A}{\mu_n} \left[\frac{e^{\alpha}}{\alpha^2 + \mu_n^2} \left(\alpha - \frac{\alpha^2 - \mu_n^2}{\alpha^2 + \mu_n^2} \right) \sin(\mu_n) - \frac{2\mu_n \alpha}{\alpha^2 + \mu_n^2} \right] \quad (2.246)$$

Функції P_{1i} та P_{2i} отримані з урахуванням комплексів $F_1(x)$ та $F_2(x)$. Оскільки ці комплекси описуються експоненційними залежностями, функція P_{2i} має аналогічний вигляд:

$$P_{2i} = 3B \left[\beta^{-1} e^{\beta} \left(1 - \frac{2}{\beta} \right) + 2\beta^{-3} (e^{\beta} - 1) \right] + \\ + 2 \sum_{n=1}^{\infty} F_1 \frac{B}{\mu_n} \left[\frac{e^{\beta}}{\beta^2 + \mu_n^2} \left(\beta - \frac{\beta^2 - \mu_n^2}{\beta^2 + \mu_n^2} \right) \sin(\mu_n) - \frac{2\mu_n \beta}{\beta^2 + \mu_n^2} \right] \quad (2.247)$$

Функції P_{1i} та P_{2i} входять у розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують явища теплопровідності та вологопровідності за граничних умов другого роду:

$$T(x, Fo) = 3[Ki_q - KoLuKi_m]Fo - \\ - 0,1(3 - 5x^2)Ki_q + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 A_{ki}^q P_{ki} - \\ - Lu^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{\mu_n^2 \sin(\mu_n)} \frac{\sin(\mu_n x)}{x} \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 Ki_k \frac{B_{ki}^q}{v_1^2} e^{-\mu_n^2 v_i^2 Lu Fo} \right] \quad (2.248)$$

$$\theta(x, Fo) = 3Ki_m Lu Fo - 0,1(3 - 5x^2)(PnKi_q + Ki_m) + \\ + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 A_{ki}^q P_{ki} - \\ - Lu^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{\mu_n^2 \sin(\mu_n)} \frac{\sin(\mu_n x)}{x} \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 Ki_k \frac{B_{ki}^m}{v_1^2} e^{-\mu_n^2 v_i^2 Lu Fo} \right] \quad (2.249)$$

де

$$A_{1i}^q = (-1)^i \frac{1-v_i^2}{v_1^2-v_2^2}; A_{2i}^q = (-1)^i \frac{Ko}{v_1^2-v_2^2}; \quad (2.250)$$

$$A_{1i}^m = (-1)^i \frac{Pn}{v_1^2-v_2^2}; A_{2i}^m = (-1)^i \frac{Lu^{-1}-v_i^2+KoPn}{v_1^2-v_2^2}; \quad (2.251)$$

$$B_{1i}^q = (-1)^i \frac{1-v_i^2}{v_1^2-v_2^2}; B_{2i}^q = (-1)^i \frac{KoLu v_i^2}{v_1^2-v_2^2}; \quad (2.252)$$

$$B_{2i}^m = (-1)^i \frac{(Lu^{-1}-v_i^2)Lu}{v_1^2-v_2^2}; A_{1i}^m = B_{1i}^m. \quad (2.253)$$

2.2.6 Математичне моделювання нестационарних температурних полів у плоскому шарі зерна під час інфрачервоної термообробки

Інфрачервона (ІЧ) термообробка плоского шару зерна є складним процесом, що залежить від численних параметрів: щільності теплового потоку на поверхні шару q_0 , кінетики його зміни на різних стадіях процесу, оптичних властивостей шару зерна, його теплофізичних характеристик (теплоємності, теплопровідності, температуропровідності), товщини шару, його густини тощо.

Через це вибір оптимальних режимних параметрів ІЧ-термообробки є складним завданням. Ситуація ускладнюється тим, що зернопереробні підприємства змушені випускати широкий асортимент продукції, маючи лише одну-дві технологічні ІЧ-установки, що вимагає частого переналаштування їхньої роботи.

У зв'язку з цим найбільш раціональним підходом є використання аналітичних методів для визначення оптимальних режимних параметрів термообробки, які ґрунтуються на графоаналітичному розрахунку нестационарних температурних полів усередині шару зерна.

На першій стадії термообробки процеси внутрішнього теплопереносу в плоскому шарі зерна описуються рівнянням теплопровідності з внутрішніми джерелами тепла при певних допущеннях:

$$\rho c \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \omega. \quad (2.254)$$

де ρ, c, λ - щільність, теплоємність і теплопровідність плоского шару зерна; ω - величина тепловиділення від внутрішніх джерел тепла; x - координата досліджуваної точки; τ - тривалість процесу.

Внутрішні джерела тепла, з урахуванням закону Бугера, описуються рівнянням:

$$\omega = kq_0 e^{-kx}. \quad (2.255)$$

де k - натуральний показник поглинання ІЧ-енергії в плоскому шарі товщиною x ; q_0 - щільність теплового потоку ІЧ-енергії на поверхні плоского шару.

З урахуванням граничних умов другого роду і для рівномірної температури плоского шару зерна, рівняння для розрахунку нестационарних температурних полів усередині нього має вигляд:

$$\begin{aligned} T(x, \tau) = T_0 + \frac{q_0 \tau}{R_s} (1 + e^{-d}) + \frac{2T_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b \sin(n\pi) \cos\left(\frac{n\pi x}{R}\right)}{n} + \\ + \frac{2q_0 R}{\lambda \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} b \cos\left(\frac{n\pi x}{R}\right) + \frac{2q_0 R^3 k^2}{\lambda \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b \cos\left(\frac{n\pi x}{R}\right) ((-1)^n - e^{-d})}{n^2 [d^2 + n^2 \pi^2]} \end{aligned} \quad (2.256)$$

де τ - тривалість стадії ІЧ-нагріву; R - половина товщини плоского шару зерна.

$$b = 1 - e^{-\frac{\alpha n^2 \pi^2 \tau}{R^2}}. \quad (2.257)$$

Дане рівняння дозволяє вирішувати такі завдання:

1. Знайти розподіл температури $T(x, \tau)$ усередині шару зерна при будь-якій його товщині $2R$, заданій початковій температурі шару зерна T_0 , тривалості ІЧ-термообробки τ і будь-якій прийнятій щільності теплового потоку q_0 .
2. Визначити щільність теплового потоку при заданій температурі $T(x, \tau)$ у будь-якій точці шару зерна товщиною

$2R$ для початкової температури T_0 і тривалості ІЧ-термообробки τ .

3. Визначити тривалість ІЧ-термообробки τ при заданих величинах щільності теплового потоку для певної температури $T(x, \tau)$ у будь-якій точці шару зерна товщиною $2R$ і початковій температурі T_0 .

У безрозмірній формі рівняння набуває вигляду:

$$T(X, Fo) = PoF_1(X, Fo) + Ki\varphi(X, Fo) \quad (2.258)$$

де Po - критерій Померанцева; Ki - критерій Кирпічева.

$$Po = \frac{kq_0R^2}{\lambda T^*}; Ki = \frac{q(t)R}{\Delta T \lambda} \quad (2.259)$$

де T^* - фіксована температура.

$$F_1(X, Fo) = 2d \left[\frac{1-e^{-d}}{2d^2} Fo + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b \cos(\mu_n x) [1-e^{-\mu^2 Fo}] [(-1)^n - e^{-d}]}{\mu_n^2 [d^2 + \mu_n^2]} \right] \quad (2.260)$$

де $\mu = n\pi$; Fo - критерій Фур'є; X - безрозмірна координата.

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2}; X = \frac{x}{R}; \quad (2.261)$$

$$\varphi(X, Fo) = k_i \left[Fo - \frac{1}{6}(1 - 3X^2) - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2}{\mu_n^2} \cos(\mu_n X) e^{-\mu_n^2 Fo} \right] \quad (2.262)$$

Згідно з рівнянням були виконані розрахунки та побудовані номограми для графоаналітичного визначення нестационарних полів температури.

У першому квадранті номограми визначається коефіцієнт ІЧ-опромінення k_0 поверхні нагрітого плоского виробу від блоку, що містить 15 ІЧ-випромінювачів вказаної

марки, розташованих на висоті Z_n і при кроці між ІЧ-випромінювачами S .

Коефіцієнт k_0 визначається виразом:

$$k_0 = \frac{q_0}{I d_e}; \quad (2.263)$$

де q_0 - щільність потоку інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, що падає на об'єкт опромінення; I - енергетична яскравість, яка характеризує об'ємне ІЧ-випромінювання від одиничної площі ІЧ-генератора в межах просторового кута в 1 стер; d_e - еквівалентний діаметр спіралі ІЧ-генератора.

Одиниця вимірювання k_0 виражається як (стер/м) або (1/м). Під об'ємним ІЧ-випромінюванням розуміють об'єм простору робочої камери, в межах якого розповсюджується вимірюваний потік ІЧ-випромінювання, тобто розглядається система "генератор ІЧ-випромінювання - опромінюваний матеріал".

В останній інтерпретації k_0 (1/м) може розглядатися як відношення площі об'єкта опромінення до об'ємного ІЧ-випромінювання від генератора в просторі робочої камери ІЧ-установки. Тому його доцільно називати коефіцієнтом опроміненості, а за фізичним змістом, аналогічно коефіцієнту екстинкції за законом Бугера, його можна також назвати коефіцієнтом зовнішньої екстинкції, що характеризує послаблення потоку об'ємного випромінювання в просторі робочої камери на шляху до поверхні оброблюваного об'єкта.

Оскільки в інженерних розрахунках важливо знати середню опроміненість поверхні виробу, розрахунок цього значення для всієї ширини конвеєра проводиться у другому квадранті номограми. Параметричний симплекс характеризує крокову нерівномірність полів енергетичного опромінення (ПЕО).

Наразі існуючі ІЧ-випромінювачі мають різні еквівалентні діаметри спіралі. Значення враховується в третьому квадранті номограми. Четвертий квадрант номограми дозволяє визначити числове значення щільності теплового потоку на поверхні виробу залежно від температури спіралі T або відповідної напруги на клеммах випромінювачів. Значення q_{p1} , отримане в цьому квадранті, характеризує тепловий потік, що падає на поверхню виробу. Враховується лише однократне падіння ІЧ-випромінювання безпосередньо від ІЧ-генератора. Для врахування ІЧ-випромінювання, відбитого від екрана ІЧ-генератора, вводиться величина q_{p2} , яка чисельно дорівнює тепловому потоку, що однократно падає на виріб від уявного відображення випромінювачів у екранах, розташованих над ІЧ-випромінювачами.

Сума $q_{p1} + q_{p2}$ дорівнює результуючому тепловому потоку q_p , тобто потоку, поглиненому виробом, за умови, що поверхня виробу буде абсолютно чорною, а поверхня верхнього екрана - абсолютно білою. Однак, оскільки харчові продукти мають певну відбивну здатність, а реальні екрани також володіють відбивною здатністю, вводиться коефіцієнти ∇_{p1} і ∇_{p2} , які дозволяють розрахувати результуючі теплові потоки:

$$\nabla_{p1} = \frac{q_{p1}}{q_{p12}}; \nabla_{p2} = \frac{q_{p2}}{q_{p22}} \quad (2.264)$$

де q_{p1} і q_{p2} - відповідно результуючі теплові потоки від q_{p12} і q_{p22} , поглинені матеріалом.

У випадку променевого теплообміну між випромінювачами та оптично нескінченно товстим виробом в умовах діатермічного середовища коефіцієнти ∇_{p1}, ∇_{p2} знаходять за рівняннями:

$$\nabla_{p1} = \frac{A}{1-RR_e}; \nabla_{p2} = \frac{AR_e}{1-RR_e}; \quad (2.265)$$

де A - поглинальна здатність матеріалу.

Значення ∇_{p1} використовується при розрахунку результуючого потоку q_{p1} від першої складової q_{p12} при висоті розташування ІЧ-випромінювачів Z_n . Для розрахунку величини q_{n2} від другої складової q_{p2} використовується коефіцієнт ∇_{p2} .

Результуючі значення q_{p1} і q_{p2} визначаються в п'ятому квадранті відповідно до рівнянь:

$$q_{p1} = \nabla_{p1} q_{n1}; q_{p2} = \nabla_{p2} q_{n2}. \quad (2.266)$$

У шостому квадранті визначається сумарний результуючий потік:

$$q_p = q_{p1} + q_{p2} \quad (2.267)$$

Ця методика графоаналітичного розрахунку була використана при проектуванні ІЧ-установки для термообробки зернової сировини.

Установка для термообробки зернової сировини інфрачервоним випромінюванням та її модифікації використовуються для проведення окремих теплових процесів, таких як:

- обсмажування насіння соняшнику;
- прогрів пшениці та жита перед помелом у зимових умовах при подачі з елеватора;
- зниження вмісту антипоживних речовин без зменшення розчинності білка, поліпшення смаку при обробці сирої сої та бобових культур;
- зміцнення слабкої клейковини пшениці та підвищення числа падіння борошна при переробці пророщеного зерна жита;

- модифікація вуглеводного комплексу з утворенням великої кількості екстрактивних речовин;
- збільшення пластичності ядра та зниження міцності зв'язку лузги, квіткових плівок з ядром перед лущенням круп'яних культур;
- санітарна обробка зернової сировини, підвищення її засвоюваності, зниження міцності, поліпшення смаку та аромату при виробництві комбікормів;
- видалення шкідників із зернофуражу;
- томління (пропарювання) при виробництві толокна.

В роботі [128] враховано всі аспекти моделювання процесу ІЧ сушіння зерна в сушильній камері, були розроблені унікальні системи рівнянь для обігріву з обох сторін і з одного боку (2.268). Конвективну складову при обігріві з обох сторін (2.269) можна ігнорувати через специфіку конструкції камери, тоді як при односторонньому підведенні тепла, наприклад, якщо ІЧ сушіння відбувається у режимі киплячого тонкого шару, конвекція враховується.

Температура в камері сушіння перетворюється у сигнал пристроєм T_f . Позначаючи ці сигнали аналогічними літерами, можна виразити різницю між фактичною і необхідною температурою у вигляді сигналу: $\Delta T = T_e - T_f$, який називають відхиленням або невідповідністю.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T + \varepsilon \frac{r}{c_p} \frac{\partial Y}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial Y}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 Y + D \delta \nabla^2 T; \\ \frac{\partial T}{\partial c_p} = \frac{a}{\frac{\partial c_p}{\partial \tau}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{r \rho}{c_p \rho} + \frac{w}{\frac{\partial c_p}{\partial \tau} c_p \rho}; \\ \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{E_p + \alpha [T_0 - T_p]}{-\lambda(W)}; \\ \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial U_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial U_p} \right)_{T,P} - T_0 \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial U_p} \right)_{T,P}; \end{array} \right. \quad (2.268)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{Q - F\chi[C_s T_n^4 - C_s T_0^4]}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \frac{\partial \xi}{\partial \Lambda_\zeta}; \\ \frac{\partial T}{\partial W} = \frac{a}{\frac{\partial W}{\partial \tau}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r\rho}{c\rho} + \frac{w}{\frac{\partial W}{\partial \tau} c\rho}; \\ \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{E_p + \alpha[T_0 - T_p]}{-\lambda(W)}; \\ \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial U_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial U_p} \right)_{T,P} - T_0 \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial U_p} \right)_{T,P}; \end{array} \right. \quad (2.269)$$

З урахуванням процесу сушіння по шарах зернового матеріалу система рівнянь набуде наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT}{d\tau} = \frac{Q - F\chi[C_s T_n^4 - C_s T_0^4]}{mc}; \\ \frac{dT_i}{d\tau} = k_2[T_{i+1} - T_i] + k_2[T_{i-1} - T_i]; \\ \frac{dT_n}{d\tau} = k_2[T_{n+1} - T_n]; \\ \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \frac{\partial \xi}{\partial \Lambda_\zeta}; \\ \frac{\partial T}{\partial W} = \frac{a}{\frac{\partial W}{\partial \tau}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{r\rho}{c\rho} + \frac{w}{\frac{\partial W}{\partial \tau} c\rho}; \\ \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{E_p + \alpha[T_0 - T_p]}{-\lambda(W)}; \\ \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial U_p} \right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial U_p} \right)_{T,P} - T_0 \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial U_p} \right)_{T,P}; \end{array} \right. \quad (2.270)$$

Використання сучасних датчиків у системах ІЧ сушіння дозволяє новими можливостями підійти до питання моделювання цього процесу. Нелінійну модель можна коригувати на основі вимірювань, отриманих під час роботи технологічного обладнання, і безпосередньо використовувати в оперативному управлінні. Найбільш доцільно представити таку модель у вигляді:

$$K = \sum_{i=1}^n C_i(\theta, S) Y_i q_i. \quad (2.271)$$

де $S = \{q_1, q_2 \dots q_n\}$; $\theta = \{Y_1, Y_2 \dots Y_n\}$ - вектори відносних величин теплових потоків у різних зонах сушіння та вологості зерна.

2.2.7. Моделювання повітрянодинамічних характеристик та температурних полів індукційного нагрівача

Для підвищення якості нагрівання та покращення енергетичних характеристик індукційної установки важливо обрати оптимальний режим роботи нагрівача. Цей режим визначається на основі аналізу можливих температурно-часових характеристик процесу нагріву. Вказані характеристики отримують через тепловий розрахунок, що висуває вимоги до точності розрахунків і проектування нагрівальних установок.

Тепловий розрахунок має враховувати низку факторів, які впливають на температурне поле в завантаженні:

- зміни інтенсивності магнітного поля по довжині завантаження;
- наявність теплових втрат з поверхні заготовки;
- залежність теплофізичних властивостей матеріалу завантаження від температури;
- зміни потужності під час нагрівання;
- можливість регулювання потужності при управлінні швидкістю нагрівання.

Методи розрахунку процесу індукційного нагрівання базуються на розв'язанні диференціальних рівнянь Максвелла та Фур'є для електромагнітного і теплового полів відповідно. Розподіл температури у часі описується рівнянням Фур'є у циліндричній системі координат.

Знайдене значення температури з урахуванням активного опору обмотки індуктора дозволяє визначити силу струму при заданій напрузі живлення. Також визначається середнє значення напруженості магнітного поля та відповідне йому значення магнітної проникності труб. Ітераційний процес завершується при досягненні необхідної точності розрахунку магнітної проникності. Після цього визначається розподіл густини струму в окремому завантаженні.

З огляду на те, що лінійні розміри феромагнітного завантаження (труби) перевищують довжину індуктора, і довжина індуктора є щонайменше втричі більшою за його діаметр, а також за результатами експериментальних досліджень, можна стверджувати, що поле всередині індуктора розподілене рівномірно. Тому для вирішення теплової задачі можна виділити одиничну трубу з прилеглою областю, яка знаходиться в тих же умовах, що й решта стрижнів. Вважається, що нормальна похідна температури на зовнішніх межах виділеної області дорівнює нулю, тобто теплові потоки зовні і всередині області виключаються. Таким чином, вирішення цієї задачі зводиться до визначення розподілу температурних полів в області з одиничною трубою і подальшого поширення розв'язку на весь об'єм завантаження.

Щоб розв'язати цю задачу, слід вирішити рівняння нестационарної теплопровідності, яке має вигляд:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \rho^{-1} \frac{\partial T}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \left\{ \begin{matrix} Q \\ -dc_p v \nabla T \end{matrix} \right\}. \quad (2.272)$$

де Q – питома потужність джерел тепла; $-dc_p v \nabla T$ – теплоносій; d, c_p, λ – густина, питома теплоємність, теплопровідність матеріала середовища відповідно; v – швидкість теплоносія.

Граничні умови такі:

- На осі симетрії - умова симетрії:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (2.273)$$

- На межі контактів двох середовищ (труба та теплоносіїв) - умова теплопередачі:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha [T_c - T_t]. \quad (2.274)$$

де λ - коефіцієнт теплопередачі на межі труби; α – коефіцієнт теплопередачі на стінці труби.

- На зовнішній межі області - умова нульового теплового потоку:

$$n[\lambda \nabla T] = 0. \quad (2.275)$$

де n - вектор зовнішньої нормалі.

Початкові умови такі:

- Початкова температура середовища $T_0 = 293,15 \text{ K}$;
- Швидкість теплоносія, розглянута як неперервне середовище - $v = 0,005 \text{ м/с}$.

Чисельний розрахунок даної задачі може бути виконаний за допомогою прикладного програмного забезпечення для обліку часу та просторових змін температури.

При моделюванні процесу індукційного нагріву для температурного розподілу в двох середовищах (труба і теплоносіїв) коефіцієнт теплопередачі α розраховується на основі числа Нуссельта, яке визначено Е. К. Калпіним і Г. А. Дрейцером для обтікання пучка циліндрів:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d}. \quad (2.276)$$

$$Nu = [0,032D - 0,0144]Re^{0,8}Pr^{0,33}. \quad (2.277)$$

де Re - число Рейнольдса; Pr - число Прандтля.

Цей підхід допомагає врахувати як конвективні, так і теплопровідні ефекти, що є критично важливим для точності моделювання та оптимізації роботи системи.

Питома потужність джерел тепла, що відповідає нагріву труби, визначається за наступною формулою:

$$Q = 0,5 \frac{j j^*}{\sigma}. \quad (2.278)$$

Слід також зазначити, що розподіл потужності всередині джерел тепла у розрахунковій області визначався на основі дискретних значень у певних точках. Згідно з наведеним методом, виконано розрахунок теплообмінного апарату для нагріву теплоносія (води). При довжині індуктора $a = 0,6$ м та числі витків $w = 180$ і діаметрі індуктора $di = 0,165$ м, площа теплообміну при використанні феромагнітних труб діаметром $df = 0,035$ м становить $S = 1,2$ м².

Оскільки індуктор має обмежену довжину і в феромагнітному завантаженні присутній ефект скупчення, розподіл теплових втрат є нерівномірним як по довжині, так і по глибині завантаження. Тому при чисельному розрахунку для визначення розподілу температурних полів необхідно враховувати цю нерівномірність у розподілі потужності всередині завантаження.

Слід зауважити, що просторовий розподіл потужності внутрішніх джерел тепла можна задати як добуток двох функцій, що апроксимують графіки розподілу потужності по довжині і глибині завантаження:

$$Q_w = Q_z Q_r. \quad (2.279)$$

Апроксимація графіків розподілу потужності по довжині труби описується поліномом четвертого порядку, а по глибині - поліномом третього порядку (через складніший характер розподілу).

Отримане значення для розподілу тепловиділень може бути використане для моделювання внутрішніх джерел тепла в будь-яких стандартних розрахункових програмах.

Таким чином, задачу розподілу температури в розгалуженому завантаженні можна розділити на дві частини. На першому етапі використовується аналогічний метод для визначення розподілу джерел тепла, який представляється у вигляді добутку двох функцій. На другому етапі проводиться чисельний розрахунок температури в завантаженні з урахуванням попередньо визначеного розподілу джерел тепла. Це дозволяє уникнути необхідності розв'язання тривимірної електро-теплової задачі. Експериментальні дослідження автора [145-148, 267-298] показали, що запропонований метод забезпечує точне описання загального розподілу температурних полів в завантаженні.

Теплофізичні властивості матеріалів труби і теплоносія (повітря) враховуються як середня температура цих матеріалів протягом процесу нагрівання (приблизно 60°C).

Для визначення температури теплоносія на виході з каналу індуктора можна скористатися відомою формулою для розрахунку теплової потужності:

$$P = C_p G \Delta T. \quad (2.280)$$

де C_p - теплоємність теплоносія; G - масова витрата теплоносія (що проходить через канал індуктора); ΔT - різниця температур.

Заздалегідь визначивши величину потужності внутрішніх джерел тепла, можна використати формулу (2.280) для

розрахунку різниці між початковою та кінцевою температурами теплоносія, що проходить через канал індуктора. З отриманих даних випливає, що різниця температур складає 41°C . Оскільки початкова температура повітря була 20°C , температура теплоносія на виході з каналу становить 61°C .

Чисельний розрахунок, який враховує зазначені теплофізичні властивості матеріалів труби та теплоносія, дозволив провести аналіз динаміки нагрівання труби. Аналіз було виконано як у точці максимальних тепловиділень, так і вздовж труби на її поверхні. Для підтримання необхідної температури теплоносія на виході з каналу індуктора можливі такі регулювання: змінювати швидкість руху теплоносія або коригувати потужність тепловиділень у трубах. Це досягається шляхом зміни напруги живлення або числа витків індуктора.

Цей підхід дозволяє адаптувати систему до вимог процесу, забезпечуючи ефективний контроль температури і налаштування процесу в реальному часі.

2.2.8 Математичне моделювання контактного нагріву для сушіння насіння у вакуумі

Автор [176-180] розглядає процес теплопровідності в умовах, що змінюються з часом. Припустивши, що насіння, яке має початкову температуру T_0 , засипається шаром товщиною h на нагріту поверхню з температурою T_{Π} (рис. 2.10).

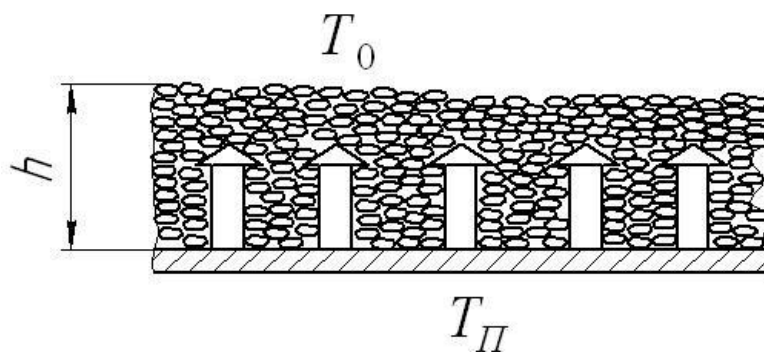


Рис. 2.10. Схема контактної нагрівки насіння

Слід зазначити, що температура поверхні $T_{\text{п}}$ залишається постійною протягом усього процесу нагрівання насіння, а початкова температура насіння T_0 є нижчою від $T_{\text{п}}$. Тепло поширюється лише у напрямку перпендикулярно до нагрітої поверхні і витрачається виключно на нагрівання насіння. Необхідно визначити залежність температури насіння $t(h, \tau)$ від часу τ і товщини шару h . Передачу тепла від нагрітої поверхні до насіння можна змодельовати за допомогою диференціального рівняння другого порядку з частинними похідними:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial h^2}, \quad (2.281)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$.

Застосуємо метод розділення змінних (метод Фур'є). Нехай шукану функцію можна представити як добуток двох окремих функцій: $t(h, \tau) = H(h) \cdot T(\tau)$.

Підставивши цей вираз у рівняння (2.281), отримано:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T(\tau) \cdot H(h) = a \cdot \frac{\partial^2}{\partial h^2} H(h) \cdot T(\tau). \quad (2.282)$$

У лівій частині рівняння знаходиться функція, що залежить від τ , тоді як у правій частині залежність від товщини шару h . Це дозволяє записати рівняння як тотожність, прирівнявши кожен до константи при фіксованому значенні в лівій або правій частині:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T(\tau) \cdot \frac{1}{a \cdot T(\tau)} = \frac{1}{H(h)} \frac{\partial^2}{\partial h^2} H(h) = \mu^2. \quad (2.283)$$

Розкриваючи вираз (2.283), одержимо диференціальні рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T(\tau) - \mu^2 \cdot a \cdot T(\tau) = 0; \quad (2.284)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial h^2} H(h) - \mu^2 \cdot H(h) = 0. \quad (2.285)$$

Розв'яжемо відповідні рівняння, для цього перенесемо доданок $\mu^2 \cdot a \cdot T(\tau)$ у праву частину рівняння, після чого помножимо обидві частини рівняння на $\partial \tau$, а потім розділимо на $T(\tau)$. У результаті рівняння набуде вигляду [176]:

$$\frac{dT}{T} = \mu^2 \cdot a \cdot d\tau. \quad (2.286)$$

Загальне рішення рівняння (2.286) можна записати так:

$$T(\tau) = C_{1T} \cdot e^{\mu^2 \cdot a \cdot \tau}. \quad (2.287)$$

Розв'яжемо рівняння (2.285), яке з урахуванням $\mu^2 < 0$ набуває такого вигляду:

$$\frac{\partial^2}{\partial h^2} H(h) + \mu^2 \cdot H(h) = 0. \quad (2.288)$$

Відповідно, загальний розв'язок рівняння (2.288) можна записати так:

$$H(h) = C_{H1} \cos(\mu h) + C_{H1} \sin(\mu h). \quad (2.289)$$

Часткове рішення для функції $t(h, \tau)$ отримано, підставивши початкові умови. При $\tau \rightarrow \infty$, функція $t(h, \tau)$ набуває значення $t(h, \tau) = T_p$. Підставляючи $\tau = \infty$ та значення функції $t(h, \tau)$ для цього випадку, отримаємо:

$$t(h, \tau) = [C_{H1} \cos(\mu h) + C_{H1} \sin(\mu h)] C_{1T} e^{-\mu^2 a \tau} + T_p. \quad (2.290)$$

Слід відмітити [176-178], що за будь-якого $h > 0$ у момент часу $\tau = 0$, функція $t(h, \tau)$ дорівнює T_0 , а при $h = 0$ у момент часу $\tau = 0$, функція $t(h, \tau)$ дорівнює T_p . Тобто, на початковий момент часу $\tau = 0$, розподіл температур можна описати як:

$$t(h, 0) = \varphi(h). \quad (2.291)$$

де:

$$\varphi(h) = \begin{cases} T_p, & h = 0 \\ T_0, & h > 0 \end{cases} \quad (2.292)$$

Функція $\varphi(h)$ є розривною. Її можна виразити через відому розривну функцію - δ -функцію Дірака. Для цього складемо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \lambda^{-\delta(\infty)} a + b = T_p \\ \lambda^{-\delta(0)} a + b = T_0 \end{cases} \quad (2.293)$$

де λ - будь-яке дійсне число в інтервалі $(1; +\infty]$; $\delta(h)$ - δ -функція Дірака; a та b - корені системи алгебраїчних рівнянь.

Розв'язок системи алгебраїчних рівнянь (2.293) для початкового розподілу температур має вигляд:

$$C_{1T_p} C_{H_2} \sin(\mu h) = \lambda^{-\delta(h)} [T_0 - T_p]. \quad (2.294)$$

Функція $\varphi(h)$ не залежить від значення λ . Це також свідчить про те, що жодне з рішень функцій $t(h, \tau)$ не задовольняє умову, навіть якщо взяти кінцеву суму рішень $t_p(h, \tau)$. Розв'язання диференційного рівняння можливе лише в тому випадку, якщо вираз лівий член рівняння (2.294) буде

представлений у вигляді нескінченного ряду, що збігається до виразу $\lambda^{-\delta(h)}[T_0 - T_p]$:

$$t(h, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} C_{1T_p} \cdot C_{H2n} \cdot \sin(\mu_n \cdot h) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot a \cdot \tau} + T_p. \quad (2.295)$$

$$C_{1T_p} = \frac{1}{d_n} \cdot \int_0^L \lambda^{-\delta(h)} \cdot (T_0 - T_p) \cdot \sin \left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L} h \right] dh, \quad (2.296)$$

$$\text{де } d_n = \int_0^L \sin^2 \left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L} h \right] dh.$$

де цей ряд збігається до розривної функції, вираженої через δ -функцію Дірака, що дозволяє задовольнити початкові умови.

Для розв'язання диференційного рівняння необхідно також визначити значення константи C_{1T_p} . З цією метою скористаємося умовою (2.294). Враховуючи отримані власні значення чисел C_{H2n} та μ_n , умову можна записати так:

$$t(h, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} C_{1T_p} \cdot \sin \left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L} h \right] = \lambda^{-\delta(h)} \cdot (T_0 - T_p). \quad (2.297)$$

Це рівняння допоможе визначити константу C_{1T_p} , що є необхідним етапом для повного розв'язання диференційного рівняння з урахуванням початкових умов.

Оскільки при $h = 0$; $\lambda^{-\delta(h)} = 0$ та $\sin \left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L} h \right] = 0$, можна записати іншу умову:

$$\int_0^L \lambda^{-\delta(h)} \cdot \sin \left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L} h \right] dh = \int_0^L \sin \left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L} h \right] dh. \quad (2.298)$$

Знайшовши попередні значення отриманих виразів і підставивши їх значення разом з виразом (2.298) у формулу (2.296), ми отримаємо значення константи C_{1T_p} [178]:

$$C_{1T_p} = \frac{8 \cdot (T_0 - T_p) \cdot \sin^2 \left[\frac{\pi}{4} (2 \cdot n - 1) \right]}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1) - \sin[\pi \cdot (2 \cdot n - 1)]}. \quad (2.299)$$

Підставивши значення власних чисел C_{1T_p} , μ_n у рішення (2.295), отримаємо частковий розв'язок диференційного рівняння, який можна записати у вигляді нескінченного числового ряду [178]:

$$t(h, \tau) = 8 \cdot (T_0 - T_p) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2 \left[\frac{\pi}{4} (2 \cdot n - 1) \right] \cdot \sin \left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L} h \right]}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1) - \sin[\pi \cdot (2 \cdot n - 1)]} \cdot e^{-\frac{\pi^2}{4 \cdot L^2} \cdot (2 \cdot n - 1)^2 \cdot a \cdot \tau} + T_p. \quad (2.300)$$

Вираз (2.300) моделює процес нестационарної теплопровідності під час нагрівання насіння. У цьому рівнянні складова $(T_0 - T_p)$ представляє температурний напір на початку процесу, де T_p - це температура, яку набуде весь шар насіння через нескінченно великий проміжок часу. Оскільки теплова енергія під час теплопровідності передається через коливальні рухи молекул, формула містить гармонічну функцію $\sin \left[(2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L} h \right]$, що відображає ці коливальні процеси.

Аналіз технологічного процесу контактного нагріву, проведений на основі розв'язку диференційного рівняння нестационарної теплопровідності, показав [176-178], що зростання товщини шару насіння призводить до нелінійного зменшення швидкості нагрівання. Це спричиняє нерівномірність сушіння насіння у вакуумі, що робить використання тільки однієї контактної поверхні для нагрівання насіння неефективним.

РОЗДІЛ 3

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ТА СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Фракціонування зернових матеріалів у вертикальному кільцевому повітряному каналі при накладанні електричного поля

Проблема отримання високоякісного (товарного) продовольчого зерна та насіння зернових і олійних культур може бути успішно вирішена застосуванням фракційної технології післязбиральної обробки зерна. Сутність технології полягає у найскорішому, без проміжного зберігання, розділенні зерна, що надходить з поля на фракції насіннєву, продовольчу та фуражну. Для такого розділення зернового вороху на ранній стадії післякомбайнової обробки можливо і доцільно здійснювати повітряними зерносепаруючими машинами, функціонуючими за фракційною технологією [1-3].

Переваги повітряної сепарації очевидні: простота конструкцій; відсутність рухомих деталей; висока надійність; процес сепарації мало залежить від вологості зернового матеріалу [4-6]. Але існуючі конструкції пневмосепаруючих машин із вертикальними [7-9], горизонтальними [1-6] та нахиленими [8] повітряними (аспіраційними) каналами мають недостатню технологічну ефективність, бо при їх розробці та проектуванні не враховувались такі особливості: нерівномірність швидкості повітря в перетині каналів; взаємодія частинок між собою; обертання частинок в завихреннях повітря; нестабільна орієнтація частинок довгастої форми, яка носить випадковий характер.

Перераховані фактори у діючих пневматичних сепараторів з вертикальними каналами призводять до втрат якісних зернівок, в наслідок їх потрапляння у відходи, а сміттеві

домішки потрапляють у фракції якісного зерна. Якість поділу не перевищує 50 %, тобто виділяється до 50 % якісного зерна.

Відомі спроби покращення якості сепарації зерна супроводжуються значними конструкційними удосконаленнями: використання багаторівневого вводу зерна в канал [7]; застосування пневматичного зважування шару зерна на лускатій поверхні живильника пневмоканалу [10]. Але перераховані удосконалення, хоча і дозволили підвищити продуктивність та ефективність поділу в незначній мірі, не вирішують задачі фракціювання зерна у вертикальних каналах, для цієї цілі застосовують горизонтальні [6] та нахилені канали [8].

Разом з тим в роботах [12-14] виявлено можливість і ефективність поділу зернового матеріалу на фракції у вертикальних кільцевих каналах [4-7, 11]. В роботі [7] досліджено процес розділення компонентів зернового матеріалу в нижній частині кільцевого каналу. Але в математичних моделях не враховано нерівномірність швидкості потоку. Аналогічний недолік а роботі [12], крім того використано некоректно сформульовані диференціальні рівняння. Більш досконало пневмогравітаційний процес розділення компонентів зернового матеріалу досліджено в роботах [15-17], при цьому удосконалено аеродинамічну схему пневмосепаратора. Але в дослідженнях прийнято форму зернівок у вигляді кулі, яка навіть при обертанні не змінює міделев перетин і відповідно, не змінюється сила аеродинамічного опору, яка залежить від орієнтації зернівок довгастої форми.

В повітряному каналі при турбулентному режимі потоку повітря під впливом нерівномірності швидкості повітря і дією завихрювань при обтіканні зернівки ненульової форми, остання починає повертатися відносно набігаючого потоку, що призводить до безперервної (випадкової) зміни міделева перетину зернівки. При цьому змінюється сила

аеродинамічного опору зернівки, і траєкторія руху частинки безперервно змінюється, що призводить до зниження якості поділу зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями.

Узагальнені вище недоліки можна усунути, якщо під час руху частинки у висхідному повітряному потоці стабілізувати орієнтації її вісей інерції в просторі каналу. Одним із ефективних способів спрямованої орієнтації зернівок довгастої форми може бути накладення на двофазний потік (зерно-повітря) сталого електричного поля. Як відомо з аналізу функціонування електричних сепараторів [16, 17] при потраплянні зернівки довгастої форми (еліпсоїд обертання) у пневмозваженому шарі в електростатичне поле під дією опракидуючого електричного моментів зернівка орієнтується вздовж силових ліній поля, тобто встановлюється більшою віссю перпендикулярно електродам, утворюючим електричне поле. Таким чином, якщо у вертикальному кільцевому каналі розмістити циліндричні електроди (на зовнішній і внутрішніх поверхнях пневмоканалу, зернівки мають бути орієнтовані вздовж радіуса, і утримуватись в такому положенні під час переміщення. Крім того на частинку (заряджену) в електричному полі з'являються додаткові сили електричної природи, які по різному впливають на траєкторії руху окремих компонентів зернового матеріалу. Дія додаткових сил має сприяти збільшенню ефекту поділу зерна за аеродинамічними і електричними властивостями.

Враховуючи вищевикладене необхідно визначити умови та методи розрахунку параметрів процесу поділу зернового матеріалу. Це може бути досягнуто шляхом математичного моделювання динаміки руху зернівок у внутрішньому каналі при дії аеродинамічних електричних і масових сил.

Специфіка задач які розглядаються обумовлює аналітично розрахунковий метод дослідження процесу поділу зернового матеріалу на фракції у вертикальному

пневмоканалі, з нижньою зоною поділу. Оскільки на процес діють значна кількість факторів, які не можливо реалізувати в експериментах на натурі або моделі. На першому етапі досліджень бажано виявити фізичне можливість інтенсифікувати процес і оцінити на скільки саме.

За критерій ефективності поділу прийнято величину відхилення (розосередження) траєкторій руху компонентів зернового матеріалу у місці їх вивантаження:

$$\Delta x = x_2 - x_1, \quad (3.1)$$

де x_2 – відхилення важкої фракції; x_1 – відхилення середньої фракції.

Обмеженням при аналізі траєкторій є максимальне відхилення x_{max} , величина якого не повинно перевищувати глибину каналу, для кільцевого каналу x_{max} (де R, r – радіуси зовнішньої і внутрішньої циліндричних стінок з яких складається пневмоканал). За цих умов величина критерію ефективності визначається за співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{R-r}. \quad (3.2)$$

Основною ознакою поділу (яка характеризує зернівку прийнята швидкість її витання v_v , величина якої пов'язана з коефіцієнтом парусності k_v залежностями:

$$\frac{q}{v_v^2} = k_v = \frac{\xi((Re)_{am})}{2m}, \quad (3.3)$$

де $\xi((Re))$ – коефіцієнт аеродинамічного опору; ρ_a – густина повітря; S_m – Міделев перетин зернівки; $m = V/\rho$ – маса зернівки; V – об'єм зернівки; ρ – густина зернівки; Re – число Рейнольдса.

Для розрахунку траєкторій руху компонентів зернового матеріалу необхідно сформулювати математичний опис (модель) динаміки переміщення окремих зернівок під дією сил визначених на основі існуючих фізичних уявлень про взаємодію частинки з повітряним потоком при накладені стаціонарного електростатичного поля.

Формулювання математичної моделі процесу переміщення матеріалу реалізовано на основі складеної розрахункової схеми (рис. 1) силової взаємодії в полі аеродинамічних та електричних сил, при наступних припущеннях: зернівки представлені у вигляді еліпсоїдів з визначеними розмірами, густиною і масою; потік повітря стаціонарний, вирівняний; сила аеродинамічного опору пропорційна квадрату швидкості обтікання; швидкість повітряного потоку розподілена в поперечному перетині за ступеневим законом [13]:

$$v(x) = v \left(\frac{x}{B} \right)_{max}^{0.1}, \quad (3.4)$$

де B – половина глибини осі каналу; v_{max} – швидкість повітря на осі, розглядається як спрямлений рівномірний потік.

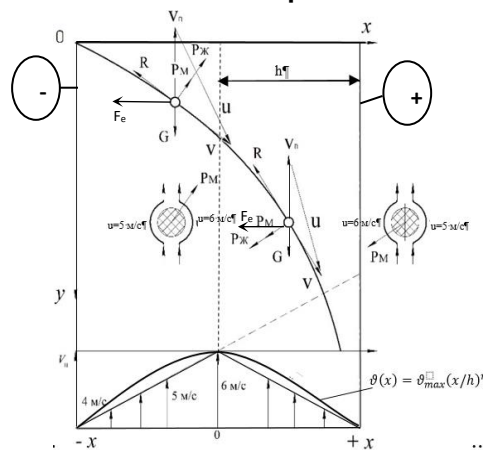


Рис. 3.1. Схема сил, що діють на частинку в пневмоканалі при накладеному електричному полі

Із схеми сил, діючих на частинку (ізольовану) у вертикальному повітряному потоці, визначаємо їх значення і напрямки:

– сила тяжіння:

$$\bar{G} = m\bar{g}, \quad (3.5)$$

де g – прискорення вільного падіння; m – маса зернівки спрямована вертикально вниз і прикладена в центрі мас;

– сила аеродинамічного опору повітряному середовищу, спрямована протилежно вектору відносної швидкості:

$$\overline{R} = mk_v \bar{u}^2, \quad (3.6)$$

де $\bar{u} = \bar{v}_a(x) - v$ – відносна швидкість зернівки; $\bar{v}_a(x)$ – швидкість повітряного потоку; v – абсолютна швидкість зернівки прикладена до точки симетрії зернівки (вектор швидкості на лінії дотичній до кривої траєкторії);

– сила електричного поля:

$$\overline{F}_e = Q\overline{E}, \quad (3.7)$$

де Q – електричний заряд зернівки; E – напруженість електричного поля.

При орієнтації зернівки довгою віссю вздовж електростатичного поля її електричний заряд визначається за формулою:

$$Q = \frac{E_0 \varepsilon_0 b^2}{4[1 + (\varepsilon_r - 1)\Phi_1]}, \quad (3.8)$$

для зернівок із формою стисненого еліпсоїду при орієнтації довгою віссю вздовж електростатичного поля, електричний заряд визначається формулою:

$$Q = \frac{E_0 \varepsilon_0 ab}{4[1 + (\varepsilon_r - 1)\Phi_1]}, \quad (3.9)$$

де $\Phi_1 = \frac{k^2}{\sqrt{(1-k^2)^3}} (\operatorname{arth} \sqrt{1-k^2} - \sqrt{1-k^2})$ – коефіцієнт осьової деполяризації; $k = \frac{a}{b}$ – коефіцієнт сферичності; b – довжина більшої вісі еліпсоїда; a – довжина малої вісі; E_0 – напруженість електричного поля вільного простору; ε_r – відносна діелектрична проникність зернівки; ε_0 – електрична стала ($\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Зернівка у формі еліпсоїда, яка подається з довільною орієнтацією у електричне поле, починає розвертатися таким чином, що довга вісь її була спрямована вздовж силових ліній поля, тобто орієнтуватися довгою віссю перпендикулярно електродам, які утворюють поле. Процес розвороту зернівки в

електричному полі здійснюється під дією обертального моменту M_e збоку поля. Величина моменту визначається за формулою:

$$M_e = \frac{E_0^2}{8\pi} V_q \Phi_2 \sin 2\gamma = \mu \sin 2\gamma_{max}, \quad (3.10)$$

де $\Phi_2 = \frac{\Phi'_1 - \Phi_1}{((\varepsilon_z - 1)^{-1} + \Phi_1)((\varepsilon_z - 1)^{-1} + \Phi'_1)}$; $\Phi'_1 = \frac{k^2}{2(1-k^2)} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{\operatorname{arth}\sqrt{1-k^2}}{\sqrt{1-k^2}} \right)$; V_q – об'єм зернівки; γ – кут між напрямком руху та довгою віссю еліпсоїда.

В процесі орієнтації зерна під дією електричного поля (момент M_e) повороту протидіє момент опору повітряного середовища. Визначається величина цього моменту з таких міркувань. Якщо сила опору середовищу ΔF , яку створює обертальне тіло з елементом його довжини Δl , яке віддалене від центра тяжіння на відстань l , то елементарний момент ΔM зумовлений цією силою дорівнюватиме:

$$\Delta M_c = l \Delta F. \quad (3.11)$$

Силу опору, яка діє на елемент довжини у лінійному (стоксовському) наближенні [13-16] можна записати у вигляді:

$$dF = k u dl, \quad (3.12)$$

де k – узагальнений коефіцієнт опору; u – лінійна швидкість елемента dl , яка (для обертального руху) визначається за очевидним виразом:

$$u = l \dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}, \quad (3.13)$$

де $\frac{d\phi}{dt}$ – швидкість зміни кута нахилу довгої вісі зернівки.

Момент опору повітря обертанню зернівки визначається з рівняння:

$$dM_c = k \dot{\phi} l^2 dl, \quad (3.14)$$

після інтегрування:

$$M_c = k \dot{\phi} \frac{l^2}{3} \quad \text{і} \quad \dot{\phi} = \dot{\gamma}. \quad (3.15)$$

Внаслідок того, що центр тиску повітряного потоку (рис. 3.1.) на зернівку не співпадає з центром мас сила опору

створює обертальний момент відносно центру мас [15], який спрямовано, таким чином, що орієнтувати зернівку більшою віссю поперек напрямку повітряного потоку $\bar{V}_a$. Величина моменту визначається за формулою [15]:

$$M_a = ku^2 l_c \sin \gamma, \quad (3.16)$$

де $u = v_a - v$ – відносна швидкість (швидкість обтікання) зернівки; v_a – швидкість потоку повітря; v – швидкість руху зернівки; l_c – відстань від геометричного центру до центра мас.

Визначивши усі діючі на зернівку сили і моменти можна записати диференціальні рівняння, що визначають рух центра мас зернівки в повітряному висхідному потоці у векторній формі (рівняння поступального руху):

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{G} + \bar{F}_e + \bar{R}, \quad (3.17)$$

та рівняння обертового руху зернівки, що описує динаміку обертового руху:

$$J \frac{d\gamma}{dt} = M_c(\gamma) + M_a(\dot{\gamma}) + M(\gamma), \quad (3.18)$$

де $J = m(a^2 + b^2)0.25$.

Підставляючи значення величини моментів (14) і (15) матимемо:

$$m(a^2 + b^2)0.25 \frac{d^2\gamma}{dt^2} - k \frac{l^3}{3} \frac{d\gamma}{dt} + k(v_a(x) - v(t))^2 \sin \gamma = 0. \quad (3.19)$$

Інтегрування рівняння (3.19) дозволяє визначити час переорієнтації зернівки в повітряному каналі після її сходження у повітряний потік, але для цього треба визначити $v(t)$ – зміну швидкості руху зернівки.

Розглядається динаміка руху компонентів зернового матеріалу у вертикальному повітряному потоці електропневмагравітаційного класифікатора (рис. 3.2, 3.3).

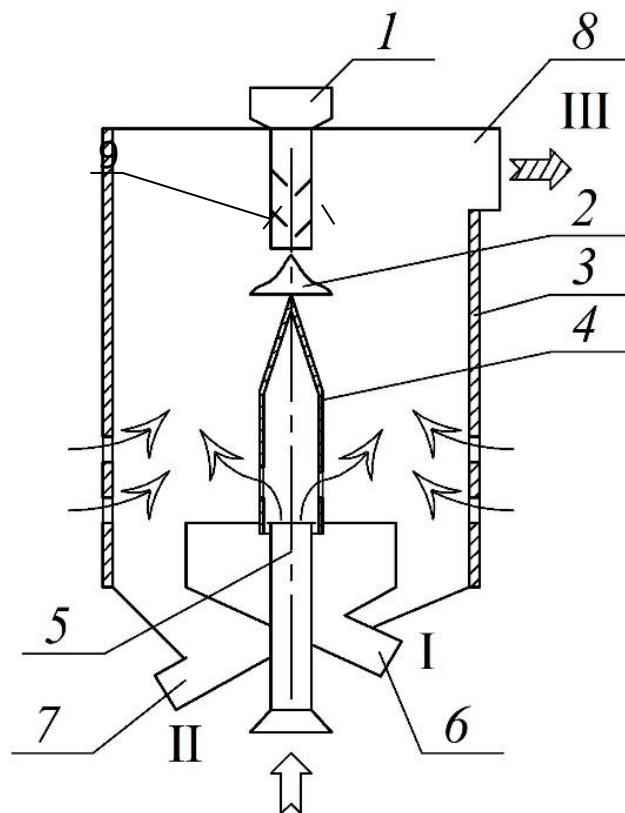


Рис. 3.2. Конструкційно-технологічна схема електропневмагравітаційного класификатора: 1 – завантажувальний бункер; 2 – розподільник зернового потоку; 3 – циліндричний заземлений корпус; 4 – ізолятор; 5 – труба всмоктування повітря; 6 – збірник -вивантажувач важкої фракції; 7 – збірник -вивантажувач середньої фракції; 8 – вихід легкої фракції в осадову камеру з вентилятором; 9 – коронуючий електрод.

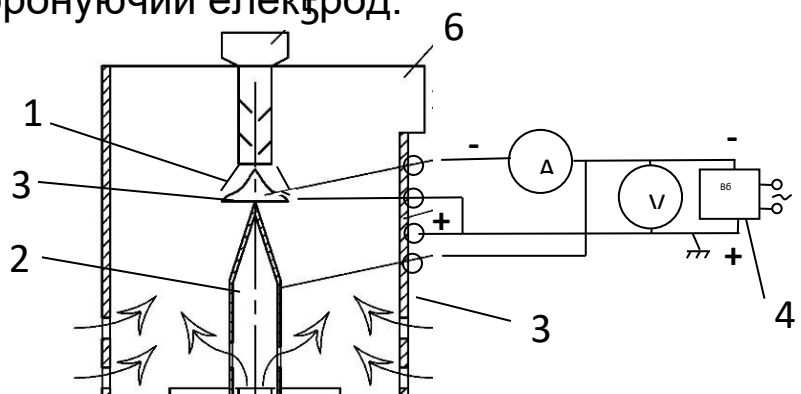


Рис. 3.3. Схема електричних комутацій: 1 – коронуючий електрод; 2 – потенціальні електроди; 3 – заземлені електроди; 4 – блок електроживлення; 5 - завантажувальний бункер; 6 - вихід легкої фракції в осадову камеру.

На рисунку 3.2 наведена конструктивно-технологічна схема вказаного класифікатора. На рисунку 3.3 схема електричних комунікацій (під'єднання електродів до блоку високої напруги). Схема блоку наведена в роботі [15, 16].

Електропневмагравітаційний класифікатор містить бункер завантажувач зернового матеріалу в канал з якого зерновий матеріал через трубу з гальмуючими елементами розпушеним струменем подається на розподільчий конус на якому закріплено заземлений електрод, над яким розміщено коронуючий електрод у вигляді конічної сітки із дроту діаметром 0.2 мм. Заземлений електрод ізолятором відділений від потенціального електроду, який розміщений на зовнішній поверхні внутрішньої порожньої конічної вставки, яка розміщена аксиально в циліндричному корпусі. До електрода через ізолятор підведена (негативна) напруга від високовольтного блоку. Внутрішня порожнинна вставка через сполучена із зовнішнім повітрям, а через вікна з пневмоканалом. На зовнішніх стінках пневмоканалу є щілини для всмоктування зовнішнього повітря. Повітряний потік із щілин рухається в граничному шарі внутрішньої поверхні омиваючи заземлений електрод-корпус; при цьому вирівнюється налипання легких частинок на поверхню. В якості подільника розділювальних фракцій використовується циліндрична частина збірника вивантажувача. Для очищення легкої фракції від сміттєвих домішок (легкі дрібні частинки) на виході повітряного потоку з пневмоканалу встановлено осадову камеру інерційного типу.

Процес функціонування (роботи) електричного пневмогравітаційного класифікатора можна описати (визначити) так. Витяжний вентилятор створює певне розрядження в об'ємі каналу, завдяки чому створюється вихідний повітряний потік. Наявність розподілених вікон, щілин в елементах конструкції епюру швидкостей повітря у поперечному перетині каналу

можна коригувати, таким чином, що виключити негативний вплив застійних зон каналу.

Зерновий матеріал поступає в канал із бункера проходячи вздовж живильної труби потік гальмується і на розподільчий конус подається в розпушеному вигляді. Проходячи між коронуючим негативним і заземленим позитивним електродами частинки отримують негативний електричний заряд Q і потрапляючи в простір між циліндричною частиною потенціального і заземлюючого електродів орієнтуються довгою віссю в напрямку вектору електричного поля $\vec{E}$, тобто в радіальному напрямку. Частинки компонентів зернового матеріалу, які мають більшу вагу (або густину) відхиляються від вісі каналу на меншу відстань і потрапляють у збірник звідки вивантажуються; більш легкі (середня фракція) відхиляються на більшу відстань падаючи донизу виводяться через патрубок з каналу. Частинки легкої фракції мають найбільше відхилення і виносяться потоком до верхньої частини каналу, а звідти в осадову камеру де осаджуються і виводяться через патрубок зовні. Таким чином реалізується поділ компонентів зернового матеріалу на три фракції. Це можуть бути за товарним призначенням насіннєва (I), продовольча (II) та фуражна (III) фракції. На скільки ефективно використання електричного поля для підвищення ефективності поділу визначаємо в матеріалах даної статті. На основі формулювання і дослідження математичної моделі.

Динаміку плоского руху компонентів зернового матеріалу у вертикальному висхідному повітряному потоці розподіленою швидкістю і накладеному електричному полі визначимо проектуючи рівняння (16) на вісі прямокутних координат XOY:

$$m \frac{dv_x}{dt} = -R_x \sin \beta - F_e, \quad (3.20)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = mg - R_y \cos \beta, \quad (3.21)$$

де R_x, R_y – проекції сил опору на вісі OX та OY;

$$\sin \beta = \frac{dx(t)/dt}{u(x,y)}; \cos \beta = \frac{dy(t)/dt}{u(x,y)};$$

де $u(x, y)$ – відносна швидкість зернівки (швидкість обтікання), величина якої визначається за формулою:

$$u(x, y) = \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + v_a(x)\right)^2}.$$

Як відомо [13] швидкість повітря у поперечному перетині вертикальних каналів розподілені нерівномірно (за ступеневим або логарифмічним законом). У пристінкових зонах каналу швидкість дорівнює нулю. Нерівномірність потоку зумовлює дію неконтрольованих бокових сил. У запропонованій аеродинамічній схемі апарату, є можливість вирівнювання епюри швидкостей повітря, в перетині каналу. На рис. 3.4 ілюстровано поле швидкостей повітря в досліджуємому каналі. Зміна швидкості руху в нижній частині каналу і зменшення її значення у верхній частині каналу, зумовлює деформації траєкторії руху частинок у бік випрямлення, що збільшує розходження траєкторій легких і важких компонентів зернового матеріалу. При розрахунках траєкторій руху зернівок різних фракцій зміну швидкості потоку за висотою визначаємо лінійними функціями:

- для нижньої частини каналу:

$$v_a(y)_1 = a_1 - b_1 y, \quad (3.22)$$

- для вищої частини каналу:

$$v_a(y)_2 = a_2 + b_2 y, \quad (3.23)$$

де a_1, b_1, a_2, b_2 – коефіцієнти апроксимації.

При цьому швидкість повітря в поперечному перетині каналу рівномірна: $\frac{dv_a}{dx} = 0$.

Визначимо проекції діючих сил:

$$R_x = mk_0 S_x \left(\frac{dx(t)}{dt}\right) \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + v_a(y)_{1,2}\right)^2}; \quad (3.24)$$

$$R_y = mk_0 S_y \left(\frac{dy(t)}{dt} + v_a(y)_{1,2}\right) \sqrt{\left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy(t)}{dt} + v_a(y)_{1,2}\right)^2}. \quad (3.25)$$

Площа Міделева перетину зернівки:

$$S_x = \pi a \sqrt{a^2 \sin^2 \phi} = \pi a^2 \sin \phi; \quad (3.26)$$

$$S_y = \pi a \sqrt{b^2 \cos^2 \phi} = \pi a b \cos \phi; \quad (3.27)$$

$$F_{ex} = QE = \frac{S_y \varepsilon_r}{4\pi(1+(\varepsilon_r-1))\Phi_1} E(y), \quad (3.28)$$

$$F_{ey} = 0, \quad E(y) = E3_{max},$$

де ε_r – діелектрична проникність зернівки (залежність від вологості) і густини зернівки ($\varepsilon_r = 10 \dots 80$).

Враховуємо, що в каналі відбувається протитечієвий рух потоку зерна і потоку повітря таким чином, що певний перетин каналу зайнятий зерном і діюча швидкість повітря у міжзерновому просторі буде збільшена в порівнянні з порожнім каналом. Значення дійсної швидкості обтікання зерна можна визначити з очевидного співвідношення:

$$v_a^*(y) = \frac{v_f}{\varepsilon}, \quad (3.29)$$

де v_f – швидкість повітря в порожньому каналі; ε – порозність двофазного потоку.

Таким чином отримані рівняння (3.19) – (3.20) із співвідношеннями (3.21) – (3.29) складають математичну модель динаміки площинного руху зернівки у вертикальному каналі з накладеним електростатичним полем.

Для чисельного розв'язку диференціальних рівнянь (нелінійних) задаємо початкові умови:

$$t = x = y = 0; \quad \frac{dx(t)}{dt} = v_0 \cos \alpha_0; \quad \frac{dy(t)}{dt} = v_0 \sin \alpha_0; \quad (3.30)$$

де v_0 – швидкість входу зернівки в потік повітря; α_0 – кут входу зернівки в повітряний потік.

Розв'язок сформульованої системи рівнянь з початковими умовами (3.30) в комп'ютерному середовищі MathCAD отримано у вигляді траєкторій руху компонентів зернового матеріалу, які різняться коефіцієнтом поділу k . На рис. 3.4 наведено траєкторії руху зернівок в повітряному потоці

електропневмогравітаційного класифікатора зернового матеріалу.

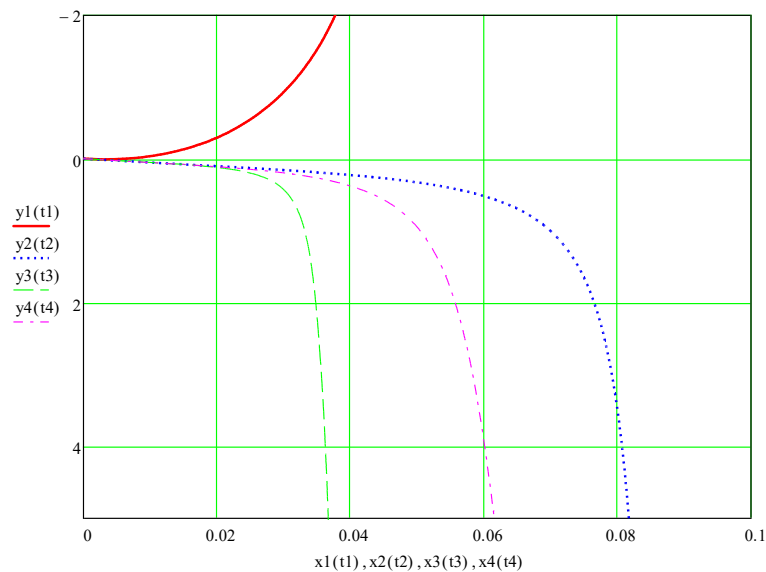


Рис. 3.4. Траєкторії руху зернівок в повітряному потоці електропневмогравітаційного класифікатора зернового матеріалу

Теоретично узагальнено і запропоновано нове вирішення наукової проблеми підвищення ефективності процесу розділення зернового матеріалу за комплексом аеродинамічних і електрофізичних властивостей окремих компонентів зернового матеріалу.

На основі аналізу сукупної дії на компоненти зернового матеріалу гравітаційної, аеродинамічної та електричної сил сформульовано математичну модель у вигляді диференціальних рівнянь динаміки руху окремої зернівки в повітряному потоці із змінною за висотою швидкістю, та сукупних алгебраїчних рівнянь які визначають особливості взаємодії зерна х повітряним потоком.

На основі чисельного розв'язку сформульовано системи рівнянь визначено траєкторії руху окремих компонентів зернового матеріалу (пшениця), що мають наступні параметри: перша фракція: (швидкість вітання) $v_v=1$ м/с; (маса) $m=42 \cdot 10^{-3}$ гр; друга фракція: $v_v=9$ м/с; $m=38 \cdot 10^{-3}$ гр; третя фракція: $v_v=5.5$ м/с; $m=35 \cdot 10^{-3}$ гр. При середньому значенні

напруженості електричного поля $E=2...3$ кВ/см величина розходження траєкторій у місці вивантаження збільшилась з 0.035 м до 0.044 м. Ці дані підтверджено експериментом при падінні одиничних зернин пшениці в каналі при $\overline{v_a} = 9 - 3.8y$, $\alpha_0 = 80^\circ$, $v_0 = 0.4$ м/с. Швидкість повітря (максимальне значення зменшилось з 12 до 9 м/с, відповідно витрати повітря зменшились на 25 %).

3.2. Модель процесу електро-пневматичного фракціонування насіннєвих матеріалів в електрокоронному сепараторі

На основі проведеного аналізу існуючих технологій сепарації насіннєвого матеріалу запропоновано для підвищення ефективності процесу поділу насіння на фракції використовувати електростатичне поле коронного розряду для попереднього розділення компонентів насіннєвої суміші за електричними властивостями. На другому етапі використовується повітряний потік. Відповідно до прийнятої технології сформульовані математичні моделі руху компонентів в електрокоронному сепараторі барабанного типу який використовують як живильник повітряного сепаратора.

Для опису руху компонентів зернового матеріалу в повітряному потоці використано типові рівняння, що описують рух частинки в середовищі з опором. Запропоновані спрощені формули для наближеного розрахунку траєкторії руху.

Збільшення урожайності зернових культур, шляхом підвищення якості насіннєвого матеріалу є актуальним завданням. Одним із напрямків його вирішення є подальше вдосконалення технологій і обладнання для поділу зернового матеріалу на фракції найбільш цінною з яких є насіннєва. Найбільш прості і розповсюджені пневматичні сепаратори дозволяють здійснювати поділ за аеродинамічними властивостями, які найбільш тісно корелюють з показниками

якості насіння (розмір, вага). Але видалення «бракованої» частини насіння, що має номінальні аеродинамічні характеристики залишається невирішеною проблемою. Одним із перспективних шляхів її вирішення є застосування електротехнологій. Застосування додаткового впливу електричного поля дозволяє шляхом дообладнання зерносепараторів електричними робочими органами, реалізувати поділ зернового матеріалу і за електричними властивостями, що значно підвищить якість насіннєвого матеріалу. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Нині розроблено високоефективні машини для очищення і сепарації зерна повітряними потоками [1-3]; у вертикальних [2], нахилених [3] і горизонтальних каналах [4]. Питання застосування електричного поля для сепарації насіннєвих сумішей висвітлені в роботах [5-7]. При цьому виявлено залежність електричних властивостей зерна від біологічного стану (біологічна активність). Аналізом встановлено, що використовуючи електростатичне поле і різницю електричних і механічних властивостей частинок зернової суміші, можна створити принципово нову технологію аеродинамічного поділу в пневмосепараторах. Для виявлення доцільності поєднання пневматичних і електричних робочих органів необхідно теоретично визначити закономірності аеродинамічному і електричному полі переміщення компонентів матеріалу в повітряному потоці при дії електричного поля коронного розряду. Використовується аналітично розрахунковий метод опису переміщення частинки на електроді в полі коронного розряду і повітряному потоці, який не пов'язаний з конкретизацією параметрів елементів конструкції машин.

Принципова схема розділення компонентів зернового матеріалу в повітряному потоці при розділенні в електростатичному полі перед подачею в повітряному потік наведено на рисунку 3.5.

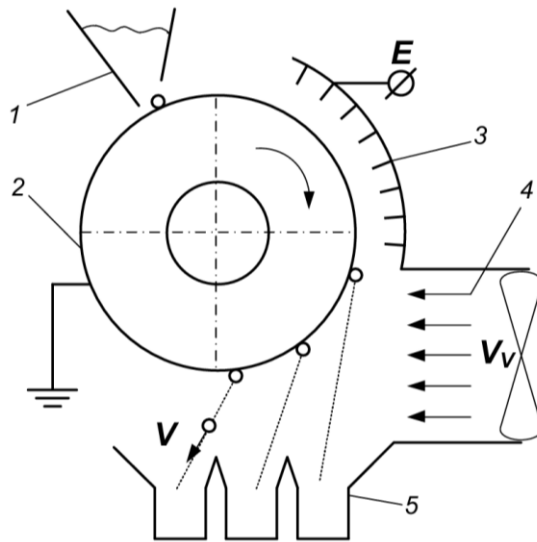


Рис. 3.5. Принципова схема розділення зерна в електричному і повітряному полі: 1 – бункер з насінням; 2 – барабанний електрод; 3 – коронуючий електрод; 4 – повітряний потік; 5 – приймальні комірки

Рівняння руху частинки по зовнішній поверхні барабану визначимо з таких посилянь: частинка знаходиться на поверхні обертового барабану в покої або може переміщуватись вздовж поверхні, що залежить від стану поверхні і властивостей матеріалу частинки.

На частинку в зоні електричного поля коронного розряду діють такі сили:

Тяжіння: $P = mg$

Відцентрова сила: $F_c = \frac{mV_a^2}{r} = m\omega^2 r$

Сила тертя: $F_t = Nf = N \tan \varphi$

Нормальна реакція поверхні: N ;

Електричного поля: $F_e = \frac{\varepsilon E}{4k} ab \mu(R)$;

Електрична сила дзеркального відбивання: $F_z = \frac{a^2 E^2 \varepsilon_0 \mu^2}{4k^2}$;

Де m - маса частинки; V_a - колова швидкість частинки при її абсолютному русі; ω - кутова швидкість частинки навколо вісі барабана; r - радіус барабана; f , φ - коефіцієнт і кут тертя; ε_r - відносна діелектрична проникність речовини зернини; E - напруженість електричного поля; a , b - розміри частинки у

формі еліпсоїда; $k = a/b$ - коефіцієнт сферичності; $k_f = \frac{\varepsilon_r - 1}{1 + (\varepsilon_r - 1)\Phi_1}$ - діелектричний коефіцієнт форми; Φ_1 - коефіцієнт осової деполяризації.

Величина функції $\mu(R)$ визначається із співвідношення [7]:

$$\mu(R) = \frac{1 + 2cR\delta k - \sqrt{1 + 4rc\delta k}}{2cR\delta k} \quad (3.31)$$

де c – ємність системи «частинка – електрод»; r – радіус електрода (коронуючого); δ – об'ємний заряд; r , R – контактний опір (опір самої частинки і контакту між нею і барабаном).

Проектуючи сили на координатній осі x' , y' рухомої системи координат отримаємо рівняння рівноваги частинки на поверхні обертального барабану:

Перше рівняння рівноваги частинки:

$$N + F_c - F_z - mg \cos \alpha = 0 \quad (3.32)$$

Друге рівняння:

$$F_f + mg \cos \alpha = 0 \quad (3.33)$$

З рівняння (3.32) визначимо силу нормальної реакції:

$$N = F_c + F_z + mg \cos \alpha - c \quad (3.34)$$

При певних умовах частинка втрачає зв'язок з поверхнею барабану і відривається від неї. За умовами $N=0$ частинка відірветься від поверхні і буде рухатись в повітряному середовищі як тіло, кинуте під кутом α до горизонту зі швидкістю V . З рівняння (3.33) маємо:

$$\cos \alpha = (-F_c - F_z + c)/mg$$

Підставляючи значення діючих сил і враховуючи, що [7]:

$$m = \pi a b^2 \rho / 6,$$

отримуємо:

$$\cos \alpha = \frac{V_a^2}{rg} - \frac{3}{2} \frac{\varepsilon E^2 \mu(R)}{2gb\rho k} \left[1 - \frac{\mu(R)}{kfk} \right] = M \quad (3.35)$$

Якщо прийняти, що швидкість руху частинки V_a , розмір барабану r і напруженість електричного поля E є незмінними величинами, що не впливають на властивості частинки, то

ступінь поділу компонентів в процесі сходження з барабану визначається величиною:

$$k_{nd} = \left[1 + \frac{\mu(R)}{kfk} \right] \mu(R) \frac{1}{b\rho kf}, \quad (3.36)$$

де b - менша вісь еліпсоїда обертання (для різних компонентів зернового матеріалу різні).

Кут відриву частинок визначається з очевидного співвідношення:

$$\alpha_0 = \arccos M. \quad (3.37)$$

При відсутності рухомого потоку повітря траєкторії руху частинок компонентів можна визначити за законом падіння тіла, кинутого під кутом α_0 до горизонту зі швидкістю V_a [7]:

$$y = x \tan \alpha - \frac{gx^2}{V^2 \cos \alpha}, \quad (3.38)$$

де α - кут сходження i -го компоненту.

Як впливає з аналізу досліджень різних авторів узагальнених в роботі [7] найбільше розгалуження траєкторій досягається при різних значеннях комплексного параметра μ (тобто різних властивостей компонентів). Для збільшення ефективності подальшого поділу доцільно використовувати рухоме повітряне середовище – горизонтальний потік повітря із швидкістю V .

Рух компонентів зернового матеріалу в горизонтальному потоці повітря після сходження з поверхні барабану описується системою диференціальних рівнянь (в нерухомій системі координат XOY , де OX – горизонтальна, OY – вертикальна вісі):

$$\ddot{x} + k_n(\dot{x} - V_n)\sqrt{(\dot{x} - V_n)^2 + \dot{y}^2} = 0;$$

$$\ddot{y} + k_n\dot{y}\sqrt{(\dot{x} - V_n)^2 + \dot{y}^2} = g;$$

де V_n – швидкість повітряного потоку; g – прискорення сил тяжіння.

$$\dot{x} = \frac{dx}{d\tau} \quad \dot{y} = \frac{dy}{d\tau}; \quad \ddot{x} = \frac{d^2x}{d\tau^2}; \quad \ddot{y} = \frac{d^2y}{d\tau^2}.$$

При початкових умовах: $\tau=0$; $x=0$; $y=0$: (V , α – швидкість і кут напрямку входження частинки в повітряний потік) дорівнює параметрам сходження частинки з барабану. При використанні спрощуючого припущення [4, 8]:

$$k_0 = \sqrt{\left(\frac{\dot{y}}{V_n}\right)^2 + \left(1 - \frac{\dot{x}}{V_n}\right)^2} \approx 1.02 \dots 1.12.$$

Траєкторії руху компонентів насіннєвого матеріалу можна наближено визначити з розв'язку рівнянь за наступними розрахунковими залежностями:

$$V_x(\tau) = V - (V - V_{x0})e^{-\frac{\tau}{k_0}},$$

$$x(\tau) = V\tau - k_0(V - V_{0x})\left(1 - e^{-\frac{\tau}{k_0}}\right),$$

$$V_y(\tau) = g_0 - (g_0 - V_{y0})e^{-\frac{\tau}{k_0}},$$

$$y(\tau) = g_0\tau - k_0(g_0 - V_{0y})\left(1 - e^{-\frac{\tau}{k_0}}\right),$$

$$k_0 = 1.1k_n V; \quad g_0 = \frac{g}{1.1k_n V}; \quad V_{0x} = V_a \cos \alpha_0; \quad V_{0y} = V_a \sin \alpha_0.$$

Кожному поточному моменту часу і τ відповідають координати переміщення частки $x(\tau)$, $y(\tau)$ і визначаючи їх значення будується траєкторія руху в координатах x і y системи координат XOY .

Поєднання процесів поділу компонентів насіннєвих матеріалів за комплексом електродинамічних і аеродинамічних властивостей дозволить значно покращити якість насіннєвого матеріалу «шляхом» видалення із фракцій неповноцінних зернин.

Підвищення якості поділу досягається також тим, що кожний компонент суміші вводиться в потік повітря під різним кутом і різною швидкістю.

Отримані спрощені математичні формули дозволяють проаналізувати процеси руху і поділу компонентів вже на стадії проектування нового обладнання і виявити раціональні параметри і режими роботи.

3.3. Моделювання процесу фракціонування зерна в пневматичних каналах при накладеному електричному полі

В світовій та вітчизняній практиці вдосконалення існуючих і створення нових машин та обладнання після збиральної обробки зерна або насіння визначилась тенденція використання ресурсо- і енергозберігаючих технологій. Найбільш повно вимоги економного використання матеріалів і енергоресурсів задовольняють зерносепаруючі машини, працюючи за технологією фракціонування зернового матеріалу (поділу на фуражну, продовольчу і насінневу фракції) з використанням повітряного потоку. В якості основних ознак фракціонування, найчастіше пропонується поділ за аеродинамічними властивостями в пневмосепаруючих каналах [1–13].

На основі аналізу вітчизняних і закордонних конструкцій повітряних зерносепаруючих машин виявлено загальні тенденції їх розвитку [10, 11] використання вертикальних аспіраційних каналів як в складі універсальних машин [3], так і самостійних сепараторів [5–7]; багаторівневе введення матеріалу в канал [8]; поділ на фракції з нижнім вивантаженням [1, 6]; застосування змінної в напрямку руху повітря швидкістю [9].

Дослідженню процесів (пневмосепаруючих систем та їх окремих елементів присвячені роботи Котова Б. І. і Степаненко С. П., Нестеренко О. В., Ермака В. П., Колодія О. С. та Кюрчева С. В.

Більшість авторів розглядають рух однорідної уособленої частинки зернового матеріалу в рухомому повітряному потоці, у рівномірно-розподіленому за перерізом каналу повітряному потоці, при цьому поділ здійснюється тільки на дві фракції: «легку» (верхнє вивантаження з каналу) і «важку» – з нижнім сходом. В роботах [6, 9] вперше запропоновано реалізувати поділ зерна на фракції з нижнім вивантаженням, шляхом розгалуження траєкторій руху окремих компонентів. Але усі проведені аналітичні дослідження [9, 12, 13] і розроблені моделі не враховують нерівномірність повітряного потоку в поперечному перерізі каналів, та орієнтацію частинок не правильної форми. Відомі пропозиції і дослідження спрямовані на підвищення ефективності поділу при використанні електричного поля накладеного на багатofракційну зернову суміш в повітряному потоці [14, 15]. Але ці роботи спрямовані на підвищення ефективності двофракційних сепараторів з нижнім вивантаженням і верхнім видаленням легкої фракції.

Відсутність даних досліджень, що до впливу нерівномірності епюри повітряного потоку на розгалудження траєкторій руху компонентів зернового матеріалу, та електричного поля, як фактора, що інтенсифікує процес поділу і дозволяє використовувати його параметри як керуючі дії, визначають актуальність теми досліджень.

Процес розділення компонентів зернового матеріалу в повітряному потоці, як відомо, заснований на різниці аеродинамічних властивостей окремих компонентів. При подачі зернового матеріалу, що складається з частинок, які відрізняються аеродинамічними властивостями (швидкість витання) у вертикальний висхідний повітряний потік певної швидкості, частина зернин виноситься потоком у верхню частину каналу, а інша частина рухається до низу проти потоку, тобто вихідний матеріал розділяється на дві фракції. Але частина компонентів в низхідному потоці зерна, частки якого

теж різняться аеродинамічними властивостями буде рухатись донизу за різними траєкторіями, тобто низхідний потік розділяється і траєкторії розщеплюються. За величиною відхилення траєкторій здійснюється поділ на фракції. Надалі розглядається тільки низхідний рух компонентів зернового матеріалу у висхідному повітряному потоці рис. 3.6.

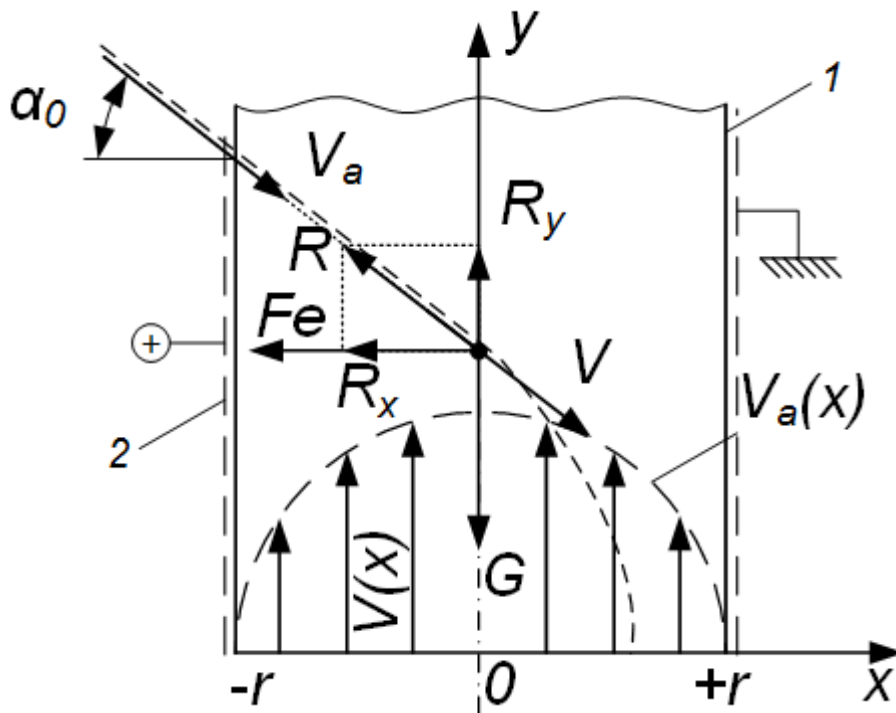


Рис. 3.6. Схема сил, що діють на частинку в повітряному каналі
(1 – канал, 2 – електроди)

Основною аеродинамічною характеристикою компонентів зернового матеріалу, є швидкість витання, величина якої в рівняннях руху враховується коефіцієнтом вітрильності:

$$k_v = \frac{C(\text{Re})S_m\rho}{2m} = \frac{g}{V_v^2},$$

де $C(\text{Re})$ – коефіцієнт аеродинамічного опору, як функція числа Рейнольдса; S_m – площа міделєвого перерізу, м^2 ; ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; m – маса частинки, кг ; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; V_v – швидкість витання, $\text{м}/\text{с}$.

Аеродинамічна сила опору повітряному потоку пропорційна квадрату відносної швидкості U :

$$R = \frac{C(Re)S_m \rho U^2}{2}.$$

При дослідженні процесу пневмофракціонування використано загальноприйняті припущення, спрощуючи порівняльний аналіз: обертання частки під дією несиметричного обтікання не враховується; орієнтація частки не змінна; величина k_v і S_m прийняті незмінними; швидкість витання частинок визначена експериментально; аеродинамічний режим у камері усталений.

В якості імітаційної моделі переміщення матеріальної частинки у рухомому середовищі з опором використано (загальноприйняті) типові диференційні рівняння [13]:

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} = g - k_v \left(V(x) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right) \sqrt{\left(V(x) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}, \quad (3.39)$$

$$\frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} = -k_v \frac{dx(\tau)}{d\tau} \sqrt{\left(V(x) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}, \quad (3.40)$$

з початковими умовами: $\tau = 0$; $x = -r$; $y = h$;

$$\begin{aligned} V_{0x} = \frac{dx(\tau)}{d\tau} &= V_\epsilon \cos \alpha_0; \quad V_{0y} = V(x) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} = V_\epsilon \sin \alpha_0; \\ V_\epsilon &= \sqrt{V_{0x}^2 + \left(V(x) + V_{0y} \right)^2}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Профіль поля швидкостей повітряного потоку (розподіл швидкості) за шириною каналу $V(x)$ описано рівнянням:

$$V(x) = V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right). \quad (3.42)$$

В рівняннях (3.39–3.42) позначено:

$V(x)$ – швидкість потоку повітря на відстані x від стінок каналу, м/с; V_0 – швидкість частинки при вході у потік повітря, м/с; α_0 – кут швидкості частинки при вході у потік повітря, град; x, y – координати руху частки, м; τ – поточний час, с; V_d –

динамічна швидкість, м/с; a – експериментальний коефіцієнт (залежить від властивостей повітря і умов його руху в каналі); V_m – максимальна швидкість повітря в каналі, м/с; r – відстань від стінок до вісі каналу, м; h – висота каналу (від місця вводу матеріалу), м.

Підставляючи значення $V(x)$ з (3.42) в (3.39) і (3.40) після відповідних перетворень отримаємо:

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} = g - k_v \left(V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right) \times$$

$$\times \sqrt{\left(V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2} ; \quad (3.43)$$

$$\frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} = -k_v \frac{dx(\tau)}{d\tau} \sqrt{\left(V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2} . \quad (3.44)$$

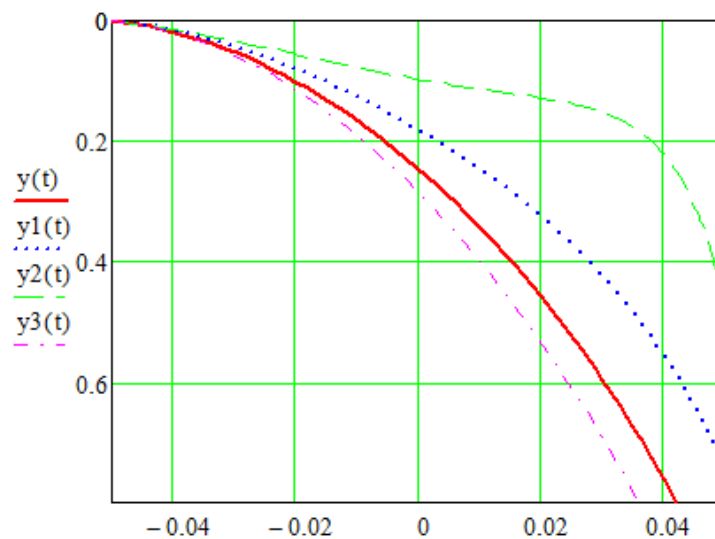


Рис. 3.7. Траєкторії руху частинок зернового матеріалу у вертикальному повітряному потоці: $\alpha_0 = 45^\circ$; $y(t) - V_B = 6$ м/с; $y1(t) - V_B = 8$ м/с; $y2(t) - V_B = 11$ м/с; $y3(t) - V_B = 5$ м/с.

Таким чином при певних співвідношеннях визначальних факторів (швидкість повітряного потоку, кут і початкова швидкість введення матеріалу, щільність зернового потоку при

зустрічі з повітрям) вертикальний канал можна і доцільно використовувати для фракціонування зернових і насіннєвих матеріалів [13] за технологічними властивостями (маса зерен, їх густина), які корелюють з аеродинамічними властивостями.

На рисунку 3.7 наведено траєкторії руху частинок зернового матеріалу у вертикальному повітряному потоці.

Найбільший вплив на ефективність фракціонування (розщеплення траєкторій) впливають наступні фактори:

- швидкість повітряного потоку і її розподіл за шириною каналу;
- початкова швидкість, кут і умови (щільність зернового потоку при зустрічі із зерновим потоком) введення сепаруючої суміші в пневмоканал;
- фізико-механічні властивості компонентів зернової суміші.

Покращити якість поділу компонентів зернового матеріалу в висхідному повітряному потоці, можна забезпечуючи додаткову силову дію на частинки, значення якої буде різною для різних за розміром і густиною компонентів. Реалізувати таку силову дію на компоненти зернового матеріалу можна шляхом використання такого електротехнологічного прийому: надання частинкам певного електричного заряду перед або під час подачі матеріалу в повітряний потік і створення в сепаруючому каналі однорідного електричного поля.

Розглянемо переміщення частинки матеріалу в вертикальному повітряному каналі при сукупній дії висхідного повітряного потоку, додаткової електричної сили, гравітаційної сили та сили опору повітряному потоці. Схема взаємодії сил показана на рис. 3.6. Приймемо, що частка має форму близьку до кулі. Для виявлення умов, за яких перебігає розділення частинок компонентів визначимо умови зарядження частинок електричним зарядом і величину самої електричної сили, що діє на частку яка рухається в повітряному потоці протитечієво.

На ділянці живильного пристрою в електричному полі частинки матеріалу заряджаються (отримують електричний заряд) використовуючи методи: електростатичної індукції (контактне зарядження), осадження іонів в полі коронного розряду (безконтактна зарядка) і комбінації названих способів. При контактному способі зарядження частинок, величина електричного заряду залежить від контактної опору частинки з електродом, який в значній мірі залежить від вологості (сухі частини, які не проводять електричний струм в електричному полі не заряджуються). Тому такий спосіб доцільно використовувати для поділу фракцій за вологовмістом. Іонна зарядка, найбільш вивчена і більш ефективна, відбувається осадженням іонів із об'єму повітря на поверхню частинки в електричному полі коронного розряду.

Величина максимального заряду частинок сферичної форми в електричному полі визначається за відомою формулою Романа:

$$Q_e = Er^2 \varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right), \quad (3.45)$$

де E – напруженість електричного поля, В/м; ε – відносна діелектрична проникність частинки; r – радіус частинки, м; ε_0 – діелектрична проникність вакууму, Ф/м.

Враховуючи, що відносна діелектрична проникність зерна залежить від густини, за даними літературних джерел, цю залежність можна апроксимувати виразом:

$$\varepsilon_i(\rho) = a + b\rho_i + c\rho_i^2, \quad (3.46)$$

де a, b, c – сталі коефіцієнти, що залежать від виду культури), то величину електричного заряду можна використовувати, як суттєвий чинник поділу у повітряному потоці; ρ_i – густина частинки компоненту i -тої фракції.

Електрична сила, діюча на частинку в електричному полі, як відомо, пропорційна її заряду Q і напруженості поля E :

$$F_e = QE,$$

або враховуючи (3.45), (3.46)

$$F_e = E^2 r^2 \varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon_i(\rho_i) - 1}{\varepsilon_i(\rho_i) + 1} \right). \quad (3.47)$$

З урахуванням додатково діючої електричної сили відповідно до рис. 3. Друге рівняння системи (3.46) (3.47) запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} = & -F_e - k_v \frac{dx(\tau)}{d\tau} \times \\ & \times \sqrt{\left(V_m + \frac{V_d}{a} \left(\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}. \end{aligned} \quad (3.48)$$

В рівняння (3.48) входить розмірна характеристика зернової частки $r = d_e/2$, де d_e – еквівалентний діаметр частки, що визначається за площею проекції частки яка дорівнює міделевому перерізу $d_e = \sqrt{4S_m/\pi}$, визначити яку для частинок неправильної форми ускладнено.

Основною аеродинамічною характеристикою компонентів зернової суміші є швидкість витання, яка для поодиноких сферичних поверхонь визначається очевидним співвідношенням, що впливає рівності сил $R = mg$ відношенням:

$$V_{\text{вум}} = \sqrt{\frac{4d_e \rho_r g}{3\rho_v \xi}}. \quad (3.50)$$

Використовуючи значення коефіцієнта опору із залежності $\xi(\text{Re})$ (при $\text{Re} > 700, \xi = 0.44$) із співвідношення (3.50) маємо:

$$V_{\text{вум}} = \sqrt{\frac{4d_e \rho_r g}{3\rho_v 0.44}}, \quad (3.51)$$

звідки

$$d_e = 0.33 \frac{\rho_v V_{\text{вум}}^2}{\rho_r g}. \quad (3.52)$$

Підставляючи значення еквівалентного діаметра (радіуса) в рівняння (9) матимемо:

$$F_e = E^2 \varepsilon_0 \left(1 + 2 \frac{\varepsilon_i(\rho_i) - 1}{\varepsilon_i(\rho_i) + 1} \right) \left(\frac{0.33}{2} \frac{\rho_v}{\rho_r g} V_{sum}^2 \right)^2. \quad (3.53)$$

Таким чином величину еквівалентної сили, що діє на частину в електричному полі можна визначити виходячи з величини швидкості витання яка, як правило, визначається експериментально.

Як впливає з аналізу виразу (3.53) на електричну силу, що діє на частку в напрямку вектору електричного поля (перпендикулярно вектору потоку повітря) в значній мірі впливає напруженість електричного поля і властивості самої частки які визначаються швидкістю витання.

Розв'язок системи рівнянь (3.43), (3.44) за означених вище початкових умов наведено на рисунку 3.8.

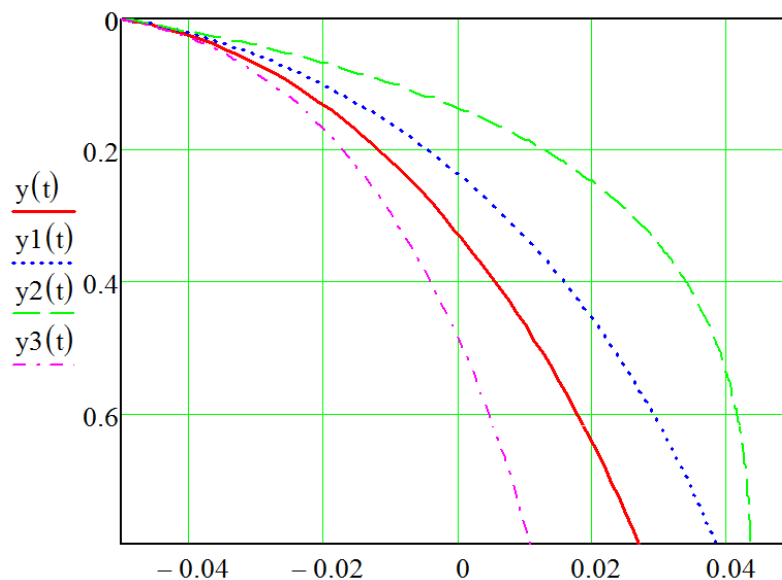


Рис. 3.8. Траєкторії руху кулькоподібної частинки у вертикальному потоці за наявності накладеного електростатичного поля

Аналіз отриманих результатів свідчить, що розгалуження траєкторій і величина кінцевого (на виході каналу) відхилення за наявності додаткового електростатичного впливу збільшується.

В наведених вище дослідженнях, геометрія частинки визначалась формою у вигляді кулі. Але більшість колосових

культур мають форму, що суттєво відрізняється від кулі, тому форма зернин апроксимується [14, 15] еліпсоїдом обертання.

Математичний опис (модель) перехідного процесу орієнтації частинки, в електричному колі може бути, в спрощеному вигляді подана рівнянням:

$$I \frac{d^2 \gamma}{d\tau^2} = M_v + M_e, \quad (3.54)$$

де $M_v = (k_2 - k_1) V_r \frac{\rho V^2}{2} \sin 2\gamma$ – обертальний момент діючий збоку повітряного потоку на еліпсоїд обертання;
 $M_e = \frac{E^2 \epsilon_0}{2} V_r k_\phi \sin 2\gamma$ – обертальний момент електричного поля; I – момент інерції зернини; γ – кут між напрямком руху і більшою віссю еліпсоїда обертання; k_1, k_2 – поперечний і повздовжній коефіцієнти інерції тіла обертання, що рухається у повітрі; k_ϕ – діелектричний коефіцієнт форми; V_r – об'єм частки.

Обертальний момент, спрямований таким чином, щоб орієнтувати еліпсоїд обертання більшою віссю під прямим кутом до вектора швидкості повітря.

При цьому величина швидкості витання (як основна ознака поділу поодиноких насінин) буде зменшуватись:

$$V_\epsilon = \sqrt{\frac{2mg}{\rho_v \xi S_m}} = \sqrt{\frac{4g}{3\rho_v \xi} \frac{ab\rho_r}{c - (a-c)\sin^2 \gamma}}, \quad (3.55)$$

де a, b – довжина і товщина зернини (довша і коротша вісь).

Час орієнтації еліпсоїда обертання:

$$\tau = \sqrt{\frac{I}{2(M_v + M_e)}} \int_{\varphi_1}^{\varphi} \frac{d\varphi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi_0 + \sin^2 \varphi_0 - \sin^2 \varphi}}. \quad (3.56)$$

За рахунками і експериментами [14, 15] час орієнтації зернини вздовж силових ліній поля складає 0.05 с за цей час частинка з $v_\epsilon = 9$ м/с переміщується: $x=11.2$ мм, $y=17.6$ мм.

На рисунку 3.9 наведені розрахункові траєкторії руху частинок компонентів з урахуванням зменшення швидкості витання за виразом (3.55) в припущенні «миттєвої переорієнтації».

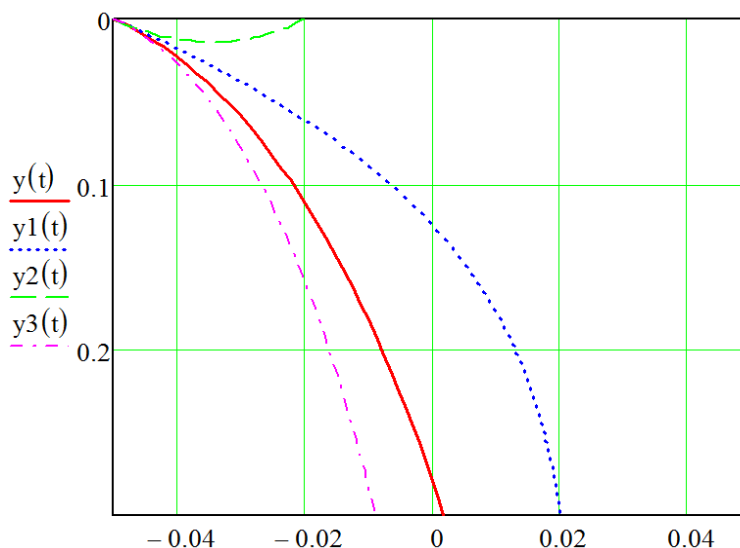


Рис. 3.9. Траєкторії руху частинок у формі еліпсоїда обертання у вертикальному каналі з накладеним електростатичним полем

Проаналізувавши розрахункові графічні залежності, що визначають траєкторії руху окремих компонентів зернового матеріалу можна констатувати наступне. Нерівномірність повітряного потоку в поперечному перетині вертикального каналу знижує ефективність поділу зерна на фракції. Дія електричного поля на частинки, що отримали електричний заряд викликає прирощення горизонтальної складової швидкості частинки. Переорієнтація частинки у формі еліпсоїда обертання і стабілізація її положення в електричному полі пневмоканалу дозволяє зменшити швидкість повітря в каналі і питомі витрати на процес поділу. Крім того зменшується висота робочої зони каналу. Вдосконалена математична модель руху частинок компонентів зернового матеріалу дозволяє визначити вплив параметрів потоку, в тому числі і ступеню нерівномірності розподілу швидкості в поперечному перерізі каналу, на величину розходження

траєкторій яка обрана критерієм ефективності поділу. Виявлено зменшення розходження траєкторії при змінній епюрі швидкості повітря. Застосування накладеного на низхідний потік дисперсного матеріалу дозволяє збільшити величину розходження траєкторії і відповідно, ефективність поділу матеріалу на фракції, та швидкості витання частинок у формі еліпсоїда обертання.

РОЗДІЛ 4

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИХ СПОСОБІВ СУШІННЯ ЗЕРНА

4.1. Ідентифікація закономірностей і моделювання енергозберігаючих режимів мікронізації зерна

Одним із перспективних напрямків в розробці енергозберігаючих (енергоефективних) технологій переробки продовольчого та фуражного зерна – є використання інтенсивного підведення теплоти інфрачервоного випромінювання до обробляемого продукту. Процес обробки зернового матеріалу інтенсивним (високотемпературним) потоком інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) називають мікронізацією зерна [1]. Унікальні можливості ІЧВ дають змогу зневоднювати і знезаражувати збіжжя, переробляти його в пластівці, крупи швидкого приготування, високоякісний корм для тварин і птиці [2, 3]. Особливістю ІЧВ є безконтактне проникнення променів в глиб матеріалу і поглинання променистої енергії молекулами води, в результаті чого водні структури нагріваються, перетворюються в пару, випаровуючись передає теплоту неводній частині матеріалу, руйнує його механічну структуру. В результаті підвищується енергетична поживність зерна, руйнуються трипсинові інгібітори, знищується токсична пліснява і гриби [4, 5]. Збільшення об'єму зернівок при мікронізації забезпечує зниження енергії на подальшу механічну обробку – подрібнення, плющення, тощо.

Існуючі технології мікронізації передбачають нагрівання зерна інтенсивним потоком ($25\text{--}39\text{ кВт/м}^2$) ІЧВ за проміжок часу 60-90с [2]. При поглинанні ІЧ променів молекулами води (що зв'язана різними формами з твердою структурою зернівки) відбувається фазовий перехід рідкої внутрішньоклітинної фази в пару, суттєво збільшується внутрішній тиск пари, що

призводить до руйнування твердої частини зернівок, збільшенню (до 3-4 разів) їх об'єму. Особливістю підведення енергії ІЧВ до зерна полягає в тому, що поглинена і виділена теплова енергія передається від водних структур до твердої фази [6], а не навпаки, як при контактному або конвективному нагріві [7]. Але при цьому виникає небезпека перегріву (підгоряння) поверхні зернівок.

Однак процес мікронізації що реалізується в сучасних установках (мікронізаторах) характеризується значними невиправданими затрати енергії –150-250 кВт год на тону продукту, низькою питомою продуктивністю. Основними причинами низької ефективності є експлуатація установок при постійному тепловому потоці випромінювачів, що зумовлює необхідність зниження температури або потужності джерела ІЧВ. Резервом підвищення ефективності мікронізаторів є наближення джерела ІЧВ до матеріалу та застосування імпульсно-періодичного режиму опромінення з можливістю періодичного охолодження поверхні зернового матеріалу в процесі опромінення.

Отримані раніше результати дослідження осцилюючих режимів які реалізовано періодичним вмиканням ІЧ випромінювачів або періодичним опроміненням в процесі переміщення шару зерна (дискретне розміщення випромінювачів) не повністю відображають досить складні закономірності внутрішнього тепло і масопереносу в процесах ІЧ опромінення зерна в тому числі із проміжним охолодженням. Дослідження процесу ускладняється перехресними зв'язками параметрів переносу теплоти і маси під дією ІЧВ. Тому розвиток теоретичних посилок на основі вдосконалених модельних уявлень взаємопов'язаних процесів при мікронізації зерна, є актуальною задачею проблеми енергозбереження.

Питання технологічної ефективності мікронізації зерна із застосуванням потужних ІЧ-випромінювачів (генераторів ІЧВ)

розкриті тільки в загальному вигляді без конкретного виділення заходів, щодо підвищення продуктивності і зниження затрат енергії на мікронізацію зерна [8-11]. Огляд технічних пропозицій, щодо необхідності конструкторсько-технологічного удосконалення схемних рішень мікронізаторів, констатує технічні можливості, але недостатньо розкривають методи рішення задач енергоефективності [12]. Перспективність комбінованих способів підведення теплової енергії до зернового матеріалу в процесах термообробки обґрунтована в роботах [13,14], де визначена необхідність створення і застосування математичних моделей які б адекватно описували механізми переносу теплоти і маси в зерновому матеріалі в процесах ІЧ-опромінення.

Найбільш інформативні математичні моделі наведено в роботах [15,16,17], в них розглядається переміщення теплоти в зерновій масі при ІЧ сушінні з використанням рівнянь теплового балансу сушильного процесу, без врахування рушійних сил процесу. За другою схемою роботи [17] отримані “оригінальні системи рівнянь” в яких відома система рівнянь сушіння О.Ликова [18] доповнена складовими які визначають зміну вільної енергії ізотермічного зневоднення, теплоту змочування, пароутворення та іншими штучними аргументами визначення яких із експериментів неможливо. Таким чином запропоновані системи рівнянь можна з обережністю використовувати тільки для якісного аналізу.

У роботах [19, 20, 21] надані практичні рекомендації, щодо використання системи взаємопов'язаних диференціальних рівнянь тепло- і масопереносу у вологому тілі при аналізі процесів ІЧ-обробки продукції. Зокрема, пропонується не враховувати складові, що визначають термовологісний перенос маси, рушійну силу зміни тиску, змінної кількості пароутвореної вологи. Ці спрощення дозволяють використовувати вихідну систему як окремі рівняння і надалі використовуються розв'язки рівнянь теплопровідності [18]

перенос вологи під дією ІЧВ не розглядається. В роботах [13, 14] в якості моделей ІЧ-сушіння зерна використані різні види емпіричних рівнянь, які описують кінетики зневоднення вологого матеріалу, при комбінованих способах енергопідведення.

Математичні моделі теплової обробки зерна в рухомих потоках [22, 23] складені з рівнянь теплового балансу елементів конструкцій установки (випромінювач, транспортер, екран) та зернового матеріалу, використовують для дослідження режимів сушіння зерна. Але складені рівняння не враховують параметри процесів внутрішнього переносу теплоти і маси та внутрішньооб'ємного випаровування вологи, які змінюють фізичну та хімічну структуру матеріалу.

Вибір та оцінка ефективності раціональних режимів мікронізації зернового матеріалу і круп при забезпеченні нормованих якісних показників і мінімізації енергетичних ресурсів повинен базуватися на вдосконалених моделях, параметри яких можна співставити з даними експериментів і на основі співставлення визначити фактичні значення коефіцієнтів диференціальних рівнянь та оцінити адекватність моделей тепло-і масопереносу при ІЧ-обробці зерна.

Мікронізація зернового матеріалу є складним одночасно діючим теплофізичним, фізико-механічним та біологічно-хімічним процесом. Математичний опис такого процесу будується як суперпозиція процесів (явищ) дифузії, бародифузії, теплопровідності і фазового перетворення [24]. Тому для формулювання математичної моделі прийнято спрощений опис фізичної сутності механізму мікронізації. Фізична модель базується на наступних уявленнях: радіаційна енергія ІЧ випромінювача поглинається водовмісними структурами зернівки, що викликає швидке нагрівання води і “скелетної” твердої структури. Інтенсивне перетворення води в пару зумовлює підвищення тиску в клітинних структурах, мікрокапілярах і порах заповнених рідиною. Подальший нагрів

і збільшення внутрішньооб'ємного (лакального) тиску пари зумовлює механічну деформацію (збільшення об'єму) і вибуховому руйнуванню структури зернівки, що супроводжується переходом вуглеводів в розчиняємий стан – желетинізацію.

Але навіть при такому спрощенні механізму нестационарного процесу, для наближеного опису процесу ІЧ-мікронізації *використовують* звичайні (при моделюванні процесів тепло-масопереносу в капілярно пористих тілах) припущення що ідеалізують об'єкт, що досліджується:

- локальна зміна вологовмісту тіла дорівнює сумі зміни вологовмісту за рахунок переносу рідини і фазового перетворення (води в пару). Кількісно співвідношення зміни вологовмісту за рахунок переносу рідини і за рахунок випаровування оцінюється критерієм фазового перетворення $\varepsilon = \frac{dU_f}{dU}$, де dU_f – зміна вологовмісту за рахунок випаровування, dU – загальна зміна вологовмісту.
- Зміна параметрів матеріалу в часі розглядається як послідовні етапи: прогрів з поверхневим видаленням вологи; нагрівання з пароутворенням і деформацією; нагрів і випаровування із зруйнованого зерна.
- Видалення вологи з поверхні відбувається конвективною дифузією з коефіцієнтом масообміну β .
- Теплообмін матеріалу із оточуючим середовищем відбувається випромінюванням і конвекцією і оцінюється коефіцієнтом теплообміну α .
- Теплофізичні і масообмінні коефіцієнти на протязі кожного етапу незмінні і дорівнюють середнім за часом.
- Прийнято також, що зернівка має форму кулі із еквівалентним радіусом R_i (різним на кожному етапі) і через її поверхню надходить постійний потік ІЧВ (що досягається безперервним обертанням зернівки на вібруючій поверхні).

- Початковий розподіл температури і вологовмісту в зернівці рівномірний.

Постійна густина (щільність) опромінення $q = \frac{Q}{F_o}$ (Q – потужність потоку; F_o – поверхня опромінення), пояснюється тим, що в процесі мікронізації збільшується поверхня зернівки і збільшується коефіцієнт поглинання ІЧВ за рахунок зменшення коефіцієнту – віддзеркалювання (при зменшенні вологості поверхні).

За таких припущень і прийнятою фізичною моделлю (рис. 3.1) процесу мікронізації зерна, для аналізу явищ внутрішнього взаємопов'язаного тепломасопереносу використано отриману О.В. Ликовим систему рівнянь які з урахуванням внутрішньофазових перетворень і сталих коефіцієнтах перенесення при вираженні рушійних сил (переносу теплоти і маси) через градієнти вологовмісту і температури мають вигляд.

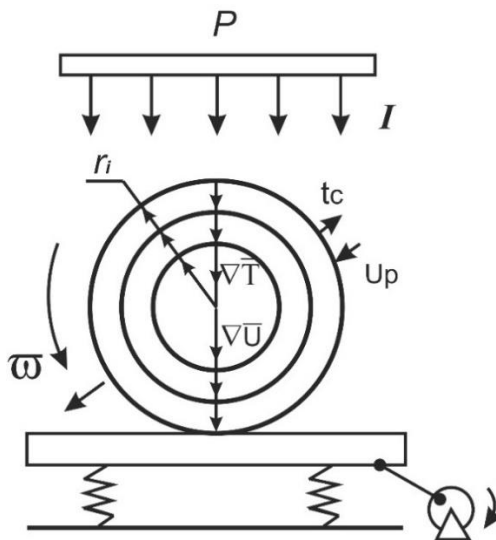


Рис. 4.1. Умовна схема процесу мікронізації зерна ІЧВ на вібруючій поверхні.

$$\frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \theta(r, \tau)}{\partial^2 r} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon r_0}{c \rho} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \tau}; \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial U(r, \tau)}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 U(r, \tau)}{\partial^2 r} + \frac{2}{r} \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} \right) + \varepsilon \frac{\partial \bar{U}}{\partial \tau}, \quad (4.2)$$

Другі складові правої частини рівнянь (4.1-4.2) визначають зміну вологовмісту в часі за рахунок фазового перетворення (води в пару) при інтенсивному ІЧ-підведенні енергії.

Для подолання труднощів задання числового значення критерію фазового переходу ε , прийнято, що пароутворення рівномірне за об'ємом зернівки і коефіцієнти температуропровідності і масопровідності (дифузії) сукупно відтворюють процес одночасного переносу вологи у вигляді рідини і пари [19]. В цьому випадку вказані коефіцієнти a і a_m вважаються коефіцієнтами ефективної температуропровідності a_{ef} та ефективної масопровідності a_{mef} і визначаються за відповідними формулами:

$$a_{ef} = \frac{\lambda}{\rho c_{ef}}; c_{ef} = c \left(1 + \frac{\varepsilon}{Rb} \right); Rb = \frac{cd\bar{\theta}}{r_0 d\bar{U}}; a_{mef} = \frac{a_m}{1-\varepsilon}.$$

Вихідні рівняння (4.1) і (4.2) можна записати у зазвичай прийнятій формі:

$$\frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial \tau} = a_{ef} \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta(r, \tau)}{\partial^2 r} + \frac{2}{r} \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial r} \right); \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial U(r, \tau)}{\partial \tau} = a_{mef} \cdot \left(\frac{\partial^2 U(r, \tau)}{\partial^2 r} + \frac{2}{r} \frac{\partial U(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (4.4)$$

В рівняннях (4.1-4.4) позначено: де θ, U – температура і вологовміст зерна; c – питома теплоємність матеріалу; λ – коефіцієнт теплопровідності зернівки; r_0 – питома теплота пароутворення; ε – критерій фазового перетворення; a, a_m – коефіцієнти температуропровідності і масопровідності; ρ – густина речовини зернівки; R, r – еквівалентний і поточний радіус зернівки у формі кулі.

Граничні умови для розв'язку рівнянь (4.3) і (4.4) взаємопов'язаного тепломасопереносу визначені виходячи з наступних міркувань.

Нагрів вологого зерна при його ІЧ опроміненні відбувається за рахунок інтенсивного поглинання ІЧ-променів молекулами води вільної і зв'язаної в ендоспермі зернівок і витрачається на його нагрів і перетворення води в пару

(псевдопароподібний стан) і дифундує з високою швидкістю до зовнішньої поверхні. Потік енергії ІЧ-променів поглинається мікроскопічними частинками вологи, які знаходяться приграничному шарі зернівок, що впливає на впливає на величину конвективного теплообміну α . Таким чином гранична умова може бути записана як сумарний радіаційний і конвективний теплообмін:

$$-\lambda \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial r} = \alpha \left[t_c + \frac{q_F}{\alpha} - \theta(\tau) \right]; \quad (4.5)$$

де, t_c – температура оточуючого повітря; α – коефіцієнт теплообміну.

Ступінь поглинання енергії ІЧ-променів залежить від вологого стану зернівок (їх) поверхні і може бути описаний (для зерен ячменю) осередненою залежністю:

$$A_\lambda(U) = 0.62 - 0.59U; \quad (4.6)$$

де, A_λ – коефіцієнт поглинання, U – вологовміст зерна.

Щільність потоку ІЧ-випромінювання визначається осередненою формулою:

$$q_F = \frac{P\eta A_\lambda}{F_o}; \quad (4.7)$$

де, P – потужність випромінювача; η – коефіцієнт корисної дії випромінювача; F_o – площа опромінення шару зерна.

Для процесу охолодження зерна, після опромінення використано граничну умову (4.5) при $q_F = 0$.

Перенесення водяної пари з поверхні нагрітого зерна в оточуюче повітря здійснюється конвективною дифузією і описано рівнянням масовіддачі:

$$-a_m \frac{\partial U(R, \tau)}{\partial r} = \beta [U(R, \tau) - U_p]; \quad (4.8)$$

де, β – коефіцієнт масовіддачі, U_p – рівноважний вологовміст. Рівняння (4.8) є граничною умовою до рівняння (4.4).

В подальшому дослідження використані аналітичні розв'язки рівнянь теплопровідності [15].

Розв'язки рівняння (4.3) з граничними умовами (4.5) та рівняння (4.4) з граничними умовами (4.8) за початкових умов:

$$\frac{\theta(r,\tau)-\theta_0}{T-\theta_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a_{ef}}{R^2} \tau \right); \quad (4.10)$$

де, $A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi \sqrt{\mu_n^2 + (Bi-1)^2}}{\mu_n^2 + Bi^2 - Bi}$ – хвильова амплітуда; $Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$ – тепловий критерій Біо; $T = t_c + \frac{q_F}{\alpha}$; μ_n – корені характеристичного рівняння:

$$\mu_n = (Bi - 1) \cdot \operatorname{tg} \mu_n. \quad (4.11)$$

Зміну в часі середньої температури зернівки визначено за очевидною формулою:

$$\bar{\theta}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \theta(r, \tau) dr. \quad (4.12)$$

Після інтегрування отримано:

$$\frac{\bar{\theta}(\tau)-\theta_0}{t_c+\frac{q_F}{\alpha}-\theta_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a_{ef}}{R^2} \tau \right); \quad (4.13)$$

$$\text{де, } B_n = \frac{6Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)}.$$

Кінетику зневоднення зернівки (зміну вологовмісту в часі) при ІЧ-опроміненні визначено розв'язком рівняння (4.4) за крайових умов (4.8) у вигляді нестационарного однополярного поля вологовмісту змінного в часі $U(r, \tau)$:

$$\frac{U(r,\tau)-U_p}{U_0-U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n^* \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a_{mef}}{R^2} \tau \right); \quad (4.14)$$

де, $A_n^* = \frac{2Bi_m \sqrt{\mu_n^2 + (Bi_m-1)^2}}{\mu_n^2 + Bi_m^2 - Bi_m}$; $Bi_m = \frac{\beta \cdot R}{a_m}$ масообмінний критерій Біо; μ_n – визначається з (4.11).

Середній вологовміст в часі визначається із залежності $\bar{U}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 U(r, \tau) dr$ і буде рівний:

$$\bar{U}(\tau) = U_p + (U_0 - U_p) \sum_{n=1}^{\infty} B_n^* \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a_{mef}}{R^2} \tau \right); \quad (4.15)$$

$$\text{де, } B_n^* = \frac{6Bi_m^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi_m^2 - Bi_m)}.$$

Для розрахунку нестационарного одномірного поля температури при охолодженні зернівок повітряним потоком з

температурою t використано розв'язок рівняння теплопровідності (4.3) при граничних умовах III роду:

$$\lambda \frac{d\theta(R,\tau)}{dr} + \alpha(\theta - t) = 0; \quad (4.16)$$

і початкових умовах: $\tau=0$; $\theta=\theta_0$; $\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0$ у вигляді залежності:

$$\frac{\theta(r,\tau)-t}{\theta_0-t} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) \sin \mu_n \frac{r}{R}}{(\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n) r \cdot \mu_n} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a_{ef}}{R^2} \tau\right). \quad (4.17)$$

Зміна в часі середньої температури зернівки:

$$\bar{\theta}(\tau) = t - (\theta_0 - t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6Bi^2}{\mu_n^2(\mu_n^2 + Bi^2 - Bi)} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a_{ef}}{R^2} \tau\right); \quad (4.18)$$

де, $Bi = \frac{0.5\lambda_a}{\lambda_g} 0.074 \left(\frac{2R \cdot V_a}{\nu}\right)^{0.74}$; λ_a – коефіцієнт теплопровідності повітря; ν – коефіцієнт кінетичної в'язкості повітря; V_a – швидкість обтікання зернівки повітрям.

Рівняння (4.10)-(4.17) являють структурну форму математичної моделі процесу мікронізації зерна. Для повного математичного формулювання, ця модель повинна бути ідентифікована за даними експериментів. Тобто потрібно визначити числові значення коефіцієнтів і критеріїв, що містяться в зазначених рівняннях. Ця задача вирішується з використанням методів зворотних задач теплопровідності [19-21] на основі експериментально отриманої інформації про об'єкт дослідження.

Для використання експериментальних точок на кривих визначених кінетики нагріву, зневоднення і охолодження в процесі пошуку невідомих коефіцієнтів (a_{ef} , a_{mef} і критеріїв Bi , Bi_m , ε) за рівняннями (4.10-4.12), (4.13-4.14) та (4.16-4.17) за алгоритмом Левенберга-Марквардта [19-21], апроксимовано емпіричними залежностями розвязки (μ_1 - μ_6) трансцендентного рівняння табульованого в роботі [15]. Чисельні розв'язки рівняння отримані в пакеті Mathcad 14 (рис. 4.2).

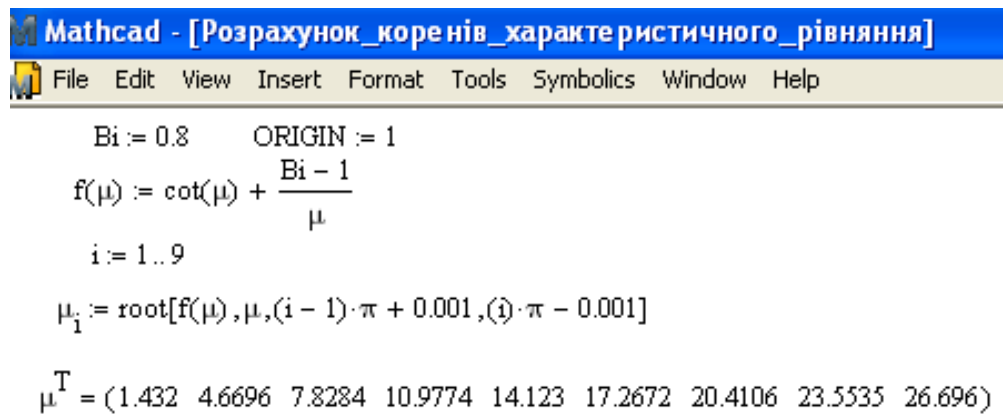


Рис. 4.2. Визначення коренів характеристичного рівняння μ_n в математичному пакеті Mathcad

Емпіричні залежності для μ_1 та μ_2 - μ_6 визначені у вигляді поліномів:

$$\mu_1 = b_0 + b_1 Bi + b_2 Bi^{b_3} \quad (4.19)$$

де, коефіцієнти: $b_0 = -0,090821$; $b_1 = -0,27041$; $b_2 = 1,924477$; $b_3 = 0,461608$; $Bi = 0,02 \div 10,5$.

$$\mu_{2-6} = b_0 + b_1 Bi + b_2 Bi^2 \quad (4.20)$$

Значення коефіцієнтів залежності (4.20) наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

μ	b_0	b_1	b_2	R (коефіцієнт множинної кореляції)
μ_2	4,49427	0,228132	-0,0108	0,9998
μ_3	7,72303	0,136715	-0,00428	0,9999
μ_4	10,90255	0,09611	-0,00206	0,9999
μ_5	14,06520	0,07373	-0,00112	0,9999
μ_6	17,22012	0,05973	-0,00067	0,9999

Для зменшення впливу випадкових і систематичних похибок, що виникають в процесі проведення експериментів на результат визначення невідомих коефіцієнтів, доцільно експериментальні дані апроксимувати (згладити).

В наших дослідженнях експериментальні точки (точки вимірів) мають вигляд гладкої кривої, що апроксимовані експоненціальними залежностями, які представлено у вигляді: ІЧ-нагрів:

$$\bar{\theta}(\tau) = A_i - (A_i - \theta_c)e^{-K_{Tn}\tau}; \quad (4.21)$$

Зневоднення:

$$\bar{U}(\tau) = B_i - (U_p - B_i)e^{-K_{Cn}\tau}; \quad (4.22)$$

Охолодження:

$$\bar{\theta}(\tau) = \theta_0 e^{-K_{on}\tau}. \quad (4.23)$$

Відповідно до фізичної моделі і схеми розрахунку (Рис. 4.3) кожного етапу перебігу процесу мікронізації, для опису використовується відповідне рівняння (4.20-4.22) із конкретним значенням коефіцієнтів і початкових умов ($\theta_0, U_0, \tau_0; \theta_1, U_1, \tau_1; \theta_2, U_2, \tau_2; \theta_3, U_3, \tau_3$).

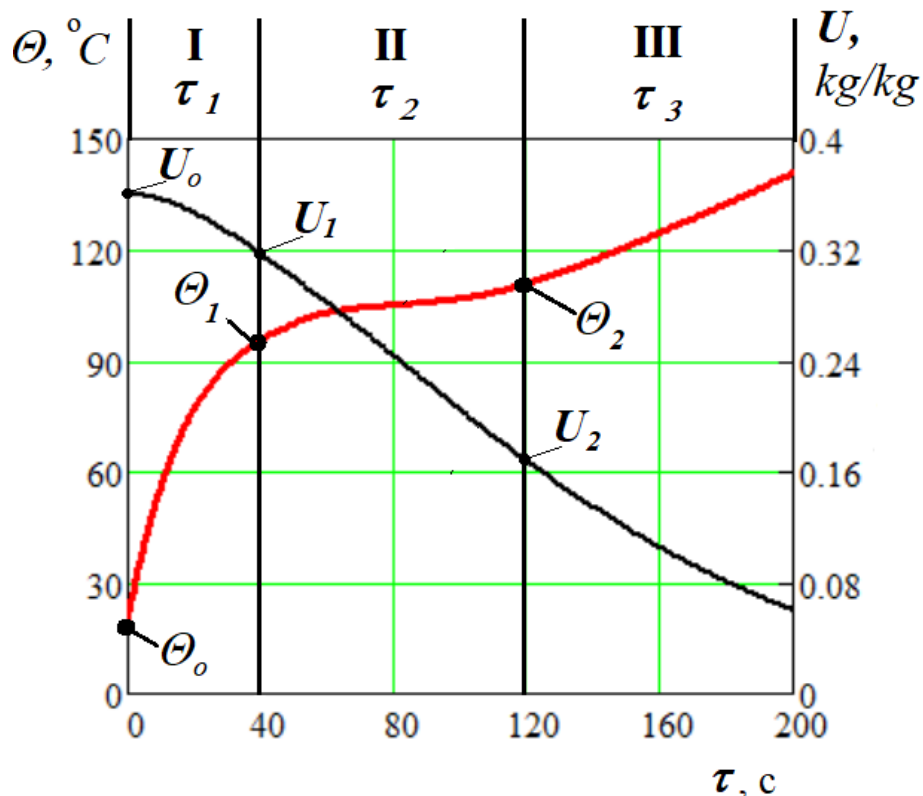


Рис. 4.3. Схема до розрахунку параметрів моделі

При визначенні коефіцієнтів і критеріїв математичної моделі сформовано масиви даних за залежностями (4.20-4.22).

Визначені залежності μ_1 - μ_2 від V_i підставляються в залежності (4.10-4.12), (4.13-4.14), (4.15-4.17) і використовуючи вбудовану функцію *genfit* у математичному пакеті Mathcad, що реалізовує алгоритм Левенберга-Маквардта, розраховуються значення V_i , V_{im} та a_{ef} , a_{mef} при яких залежності $\theta(\tau)$, $U(\tau)$, $\theta_o(\tau)$ будуть найбільш точно описуватимуть набори заданих точок, визначених з (4.20-4.22).

Початкові апіорні приблизні значення V_i , V_{im} та a_{ef} , a_{mef} для заданих технологічних параметрах процесу нагріву, зневоднення та охолодження взято з літератури [145-148, 257-317].

Експериментальні дослідження процесу мікронізації зерна проводилися на лабораторному стенді (рис. 4.4), який складається з вібраційної платформи з розміщеними на її поверхні лотками із зерновим матеріалом.

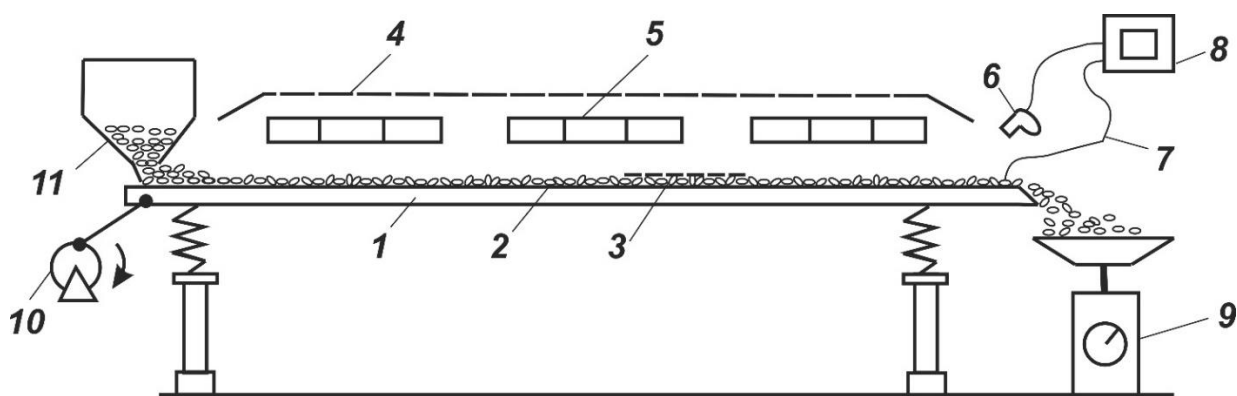


Рис. 4.4. Конструктивно-технологічна схема лабораторного стенду.

Зерно в лотках засипано щільним моношаром (в одне зерно). Сорт зерна «Аналог». Кут нахилу платформи до горизонту забезпечував коливно-обертальний рух зернівок в лотках. Над лотками розміщений кварцовий інфрачервоний випромінювач з плоским екраном (QP1 248 [25]). Питома

підведена потужність на поверхню, що опромінюється 25 кВт/м². Температуру поверхні зерна вимірювали пірометром UNI-T PRO UTi260B. Показники температури фіксувалися комп'ютером TOSHIBA до якого підключався пірометр з комплектною хром-капелевою термопарою, що вмонтовувалася в середину зернівки. Вологовміст визначався методом висушування проб та вологоміром Wile 55. Режим обробки експериментальних даних – послідовне накладання дослідів. Зерно опромінювали послідовно з експозицією 5-10-...-30 с – до початку підгорання поверхні зерна. Повторність дослідів – трикратна.

Результати експериментальних досліджень представлені узагальненими (усередненими за трьома експериментами) графічними залежностями зміни температури зерна (поверхня і центр) $\theta(\tau)$ і вологовмісту $U(\tau)$ від часу опромінення τ , рис. 4.5.

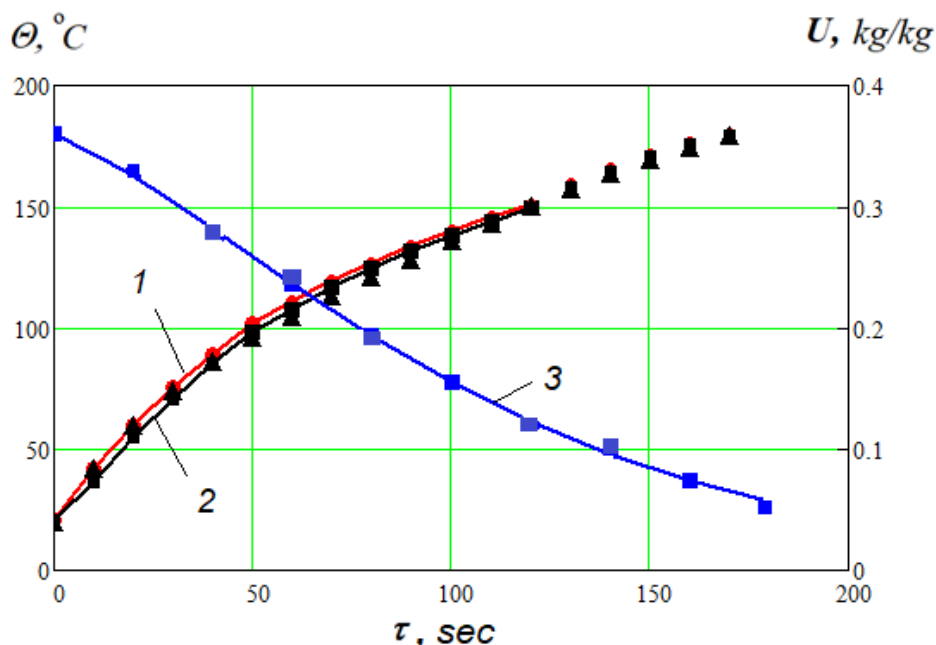


Рис. 4.5. Залежності за експериментальними даними: 1 – θ_s – температура поверхні зернівки; 2 – $\bar{\theta}(\tau)$ – середньої температури; 3 – вологовмісту $U(\tau)$ зерна від часу опромінення, $q=25$ кВт/м².

З аналізу кінетичних закономірностей можна відмітити три стадії процесу нагрів, ізотермічна стадія, нагрів.

Як впливає з аналізу експериментальних залежностей часової зміни температури і вологовмісту зерна, процес обробки зерна інтенсивним ІЧ випромінюванням характеризується трьома послідовними етапами. Візуально закінчення одного і початку іншого можна прийняти зміну швидкості і зневоднення матеріалу. Закінчення першого етапу характеризується початком збільшення окремих зернівок і закінчується вибуховим нарощенням об'єму шару зерна (за рахунок вспухання більшості зернівок). Третій етап закінчується початком «горіння» (обвуглення) поверхні зернівок.

Фізичну картину перебігу процесу мікронізації можна представити таким чином. На початковій стадії розпочинається інтенсивне нагрівання поверхневих шарів зернівки і відповідно випаровування води із оболонок зернівок. Далі під дією швидкого підвищення температури відбувається перехід зв'язаної води у псевдопарообразний стан, різке збільшення внутрішнього тиску в результаті чого зернівка «вспучується» і крізь утворені мікротріщини і збільшені міжклітинні пори інтенсивно випаровується вода. В подальшому відбувається «вибухове» руйнування твердої структури зернівки і остаточне зневоложення, шляхом випаровування із зруйнованих поверхонь зернівок. Наведена схема суттєво спрощена, але на її основі можна апроксимувати експериментальні дані, ділянками кривих, що послідовно з'єднані в єдину залежність від часу опромінення і на їх основі визначити невідомі коефіцієнти і критерії в рівняннях (4.10, 4.12), (4.13, 4.14) для кожного умовного етапу мікронізації зерна.

В приведених дослідженнях характер розміщення дослідних точок дозволило з достатньою точністю апроксимувати графіки $\theta(t)$, $U(t)$ наступними залежностями:

$$\begin{cases} \bar{\theta}_I(\tau) = 200 - 180e^{-\frac{\tau}{85}}; \\ \bar{\theta}_{II}(\tau) = 200 - 100e^{-\frac{\tau}{100}}; \\ \bar{\theta}_{III}(\tau) = 200 - 50e^{-\frac{\tau}{55}}; \end{cases} \quad (4.24)$$

$$\begin{cases} \bar{U}_I(\tau) = 0.36e^{-0.0046\tau}; \\ \bar{U}_{II}(\tau) = 0.28e^{-0.0147\tau}; \\ \bar{U}_{III}(\tau) = 0.1e^{-0.028\tau}. \end{cases} \quad (4.25)$$

де, τ – час опромінення.

За отриманими залежностями (4.24) і (4.25) сформовано масиви даних і за ними рис. 4.6 з використанням функції genfit в пакеті Mathcad визначені шукані коефіцієнти a_{ef} , a_{mef} , Bi , Bim в рівняннях $\bar{\theta}(\tau, R)$, $\bar{U}(\tau, R)$ які моделюють нестационарний перенос теплоти і вологи при ІЧ-опроміненні зерна.

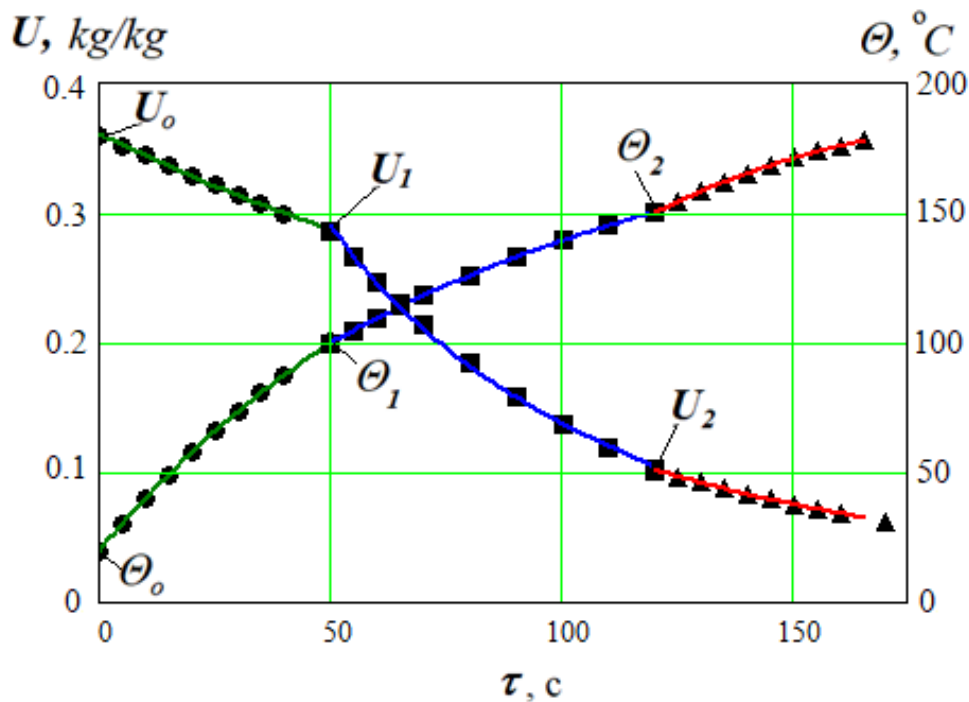


Рис. 4.6. Згладжені експериментальні дані за (4.24), (4.25)

Екранний фрагмент визначення коефіцієнтів і критеріїв переносу теплоти проведених дослідів представлено на рис. 4.7.

Отримані значення коефіцієнта ефективної температуропровідності по етапах $a_{ef} =$

$(19.444; 16.528; 30.05) \cdot 10^{-8}$, критерій **Bi** середній за процес **Bi**=0.0739; 0.0739; 0.0739.

За аналогічною методикою визначені визначенні коефіцієнти і критерії переносу маси за даними експериментів та залежністю (4.14).

Значення коефіцієнтів ефективної масопровідності по етапах $a_{\text{mef}} = (2.237; 8.318; 5.196) \cdot 10^{-9}$, критерій **Bi_m** середній за процес **Bi_m**=4.

Ідентифікація процесу охолодження зерна після ІЧ-нагріву реалізована за даними попередніх експериментів наведених в роботі [21]. Отримані значення $a=2.12 \cdot 10^{-7}$; **Bi**=0.15.

Mathcad - [14_09_2025 Identification of grain heating 2025]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

$$F(\tau, a, Bi) := \frac{d}{da} \left[tc - (tc - t_0) \cdot \frac{6 \cdot Bi^2}{(-0.090821 - 0.27041 \cdot Bi + 1.924477 \cdot Bi^{0.461608})^2} \right] \cdot (-0.090821 - 0.27041 \cdot Bi + 1.924477 \cdot Bi^{0.461608})^2$$

$$\frac{d}{dBi} \left[tc - (tc - t_0) \cdot \frac{6 \cdot Bi^2}{(-0.090821 - 0.27041 \cdot Bi + 1.924477 \cdot Bi^{0.461608})^2} \right] \cdot (-0.090821 - 0.27041 \cdot Bi + 1.924477 \cdot Bi^{0.461608})^2$$

$$g := \begin{pmatrix} 12 \cdot 10^{-8} \\ 2 \end{pmatrix}$$
 approximate values:
 a – thermal diffusivity;
 Bi

$$P := \text{genfit}(\tau1, Y1, g, F)$$

$$P = \begin{pmatrix} 1.9444 \times 10^{-7} \\ 0.07389 \end{pmatrix}$$
 identified values:
 a-thermal diffusivity;
 Bi

Рис. 4.7. Екранний фрагмент реалізації функції genfit в математичному середовищі Mathcad для визначення коефіцієнтів a_{ef} і критерію **Bi**

Підставивши визначені значення коефіцієнтів a_{ef} і критеріїв **Bi** в рівняння (4.10), розраховано нестационарне

одномірне поле температур зернівки в процесі ІЧ-мікронізації (рис. 4.8).

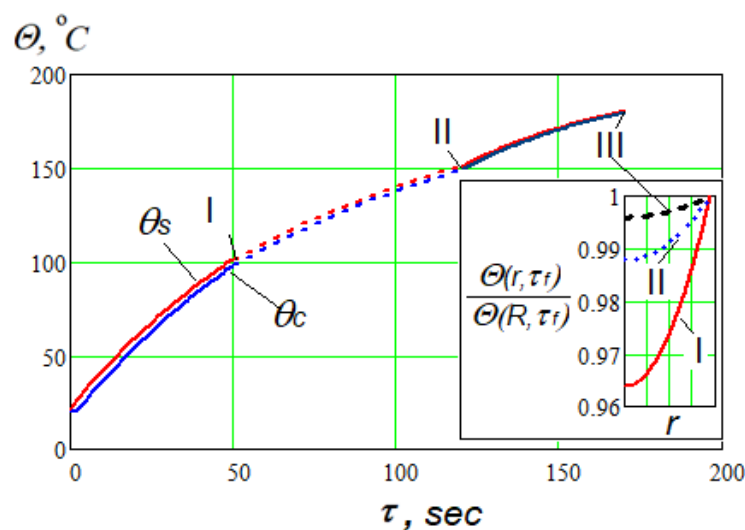


Рис. 4.8 Нестационарне одномірне поле температур зернівки в процесі

θ_s – температура поверхні зернівки; θ_c – температура центру зернівки; I-стадія нагріву зернівки до «вибуху»; II-стадія нагріву при інтенсивному випаровуванні води із зернівки; III-стадія нагріву сухої речовини зернівки.

За визначеними критерії ε , Bi_m і коефіцієнтом a_{mef} з використанням рівняння (4.12) та (4.14) побудовані залежності зміни середніх значень вологовмісту та температури зернівки від часу опромінення τ (рис. 4.9).

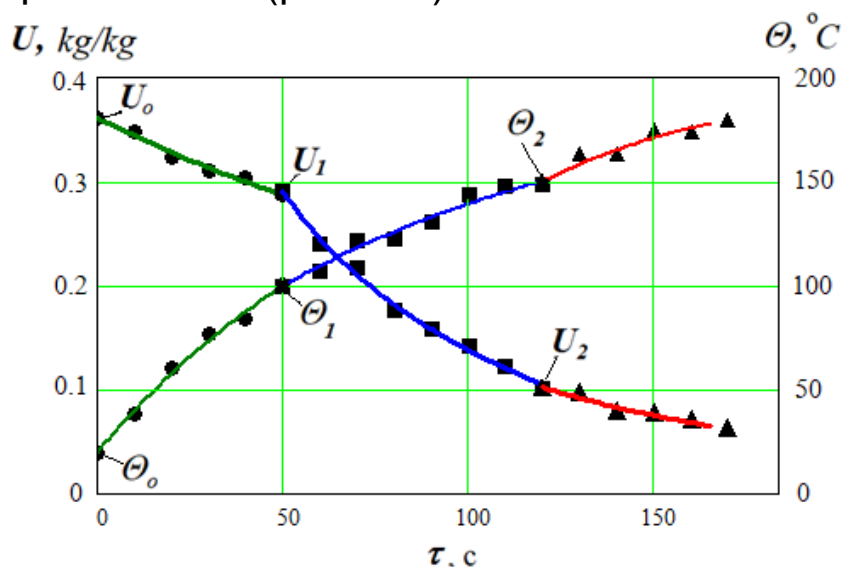


Рис. 4.9. Залежності періодів мікронізації за формулами (3.14), (3.17) із ідентифікованими коефіцієнтами

На площині графіка рис. 4.9 нанесені точки даних експериментів, які свідчать про достатню адекватність аналітичних залежностей реальним процесам.

З графічних залежностей $\theta(r, \tau)$ рис. 4.8 можна визначити, що роздвоєння кривих нагріву (різниця між температурою в центрі та на поверхні), що свідчить про наявність градієнта температури, який спрямований проти градієнта вологовмісту. Протилежні напрямки означених градієнтів, як відомо, гальмують переміщення вологи до поверхні створюючи надлишковий тиск водяної пари, що підтверджується збільшенням критерію фазового переходу з 0.3 до 0.6.

При цьому збільшення температури поверхні вище 100°C призводить до побуріння поверхні (часткове підгоряння) та створює небезпеку вигорання сухої речовини (білка, крохмалу). Тому доцільність переривчастого опромінення стає очевидним [8-16].

Розглянемо ефективність осцилюючого режиму мікронізації зерна. Процес термічної обробки в такому режимі складається з ряду послідовних циклів, в кожному з яких нагрітий ІЧ-опроміненням моношар зерна охолоджується в зоні припинення дії ІЧ-опромінення низхідним потоком повітря, що проходить крізь шар зерна омиваючи кожну зернівку.

Використовуючи те, що в зонах проміжного охолодження відсутнє сприймання теплоти зерном, частина вологи випаровується (самовипаровується) за рахунок акумульованої при опроміненні теплоти, швидке охолодження поверхні змінить напрямок градієнта температури, що прискорить процес зневоднення. В енергетичному плані, зниження температури поверхні зерна збільшує температурний напор ІЧ-опромінення і відповідно тепловий потік.

Теплова потужність генератора ІЧ-випромінювання (повний потік випромінювання) визначається відомою формулою – закон Стефана-Больцмана:

$$P_B = \sigma_0 C_{\text{пр}} F_0 \left[\left(\frac{\theta_B + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_g + 273}{100} \right)^4 \right]; \quad (4.26)$$

де, σ_0 – стала Стефана-Больцмана; F_0 – поверхня опромінення; $C_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт опромінення (залежить від форми випромінювальної поверхні); θ_B, θ_g – температура поверхні випромінювання та температура поверхні зерна.

Як впливає з аналізу виразу (4.26), сприймаємий зерном тепловий потік збільшується при зменшенні температури поверхні зернового матеріалу, що інтенсифікує нагрів зерна при наступному циклі опромінення.

Питомий тепловий потік, що сприймається зерном і витрачається на підвищення температури і випаровування вологи визначається очевидним співвідношенням:

$$q = \frac{P_B \cdot \eta \cdot A(U)}{F_0}; \quad (4.27)$$

де, η – коефіцієнт корисної дії випромінювача; $A(U)$ – коефіцієнт поглинання ІЧ-випромінювання зерна, що залежить від вологовмісту U .

На графіку рис. 4.10, як приклад, наведено фрагмент кінетики осцилюючого режиму термічної обробки зерна ІЧ-випромінюванням та охолодження зерна потоком повітря. Як свідчать графічні залежності спрямованість градієнтів змінюється в протилежних напрямках, що дозволяє уникнути перегріву поверхні зерна.

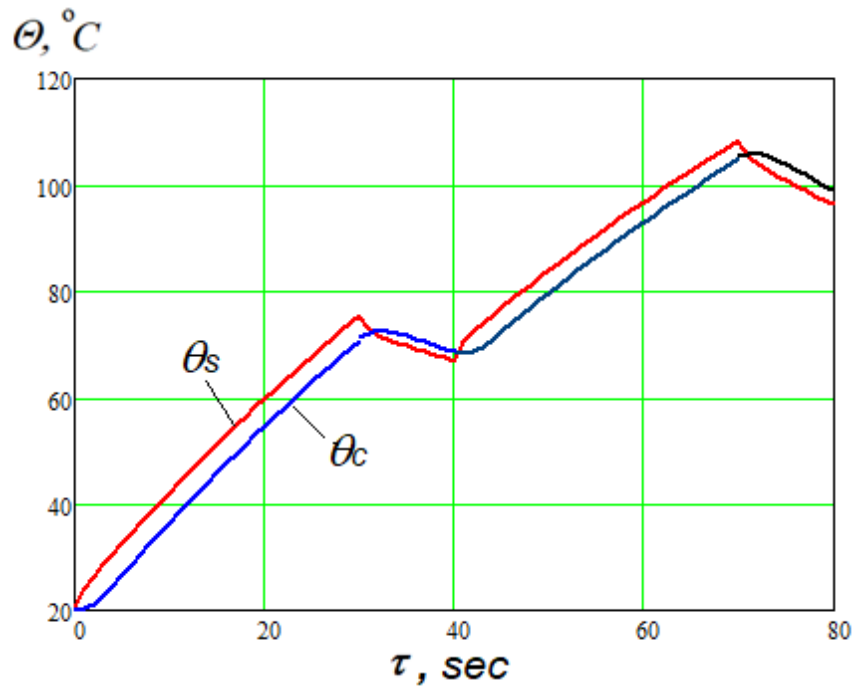


Рис. 4.10. Кінетика ІЧ-нагріву і проміжного охолодження: θ_s – поверхня зернівки; θ_c – центр зернівки.

Враховуючи відносну складність і завищений об'єм розрахунків за отриманими рівняннями, для розрахунку режимних параметрів процесу переміжного ІЧ-опромінення та охолодження матеріалу модель кінетики мікронізації доцільно спростити на основі таких міркувань. В розрахунках оперуємо тільки середніми значеннями параметрів $\bar{\theta}(\tau)$; $\bar{U}(\tau)$. Ряди в рівняннях (3.14) і (3.15) швидко сходяться, що дає можливість в розрахунках використовувати тільки перші члени ряду, з коренем μ_1 , значення якого апроксимується відомим рівнянням (для тепло та масопереносу в кулястому тілі):

$$\mu_1^2 = \left[\frac{1}{\pi^2} + \frac{1}{3\text{Bi}} \right]^{-1}. \quad (4.28)$$

Швидкість нагріву та зневоднення отримаємо диференціювання за часом залежностей (4.14) і (4.15) і порівнявши отримані значення із вихідними рівняннями (4.14) і (4.15) за схемою [21] отримаємо спрощений опис кінетики нагріву і зневоднення зернівок у вигляді диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\bar{\theta}(\tau)}{d\tau} = k_T [t_c - \bar{\theta}(\tau)] + k_T \frac{q}{\alpha}; \quad (4.29)$$

$$\frac{d\bar{U}(\tau)}{d\tau} = -k_c [\bar{U}(\tau) - U_p]; \quad (4.30)$$

$$\text{де, } k_T = \mu_1^2 \frac{a_T}{R^2(1+\frac{\varepsilon}{Rb})}; \quad k_C = \mu_1^2 \frac{a_m}{R^2(1-\varepsilon)}.$$

Надалі приймаємо, що коефіцієнт температуропровідності зернівки (в інтервалі вологовмісту $U=0.125-0.39$ кг/кг.с.р) суттєво змінюються із зміною вологовмісту і за даними експериментів цю залежність апроксимовано формулою:

$$a_{ef}(\bar{U}) = b_0 + b_1 \bar{U} + b_2 \bar{U}^2; \quad (4.31)$$

$$\text{де, } b_0=4.99 \cdot 10^{-7}; \quad b_1= -2.876 \cdot 10^{-6}; \quad b_2=5.976 \cdot 10^{-6}.$$

Коефіцієнт дифузії води зернівки суттєво збільшується при збільшенні температури [63], в інтервалі $20 \div 105$ °С температурна залежність апроксимована рівнянням:

$$a_{mef}(\bar{\theta}) = b_3 + b_4 \bar{\theta}; \quad (4.33)$$

$$\text{де, } b_3=1.227 \cdot 10^{-9}; \quad b_4= 3.448 \cdot 10^{-11}.$$

Таким чином рівняння (4.27) і (4.28) є взаємопов'язані, а кінетика мікронізації описується системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\bar{\theta}(\tau)}{d\tau} = \left(\frac{\mu_1}{R}\right)^2 [b_0 - b_1 \bar{U}(\tau) + b_2 \bar{U}(\tau)^2] \left[t_c + \frac{q}{\alpha} - \bar{\theta}(\tau)\right]; \quad (4.33)$$

$$\frac{d\bar{U}(\tau)}{d\tau} = -\left(\frac{\mu_1}{R}\right)^2 [b_3 + b_4 \bar{\theta}(\tau)] [\bar{U}(\tau) - U_p]; \quad (4.34)$$

за початкових умов: $\bar{\theta}(0) = \theta_0$; $\bar{U}(0) = U_0$.

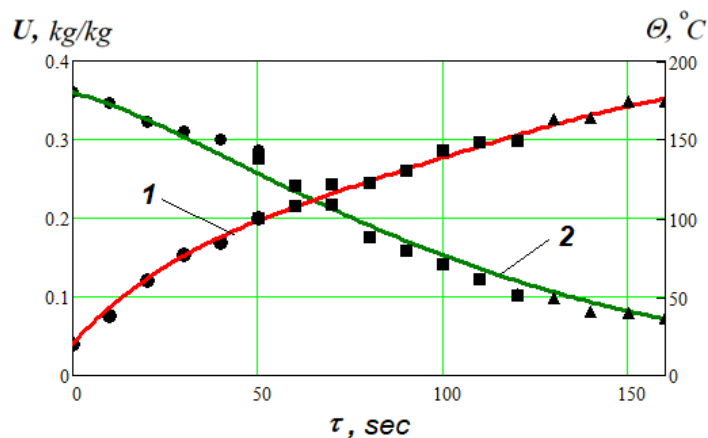


Рис. 4.11. Кінетики нагріву (1) і зневоднення (2) розраховані за (4.33)-(4.34)

На рис. 4.11 наведено графічні залежності зміни температури $\bar{\theta}(\tau)$ та вологовмісту $\bar{U}(\tau)$, що отримані за чисельними розв'язками системи (4.33)-(4.34) з використанням залежностей $k_T(U)$ та $k_C(\theta)$, точками відмічені дані експериментів.

Рівняння кінетики охолодження зернівки після опромінення визначимо за аналогією з (4.35) у вигляді:

$$\frac{d\bar{\theta}_o(\tau)}{d\tau} = k_o[t_c - \bar{\theta}_o(\tau)]; \quad (4.35)$$

де, $k_o = \left(\frac{\mu_1}{R}\right)^2 [b_5 - b_6 \bar{U}(\tau)]$.

Отримані спрощені рівняння зміни параметрів зерна в часі при ІЧ-опроміненні та подальшому охолодженні повітрям дають можливість розраховувати процес мікронізації в осцилюючому режимі (переміжне опромінення і охолодження) за схемою послідовного розрахунку кінетики нагрівання і зневоднення розв'язком системи (4.30)-(4.31) та охолодження за розв'язком рівняння (4.32). При цьому початковими умовами після кожного наступного циклу $\bar{\theta}_n, \bar{U}_n$ задаємо кінцеві значення параметрів попереднього циклу перебігу процесів нагріву, охолодження да зневоднення.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь (4.30)-(4.31) здійснюється в програмному середовищі Mathcad. Побудова графічних залежностей зміни параметрів зерна в часі $\bar{U}(\tau), \bar{\theta}(\tau), \bar{\theta}_o(\tau)$ складає сутність розрахунків режимів мікронізації зерна при переміжному енергопідведенні, що реалізується зональним методом (зона нагрівання – зона охолодження).

Структуру режимних параметрів сформуємо з таких позицій. На початку процесу (І-стадія), коли зерно має максимальну вологість інтенсивність теплової потужності випромінювання задаємо максимальною. Це може бути реалізовано без додаткових затрат енергії шляхом максимального наближенні ІЧ-генератора до шару зерна.

Як відомо з теорії радіаційного випромінювання коефіцієнт поглинання енергії ІЧВ у воді вищий, ніж у сухої речовини зернівки, тому температура поверхневої частини зернівок швидко набуває критичного значення. При цьому випаровується поверхнева волога і відбувається усушка (усадка, ущільнення поверхні, що висохла) – переміщення вологи до поверхні утруднюється, виникає небезпека підгоряння поверхні. Припинення опромінення зерна і інтенсивне вентилявання його повітрям призводить до швидкого охолодження поверхні, зміни напрямку градієнта температури і тиску і часткового видалення вологи теплотою акумульованого зерном у циклі опромінення. При наступному циклі опромінення, теплота від поверхні передається через поверхневі шари всередину зернівки, що призводить до інтенсивного пароутворення, перегріву, збільшенню тиску пари і відповідно руйнуванню механічної структури зерна. Зерно вспучується, розтріскується (збільшується розмір пор), волога інтенсивно видаляється з об'єму зернівки. На наступному циклі охолодження вивільнена волога випаровується за рахунок акумульованої теплоти під час опромінення.

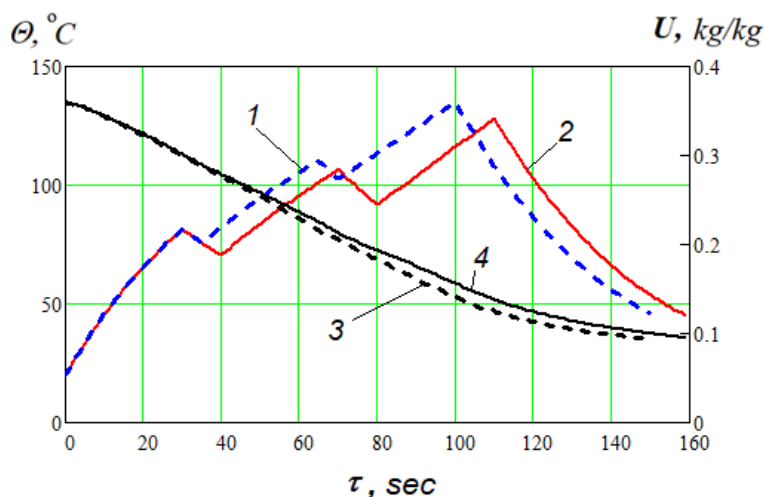


Рис. 4.12. Кінетики нагріву і зневоднення при осцилюючих режимах мікронізації

1-крива кінетики нагріву ($\tau_{\text{опр}} = 30$ сек, $\tau_{\text{відл}} = 5$ сек); 2-крива кінетики нагріву ($\tau_{\text{опр}} = 30$ сек, $\tau_{\text{відл}} = 10$ сек); 3- кінетика зневоднення зерна ($\tau_{\text{опр}} = 30$ сек, $\tau_{\text{відл}} = 5$ сек); 4 - кінетика зневоднення зерна ($\tau_{\text{опр}} = 30$ сек, $\tau_{\text{відл}} = 10$ сек)

Наступний цикл ІЧ-опромінення швидко прогріває вже «розворочене» зерно, при цьому видаляється остаточно зв'язана волога. Охолодження зерна повітряним потоком завершує процес випаровування вологи, виключаючи подальший нагрів і підгоряння. Ациклічні короточасні процеси: нагріву, зневоднення, охолодження досить повно узгоджуються з реальними процесами, які відбуваються із зерном в процесах «імпульсного» опромінення.

На графіках рис. 4.12 представлено результати розрахунків варіантів осцилюючих (циклічних) режимів мікронізації зерна. В процесі досліджень режимів мікронізації зерна враховувалася практична доцільність незмінної в циклах експозиції опромінення ($\tau = 30$ с). Величина якої визначається очевидним співвідношенням:

$$\tau_{\text{опр}} = \frac{L_{IR}}{V_g} ; \quad (4.36)$$

де, L_{IR} – довжина пристрою, що генерує ІЧВ; V_g – швидкість переміщення зерна вібротранспортером.

Тому варіювалася тільки експозиція охолодження, яка залежить від відстані генераторами ІЧВ.

Розглянуто варіанти процесу з різним часом охолодження величина якого може змінюватися в напрямку руху зерна.

Як впливає з аналізу отриманих графіків, найбільш ефективними є процес періодичного опромінення зерна з наступним його охолодженням при збільшенні експозиції охолодження в кожному циклі. Це узгоджується з даними (твердженнями) інших дослідників, процес видалення вологи інтенсифікується в період «вибухового» руйнування зернівок і зв'язана волога переходить у псевдопару, а потік повітря інтенсифікує дифузійний перенос вологи з поверхонь в повітря. Вихід вологи збільшується на 20%.

На підставі аналізу існуючих досліджень встановлено високу ефективність теплової обробки зерна ІЧ-випромінюванням з метою спрямованої зміни його

технологічних властивостей і якісних показників. В теплоенергетичному розумінні – мікронізація являє собою процес переносу теплоти і вологи з фазовим переходом та руйнівною деформацією механічної структури зернівок. В процесі мікронізації зерно збільшується в об'ємі, знижується його твердість і механічна міцність, зернівка розтріскується і частина його внутрішньої поверхні переходить у зовнішню. Перетворення фізико-механічних властивостей супроводжується перетворенням води в пароподібний стан і вивільненню його з зернової речовини. Але технологія мікронізації зернового матеріалу зв'язана із значними затратами енергії. Суттєвим резервом зниження енергоємності є збільшення інтенсивності потоку променистої енергії наближенням джерела ІЧВ до поверхні зерна. Однак, при цьому виникає загроза підгоряння поверхні зерна і втрат сухої речовини. Найбільш ефективним способом уникнення перегріву зерна є застосування імпульсно-циклічного опромінення з охолодженням нагрітого зерна повітряним потоком.

Для визначення ефективності застосування осцилюючого режиму і розробки енергоефективних режимів шляхом дослідження процесів ІЧ нагріву, зневоднення і охолодження окремих зернівок, сформульовано фізична модель сумісних процесів тепломасопереносу при ІЧ-опроміненні.

На основі аналізу теплофізичних і масопереносних явищ, які супроводжують складний процес мікронізації з урахуванням нових узагальнених уявлень сформульовані математичні моделі за допомогою яких на основі даних експериментів визначені основні коефіцієнти і критерії переносу енергії і речовини.

Ідентифіковані математичні моделі на базі розв'язків рівнянь нестационарної тепло- і масопровідності (дифузії вологи) дали можливість розрахувати зміни в часі одномірних

полів температури і вологовмісту в зернівках при інтенсивному ІЧ-опроміненні.

Співвідношення даних теоретичних розрахунків і даних отриманих експериментально дозволяє стверджувати, що запропонована математична модель адекватно описує реальні процеси. Аналіз отриманих залежностей підтверджує правильність сформульованої фізичної картини (моделі) протікання процесу мікронізації в три етапи з вивільненням вологи у вигляді рідкої і парової фази.

Використання визначених залежностей коефіцієнту температуропровідності від вологості, а коефіцієнта масопровідності (дифузії вологи) від вологовмісту зерна, дозволило спростити рівняння сумісного переносу теплоти і маси, і сформулювати математичну модель мікронізації, яка дала можливість розрахувати часову зміну температури і вологовмісту зерна розв'язком однієї системи рівнянь. Отримані результати розв'язку даної системи досить точно описують виділені етапи процесу мікронізації, що підтверджується співпадінням теоретичних і експериментальних даних кривих кінетики нагріву і зневоднення. Це дало можливість аналітичного проектування режимів процесу мікронізації з безперервно або ступінчастими змінами параметрів осцилюючого режиму.

Аналіз способів реалізації осцилюючого (циклічного) режиму мікронізації зерна приведений на основі співставлення періодичної зміни температури і вологості зерна при постійній експозиції опромінення і різних значеннях експозиції охолодження.

Зменшення часу охолодження зерна в першому циклі і подальше його збільшення в другому і третьому циклах призводить до збільшення середньої за процес температури зерна і відповідно збільшенню інтенсивності вологовидалення при однакових затратах енергії. Але при цьому час перегріву зерна тобто часу дії перебільшеної температури на 20-30 °C не

перевищує 5-6 сек, цього часу недостатньо для початку підгоряння поверхні зерна.

Короткі висновки.

1. Розроблено математичні моделі сумісного тепло і масопереносу при інтенсивному опроміненні зерна ІЧ-випромінюванням з урахуванням пароутворенні і перенесенні вологи у вигляді рідини і пари. Запропоновано систему диференціальних рівнянь процесу взаємозв'язаного тепломасопереносу з коефіцієнтами переносу залежними від зміни в часі температури вологості зерна. Параметри математичних моделей ідентифіковані за даними експериментів, а розраховані за ними залежності адекватно (з достатньою точністю) описують реальний процес мікронізації зерна ІЧ-опроміненням.

2. На підставі отриманих математичних моделей встановлено закономірності зміни температури і вологовмісту зерна і режимних параметрів та властивостей (теплофізичних) зернового матеріалу. За даними експериментів визначені емпіричні залежності коефіцієнта температуропровідності від вологовмісту, а коефіцієнта масопровідності від температури.

3. Запропоновано нову концепцію аналітичного розрахунку і фізичного опису процесу теплової обробки зернового матеріалу інтенсивним ІЧ-випромінюванням, при безперервно змінних параметрах осцилюючого режиму, що дозволило сформулювати і кількісно оцінити режими циклічно-переміжного вливу ІЧ-випромінювання і примусового охолодження зерна, на показники процесу.

4. Резерви, щодо інтенсифікації процесу мікронізації в цілому визначаються швидкістю нагріву, що відповідно інтенсифікує і зневоднення. Реалізація осцилюючого режиму у вигляді циклічно-імпульсного опромінення з проміжним примусовим охолодженням є найбільш ефективною, так як забезпечує видалення вологи з меншими на 20-30 %

енергозатратами і зменшує перегрів поверхні, порівняно із неперервним ІЧ-опроміненням.

4.2 Математична модель теплоенергетичних режимів теплонасосної сушильної установки

Значні енергетичні витрати на процес зневоднення зернової сільськогосподарської сировини є передумовою до впровадження нового енергозберігаючого обладнання і підвищення ефективності існуючих установок через їх технічну і технологічну модернізацію.

Скорочення енерговитрат в АПК на сушіння зернових матеріалів є можливим через заходи направлені на зменшення викидів тепла з відпрацьованим теплоносієм, використання поновлювальних джерел енергії і вторинних енергоресурсів. Ці заходи реалізуються, в тому числі, використанням енергоефективного теплонасосного обладнання. Для визначення енергетичної і технологічної ефективності, раціональних режимів функціонування теплонасосних сушильних установок та їх конструктивних параметрів необхідно мати науково-обґрунтований метод розрахунків, що базується на математичних моделях теплоенергетичних процесів в елементах обладнання таких установок, що функціонують, як правило, в нестаціонарних режимних умовах.

В процесах післязбиральної обробки зерна і підготовки насіння для зберігання процеси сушіння мають найбільшу енергоемність, до 80% енергії витраченої на всю технологію стаціонарної доробки урожаю зернових культур. Але всього 40-45% витраченої енергії використовується корисно. При сушінні зерна насіннєвого призначення, витрати енергії збільшуються в 1.3-1.4 рази в порівнянні із зерном продовольчого призначення.

Задачі зменшення енергоемності сушильного процесу та його інтенсифікація можуть бути вирішені шляхом

використання теплонасосних систем тепlopостачання для сушильних установок, які дозволяють утилізувати теплові викиди сушарок (з відпрацьованим сушильним агентом) і створювати раціональні схеми використання енергії і режими сушіння.

Застосування теплових насосів для підготовки сушильного агента або охолоджуючого повітря в малотоннажних сушарках для насінневого матеріалу дозволить відмовитися від використання природнього газу, дизельного або пічного палива.

Для визначення енергетичної і технологічної ефективності та раціональних режимів функціонування теплонасосних сушильних установок та їх конструктивних параметрів необхідно мати науково-обґрунтований метод розрахунків, що базується на математичних моделях теплоенергетичних процесів в елементах обладнання таких установок.

Внаслідок значних витрат технологічної теплоти в конвективних сушарках (з відпрацьованим сушильним агентом та нагрітим сухим зерном) виникає необхідність утилізації теплових викидів зерносушарок [1]. Дослідженням способів і технічних засобів утилізації теплоти відпрацьованого сушильного агента та нагрітого зерна присвячено ряд наукових досліджень які проаналізовані в роботах [2-4]. Визначено, що рекуперація викидної теплоти сушильного агента для нагрівання свіжого теплоносія низькопотенційним тепловим потоком, хоча і дозволяє знизити затрати енергії на підготовку сушильного агента (на 10-15%), але залишається малоефективною. В роботі [5] проаналізовано сучасні заходи спрямовані на зниження питомих витрат теплоти в зерносушарках, встановлено, що застосування утилізації теплоти насиченого вологою теплоносія та охолоджуючого матеріал повітря дозволяє зменшити питомі витрати теплоти

на видалення вологи з 5000 кДж/кг до 3284 кДж/кг випареної вологи і підвищити коефіцієнт корисної дії із 49% до 77.5%; при використанні теплонасосної установки з тепловим двигуном в якості приводу компресора затрати теплової енергії на видалення вологи становитимуть 3000 кДж/кг випареної вологи.

Експериментальні і теоретичні дослідження проведені в роботах [6-7] при сушінні насіння ріпаку, деревини [8], зерна рису [9, 10] дозволяють визначити, що використання теплонасосних систем для підготовки сушильного агента є доволі ефективним способом суттєвого зменшення енергетичних затрат на сушіння сільськогосподарської продукції.

Методи розрахунків параметрів теплонасосного обладнання наведені в роботах [11, 13]. Але в цих роботах розглянуто розрахунки статичних характеристик теплових насосів, в незалежності від характеристик (динамічних) споживача і джерела вторинної енергії – сушарок. В роботах [9, 10] наведено також статичні характеристики теплових насосів і сушарок. Динамічна модель теплових режимів зерносушарки безперервної дії подано в роботі [14], а теплонасосної системи теплопостачання в роботі [15]. Математичні моделі динамічних режимів сучасних сушарок з тепловими насосами як єдиної системи відсутні.

При складанні математичного опису процесу сушіння в установках безперервної дії прийнято, що видалення вологи із матеріалу при конвективному підведенні теплоти і конвективному відведенні вологи з поверхні матеріалу відбувається за законом випаровування з вільної поверхні (закон Дальтона): $W(\tau) = \beta f(P_n(\theta) - P_n(d))$. Підведення

теплоти до поверхні матеріалу конвективно за законом Ньютона: $Q(\tau) = \alpha f(t_c - \theta)$, де $P_H(\theta)$ – парціальний тиск насиченої пари при температурі поверхні зерна; θ – температура зерна, $P_H(d)$ – парціальний тиск водяної пари в повітрі; t_c , d – температура та вологовміст сушильного агента (нагрітого повітря); α, β – коефіцієнти теплообміну і масообміну; f – поверхня матеріалу.

Крім того для спрощення опису прийнято, що волога із матеріалу видаляється і випаровується одночасно, зміна температури і вологості матеріалу відбувається безградієнтно.

Для сушарок безперервної дії, незалежно від їх конструкційного виконання, прийнято розглядати процеси сумісного тепло- і масообміну між потоками сушильного агента – нагрітого повітря, який визначається масовими витратами G_c та потоком зерна з масовими витратами G_z . В цьому випадку, достатньо визначити параметри матеріалу і сушильного агента на виході із сушильної установки. При цьому параметри матеріалу і сушильного агента на вході в сушарку вважаються заданими і сталими. Нестационарні процес сушіння, перебіг якого відбувається за такою схемою може бути досліджено математичною моделлю із зосередженими параметрами, на основі рівнянь теплового і матеріального балансу.

Для опису теплових процесів в тепловому насосі, достатню також знати зміну параметрів повітря і холодоагенту в елементах холодильної машини яку використовують, як тепловий насос [12, 13].

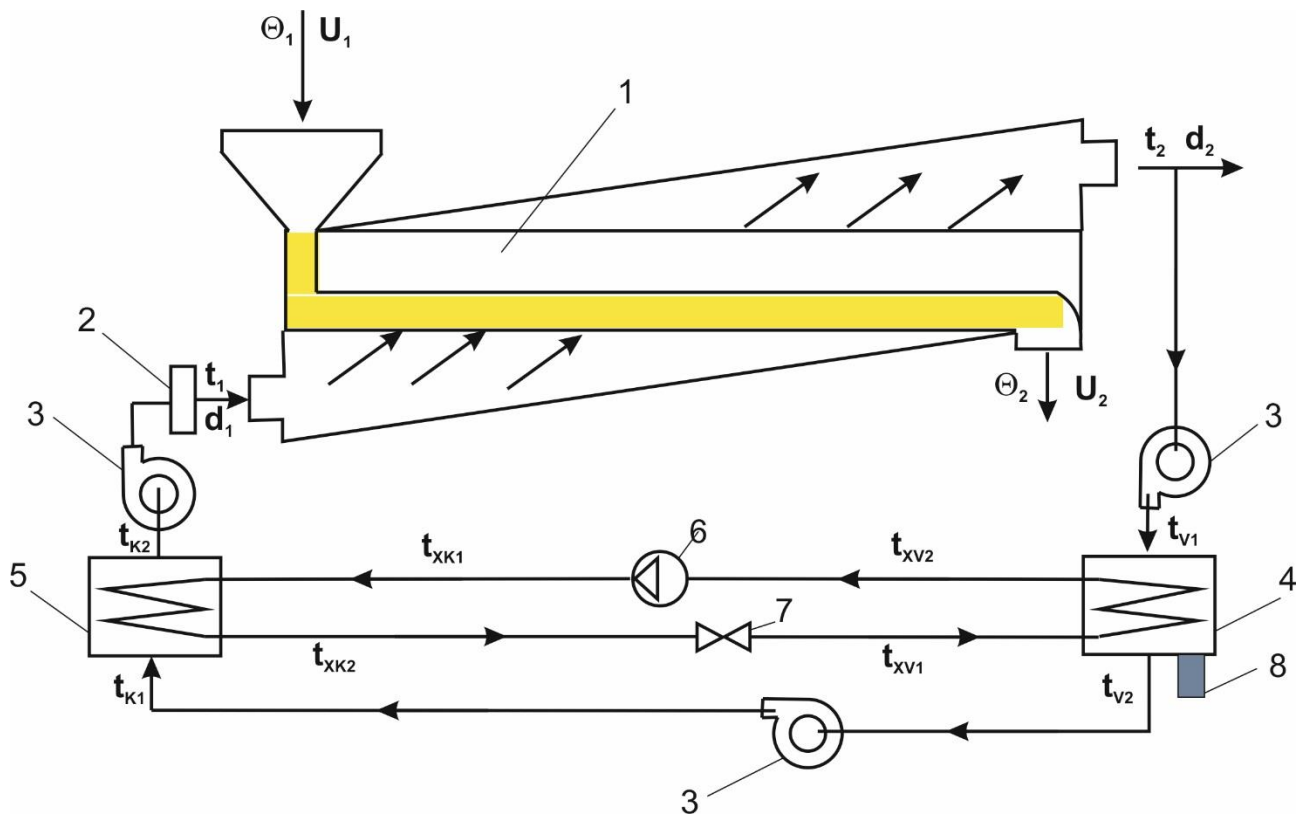


Рис. 4.13. Розрахункова схема теплонасосної сушильної установки (1 – сушарка; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – випарник; 5 – конденсатор; 6 – компресор; 7 – дроселюючий вентиль; 8 – збірник конденсату).

Установка, розрахункова схема якої представлена на рис. 4.13, працює так. Відпрацьований сушильний агент (на виході сушарки) вентилятором подається в теплообмінник на випарника 4 холодильної машини, де контактуючи із трубчастим охолоджувачем (конденсат відводиться назовні) після чого вентилятором повітряного конденсатора подається в теплообмінник конденсатора 5. Контактуючи з нагрітою поверхнею циркуляційного контуру конденсатора зневоднене повітря нагрівається і вентилятором подається в калорифер 2 для догрівання до необхідної температури.

Динамічний нестационарний режим процесу сушіння зерна представлено системою диференціальних рівнянь [16]:

$$m_V \cdot C_P \frac{dt_2(\tau)}{d\tau} = G_c \cdot C_P \cdot (t_1 - t_2) - \alpha \cdot f \cdot (\bar{t} - \bar{\theta}) - k \cdot F \cdot (\bar{t} - \bar{\theta}) - k \cdot F \cdot (\bar{t} - t_H) + r\beta f(a\bar{\theta} + c + b\bar{d}); \quad (4.37)$$

$$m_z \cdot C_z \frac{d\theta_2(\tau)}{d\tau} = G_z \cdot C_z(\theta_1 - \theta_2) + \alpha \cdot f \cdot (\bar{t} - \bar{\theta}) - \beta \cdot f \cdot (\alpha \cdot \bar{\theta} + c - b \cdot \bar{d}); \quad (4.38)$$

$$m_{zo} \frac{dU_2}{d\tau} = G_{zo} \cdot (U_1 - U_2) - \beta \cdot t \cdot (a \cdot \bar{\theta} - c - b \cdot \bar{d}); \quad (4.39)$$

$$-m_v \frac{dd_2(\tau)}{d\tau} = G_c(d_2 - d_1) - \beta \cdot t \cdot (a \cdot \bar{\theta} + c - b \cdot \bar{d}); \quad (4.40)$$

Де a, b, c - сталі коефіцієнти лінеаризації залежностей насиченої пари при температурі нормального тиску на поверхні матеріалу:

$P_H(\bar{\theta}) = a \cdot \bar{\theta} + c$, та в повітрі $P_H = b \cdot \bar{d}$;

$\bar{t} = 0,5(t_1 + t_2)$; $\bar{\theta} = 0,5(\theta_1 + \theta_2)$; $\bar{d} = 0,5(d_1 + d_2)$ – середні значення параметрів у сушарці;

t_2, d_2 - температура і вологовміст повітря, °С, г/кг·с.п.;

θ_2, U_2 – температура і вологовміст насіння, °С, кг/кг·с.р.;

m_z, m_v - маса зерна і повітря в об'ємі сушарки, кг;

m_{zo} - маса абсолютно сухого насіння в об'ємі сушарки, кг;

C_p, C_z - питома теплоємність повітря і зерна, Дж/ кг·°С;

G_p, G_z, G_{zo} - витрати повітря, зерна і абсолютно сухого зерна;

t_1, θ_1, U_1, d_1 - параметри повітря і зерна на вході в сушарку, °С, кг/кг·с.р.;

α, k - коефіцієнт теплообміну між зерном і повітрям, коефіцієнт теплопередачі від повітря до зовнішнього середовища, Вт/м²·°С;

f, F - поверхня зерна, що знаходиться в сушарці і зовнішня поверхня сушарки, м²;

β - коефіцієнт масообміну, кг/м²·Па;

a, b, c - сталі коефіцієнти;

$\bar{t}, \bar{\theta}, \bar{d}$ - середні значення параметрів;

r – теплота пароутворення (питома) Дж/кг.

Система рівнянь (4.39-4.40) описує зміну в часі параметрів матеріалу θ_2 , U_2 та сушильного агента t_2 , d_2 на виході сушильної установки при наступних початкових умовах:

$$\tau=0, t_2(0)=t_1; d_2(0)=d_1; U_2(0)=U_1; \theta_2(0)=\theta_1; \frac{dt_2}{d\tau} = \frac{d\theta_2}{d\tau} = \frac{dU_2}{d\tau} = \frac{dd_2}{d\tau} = 0; \quad (4.41)$$

Математичний опис нестационарних теплових процесів в тепловому насосі складаємо для інерційних елементів будови випарника і конденсатора окремо [17].

Вихідними диференціальними рівняннями що описують динаміку теплообміну у випарнику є рівняння теплового та матеріального балансу [9]:

- для повітряного потоку вторинного джерела енергії:

$$m_p c_p \frac{dt_2}{d\tau} = G_p c_p (t_{p1} - t_{p2}) - \alpha_1 F_1 (\bar{t}_p - \theta_c) - Q_k; \quad (4.42)$$

- для стінок випарника (трубчатого):

$$m_c c_c \frac{d\theta_c}{d\tau} = \alpha_1 F_1 (\bar{t}_v - \theta_c) - \alpha_2 F_2 (\theta_c - \bar{t}_{xa}) + Q_k; \quad (4.43)$$

- для потоку холодоагенту:

$$m_x c_x \frac{dt_{x2}}{d\tau} = G_x c_x (t_{p1} - t_{x2}) + \alpha_2 F_2 (\theta_c - \bar{t}_{xa}); \quad (4.44)$$

- теплота, що виділяється на поверхні теплообмінника при конденсації вологи з повітря:

$$Q_k = \sigma_o r F_1 (\bar{d}_v - d''(\theta_c)); \quad (4.45)$$

- рівняння матеріального балансу для вологого повітря:

$$m_p \frac{dd_2}{d\tau} = G_p(d_{p1} - d_{p2}) - \sigma_o F_1 (\overline{d_p} - d''(\theta_c)); \quad (4.46)$$

де $t_{p1} = t_o$ – температура кипіння холодоагенту; $\overline{t_v} = 0.5(t_{v1} + t_{v2})$; $\overline{t_{xa}} = 0.5(t_o + t_{n2})$; $\overline{d_p} = 0.5(d_{p1} + d_{p2})$; θ_c – температура стінки (поверхні випарника); G_p, G_{xa} – масові витрати повітря і холодоагенту; F_1, F_2 – зовнішня і внутрішня поверхні теплообміну; α_1, α_2 – коефіцієнт теплообміну від повітря і холодоагенту до стінки; σ_o – коефіцієнт масовіддачі при конденсації вологи; $d''(\theta_c)$ – температура насичення повітря при температурі стінки; $m_{po}c_p, m_c c_c, m_x c_x$ – теплоємність повітря, теплообмінника, холодоагенту в об'ємах елементів апарату; m – маса; c – питома теплоємність.

Кількість холодоагенту у випарнику складається з маси пари m_n та рідини m_p .

Відповідно витрати холодоагенту в системі:

$$G_{xa} = G_n + G_p. \quad (4.47)$$

Витрати парової фаз можна визначити із співвідношення [16]:

$$G_n = G_{xa}\chi, \quad (4.48)$$

де $\chi = \frac{m_n}{m_n + m_p} = \frac{\rho_n}{\rho_n + \rho_p}$ – масовий вміст парів холодоагенту в контурі випарника.

Об'ємні витрати пари:

$$V_n = \frac{G_n}{\rho_n}, \quad (4.49)$$

де ρ_n – густина пари.

З урахуванням введених співвідношень, рівняння (4.46) перепишемо у вигляді:

$$m_x c_x \frac{dt_{n2}}{d\tau} = \frac{\alpha_2 F_2}{\rho_n} (\theta_c'' - 0.5t_o - 0.5t_{n2}) - G_p \frac{q_o}{\rho_n} - q_v V_n. \quad (4.50)$$

В цьому рівнянні величина G_p визначає заповнення випарника холодоагентом, V_n – холодопродуктивність компресора (q_o – питома холодопродуктивність).

Диференціальні рівняння (4.46) - (4.50) складають математичну модель динаміки температурного режиму випарника ТНУ.

Математична модель динаміки процесів теплообміну у повітряному конденсаторі при прийнятих спрощеннях може бути представлена диференціальними рівняннями зміни параметрів теплообмінника конденсатора і потоків на виході апарату.

Для потоку повітря, що нагрівається в конденсаторі:

$$m_k c_v \frac{dt_{m2}}{d\tau} = G_m c_v (t_{m1} - t_{m2}) + \alpha_1^k F_1^k (\theta_{ck} - \overline{t_m}). \quad (4.51)$$

Для температури стінки теплообмінника конденсатора:

$$m_{ck} c_{ck} \frac{d\theta_{ck}}{d\tau} = \alpha_2^k F_2^k (\overline{t_{xk}} - \theta_{ck}) - \alpha_1^k F_1^k (\theta_{ck} - \overline{t_m}). \quad (4.52)$$

Для температури конденсату на виході:

$$m_x^k c_x^k \frac{dt_{k2}}{d\tau} = G_n c_n t_{n1} - G_p c_p t_{k2} - r \chi G_{xa} + \alpha_2^k F_2^k (\overline{t_{xk}} - \theta_{ck}), \quad (4.53)$$

де $G_n = G_{xa} \chi$; $G_p = G_{xa} (1 - \chi)$; r – питома теплота конденсації пари холодоагенту; $m_k c_v, m_{ck} c_{ck}, m_x^k c_x^k$ – теплоємність повітря в об'ємі теплообмінника конденсатора,

стілки конденсатора та холодоагенту в об'ємі елементів конденсатора; $\overline{t_{xk}}$ – температура конденсації.

Зміна параметрів холодоагенту в часі (у рідкій і паровій фазах) при стисненні в компресорі і розширенні в дросельному клапані, не враховується, процеси вважаються стаціонарними:

– для компресора:

$$t_{n2} = k'_2 t_{n1}; \quad (4.54)$$

– для дроселюючого клапану:

$$t_{p4} = k'_1 t_{p3}, \quad (4.55)$$

де k'_1, k'_2 – коефіцієнти пропорційності сталі величини; позначки (4.50–4.54) визначають значення температури на T-S діаграмі теоретичного циклу парокомпресорної машини.

Для замикання загальної системи рівнянь яка складається із рівнянь (4.41-4.44), (4.46-4.48, 4.54, 4.55) запишемо рівняння зв'язків відповідно до схеми рис.1: $t_2 = t_{p1}$; $t_{p2} = t_{k1}$; $t_1 = t_{k2} + \frac{P}{G_p c_p}$ (де P – теплова потужність нагрівача повітря).

При використанні додаткового догрівача повітря (калорифера), температура сушильного агента на вході в сушильну камеру буде визначатися із рівняння теплового балансу:

$$m_k c_k \frac{dt_1(\tau)}{d\tau} = G_p c_p (t_{k2}(\tau) - t_1(\tau)) + P. \quad (4.56)$$

Таким чином математична модель нестационарного режиму тепла насосної сушильної установки визначається системою 13-ти диференціальних рівнянь і алгебраїчних рівнянь зв'язку.

Прирівнюючи похідні параметрів моделі за часом до нуля отримаємо математичний опис статичних характеристик теплонасосної сушарки у вигляді системи алгебраїчних рівнянь, розв'язком якої можна розрахувати основні технологічні параметри сушильної установки та визначивши їх показники обґрунтувати теоретичні параметри теплового насоса.

За даними розрахунків [9, 12] раціональна температура конденсації холодоагента (R22) становить 70°C , а температура його кипіння становить 20°C за таких умов можна отримати температуру сушильного агента 65°C , що є достатнім для сушіння насіннєвого матеріалу зернових культур.

Коефіцієнт енергетичної ефективності теплонасосної системи за таких параметрів становить 3-3,5.

За результатами аналітичного аналізу процесів у теплонасосній сушарці для насіннєвого зерна вперше отриманий математичний опис який пов'язує в єдину математичну систему всі основні технологічні параметри сушарки, теплонасосної установки, догрівача повітря. Це дає можливість ідентифікувати розглянутий технологічний процес.

Короткі висновки.

1. Отримана математична модель динамічних режимів теплонасосної сушильної установки відрізняється замкненістю контурів робочого тіла холодоагента та контуру сушильного агента і може бути використана при розробці системи автоматичного керування процесом сушіння сільськогосподарської продукції.

2. Перетворення динамічної моделі в статичну шляхом виключення похідних змінних параметрів, що характеризують процес дозволить визначити раціональні режими функціонування теплонасосної системи тепlopостачання сушильної установки і оптимізувати режим функціонування сушильної установки.

4.3. Математичне моделювання режимів сушіння зернонасінневих матеріалів в установках з індукційним підведенням енергії

Для отримання високоякісного насінневого матеріалу необхідна своєчасна та швидка обробка свіжозібраного врожаю. Однією з важливих проблем господарського насінництва залишається сушіння. Серійні сушильні установки закордонного виробництва не повністю відповідають сучасним вимогам, мають серйозні конструкційні й експлуатаційні недоліки. Вітчизняні насіннево-сушильні установки практично відсутні. Насіннево-продукуючі господарства використовують саморобні сушарки, які простіші у виготовленні, забезпечують «м'які» температурні режими, але потребують значних трудових ресурсів. Здебільшого використовують сушарки періодичної дії, які характеризуються значною нестандартністю та розподіленістю параметрів процесу, що негативно впливає на якість насіння, яке обробляється.

Основними способами інтенсифікації найбільше розповсюджених сушарок конвективного типу є збільшення температури та кількості сушильного агента. Але перший спосіб обмежений термолабільністю (термонестійкістю) насінневого матеріалу. Другий спосіб пов'язаний із збільшенням енергетичних затрат, оскільки збільшення кількості сушильного агента автоматично підвищує теплові втрати та зменшує енергетичну ефективність і відповідно збільшує затрати на сушіння.

Зменшення загальної кількості сушильного агента може бути досягнуто безпосередньо в зоні сушіння через спеціальні гріючі елементи.

Суттєво впливає на інтенсифікацію сушіння зменшення тиску в сушильній камері завдяки підвищенню значень коефіцієнта масообміну, який у першому наближенні зворотно пропорційний тиску. Але у разі розрідженого (вакуумованого)

середовища передача теплоти конвекцією незначна. Тому для підтримання належної інтенсивності сушіння у вакуумі (залишковий тиск – більше 10 мм рт. ст.) теплоту для випаровування вологи з матеріалу необхідно підводити теплопровідністю від нагрітої поверхні (контактне сушіння). Створення нових індукційних установок для нагріву феромагнітних тіл, як проміжного теплоносія, дає можливість на новому рівні розглянути доцільність використання індукційного способу підведення енергії до насінневого матеріалу.

У роботі [1] встановлено необхідність забезпечення температурного режиму сушіння як запоруки отримання якісного насіння. У дослідженні [2] з метою покращення показників призначення селекційних конвективних сушарок проведені дослідження процесу сушіння в щільному шарі з рівномірно розподіленими електронагрівальними елементами та встановлена висока ефективність цього способу. Отримані аналітичні розрахункові залежності, що визначають режим періодичного сушіння в установках з індукційним нагрівом, недолік сушарок періодичної дії зберігається й у разі кондуктивно-конвективного сушіння [3]. Накопичено досвід, теоретично й експериментально обґрунтовано [4–6] нові форми організації процесу сушіння зерна з кондуктивно-конвективним підведенням енергії на базі термосифонів [4] і теплових труб [5]. Значні перспективи для інтенсифікації теплообміну відкривають нові індукційні установки для термообробки зернових матеріалів із прутковими (стрижневими) тепловиділяючими елементами [6, 7]. Можливість використання феромагнітних тепловиділяючих елементів індукційного нагріву для вдосконалення сушарок насінневого типу, які працюють у безперервному режимі, практично не досліджена, математичний опис процесів сушіння в рухомому щільному шарі з кондуктивним підведенням теплоти від циліндричних індукторів відсутній,

хоча в літературі є відомості щодо математичного опису кондуктивного нагріву дисперсних матеріалів [7, 9]. Отже, можливість суттєвого підвищення ефективності сушіння насіннєвого матеріалу в розрідженому середовищі з індукційним нагрівом контактних елементів [8], занурених у рухомий шар дисперсного матеріалу, достатньо обґрунтована та висвітлена в літературі. Для визначення та кількісної оцінки режимів сушіння насіннєвого матеріалу в установках з індукційним підведенням енергії необхідно мати математичний опис тепло-масообмінних процесів, який адекватно описує реальні процеси.

Сушильна установка з індукційним підведенням теплової енергії являє собою фізичну систему, що визначається моделлю з чотирьох (у спрощеному розгляданні) елементів (теплових ємностей): циліндричний корпус з індуктором (камера сушіння) із діелектричного матеріалу, в якому рівномірно за поперечним перерізом розміщено завантаження індуктора у виді стрижнів колового перетину та двох рухомих потоків (прямотечієві або протитечієві) насіннєвого матеріалу й повітря, яке служить вологопоглинаючим середовищем. Індуктор створює магнітне поле, яке, замикаючись на завантаження, рівномірно розподіляється по внутрішньому периметру стрижнів, які є тепловіділяючими елементами з розгалуженою поверхнею. Розрахункова схема сушильної установки як об'єкта математичного моделювання представлена на рисунку 4.14.

Фізична модель процесу полягає у наступному. Теплота, яка виділяється в стрижнях завантаження індуктора під дією магнітного поля передається конвекцією до рухомого потоку повітря та кондуктивно до поверхні зерна. Частину теплоти зерно отримує від повітря конвекцією та від ТВЕ (тепловіділяючі елементи) випромінюванням. Теплота, отримана зерном, витрачається на його нагрівання та випаровування вологи й виноситься з сушарки з нагрітим

зерном. Частина теплоти матеріалу та повітря передається внутрішній поверхні корпусу. Корпус отримує певну кількість теплоти від нагріву обмотки індукторно, тому його температуру можна вважати постійною величиною.

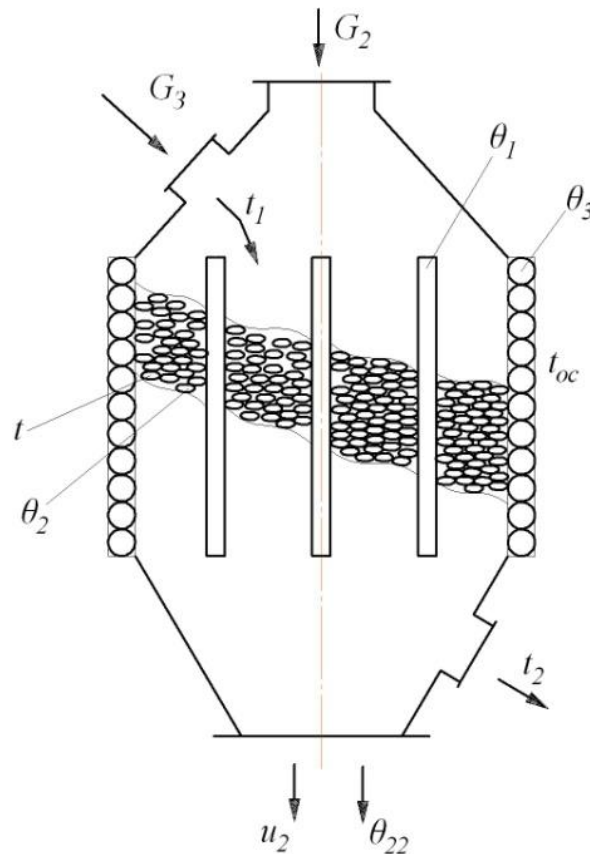


Рис. 4.14. Розрахункова схема сушильної установки

Прийmemo наступні припущення:

- теплофізичні властивості матеріалу та повітря залишаються незмінними як за координатою, так і за часом;
- тепловий потік в аксіальному напрямку в потоках тепловіділяючих елементів і корпусі – відсутній;
- коефіцієнти тепло- і масообміну залишаються постійними й дорівнюють середньому значенню за процес;
- стінка корпусу з внутрішніми джерелами теплоти – адіабатна;
- процеси перенесення теплоти та маси в матеріалі – безградієнтні.

У разі достатньо значної довжини тепловиділяючих елементів крайовими ефектами недогріву можна знехтувати та вважати, як перше наближення, розподіл потужності тепловиділень рівномірним.

Використовуємо такі умови і позначення:

P – теплова потужність тепловиділяючих елементів, кВт;

$\theta_1, \theta_2, t, \theta_3$ – температура тепловиділяючих елементів, зернового матеріалу, повітря та корпусу, відповідно, °С;

α_e – ефективний коефіцієнт теплообміну від дисперсного матеріалу до поверхонь;

α_1 – α_4 – конвективні коефіцієнти;

F_1, F_2, F_3 – поверхні теплообміну стрижнів, зерна, корпусу, відповідно, м²;

m_1, m_2, m_3, m_4 – маса стрижнів, зерна, повітря та корпусу, відповідно, кг;

c_1, c_2, c_3, c_4 – питома теплоємність стрижнів, зерна, повітря та корпусу з індуктором, відповідно, Дж/кг °С;

G_2, G_3, G_{o2} – масові витрати повітря, зерна й абсолютно сухого зерна, відповідно, кг/с;

H – висота камери та тепловиділяючої частини стрижнів, м;

h, τ – поточна координата та час, м і с;

β, F'_2 – коефіцієнт масообміну та вологовиділяюча поверхня матеріалу, кг/м²·год і м²;

$P''(\theta_2)$ – парціальний тиск насиченої водяної пари за температури поверхні матеріалу, Па;

$P(x)$ – парціальний тиск водяної пари в повітрі, Па;

P_A – атмосферний тиск, Па;

P_K – тиск повітря в камері, Па;

η – тепловий коефіцієнт корисної дії індуктора;

u, x – вологовміст матеріалу та повітря, %.

Складемо диференціальні рівняння теплового балансу для кожної з названих вище інерційних ємностей:

для тепловиділяючих елементів

$$P = m_1 c_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + \alpha_e F_1(\theta_1 - \theta_2) + \alpha_1 F_1(\theta_1 - t); \quad (4.57)$$

для потоку зернового матеріалу

$$\begin{aligned} \alpha_e F_1(\theta_1 - \theta_2) = m_2 c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} + G_2 c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} - m_{o2} r_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + G_{o2} r_0 H \frac{\partial u}{\partial h} + \\ + \alpha_2 F_2(\theta_2 - t) + \alpha_e F_3(\theta_2 - \theta_3); \end{aligned} \quad (4.58)$$

для потоку повітря

$$\begin{aligned} \alpha_1 F_1(\theta_1 - t) = m_3 c_3 \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_3 c_3 H \frac{\partial t}{\partial h} - \alpha_2 F_2(\theta_2 - t) + \\ + \alpha_3 F_3(t - \theta_3) + m_{o2} r_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + r_0 \beta F_2'(a\theta_2 + c - xb); \end{aligned} \quad (4.59)$$

для корпусу з індуктором

$$P(1 - \eta) + \alpha_e F_3(\theta_2 - \theta_3) + \alpha_3 F_3(t - \theta_3) = m_4 c_4 \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + \alpha_4 F_4(\theta_3 - t). \quad (4.60)$$

Складемо рівняння матеріального балансу для матеріалу та повітря:

$$-\left(m_{o2} \frac{\partial u}{\partial \tau} + G_{o2} H \frac{\partial u}{\partial h}\right) = m_3 \frac{\partial x}{\partial \tau} + G_3 H \frac{\partial x}{\partial h}; \quad (4.61)$$

для матеріалу

$$-m_{o2} \frac{\partial u}{\partial \tau} - G_{o2} H \frac{\partial u}{\partial h} = \beta F_2'[P''(\theta_2) - P(x)] \cdot \frac{P_A}{P_K}; \quad (4.62)$$

$$P''(\theta_2) = a\theta_2 + c; \quad (4.63)$$

$$P(x) = bx. \quad (4.64)$$

Для отримання аналітичних розв'язків системи рівнянь (4.56)–(4.64) приймаємо додаткові припущення:

- корпус сушарки – теплоізолюваний і не приймає участі в теплообміні (витрати в оточуюче середовище компенсуються тепловиділенням обмотки індуктора);
- зміна вологовмісту матеріалу пропорційна зміні температури матеріалу ($du \sim d\theta$) та можна використовувати критерій Ребіндера – $R_b = \frac{cd\theta}{r_0 du}$, звідки

$$R_b r_0 du = c_2 d\theta_2. \quad (4.65)$$

Інтегруючи співвідношення (4.65) у межах u_1 до u та θ_1 до θ :

$$R_b r_0 (u_1 - u) = c_2 (\theta - \theta_1). \quad (4.66)$$

Рівняння матеріального балансу для матеріалу та повітря запишемо як

$$G_{o2} (u_1 - u) = G_3 (x - x_1). \quad (4.67)$$

Порівнюючи рівняння (4.66) та (4.67), матимемо:

$$x = \bar{c} \theta_2 - \bar{c} \theta'_2 + x_1, \quad (4.68)$$

$$\text{де } \bar{c} = \frac{c_2 \cdot G_{o2}}{r_0 G_3 R_b};$$

θ'_2 і x_1 – температура матеріалу та вологовміст повітря на вході в сушарку, °C і %.

Інтегруючи рівняння (4.66) по τ та по h , будемо мати:

$$-\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{c_2}{R_b r_0} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad -\frac{\partial u}{\partial h} = \frac{c_2}{R_b r_0} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial h}. \quad (4.69)$$

Підставляючи отримані значення з (4.68) і (4.69), відповідно, в рівняння (4.59)–(4.61), перепишемо їх після перетворень як

$$m_1 c_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = P - (\alpha_e F_1 + \alpha_1 F_1) \theta_1 + \alpha_e F_1 \theta_2 + \alpha_1 F_1 t; \quad (4.70)$$

$$-m_2 c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} - G_{o2} c_2 H \frac{\partial \theta_2}{\partial h} = -(\alpha_2 F_2 + \alpha_e F_1) \theta_2 + \alpha_e F_1 \theta_1 + \alpha_2 F_2 t; \quad (4.71)$$

$$m_3 c_3 \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_3 c_3 H \frac{\partial t}{\partial h} = (\alpha_2 F_2 + r_0 \beta F_2' a - b \bar{c}) \theta_2 + \alpha_1 F_1 \theta_1 - \\ - (\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3) \cdot t + [b(\bar{c} \theta_2 + x_1) + c] r_0 \beta F_2'. \quad (4.72)$$

Розглянемо стаціонарний режим роботи установки (який настає після закінчення перехідного процесу). У разі встановленого режиму в кожній точці простору сушильної камери всі параметри процесу сушіння від часу не залежать і мають постійне значення. Вважаємо, що система тепловиділяючих елементів може бути виготовлена з можливістю кутового переміщення (обертання) [10], тоді розглядаємо одномірний процес. Зміна за координатою – висотою може бути визначена розв'язком рівнянь (3.14)–(3.16) при $\frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = 0$.

Із рівняння (4.70) матимемо:

$$\theta_1 = P'_1 + k_1 \theta_2 + k_2 t. \quad (4.73)$$

$$\text{де } P'_1 = \frac{P}{k}; k_1 = \frac{\alpha_e F_1}{k}; k_2 = \frac{\alpha_1 F_1}{k}; k = \alpha_e F_1 + \alpha_1 F_1.$$

Введемо позначення коефіцієнтів у рівняннях (4.54) та (4.55):

$$l_1 = \alpha_2 F_2 + r_0 \beta F_2' (a - b \bar{c}) + k_2; \\ l_2 = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 + k_2; \\ l_3 = \alpha_1 F_1 P'_1 + \alpha_3 F_3 \theta_3 + r_0 \beta F_2' [c - b(\bar{c} \theta_{21} - x_1)]; \\ l_4 = k_2 (F_2 + 1); l_5 = \alpha_2 F_2 + \alpha_e F_1 + k_1; l_6 = \alpha_e F_1 + k_1; \\ T_1 = \frac{G_3 c_3 H}{l_1}; T'_1 = \frac{m_3 c_3}{l_1}; T_2 = \frac{G_{o2} \bar{c} H}{l_4}; T'_2 = \frac{m_2 c_2}{l_4}; \\ a_1 = \frac{l_2}{l_1}; a_2 = \frac{l_5}{l_4}; b_1 = \frac{l_3}{l_1}; b_2 = \frac{l_6}{l_4}.$$

З урахуванням введених коефіцієнтів і рівняння (4.73) маємо наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} T_1 \frac{dt}{dh} + a_1 t - b_1 = \theta_2 \\ T_2 \frac{d\theta_2}{dh} + a_2 \theta_2 - b_2 = t \end{cases} \quad (4.74)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (4.74) відносно t і θ , отримаємо рівняння, що визначають зміну температури повітря та матеріалу за координатою – висотою камери h :

$$A_1 \frac{d^2 t}{dh^2} + A_2 \frac{dt}{dh} + A_3 t = A_4, \quad (4.75)$$

$$A_1 \frac{d^2 \theta_2}{dh^2} + A_2 \frac{d\theta_2}{dh} + A_3 \theta_2 = A_5. \quad (4.76)$$

У рівняннях позначено: $A_1 = T_1 T_2$; $A_2 = a_1 T_2 + a_2 T_1$; $A_3 = a_1 a_2 - 1$; $A_4 = b_2 + a_2 b_1$; $A_5 = b_1 + a_1 b_2$.

Задаємо граничні умови: $h = 0$; $t = t_1$; $\theta = \theta_{21}$; $\frac{\partial \theta_2}{\partial h} = 0$; $\frac{\partial t}{\partial h} = 0$; $x = x_1$,

де t_1 , θ_{21} , x_1 – значення параметрів на вході в сушарку з індукційним нагрівом.

Розв'язок неоднорідних диференціальних рівнянь другого порядку визначається значенням коренів характеристичного рівняння:

$$A_1 r^2 + A_2 r + A_3 = 0.$$

Проведений аналіз показав, що в діапазоні реальних значень усіх сталих коефіцієнтів характеристичне рівняння має дійсні та різні корені r_1 та r_2 .

Розв'язок рівнянь (4.75) та (4.76) за зазначених граничних умов отримаємо як

$$t(h) = \frac{t_1 A_3 - A_4}{A_3 \cdot (r_1 - r_2)} [r_1 e^{r_2 h} - r_2 e^{r_1 h}] + \frac{A_4}{A_3}, \quad (4.77)$$

$$\theta_2(h) = \frac{\theta_{21} A_3 - A_5}{A_3 \cdot (r_1 - r_2)} [r_1 e^{r_2 h} - r_2 e^{r_1 h}] + \frac{A_5}{A_3}, \quad (4.78)$$

де $r_1, r_2 = \frac{-A_2 \pm \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3}}{2A_1}$ – корені характеристичного рівняння.

Рівняння (4.77) і (4.78) визначають розподіл температури матеріалу та повітря за висотою сушильної камери. Величини всіх параметрів на виході сушарки (у кінці процесу) визначаються підстановкою $h = H$, де H – висота камери (довжина сушильного тракту).

Розглянемо масообмінні процеси. Із рівнянь (4.60)–(4.63) отримаємо за умов: $\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial x}{\partial \tau} = 0$:

$$G_3 H \frac{\partial x}{\partial h} = \beta F'_2 [a\theta_2 + c - bx] \cdot \frac{P_A}{P_K} \quad (4.79)$$

або

$$\frac{\partial x}{\partial h} + Bbx = Bc + Ba\theta_2, \quad (4.80)$$

$$\text{де } B = \frac{\beta F'_2}{G_3 H} \cdot \frac{P_A}{P_K}.$$

Підставимо значення температури матеріалу θ_2 з (4.78) у (4.80) та після алгебраїчних перетворень отримаємо:

$$\frac{\partial x}{\partial h} + Bbx = C + D_1 e^{r_2 h} - D_2 e^{r_1 h}, \quad (4.81)$$

$$\text{де } C = Bc + \frac{A_5}{A_3}; D_1 = B a k_T r_1; D_2 = B a k_T r_2; k_T = \frac{\theta_{21} A_3 - A_5}{A_3 \cdot (r_1 - r_2)}.$$

Розв'язок неоднорідного диференціального рівняння отримаємо як суму загального та частинного рівнянь:

$$x(h) = C_0 e^{-Bch} + \frac{C}{B \cdot b} + \frac{D_1}{r_2 - Bb} e^{r_2 h} - \frac{D_2}{r_1 - Bb} e^{r_1 h}, \quad (4.82)$$

$$\text{де } C_0 = x_1 - \frac{C}{B \cdot b} - \frac{D_1}{r_2 + Bb} + \frac{D_2}{r_1 + Bb}.$$

Зміну вологовмісту матеріалу отримаємо з рівняння (4.61), підставивши в нього значення похідної $\frac{\partial x}{\partial h}$ та продиференціювавши залежність (4.82):

$$\frac{dx(h)}{dh} = -C_0 B c e^{-Bch} + \frac{D_1 r_2}{r_2 - Bb} e^{r_2 h} - \frac{D_2 r_1}{r_1 - Bb} e^{r_1 h}. \quad (4.83)$$

Підставивши отримане значення у рівняння (4.60), матимемо:

$$-R \frac{du}{dh} = -C_0 B c e^{-Bch} + \frac{D_1 r_2}{r_2 - Bb} e^{r_2 h} - \frac{D_2 r_1}{r_1 - Bb} e^{r_1 h}, \quad (4.84)$$

$$\text{де } R = \frac{G_3}{G_{02}}.$$

Інтегруючи рівняння (4.84) за граничної умови: $h = 0$; $u = u_1$, де u_1 – значення вологовмісту матеріалу на вході в сушарку, після відповідних перетворень отримаємо:

$$u(h) = u_1 - R C_0 (1 - e^{-Bch}) + \frac{D_1}{r_2 - Bb} (1 - e^{r_2 h}) - \frac{D_2}{r_1 - Bb} (1 - e^{r_1 h}). \quad (4.85)$$

Отже, отримані залежності $\theta_2(h)$, $t(h)$, $x(h)$, $u(h)$ дають можливість визначити зміну основних параметрів процесу сушіння з індукційним підведенням теплоти до матеріалу (через кондуктивно-конвективний теплообмін). Коефіцієнти, які входять до рівнянь, $(I_1 - I_4, T_1, T_2)$ характеризують параметри

матеріалу та сушарки. Значення вихідних параметрів θ_2 , t_2 , x_2 , u_2 отримують підстановкою $h = H$ у рівняння (4.77), (4.78), (4.82) та (4.85).

Отримані аналітичні залежності стаціонарного режиму функціонування сушарки з індукційним підведенням теплоти дають можливість визначити та кількісно оцінити вплив режимних і конструкційних параметрів на показники призначення сушарки, а також ідентифікувати параметри динамічної моделі за даними експериментів й отримати числовий розв'язок динамічних процесів сушіння.

4.4. Дослідження руху зернівки у барабанній сушарці з ІЧ-енергопідведенням по скатній лінійчатій мінімальній поверхні

Зберігання у сухому стані - найбільш розповсюджений спосіб консервування рослинних матеріалів. Енерговитрати на сушіння зернових, насіннєвих і кормових матеріалів можуть складати до 50% від сумарних затрат на виробництво готового продукту. Універсальні сушарки барабанного типу широко використовуються в господарствах, бо, дозволяють проводити зневоднення різних сипучих вологих матеріалів. Але за рядом показників роботи (питомі затрати енергії, рівень автоматизації, виконання екологічних вимог, та інші) ці сушарки не повністю відповідають сучасним вимогам виробництва сільськогосподарської і переробної галузей. Вирішення задач оптимізації, щодо продуктивності і енергозатрат барабанних агрегатів, можливе лише за наявності адекватних математичних моделей процесів. Тому метою досліджень було розробка математичного апарату для обґрунтування геометричних параметрів скатної полицки в сушильному барабані для забезпечення гарантованого гравітаційного руху по ній зернового матеріалу з мінімальною швидкістю для максимального часу радіаційного опромінення

зернівки. Отримані рівняння можна використовувати для аналізу процесу переміщення зернівки в сушильному барабані і оптимізації режимних параметрів термообробки при відомих значеннях конструктивних параметрів сушарки.

Проблема зменшення енерговитрат при термічному сушінні вологого зерна надзвичайно актуальна для сільськогосподарських виробників, особливо в умовах невеликих господарств. Термічному сушінню підлягає до 40% зібраного зерна, а в деякі роки – до 80%.

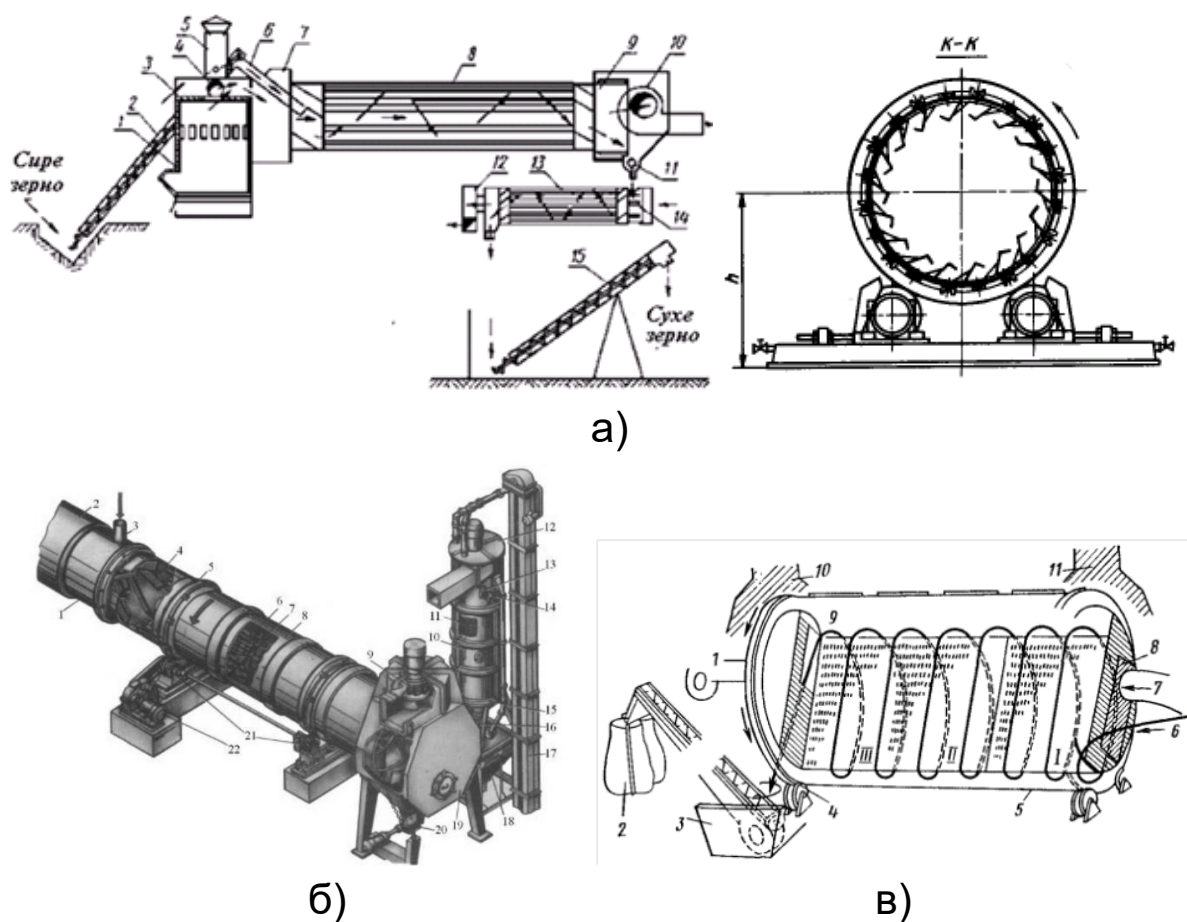


Рис. 4.15. Барабанні сушарки (а – технологічна схема СЗПБ, б – зовнішній вигляд СЗСБ, в – система Мюллера [4])

При цьому енерговитрати на сушіння можуть досягати до 50% від виробництва кінцевого продукту. У невеликих фермерських господарствах більшість використовуваних технічних засобів є уніфікованими та універсальними для економії матеріальних затрат на їх придбання.

Тому використання сушарок барабанного типу є доцільним з точки зору універсальності за видами зернової сировини і термообробки [1].

Для потреб агропромислового виробництва розроблені, випускаються і експлуатуються барабанні сушарки різних типів і марок [2], найбільш поширені СЗСБ, СЗПБ типу БНв яких можуть бути реалізовані в різному виконанні (прямоточні, протитечієві; з лопатевою, секторною, лопатево-секторною системою переміщення і комбінованими насадками, з кутом нахилу апарату від 1° до 4° , тощо [3]) рис. 4.15, але всі вони мають суттєвий недолік у порівнянні з іншими типами зерносушарок, що реалізують конвективний вид сушіння – завищені питомі енерговитрати.

Радикальним способом зменшення енерговитрат на сушіння є підведення радіаційної енергії для нагрівання зернової сировини безпосередньо всередині барабану для зменшення кількості подачі теплоносія і, як наслідок, зменшення витрат теплоти з відпрацьованим сушильним агентом в оточуюче середовище.

Але застосування такого способу проведення процесу термічного сушіння стримується недостатньо обґрунтованими способами переміщення і перемішування зернового матеріалу в локальних радіаційних зонах барабанних сушарок з ІЧ-енергопідведенням.

В літературних джерелах, достатньо матеріалів щодо переміщення матеріалу [5] та розрахунку процесів конвективного тепло- і масообміну [6], в установках барабанного типу при сушінні сільськогосподарських і харчових матеріалів. В роботах [1,7] обґрунтовано ефективність застосування терморадіаційного – ІЧ-енергопідведення в сушильних барабанах. Основною перевагою таких схем сушильного процесу є більш ефективна і інтенсивна передача теплової енергії до матеріалу і можливість впливати на характер розподілу температури

матеріалу за довжиною барабану. Однак у відомих роботах [5, 6, 7] із переміщення зернового матеріалу всередині барабану не враховується зміна коефіцієнта тертя в залежності від вологості зерноматеріалу, що в свою чергу призводить до зміни експозиції впливу локального ІЧ-підведення до матеріалу та може негативно відобразитися на енергопоказниках процесу.

Для забезпечення безпосереднього підведення радіаційної енергії від ІЧ-нагрівачів до зернового матеріалу в барабанній сушарці пропонується розмістити скатні полицки над однією з яких розмістити ІЧ-нагрівачі, рис. 4.16.

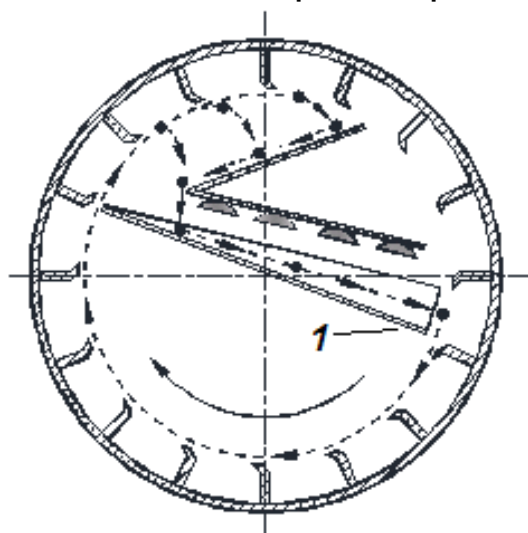


Рис. 4.16. Фронтальна схема барабанної сушарки (1 – скатна полицка).

Для максимально ефективного підведення радіаційної енергії до зернового матеріалу період (експозиція опромінювання) перебування зернового матеріалу на скатній полицці 1 повинний бути максимальним.

Для визначення закономірностей переміщення зернівки по скатній полицці розглянемо сили, що діють на зернівку при гравітаційному русі по шорсткій поверхні, рис. 4.17.

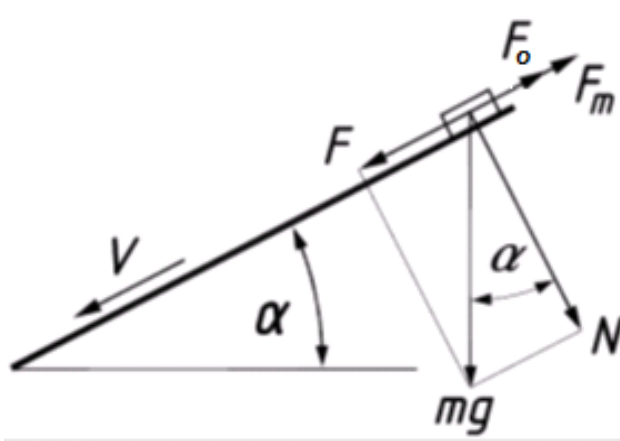


Рис. 4.17.Схема сил, що діють на зернівку при гравітаційному русі по шорсткій поверхні

Диференціальне рівняння гравітаційного руху частинки по шорсткій прямолінійній поверхні запишеться у вигляді:

$$m\ddot{x} = mg \cdot \sin \alpha - f \cdot mg \cdot \cos \alpha - F_0 \quad (4.86)$$

де, m – маса зернівки, кг; $\ddot{x}$ – прискорення, м/с^2 ; α – кут нахилу поверхні, f – коефіцієнт тертя, F_0 – сила опору середовища, Н.

Сила опору середовища (повітря) може визначатися за законом Стокса – сила опору пропорційна швидкості руху зернівки: $F_0 = k \cdot v = k \cdot \frac{ds}{dt}$, де k – коефіцієнт пропорційності, для частинки у вигляді кулі визначається так: $k = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot R_e$ або за законом Ньютона – сила опору пропорційна квадрату швидкості руху зернівки: $F_0 = k_{\pi} \cdot v^2 = k_{\pi} \cdot \left(\frac{ds}{dt}\right)^2$, де k_{π} – коефіцієнт парусності, визначається із швидкості витання зернівки.

На рис. 4.18 представлені графіки результатів чисельного розв'язку рівняння (4.86), з урахуванням опору середовища і без урахування.

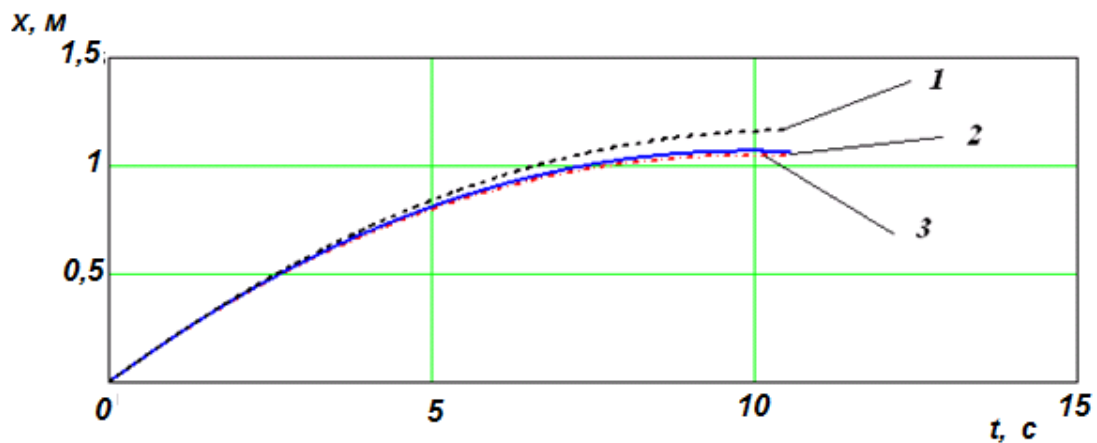


Рис. 4.18. Залежності переміщення зернівки по шорсткій поверхні

(1 – без врахування опору середовища, 2 – опір за законом Стокса, 3 – опір за законом Ньютона)

За результатами чисельних обчислень за рівнянням (4.86) при різних початкових параметрах (початковій швидкості, коефіцієнті тертя), максимальне розходження переміщення зернівки в кінці скатної полички довжиною 1 м при різних законах розрахунку опору середовища і без його врахування становило – 7%.

Тому для спрощення подальших аналітичних розрахунків опір середовища враховувати не будемо, а при розрахунках довжину полички будемо збільшувати на 10%, для гарантованого сходження зернівки з неї.

Для того, щоб зернівка максимально довго знаходилася на поличці під впливом ІЧ-нагрівачів потрібно визначити кут нахилу полички при якому швидкість переміщення зернівки по ній зменшується в процесі руху і в кінці полички дорівнює нулю. Визначимо спочатку початкову швидкість руху зернівки по поличці.

Зернівка падає з лопатки і з нульовою стартовою швидкістю ($u_0=0$), починає вільне падіння. Час падіння до полички знаходимо із залежності:

$$t_{\Pi} = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} \quad (4.87)$$

де h – висота вільного падіння (до полицки); g – прискорення вільного падіння, м/с².

Швидкість в кінці падіння визначаємо із залежності:

$$\dot{x} = v(t) = v_0 + g \cdot t_f \quad (4.88)$$

Підставимо (4.87) в (4.88) отримаємо кінцеву швидкість падіння зернівки:

$$v_{\text{кп}} = g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4.89)$$

Враховуючи, що поличка нахилена під кутом α до горизонту то початкова швидкість руху зернівки по полиці буде визначатися із залежності:

$$v_0 = v_{\text{кп}} \cdot \sin \alpha = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot \sin \alpha \quad (4.90)$$

Розглянемо рух без врахування сили опору середовища (повітря), тоді рівняння (4.86) перепишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= mg \cdot \sin \alpha - f \cdot mg \cdot \cos \alpha, \\ \ddot{x} &= g \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha) \end{aligned} \quad (4.91)$$

де f – коефіцієнт тертя, $f = \operatorname{tg} \rho$, ρ – кут тертя.

Рівняння (4.91) перепишемо у вигляді:

$$\ddot{x} = \frac{g \cdot \sin(\alpha - \rho)}{\cos \rho} \quad (4.92)$$

В кінці полицки швидкість повинна наближатися до нуля, $v_{\Pi} = 0$, тоді з рівнянь (4.88), (4.90), (4.92) знайдемо час руху до зупинки:

$$t = -\frac{v_0}{\ddot{x}} = -\frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha}}{\frac{g \cdot \sin(\alpha - \rho)}{\cos \rho}} = -\frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \sin \alpha \cdot \cos \rho}}{g \cdot \sin(\alpha - \rho)} \quad (4.93)$$

Проінтегруємо рівняння (4.88) і підставимо в нього (4.93), (4.92), (4.90) отримаємо шлях, що пройде зернівка до зупинки:

$$x_3 = -\frac{h \cdot \cos \rho \cdot \sin^2 \alpha}{\sin(\alpha - \rho)} \quad (4.94)$$

При заданих h , ρ , x_3 (ширина полички) знаходимо α з рівняння (4.94), потім з рівняння (4.93) визначаємо час переміщення по поличці, рис. 4.19, рис. 4.20.

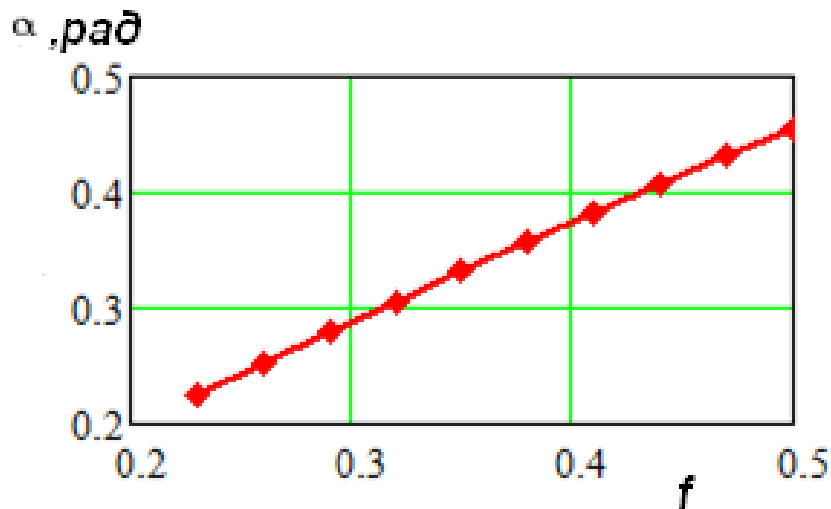


Рис. 4.19. Залежність кута нахилу полички шириною $x=1$ м, від коефіцієнта тертя

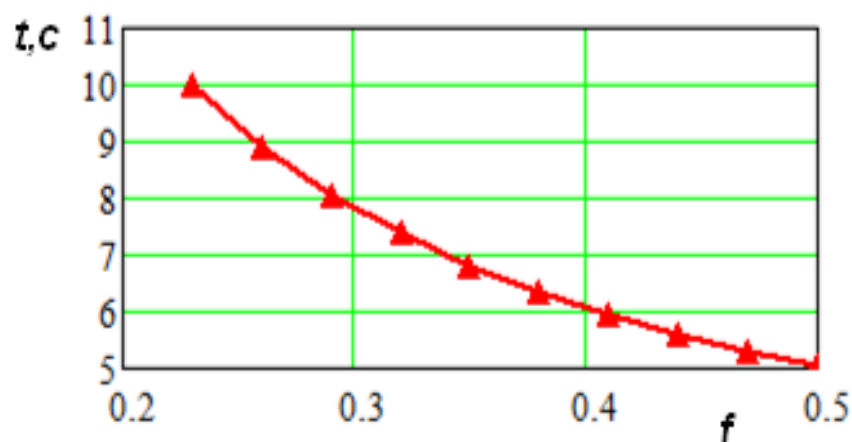


Рис. 4.20. Залежність часу перебування зернівки на поличці шириною $x=1$ м, від коефіцієнта тертя і відповідно визначеному α

Коефіцієнт тертя в сушарці змінюється від максимального значення при найвологішому зерні на вході в сушарку до мінімального при сухому зерні на виході із сушарки [8]. Відповідно, кут α буде мінятися від максимального значення до мінімального, рис. 4.21,а. Якщо кут α буде змінюватися лінійно, то для проектування скатної полицки можна використати відсік мінімальної лінійчатої поверхні гвинтового коноїда (або прямого закритого гелікоїда) [9], рис. 4.21,б. Щоправда, в такому випадку траєкторія руху частинки може не збігатися із прямолінійною твірною, але це характерно для великого перепаду кутів α . У нашому випадку такий перепад є незначним, тому вважатимемо, що частинка рухатиметься вниз вздовж прямолінійної твірної поверхні.

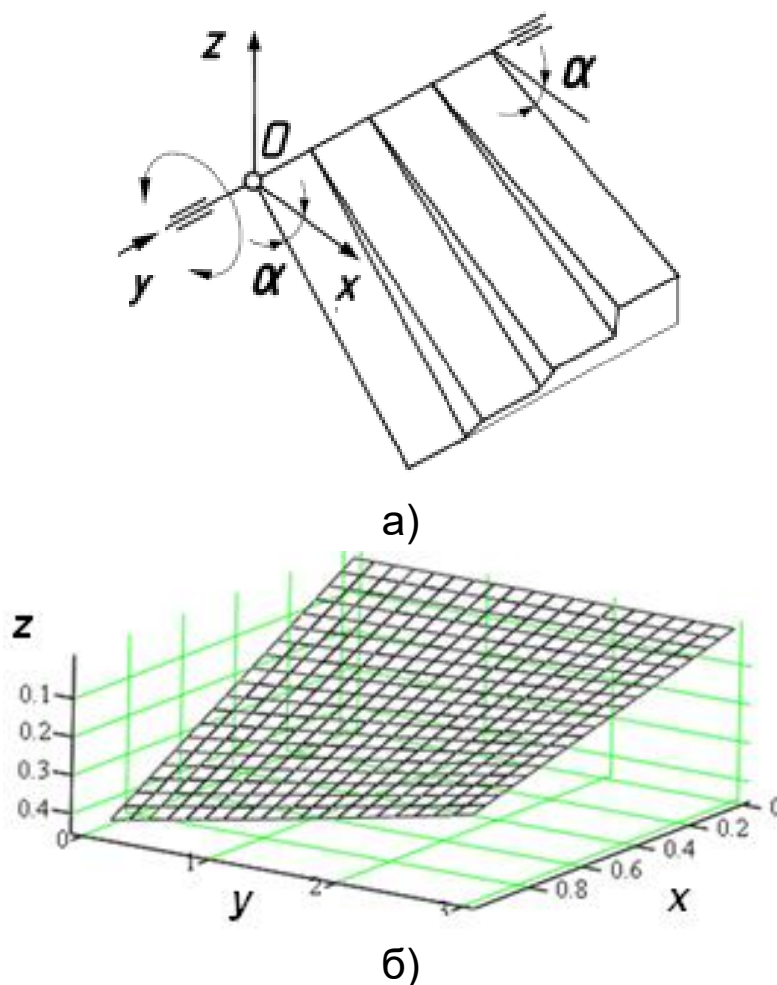


Рис. 4.21. Мінімальна лінійчата поверхня скатної полицки

На рис. 4.21,б побудовано відсік поверхні гвинтового коноїда (або прямого закритого гелікоїда)[9], параметричні рівняння якого мають вигляд:

$$\begin{aligned} X(u, v) &= u \cdot \cos v; \\ Y(u, v) &= \frac{L}{\alpha_k - \alpha_0} (v + \alpha_0); \\ Z(u, v) &= u \cdot \sin v, \end{aligned} \quad (4.95)$$

де, α_0 – кут нахилу полички, визначений із (4.94) за кута тертя для найвологішого зерна на вході в сушарку; α_k – кут нахилу полички для сухого зерна на виході із сушарки; L – довжина полички, м; $u \in [0; \dots; L]$; $v \in [\alpha_0; \dots; \alpha_k]$.

Вирази коефіцієнтів першої квадратичної форми [9] поверхні (4.95) скатної полички дорівнюють:

$$E = 1; F = 0; G = u^2 + \left(\frac{L}{\alpha_k - \alpha_0} \right)^2. \quad (4.96)$$

Вирази коефіцієнтів другої квадратичної форми [9] поверхні (4.95) скатної полички дорівнюють:

$$L = 0; M = \frac{L}{\sqrt{1 + u^2 \cdot (\alpha_k - \alpha_0)^2}}; N = 0. \quad (4.97)$$

Коефіцієнти першої та другої квадратичних форм побудованої поверхні (4.96) перетворюють вираз її середньої кривини [9] $H = \frac{E \cdot N - 2 \cdot F \cdot M + G \cdot L}{2(E \cdot G - F^2)}$ до нуля, тому поверхня скатної полички є мінімальною.

При термічному сушінні для зменшення енерговитрат потрібно забезпечити максимальний час перебування зернівки на поличці, час перебування відповідно до залежності (4.95) залежить від змінних параметрів – кута нахилу полички і висоти падіння зернівки.

Чисельно визначимо при яких змінних параметрах α і h залежність (4.95) прийматиме максимальне значення. Для

спрощення розрахунків проведемо такі алгебраїчні перетворення.

Домножимо чисельник і знаменник рівняння (4.95) на $h \cdot \sin \alpha$, отримаємо:

$$t = -\frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h} \sin \alpha \cdot \cos \rho}{g \cdot \sin(\alpha - \rho)} \cdot \frac{h \cdot \sin \alpha}{h \cdot \sin \alpha} = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{g \cdot h \cdot \sin \alpha} \cdot \left[-\frac{h \cdot \cos \rho \cdot \sin^2 \alpha}{\sin(\alpha - \rho)} \right] \quad (4.98)$$

В рівнянні (4.96) вираз в дужках відповідає переміщенню до зупинки за формулою (4.94), тобто:

$$t_3 = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{g \cdot h \cdot \sin \alpha} \cdot s_3 \quad (4.99)$$

де, s – шлях зернівки рівний ширині скатної полицки.

Результати чисельних досліджень руху зернівки по скатній полицці за залежностями (4.92), (4.96) в математичному середовищі Mathcad представлені на екранному фрагменті на рис. 4.22.

формула для визначення часу руху по полицці - $t(\alpha, h) := \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{g \cdot h \cdot \sin(\alpha)} \cdot s$

початкові значення відліку - $\alpha := 0.3$ $h := 0.08$

Given

$0.7 \cdot \rho \leq \alpha \leq 1.2 \rho$ -діапазон значень кута нахилу полицки

$0.05 \leq h \leq 0.1$ -діапазон значень висоти з якої падає зерно на полицку

$s = \frac{-h \cdot \cos(\rho) \cdot (\sin(\alpha))^2}{\sin(\alpha - \rho)}$ -умова досягнення зернівкою краю полицки

$P := \text{Maximize}(t, \alpha, h) = \begin{pmatrix} 0.279 \\ 0.05 \end{pmatrix}$ значення кута і висоти при яких час руху по полицці буде максимальним

$$P = \begin{pmatrix} 0.279 \\ 0.05 \end{pmatrix}$$

$T := t(P_0, P_1) = 8.068$ час руху зернівки по полицці

Рис. 4.22. Екранний фрагмент чисельного дослідження на екстремум у математичному середовищі Mathcad.

За результатами проведених чисельних експериментів в максимально можливому діапазоні змінних параметрів

визначили, що найдовше перебування зернівки на полиці забезпечується при падінні з найменшої висоти (незалежно від коефіцієнту тертя) і куту α , що визначений з (4.92).

Розроблений математичний апарат дозволяє визначати параметри скатної полицки в залежності від параметрів зернового матеріалу і розмірів барабану, для забезпечення мінімальної швидкості руху зернового матеріалу по ній.

Оптимізаційне дослідження числовими методами отриманих аналітичних залежностей дозволяє обґрунтовувати параметри скатної полицки в сушильному барабані для конкретних умов проведення процесу.

4.5. Аналітичне дослідження температурного поля зернівки при імпульсно-періодичному підведенні енергії інфрачервоним випромінюванням

Збільшення виробництва зерна, зменшення його втрат та забезпечення високої якості на всіх етапах післязбиральної обробки, подальшого зберігання й переробки є ключовими чинниками розвитку агропромислового комплексу держави. Найпоширенішим способом довготривалого зберігання зерна є його утримання у сухому стані за помірної температури. У зв'язку з цим найбільш енергоємними операціями післязбиральної обробки залишаються сушіння та охолодження зернової маси. Підвищення ефективності доведення зерна до кондиційного стану за вологістю та температурою досягається шляхом інтенсифікації тепломасообмінних процесів, зменшення питомих енергетичних витрат, а також збереження й покращення якісних показників продукції.

Сушіння зерна інфрачервоним випромінюванням (ІЧ-випромінюванням) має суттєві переваги порівняно з традиційним конвективним методом, який найбільш широко застосовується в агропромисловому комплексі. Насамперед

це економічний ефект: за даними досліджень, для зменшення вологості зерна з 21 % до 14 % потрібно приблизно на 40 % менше часу, ніж при традиційному сушінні. Зерно, висушене інфрачервоним випромінюванням, менш чутливе до умов зберігання та характеризується підвищеною стійкістю до розвитку мікрофлори.

Окрім цього, використання ІЧ-випромінювання під час кондиціювання зерна забезпечує підвищений вихід борошна та покращує його хлібопекарські властивості. Можливість формування високих концентрацій теплової енергії у поверхневих шарах продукту дозволяє здійснювати дезінсекцію зерна без застосування токсичних хімічних препаратів та шкідливих електромагнітних впливів, а також проводити мікронізацію з метою підвищення кормової цінності продукту.

Установки для термообробки зерна інфрачервоним випромінюванням також застосовують для попереднього нагрівання зерна перед конвективним сушінням, що сприяє скороченню тривалості основного процесу, а також для передпосівної стимуляції насіння з метою підвищення його енергії проростання та схожості.

Разом із тим інфрачервона термообробка зерна у виробничій практиці використовується недостатньо. Основною причиною є недосконалість апаратного оформлення процесу, відсутність обґрунтованих режимних параметрів та недостатня розробленість аналітичних моделей, які б адекватно описували формування температурного поля зернівки при імпульсно-періодичному підведенні енергії.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває аналітичне дослідження нестационарного температурного поля окремої зернівки за умов імпульсного інфрачервоного нагрівання. Такий підхід дозволяє:

- визначити раціональні параметри інтенсивності та тривалості імпульсів;

- оцінити глибину проникнення теплової хвилі;
- встановити градієнти температур у поверхневих і внутрішніх шарах зерна;
- мінімізувати ризик перегрівання оболонки та збереження біологічної цінності ядра;
- забезпечити енергоефективність процесу.

Імпульсно-періодичний режим підведення енергії створює умови для вирівнювання температурного поля за рахунок чергування фаз нагрівання та релаксації, що сприяє інтенсифікації внутрішнього тепломасообміну та зниженню термічних напружень у структурі зернівки. Розроблення математичної моделі такого процесу є необхідною передумовою для створення енергоощадного обладнання нового покоління для післязбиральної обробки зерна.

Питанням теоретичних досліджень і практичного застосування інфрачервоного випромінювання для сушіння та термообробки зернових матеріалів присвячено значну кількість наукових праць, аналіз яких підтверджує високу технологічну ефективність процесів обробки зерна інфрачервоним випромінюванням. Узагальнення результатів цих досліджень свідчить про перспективність використання ІЧ-енергії як інструмента інтенсифікації тепломасообміну в зерновому середовищі, особливо за умов необхідності скорочення тривалості обробки та зменшення втрат якості продукції.

У процесах сушіння питомі енергетичні витрати є найменшими саме при радіаційному способі підведення енергії. Це пояснюється безпосереднім перетворенням електромагнітної енергії у теплову в поверхневих шарах зернівки без проміжного теплоносія, що мінімізує втрати на нагрівання повітря чи конструктивних елементів установки. Однак у високінтенсивних процесах, зокрема під час мікронізації, енергетичні показники суттєво зростають і можуть досягати 140-145 кВт·год на тонну продукту. Такий рівень

витрат зумовлений необхідністю швидкого нагрівання зерна до температур, що забезпечують структурні перетворення крохмалю та білкових компонентів.

Одним із основних резервів зниження питомих енергетичних витрат, поряд з удосконаленням конструктивних елементів обладнання, є зменшення відстані між випромінювачем та поверхнею зернового шару. Відомо, що щільність променевого потоку, який сприймається матеріалом, обернено пропорційна квадрату відстані між джерелом випромінювання та об'єктом нагрівання. Тому наближення випромінювача до шару зерна призводить до суттєвого зростання густини теплового потоку, що падає на поверхню зернівки, і відповідно - до інтенсифікації процесу нагрівання.

Разом із тим збільшення теплового потоку, який сприймається поверхнею зерна, може спричиняти локальне перегрівання або підгоряння матеріалу. Це пов'язано з високою термочутливістю зерна як біологічного об'єкта, а також із його вологоінерційністю - здатністю внутрішньої вологи із запізненням реагувати на зміну температурних умов. У результаті виникають значні температурні градієнти між поверхневими та внутрішніми шарами зернівки, що може призводити до термічних напружень, руйнування клітинної структури та погіршення посівних або технологічних властивостей.

Характеристикою вологоінерційності є число Ликова, яке відображає співвідношення інтенсивності теплопровідності та масопереносу в капілярно-пористих матеріалах. Це безрозмірний критерій подібності, що дозволяє оцінити взаємозв'язок між температурним і вологісним полями у процесі сушіння. За умов імпульсно-періодичного підведення енергії аналіз числа Ликова набуває особливого значення, оскільки чергування фаз нагрівання та релаксації суттєво впливає на характер перерозподілу вологи всередині зернівки.

Таким чином, для запобігання перегріванню та забезпечення енергоефективності процесу необхідне аналітичне моделювання нестационарного температурного поля зернівки з урахуванням її теплофізичних властивостей, геометрії, спектральних характеристик ІЧ-випромінювання та режиму імпульсного навантаження. Такий підхід дозволяє визначити раціональні значення густини теплового потоку, тривалості імпульсу та паузи між імпульсами, що забезпечують інтенсивне, але контрольоване сушіння без погіршення якості зерна.

$$Lu = \frac{a_m}{a} \approx \frac{1 \cdot 10^{-11}}{1 \cdot 10^{-8}} = 0,3 \cdot 10^{-3} \quad (4.100)$$

де a_m - коефіцієнт дифузії вологи в матеріалі;
 a - коефіцієнт температуропровідності (термічної дифузії).

Мале значення числа Ликова свідчить про те, що зерно відносно швидко нагрівається до критичної температури, проте процес відведення вологи з його внутрішніх шарів відбувається повільно. Це означає, що інтенсифікація сушіння обмежується, з одного боку, небезпекою перегрівання поверхневих шарів зернівки, а з іншого - швидкістю внутрішнього вологопереносу. За таких умов виникає суттєва невідповідність між темпами підвищення температури та швидкістю міграції вологи до поверхні випаровування, що може призводити до локального пересушування оболонки, утворення тріщин і зниження технологічної та біологічної якості зерна.

Для запобігання перегріванню матеріалу та одночасного зменшення питомих енергетичних витрат застосовують імпульсну обробку зернової маси інфрачервоним випромінюванням із періодичною відлежкою. Суть такого

режиму полягає в чергуванні періодів нагрівання τ (нагр) із періодами відлежки t (відл).

У фазі нагрівання відбувається інтенсивне підведення енергії до поверхневих шарів зернівки, формування температурного градієнта та активізація процесів випаровування вологи. У фазі відлежки зовнішнє енергетичне навантаження відсутнє, і система переходить у режим внутрішнього перерозподілу тепла та вологи: температура вирівнюється по об'єму зернівки, а волога мігрує з внутрішніх шарів до поверхні. Саме в цей період реалізується потенціал внутрішнього масопереносу без ризику додаткового перегрівання оболонки.

Такий режим термообробки дозволяє цілеспрямовано керувати розвитком температурного поля в зернівці, впливати на кінетику тепломасообміну та здійснювати контрольовану зміну структурних, фізико-хімічних і біохімічних показників оброблюваного зерна. Зокрема, можлива регуляція ступеня денатурації білків, модифікації крохмалю, зниження активності ферментів та пригнічення мікрофлори без критичного погіршення посівних або продовольчих властивостей.

З позицій енергоефективності тривалість нагрівання повинна бути мінімально достатньою для формування необхідного температурного потенціалу, тоді як тривалість відлежки має оптимальне значення. За надто малого періоду відлежки вирівнювання температури в об'ємі зернівки буде недостатнім, що спричиняє накопичення температурних градієнтів і підвищує ризик локального перегрівання. Натомість за надмірно великої тривалості відлежки зростає загальна тривалість процесу, що знижує його продуктивність та економічну доцільність.

Отже, визначення раціонального співвідношення між τ (нагр) та t (відл) є ключовим завданням при розробленні імпульсних режимів ІЧ-обробки зерна. Його розв'язання потребує аналітичного опису нестационарних температурних

полів із урахуванням теплофізичних параметрів зернівки, граничних умов тепловіддачі та критеріїв подібності, зокрема числа Ликова.

Розглянемо терморадіаційну установку для обробки зерна, в якій нагрівання та видалення вологи здійснюється за рахунок теплоти, що безконтактно передається випромінюванням від світлих інфрачервоних нагрівачів (температура тіла розжарювання до 1800–2000 °С) до поверхні матеріалу.

ІЧ-нагрівачі встановлюють над вібротранспортером, на якому розміщується шар зерна товщиною 2–3 зернівки, паралельно до зовнішньої поверхні нагрівальних елементів. Для формування спрямованого потоку променевої енергії від ІЧ-нагрівачів до шару зерна над нагрівальними елементами розміщують відбивний екран, який концентрує та перерозподіляє випромінювання в робочу зону.

Вібраційне транспортування зерна вздовж ІЧ-нагрівачів супроводжується інтенсивним перемішуванням і взаємним контактом зернівок. Унаслідок цього відбувається вирівнювання температури в об'ємі шару, зменшення локальних зон перегрівання та формування більш однорідного температурного поля (рис. 4.23).

З фізичної точки зору процес нагрівання в такій установці характеризується поєднанням кількох механізмів теплопереносу:

- променевого теплообміну між нагрівачем і поверхнею зерна;
- теплопровідності всередині окремої зернівки;
- контактного теплообміну між зернами;
- конвективного теплообміну з навколишнім повітрям;
- внутрішнього масопереносу вологи.

Основна частина енергії поглинається поверхневими шарами зернівки, після чого теплота поширюється вглиб за рахунок теплопровідності. За умов імпульсного режиму роботи

ІЧ-нагрівачів формування температурного поля має нестационарний характер і визначається співвідношенням тривалості нагрівання, паузи, інтенсивності теплового потоку та швидкості руху зерна по вібротранспортеру.

Товщина шару 2 - 3 зернівки є конструктивно обґрунтованою:

- з одного боку, вона забезпечує достатню пропускну здатність установки;
- з іншого - гарантує проникнення променевої енергії до більшості частинок шару та мінімізує екранування нижніх зернівок верхніми.

Вібраційний режим транспортування виконує подвійну функцію: забезпечує рівномірне переміщення матеріалу через зону опромінення та інтенсифікує тепломасообмін за рахунок руйнування локальних температурних і вологісних градієнтів у шарі. Таким чином, у системі формується керований динамічний тепловий режим, який поєднує високу інтенсивність нагрівання з можливістю часткового самовирівнювання температури.

Для подальшого аналітичного опису доцільно розглядати окрему зернівку як теплофізичний об'єкт із заданими початковими умовами (початкова температура та вологість) і граничною умовою у вигляді змінного в часі щільнісного теплового потоку від ІЧ-випромінювання. Це дозволить перейти до математичної моделі формування температурного поля в умовах імпульсно-періодичного підведення енергії.

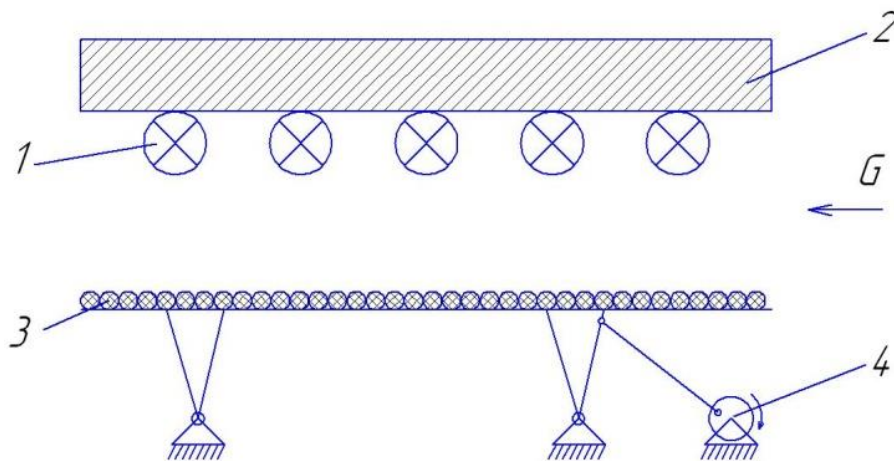


Рис. 4.23. Схема терморадіаційної установки: 1 – випромінювач; 2 – відбивний екран; 3 – зерно (шар зернового матеріалу); 4 – віброзбуджувач.

Подана схема відображає принципову компоновку установки для імпульсної інфрачервоної термообробки зерна. Випромінювач (1) є джерелом інтенсивного інфрачервоного потоку, який спрямовується на поверхню зернового шару. Відбивний екран (2) виконує функцію концентрації та перерозподілу променевої енергії, зменшуючи втрати випромінювання в навколишній простір і підвищуючи коефіцієнт використання енергії.

Зерно (3) розміщується тонким шаром на робочій поверхні вібротранспортера. Така організація шару забезпечує мінімальне взаємне екранування зернівок і рівномірність опромінення. Віброзбуджувач (4) створює коливання робочої поверхні, що забезпечують переміщення зерна вздовж зони опромінення та його інтенсивне перемішування.

Завдяки поєднанню спрямованого променевого нагрівання та вібраційного перемішування досягається:

- рівномірність розподілу температури в шарі;
- інтенсифікація внутрішнього тепломасообміну;
- зменшення локальних зон перегрівання;
- підвищення стабільності технологічного режиму.

Конструктивна простота такої установки поєднується з можливістю гнучкого регулювання режимних параметрів:

інтенсивності випромінювання, відстані між випромінювачем і шаром зерна, частоти та амплітуди коливань вібротранспортера, а також співвідношення тривалості імпульсу нагрівання та паузи відлежки.

У нашому дослідженні розглянемо динаміку зміни температурного поля окремої зернівки як елементарного об'єкта тепло- та масопереносу. Такий підхід дозволяє абстрагуватися від макроскопічних особливостей шару й зосередитися на внутрішніх процесах формування температурних градієнтів у частинці.

Тепловий потік, що падає на поверхню зернівки (вважатимемо, що на всю поверхню, оскільки зерно швидко обертається у віброкиплячому шарі), у період ІЧ-нагрівання можна визначити за відповідною залежністю. При цьому припускається, що:

- обертання зернівки забезпечує квазіоднорідне опромінення її поверхні;
- коефіцієнт поглинання випромінювання є сталим у межах робочого спектра;
- екранування з боку сусідніх зерен є мінімальним завдяки перемішуванню;
- вплив конвективної складової теплообміну є другорядним порівняно з променевим.

За цих умов щільність теплового потоку $q(t)$, що сприймається поверхнею зернівки в період нагрівання, можна подати як функцію часу, яка враховує інтенсивність випромінювання джерела, геометричні параметри розміщення нагрівача та коефіцієнт поглинання поверхні зерна. В імпульсному режимі ця функція має періодичний характер:

- у фазі нагрівання $q(t)=q_0$;
- у фазі відлежки $q(t)=0$.

Таким чином, підведення енергії до зернівки описується як періодична прямокутна функція часу.

Фізично це означає, що в кожному циклі відбувається імпульсне накопичення теплової енергії в поверхневих шарах, після чого настає етап її перерозподілу в об'ємі зернівки за рахунок теплопровідності.

Для подальшого аналітичного опису температурного поля доцільно розглядати зернівку як тіло сферичної або еліпсоїдної форми з радіальною симетрією температурного поля. У такому випадку розподіл температури $T(r,t)$ визначатиметься рівнянням нестационарної теплопровідності з граничною умовою другого роду (за заданим тепловим потоком) на поверхні частинки.

Такий підхід дозволяє:

- оцінити максимальну температуру поверхні зернівки;
- визначити швидкість прогрівання центральної зони;
- встановити критичну тривалість імпульсу, за якої не відбувається перегрів;
- оптимізувати співвідношення між інтенсивністю випромінювання та тривалістю паузи.

$$Q = \frac{P \cdot \eta \cdot A}{F} \quad (4.101)$$

Де P - потужність випромінювача, кВт; η - коефіцієнт корисної дії випромінювача; A - коефіцієнт поглинальної здатності зерна; F - площа поверхні, що опромінюється, м².

З урахуванням зазначених параметрів щільність теплового потоку, що сприймається поверхнею зернівки в період нагрівання, визначається співвідношенням між ефективною випромінюваною потужністю та площею опромінення з урахуванням поглинальної здатності матеріалу. Таким чином, реальний тепловий потік, який бере участь у формуванні температурного поля, є добутком потужності джерела, його ККД та коефіцієнта поглинання зернівки, віднесеним до площі опромінюваної поверхні.

Для спрощення математичного опису приймемо форму зернівки у вигляді кулі. Незважаючи на те, що реальна геометрія зерна (пшениці, ячменю тощо) є складнішою та

ближчою до еліпсоїдної, сферична модель є достатньо коректною для аналітичних розрахунків і дозволяє отримати узагальнені закономірності формування температурного поля.

Еквівалентний радіус зернівки визначимо як радіус кулі, об'єм якої дорівнює об'єму середньої (за масою) частинки. Тоді еквівалентний радіус визначається з умови рівності об'ємів:

$$R_e = \frac{1}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V}{\pi}} \quad (4.102)$$

Такий підхід дозволяє перейти до радіально-симетричної постановки задачі теплопровідності, де температура є функцією радіальної координати r та часу t .

Сферична модель істотно спрощує подальший аналітичний розв'язок, оскільки дає можливість застосувати класичне рівняння нестационарної теплопровідності в сферичних координатах із граничною умовою у вигляді змінного в часі теплового потоку на поверхні $r=R_{\text{екв}}$.

У подальшому це дозволить:

- визначити максимальну температуру поверхні зернівки;
- проаналізувати швидкість прогрівання центральної зони ($r=0$);
- оцінити величину температурних градієнтів;
- встановити допустиму тривалість імпульсу нагрівання без досягнення критичних температур.

При постійному тепловому потоці радіальний розподіл температури в зернівці в будь-який момент часу можна описати рівнянням теплопровідності в сферичних координатах. Для сферичної зернівки з радіусом $R_{\text{екв}}$ це рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right) \quad (4.103)$$

з граничними умовами:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial r} + \frac{Q}{\lambda} &= 0, \\ \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial r} &= 0, \\ t(0, \tau) \neq \infty, t(r, 0) &= t_0. \end{aligned} \quad (4.104)$$

Розв'язок цієї задачі для постійного теплового потоку наведено в [14].

$$t(r, \tau) = \frac{QR}{\lambda} \left[\frac{3 \cdot a \cdot \tau}{R^2} - \frac{3R^2 - 5r^2}{10R^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 \cos \mu_n} \cdot \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \times \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2} \right) \right] + t_0 \quad (4.105)$$

де a - коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$ ($\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ у фізичній інтерпретації через співвідношення $a = \lambda / (\rho c)$); λ - коефіцієнт теплопровідності зерна, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$; μ_n - корені характеристичного рівняння, які визначають власні значення для сферичної симетрії.

Для розрахунків за формулою (4.105) та отримання результатів, представлених на рис. 4.24, коефіцієнти теплопровідності та температуропровідності визначалися на основі емпіричних залежностей для пшениці, наведених у роботі [19], а також даних з роботи [15].

Ці залежності враховують:

- фізико-механічні властивості зерна (густина, вологість, вміст крохмалю та білків);
- вплив вологості на теплопровідність і теплоємність;
- температурну залежність теплопровідності та дифузії тепла.

Таким чином, використання емпірично визначених параметрів дозволяє отримати реалістичні розрахунки прогрівання зернівки та формування температурного поля при опроміненні ІЧ-нагрівачами.

На рис. 4.24 показано приклад розподілу температури в зернівці в часі та по радіусу, отриманий за наведеною аналітичною моделлю для постійного теплового потоку.

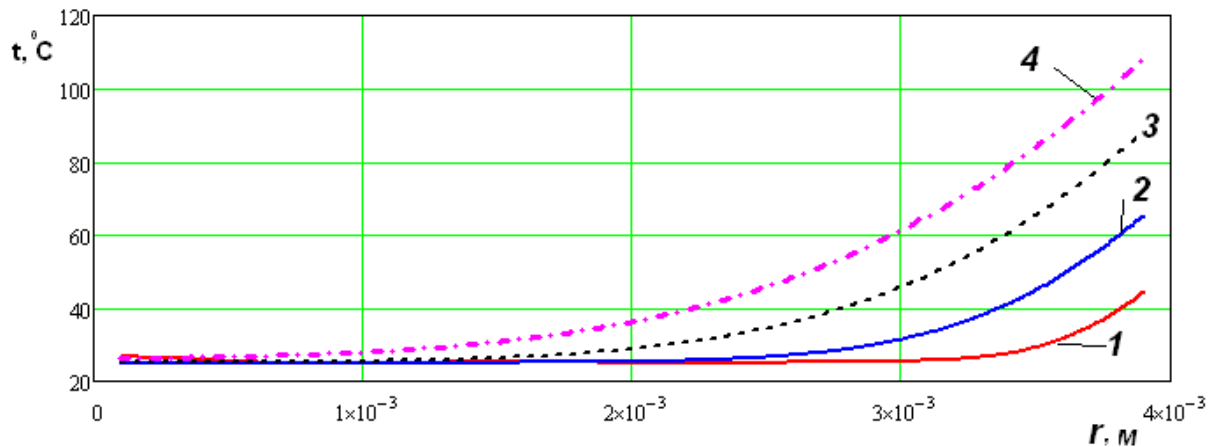


Рис. 4.24. Розподіл температури в зернівці залежно від часу дії ІЧ-випромінювання

$Q=32 \text{ кВт/м}^2$ - щільність теплового потоку; $\lambda=0,459 \text{ Вт/м К}$ - теплопровідність зерна; $a=9,451 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м К}$ - коефіцієнт температуропровідності;

Криві відповідають різній тривалості періоду нагрівання:

1 – $t_{\text{нагр}}=1 \text{ с}$; 2 – $t_{\text{нагр}}=3 \text{ с}$; 3 – $t_{\text{нагр}}=6 \text{ с}$; 4 – $t_{\text{нагр}}=9 \text{ с}$

Криві показують динаміку підвищення температури зернівки при безперервному опроміненні ІЧ-випромінюванням.

Зі збільшенням тривалості нагрівання поверхнева та внутрішня температура зернівки зростає більш інтенсивно.

Короткі імпульси нагрівання дозволяють уникнути перегрівання, а більш тривалі призводять до більшої різниці температур між поверхнею та центром зернівки.

Таким чином, аналіз кривих на рис. 2 дозволяє оцінити оптимальний час нагрівання для забезпечення енергоефективного прогрівання зернівки без термічного пошкодження.

Зміна середньої температури зернівки залежно від часу дії ІЧ-випромінювання визначалася за формулою [13]:

$$\bar{t}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \cdot t(r, \tau) dr \quad (4.106)$$

Криві зміни середньої температури зернівки представлені на рис. 4.25, розраховані за формулами (4.105 – 4.106).

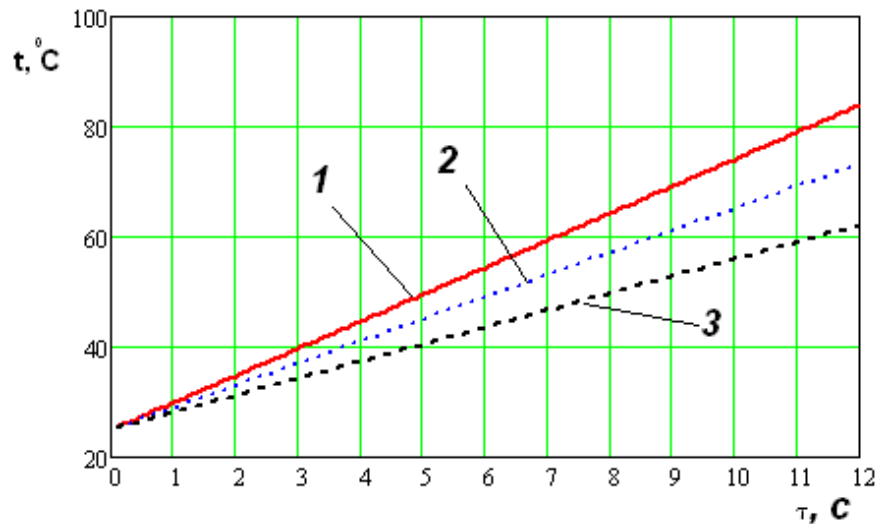


Рис. 4.25. Зміна середньої температури зернівки залежно від часу дії ІЧ-випромінювання та потужності теплового потоку Q
(1 - $Q=32 \text{ кВт/м}^2$, 2 - $Q=32 \text{ кВт/м}^2$, 3 - $Q=20 \text{ кВт/м}^2$).

На графіках, представлених на рис. 4.25, найвища температура нагрівання спостерігається в поверхневому шарі зернівки наприкінці періоду нагрівання, і вона у декілька разів перевищує температуру центру зернівки. Такий характер нагрівання зерна ІЧ-випромінюванням відзначений у роботі [1].

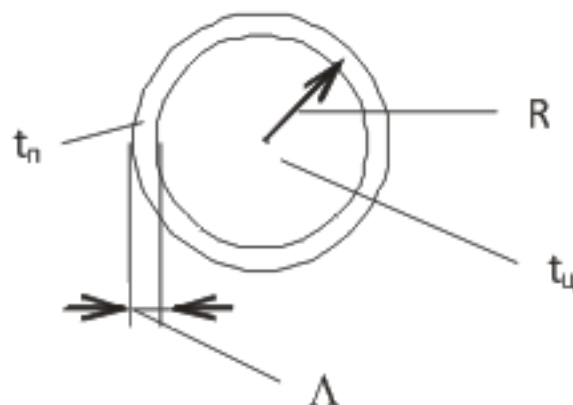


Рис. 4.26. Схема розподілу температури в зернівці наприкінці періоду нагрівання - на початку періоду відлежки

Отже, аналітично на початку періоду відлежки зерна (рис. 4.26.) розподіл температури можна записати у вигляді:

$$f(r) = t(r,0) = \begin{cases} t_{\text{ц}}, & \text{якщо } 0 \leq r \leq R-\Lambda, \\ t_{\text{п}}, & \text{якщо } R-\Lambda < r \leq R. \end{cases} \quad (4.107)$$

Зміна температурного поля зернівки на стадії відлежки та охолодження її поверхні навколишнім невідігрітим повітрям відбувається за граничними умовами III роду (конвективний теплообмін на поверхні).

Задача охолодження сферичної зернівки за законом конвекції при початковому розподілі температури $T(r,0)=f(r)$ і граничних умовах III роду має аналітичне рішення [14]:

$$t(r, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\frac{2\mu_n}{\mu_n - \sin(\mu_n) \cos(\mu_n)} \times \frac{\sin(\mu_n \frac{r}{R})}{r \cdot R} \int_0^R r \cdot f_1(r) \sin(\mu_n \frac{r}{R}) dr}{\times} \right) e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} + t_c \quad (4.108)$$

де $f_1(r)$ - певна функція, яка визначається з співвідношення:

$$f_1(r) = f(r) - t_c \quad (4.109)$$

Де t_c - температура навколишнього середовища (повітря), °C; Fo - критерій Фур'є, який характеризує зв'язок між швидкістю зміни температурного поля, фізичними властивостями матеріалу та розмірами тіла, визначається як:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2} \quad (4.110)$$

У формулі (4.108) μ визначається з характеристичного рівняння [13]:

$$tg(\mu) = -\frac{1}{Bi-1} \cdot \mu \quad (4.111)$$

де Bi - критерій Біо:

$$Bi = \alpha \frac{R}{\lambda} \quad (4.112)$$

де α - коефіцієнт теплообміну конвекцією, Вт/(м²·К), який характеризує інтенсивність теплового обміну між поверхнею зернівки та навколишнім повітрям.

Якщо розподіл температури в початковий момент часу прийняти за формулою (4.107), то, підставивши (4.107) та (4.109) у (4.108), отримуємо загальне рівняння для визначення зміни температурного поля зернівки на стадії відлежки у вигляді:

$$\begin{aligned} t(r, \tau) - t_c &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n}{\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} \cdot \frac{\sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot R} \\ &\cdot \left(\int_0^{R-\Lambda} r \cdot (t_{\text{ц}} - t_c) \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R} dr + \right. \\ &\left. + \int_{R-\Lambda}^R r \cdot (t_{\text{п}} - t_c) \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R} dr \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} \end{aligned} \quad (4.113)$$

Знайшовши визначені інтеграли у рівнянні (4.113), отримуємо спрощене та аналітичне представлення для температурного поля зернівки під час відлежки:

$$\begin{aligned} t(r, \tau) = & \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{R(t_{\text{ц}} - t_{\text{п}}) \sin \frac{(R-\Lambda)\mu_n}{R} + (t_{\text{п}} - t_{\text{ц}})(R-\Lambda)\mu_n \cos \frac{(R-\Lambda)\mu_n}{R} + R(t_{\text{п}} - t_c)(\sin \mu_n - \cos \mu_n)\mu_n}{\mu_n(\mu_n - \cos \mu_n \sin \mu_n)} \times \\ & e^{-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{R^2}} \sin \mu_n \frac{r}{R} + t_c \end{aligned} \quad (4.114)$$

Підставляючи формулу (4.108) у (4.107), отримуємо залежність для визначення середньої температури зернівки при початковому ступінчастому розподілі температури всередині зернівки:

$$\bar{t} = t_{\text{ц}} \cdot \left[\frac{R-\Lambda}{R} \right]^3 + t_{\text{п}} \cdot \left[1 - \left[\frac{R-\Lambda}{R} \right]^3 \right] \quad (4.115)$$

Розв'язавши рівняння (4.115) відносно Λ , отримаємо вираз для визначення безрозмірної температурної функції (температурного параметра), яка характеризує зміну середньої температури зернівки під час відлежки:

$$\Lambda = R - \frac{\sqrt[3]{R^3 \cdot (t_{\text{ц}} - t_{\text{п}})^2 \cdot (\bar{t} - t_{\text{п}})}}{t_{\text{ц}} - t_{\text{п}}} \quad (4.116)$$

Для визначення товщини поверхневої зони нагрівання зернівки Λ за період інфрачервоного нагрівання використовують наступний алгоритм:

1. Розрахунок температури поверхні та центру зернівки після нагрівання.
2. Обчислення середньої температури зернівки після стадії нагрівання
3. Визначення товщини поверхневої зони нагрівання Λ .
4. Розрахунок кінетики температурного поля зернівки на стадії відлежки.

Після визначення Λ використовують формулу (4.116) для опису динаміки температурного поля під час відлежки, тобто поступового вирівнювання температури від поверхні до центру зернівки.

Рис. 4.27 і Рис. 4.28 ілюструють радіальний розподіл температури зернівки після нагрівання та на різних стадіях відлежки та зміну середньої температури зернівки у часі під час періоду відлежки.

Таким чином, комбінація формул (4.107), (4.108) та (4.116) дозволяє повністю описати температуру зернівки від моменту нагрівання до кінця відлежки та визначити товщину поверхневої зони нагрівання для оптимізації процесу.

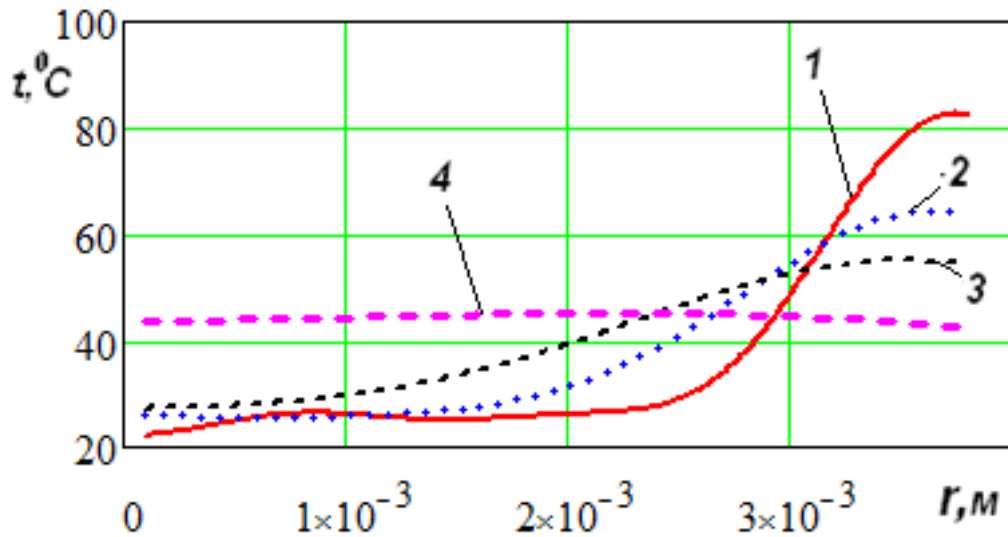


Рис. 4.27. Розподіл температури в зернівці залежно від часу відлежки

($\lambda=0,459$ Вт/м·К, $a=9,451 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $Bi=0.8$,
1 – $\tau_{отл}=1$ с, 2 – $\tau_{отл}=3$ с, 3 – $\tau_{отл}=6$ с, 4 – $\tau_{отл}=20$ с).

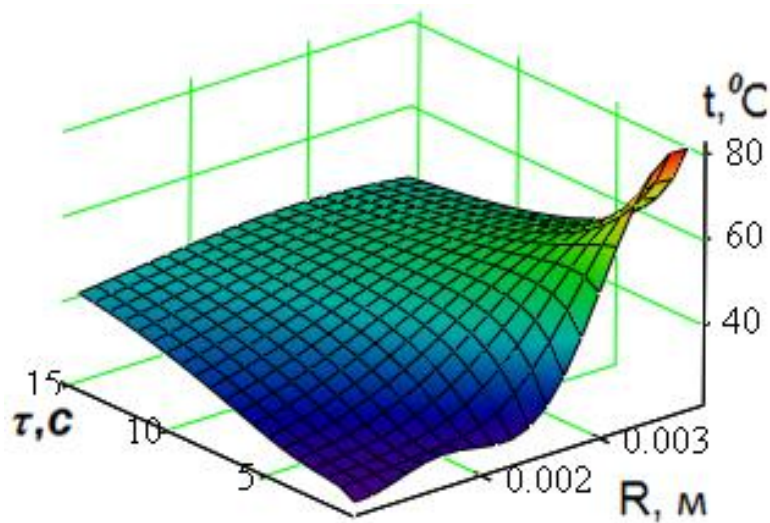


Рис. 4.28. Температурне поле зернівки на стадії відлежки

За залежностями (15) та (7) можна розрахувати кінетику зміни середньої температури зернівки на стадії відлежки рис. 4.29.

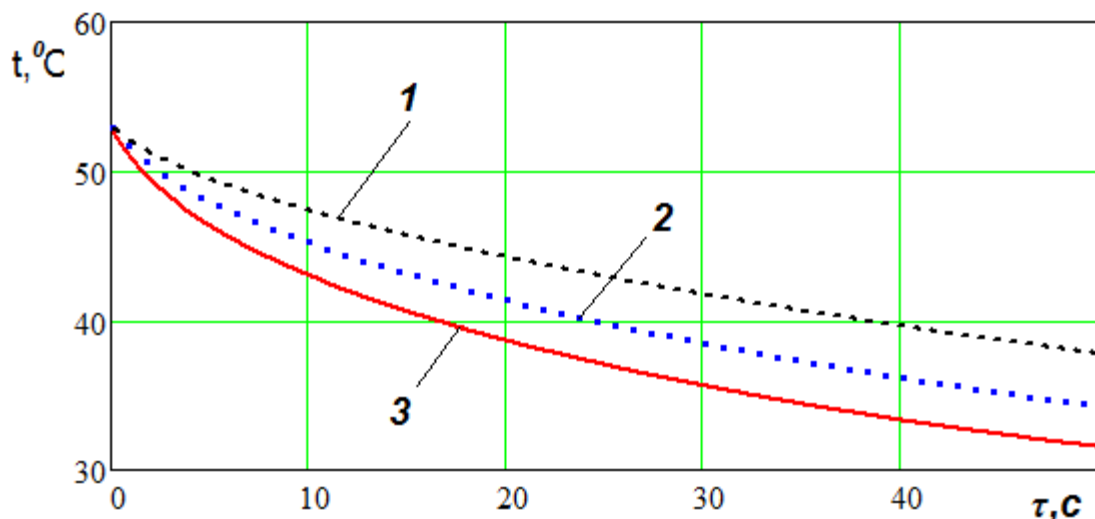


Рис. 4.29. Кінетика зміни середньої температури зернівки (1 - пасивна відлежка - $Bi=0.832$, 2 - відлежка в віброкиплячому шарі - $Bi=1.25$, 3 - відлежка з вентиляцією - $Bi=1.67$)

На Рис. 4.28 показана кінетика зміни середньої температури зернівки при поєднанні двох стадій термообробки:

1. Імпульсне ІЧ-нагрівання зернівки (граничні умови II роду) - розрахунок виконаний за формулами (4.106)–(4.107):

- На цій стадії поверхня зернівки нагрівається швидко, виникає радіальний градієнт температури: поверхня гаряча, центр ще холодний;

- Формули враховують радіальний розподіл температури та середню температуру після імпульсу нагрівання.

2. Відлежка зернівки (граничні умови III роду) - розрахунок виконаний за формулами (4.112, 4.115, 4.116) для різних режимів охолодження:

- Відлежка пасивна (малий Bi) - повільне охолодження, температура вирівнюється поступово;

- Відлежка у віброкиплячому шарі (середній Bi) - активне перемішування прискорює вирівнювання температури;

- Відлежка з вентиляванням (великий Bi) - інтенсивна конвекція, найшвидше охолодження до температури навколишнього середовища.

Рис. 4.29 демонструє повну динаміку середньої температури зернівки від моменту нагрівання до кінця відлежки, показує, як різні режими відлежки впливають на швидкість вирівнювання температури. Допомогає визначити оптимальні параметри періоду відлежки та уникнути перегріву зерна, забезпечуючи енергоефективність процесу.

На рис. 4.30 показана кінетика зміни температури поверхні зернівки під час двох стадій термообробки:

1. Імпульсне ІЧ-нагрівання зернівки (граничні умови II роду) - розрахунок за формулою (6):

- На цій стадії поверхня зернівки нагрівається швидко і значно;

- Графік показує, як температура поверхні досягає максимального значення в кінці періоду нагріву.

2. Відлежка зернівки (граничні умови III роду) - розрахунок за формулами (15, 17) для різних режимів охолодження:

- Пасивна відлежка (малий Bi) - поверхня охолоджується повільно, температура поступово знижується;

- Відлежка у віброкиплячому шарі (середній Bi) - більш інтенсивне перемішування зерна прискорює вирівнювання температури поверхні;

- Відлежка з вентиляванням (великий Bi) - активна конвекція забезпечує найшвидше охолодження поверхні до температури навколишнього середовища.

Максимальна температура поверхні зернівки досягається під час ІЧ-нагрівання. Швидкість охолодження поверхні під час відлежки безпосередньо залежить від числа Біо (Bi), тобто від інтенсивності конвекційного теплообміну та перемішування. Графік дозволяє оцінити ризик перегріву

поверхні зернівки і визначити оптимальний режим відлежки для збереження якості зерна.

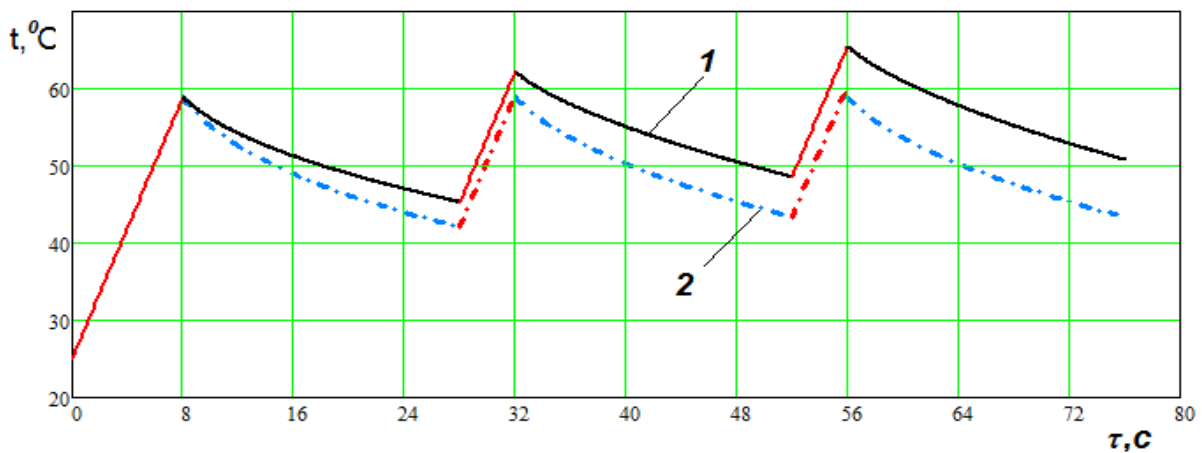


Рис. 4.30. Кінетика зміни середньої температури зернівки при осцилюючому режимі термообробки ($Q=26$ кВт/м², 1 - відлежка в віброкиплячому шарі - $Bi=1.25$, 2 - відлежка з вентиляцією - $Bi=1.67$)

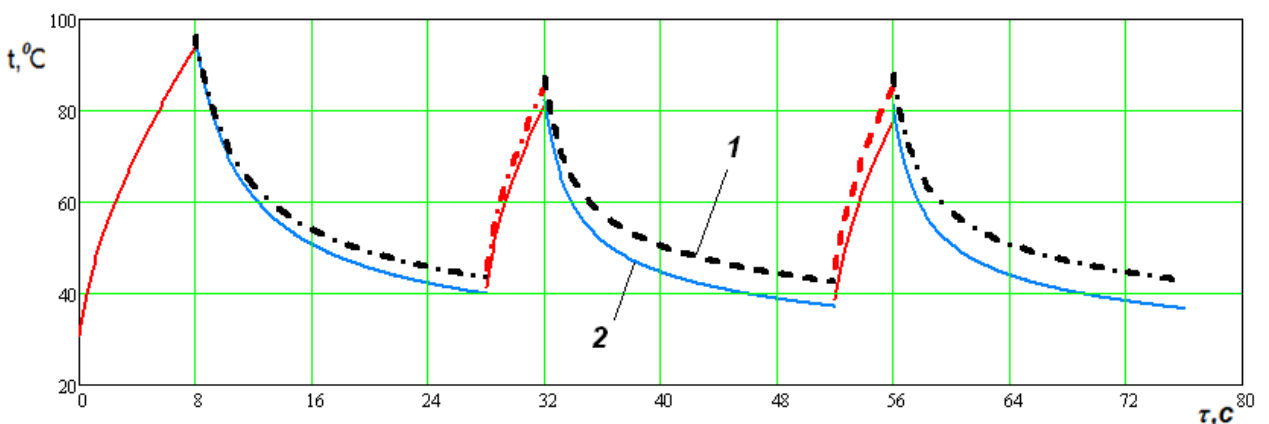


Рис. 4.31. Кінетика зміни температури поверхні зернівки при осцилюючому режимі термообробки ($Q=26$ кВт/м², 1 - відлежка в віброкиплячому шарі - $Bi=1.25$, 2 - відлежка з вентиляцією - $Bi=1.67$)

Осцилюючий нагрів та контроль Bi дозволяють ефективно керувати температурним полем поверхні зернівки;

Графік рис. 4.31 демонструє, як температура поверхні досягає максимуму під час імпульсу нагрівання і потім поступово знижується під час відлежки, причому швидкість

охолодження залежить від інтенсивності конвекції та перемішування.

Запропонована методика розрахунку зміни температури зерна при осцилюючому режимі обробки ІЧ-випромінюванням дозволяє прогнозувати розвиток температурного поля зернівки в залежності від технологічного регламенту роботи установки.

- Це означає, що можна визначати, як температура зерна змінюватиметься у часі при різних параметрах нагрівання та відлежки, що особливо важливо для контролю якості та безпеки процесу.

Отримані залежності дозволяють шляхом варіювання часу включення та вимикання ІЧ-випромінювачів змінювати:

- середню температуру зерна,
- температуру поверхні,
- швидкість нагріву та охолодження, щоб визначити оптимальні параметри енергоспоживання та забезпечити високу якість термообробки зерна.

Методика дає можливість індивідуально підбирати режими нагрівання та відлежки для різних типів зерна і різних товщин шару;

Це забезпечує енергоефективність процесу, мінімізує ризик перегріву та руйнування зерна і дозволяє покращити кінцеві показники якості продукту (смакові та технологічні властивості муки або кормового зерна).

4.6. Моделювання та розрахунок процесу радіаційно-конвективного сушіння насіння у лотковій вібраційній установці періодичної дії (з контуром циркуляції матеріалу)

Сушіння насіннєвого матеріалу є обов'язковою операцією післязбиральної доробки. Оскільки об'єми матеріалу які відрізняються сортовими ознаками, досить невеликі, то для їх висушування застосовують сушарки періодичної дії. При

зневодненні олійного насінневого матеріалу набувають зростаючого попиту процесу інфрачервоного сушіння. Процес сушіння насінневого матеріалу, який відрізняється високою термочутливістю, як правило досить повільний і супроводжується суттєвим споживанням енергії. Одним із напрямків підвищення енергетичної ефективності процесу є застосування віброзрідженого шару матеріалу при періодично імпульсному опроміненні. В роботі розглянути теоретичні посилення ІЧ-сушіння, запропоновано математичний опис, у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь і спрощені розрахункові залежності.

Сушіння насіння у сільськогосподарському виробництві пов'язане з вирішенням двох проблем: по-перше висока якість насіння забезпечує збільшення урожаю зернових культур, а по друге – сушіння є одним із найбільш енергоємних процесів в галузі виробництва зерна, і суттєво впливає на енергетичний баланс господарств. Тому вибір способу і технічних засобів для сушіння насінневого матеріалу треба враховувати при розгляді питання, щодо раціонального використання енергетичних ресурсів зернопродукуючих господарств.

В останні роки значно підвищився попит на використання інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) для термічної обробки насінневого матеріалу. Однак висока енергоємність процесу ІЧ-опромінювання, при зростаючих цінах на електроенергію висуває завдання визначення раціональних режимів сушіння насінневих матеріалів. Перспективним напрямком підвищення ефективності процесу і зниження енергозатрат є використання імпульсного режиму підведення енергії ІЧВ. Найбільш ефективно такий режим може бути реалізовано у вібросушарках лоткового і контейнерного типу за рахунок утворення віброзваженого та вихорного руху дисперсного середовища, таким чином, що усі частинки в процесі перемішування періодично опромінювались ІЧВ. При цьому сушильний агент не виконує задачі підведення енергії (тобто

теплоносія). Його функція поглинання і видалення вологи, що значно зменшує втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом. Для визначення раціональних режимів (кінематичних і тепловологісних) їх кількісної оцінки необхідно мати математичний опис процесу сушіння імпульсно-періодичним опроміненням і формули для розрахунку параметрів процесу.

Питання технологічної ефективності сушіння рослинної сировини та інших харчових продуктів ІЧ-випромінювання та методи розрахунку сушильних установок детально висвітлені в узагальнюючих роботах [1-3]. Показано, що інтенсивна дія ІЧВ на поверхневий шар оброблюємого матеріалу створює проблему його перегріву та нерівномірності температурного поля [5, 6]. Аналіз літературних джерел [5-9] дозволив зробити висновок, що одним з перспективних методів інтенсифікації процесу сушіння термочутливих матеріалів ІЧВ є використання імпульсного (осцилюючого) режиму опромінення. Це дозволяє не тільки уникнути перегріву але й наблизити джерела ІЧВ до рухомого шару матеріалу [10, 12]. Розрахунок процесу сушіння з використанням ІЧВ базується на розв'язанні диференціальних рівнянь нагріву і зневоднення матеріалу які враховують фазові перетворення і відповідну зміну маси матеріалу. При сушінні високовологого матеріалу ІЧВ – виникає потреба одночасного видалення вологи, що випаровується з поверхні матеріалу, що інтенсифікує зовнішній тепломасообмін. Тому при проектуванні сушарок необхідно знати зміну основних параметрів процесу: температури і вологовмісту як матеріалу так і фільтруємого крізь шар матеріалу газу (повітря). Для кількісної оцінки ефективності процесу необхідно мати повну математичну модель і розрахункові формули для ідентифікації параметрів моделі.

Для сушіння невеликих об'ємів насіннєвого матеріалу найбільш доцільно використовувати сушарки періодичної дії,

лоткового або контейнерного типу з вібраційним переміщенням і перемішуванням матеріалу.

При накладанні вібрацій на шар дисперсного зернового матеріалу в прямокутному або U-подібному жолобі, рух матеріалу набуває циркуляційних характер; віброзріджений матеріал циркулює і «віброзважає» шарі, частинки якого рухаються по замкненій траєкторії підіймаючись на поверхню шару і опускаючись донизу. На поверхні шару частинки опромінюються джерелом ІЧВ і акумулюючи променеву енергію, занурюються в глибину шару де її температура за рахунок випаровування вологи перерозподіляється вирівнюючи температурне поле. Таким чином в процесі циркуляції шару частинки опромінюються періодично, з періодом, що визначається кінематичними параметрами вібрацій. Для видалення вологи, яка з'являється на поверхні, циркулюючий шар обробляється потоком повітря, який нагріваючись від джерела ІЧВ фільтрується крізь віброзріджений шар в радіальному напрямку. Відпрацьоване повітря, насичене вологою видаляється через колектор розміщений в центрі циркуляційного шару зерна.

Розглянемо один із можливих варіантів реалізації процесу сушіння у віброзрідженому шарі лоткової сушарки (з U-образним контейнером) при осцилюючому режимі (Рис. 4.32). Оскільки при сушінні термочутливих параметрів досить важливим є встановлення залежності між температурою матеріалу і часом протікання процесу, то варіант періодичного режиму дозволяє найбільш просто і повно визначити та ідентифікувати параметри процесу і матеріалу.

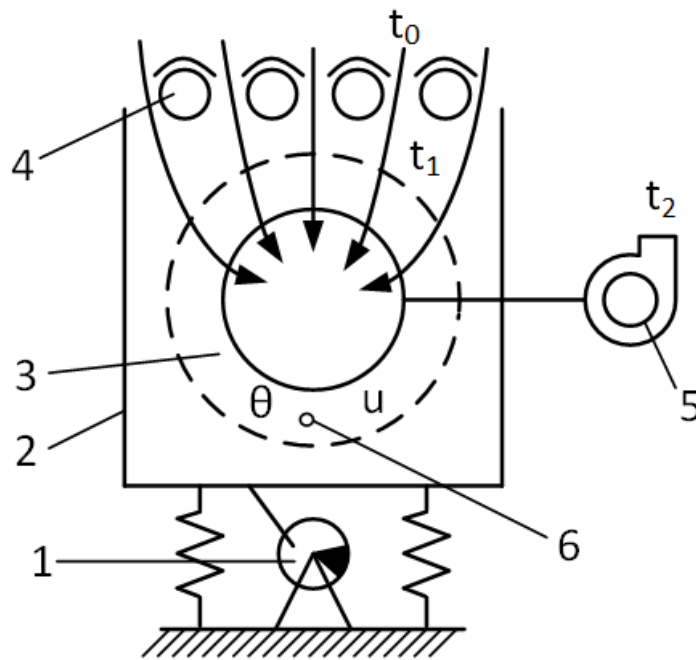


Рис. 4.32. Розрахункова схема вібросушарки: 1 – віброзбудник; 2 – корпус; 3 – колектор; 4 – ІЧВ; 5 – вентилятор; 6 – матеріал.

Таким чином розглядається періодичний процес радіаційно-конвективного сушіння з переривчастим (періодично-імпульсним) ІЧВ.

При складанні математичної моделі і аналізу процесу сушіння в апараті періодичної дії використовуємо наступні спрощуючі припущення:

- градієнт температури і вологовмісту в окремій частині відсутній;
- матеріал монодисперсний;
- перемішування частинок в віброзрідженому шарі ідеальне;
- теплофізичні властивості матеріалу і повітря в часі не змінюються;
- усі види теплообміну (конвективний, радіаційний, кондуктивний) враховуються відповідними коефіцієнтами теплообміну.

Математична модель процесу сушіння побудована на основі балансових співвідношень для періодичного режиму

при радіаційному і конвективному підведенні енергії і представлена у вигляді наступних диференціальних рівнянь.

Збереження енергії для інфрачервоного джерела випромінювання:

$$P(\tau) = m_v c_v \frac{\partial \theta_v}{\partial \tau} + \sigma \varepsilon'_{np} 10^{-8} (T_v^4 - T_z^4) F_v + \alpha'_v F_v (\theta_v - t_{oc}) + \alpha_k F'_v (\theta_v - t); \quad (4.117)$$

інтегральне рівняння теплообміну:

$$m_z c_z(u) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + m_0 r \frac{\partial u}{\partial \tau} + \sigma \varepsilon''_{np} 10^{-8} (T_z^4 - T_{oc}^4) = \sigma \varepsilon_{np} A_\lambda 10^{-8} (T_v^4 - T_z^4) + \alpha_{ef} F_k (\theta - \theta_k); \quad (4.118)$$

теплового балансу для повітря:

$$m_n c_n \frac{\partial t}{\partial \tau} + G_n c_p h \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_k f (\theta - t) + \alpha_k F_v (\theta_v - t); \quad (4.119)$$

кінетики сушіння:

$$-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} = k(\theta) (\bar{u} - u_p); \quad (4.120)$$

матеріального балансу для вологи в повітрі:

$$m_n \frac{\partial d}{\partial \tau} + G_n h \frac{\partial d}{\partial x} = -m_0 \frac{\partial u}{\partial \tau}; \quad (4.121)$$

теплового балансу для стінки корпусу:

$$m_k c_k \frac{\partial \theta_k}{\partial \tau} = \alpha_{ef} F_{kv} (\theta - \theta_k) - \alpha_k F_{ko} (\theta_k - t_{ac}); \quad (4.122)$$

Де

$$T_v = \theta_v + 273; T_z = \theta + 273; T_{oc} = t_{oc} + 273;$$

$$k(\theta) = a_m(\theta) \left(R^2 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{Bi_m} \right) \right)^{-1};$$

$$Bi_m = \frac{\alpha R}{a_m} = Nu_m \frac{D_n}{a_m} = 2 + 0.51 Re^{0.52} Pr_m^{0.33};$$

$$Re = \frac{vR}{\nu}; Pr_m = \frac{\nu}{a}; \alpha'_v = \alpha_v + \alpha_k;$$

де $P(\tau)$ – потужність випромінювача; $\theta_v, \theta, t, \theta_k, t_{oc}$ – температура випромінювача, зернового матеріалу, повітря в камері, стінки, корпусу, оточуючого середовища; u, d – вологовміст матеріалу і повітря; σ, ε_{np} – стала Стефана-Больцмана, приведена випромінювальна здатність; m_o, m_n, m_v – маса сухого матеріалу, повітря в камері, випромінювача;

c_z, c_p, c_v, c_k – питома теплоємність зерна, повітря, випромінювача, корпусу; F_v, F'_v, f_z, F_k – поверхня випромінювання, випромінювача, зерна, стінок корпусу; r – питома теплота пароутворення; G_n – масові витрати повітря; h – товщина рухомого шару матеріалу; $\alpha'_v, \alpha_k, \alpha_{ef}$ – коефіцієнт теплообміну випромінюванням, конвекцією, ефективний коефіцієнт кондуктивного теплообміну; $k(\theta)$ – коефіцієнт сушіння; $a(u)$ – коефіцієнт масопровідності; R – радіус частинки; Bi_m – критерій Біо масообмінний; Nu_m – критерій Нусельта масообмінний; Re – критерій Рейнольдса; Pr_m – масообмінний критерій Прандтля; β – коефіцієнт масообміну; ν – кінематична в'язкість повітря; v – швидкість повітря; D_n – коефіцієнт дифузії вологи в повітрі.

Отримана математична модель являє систему нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних, які описують кінетику процесу сушіння зернового матеріалу у віброзріджено-вихровому шарі при радіаційно-конвективному підведенні теплової енергії.

Незважаючи на замкненість отриманої системи рівнянь її розв'язок суттєво утруднений навіть при використанні ЕОМ, так як, до диференціальних рівнянь входять коефіцієнти і безрозмірні комплекси значення яких можна визначити тільки експериментально.

Для ідентифікації параметрів математичної моделі бажано мати аналітичні залежності, отримані з вихідної системи рівнянь (4.117 - 4.122) при додаткових спрощеннях на основі таких посилок:

радіаційні складові в рівняннях (4.117) і (4.118) можна лінеаризувати використовуючи [2] лінійний коефіцієнт радіаційного теплообміну:

$$\sigma \varepsilon_{np} 10^{-8} (T_1^4 - T_2^4) = \alpha_l (\theta_1 - \theta_2);$$

Де $\alpha = \sigma^*(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)$; σ^* – приведений коефіцієнт випромінювання.

Враховуючи, що шар зерна (віброзріджений) має невелику «товщину» (до 0.05 м) градієнт температури повітря можна виразити через кінцеву різницю температури на вході і виході шару:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \approx \frac{\Delta t}{\Delta x} \approx \frac{t_1 - t_2}{h},$$

аналогічно для вологовмісту повітря:

$$\frac{\partial d}{\partial x} \approx \frac{\Delta d}{\Delta x} \approx \frac{d_1 - d_2}{h},$$

при розігрітому випромінювачі в рівнянні (1) похідна $\frac{\partial \theta_v}{\partial \tau} = 0$.

Втрати теплоти в оточуюче середовище (включаючи елементи конструкції сушарки можна врахувати коефіцієнтом корисної дії джерела енергопостачання установки, при попередньому розігріві установки перед завантаженням матеріалу.

Після відповідних перетворень, з врахуванням зроблених припущень і заміною похідної $\partial u / \partial \tau$ (відповідно до критерію Ребіндера $Rb = \frac{c}{r} \frac{\partial u}{\partial \tau}$) на величину $-\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\bar{c}}{r} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau}$, замість системи рівнянь (4.116 - 4.122) отримаємо спрощену систему рівнянь відповідно до кількості невідомих (шуканих) величин:

$$T_1 \frac{d\theta}{d\tau} + a_1 \theta - b_1(\tau) = t_2; \quad (4.122)$$

$$T_2 \frac{dt_2}{d\tau} + a_2 t_2 - b_2 = \theta; \quad (4.123)$$

$$-\frac{du}{d\tau} = k(Bi_m)(a_3 \theta + b_3)(u - u_p); \quad (4.124)$$

$$m_n \frac{dd_2}{d\tau} = G_n(d_1 - d_2) + m_o k(Bi_m)(a_3 \theta + b_3)(u - u_p); \quad (4.125)$$

Де

$$T_1 = 2 \frac{m_o c_t}{\alpha'_v f'_z} \left(1 + \frac{1}{Rb}\right); a_1 = 2; b_1(\tau) = 2 \frac{AE(\tau)\eta F_v}{\alpha'_v f'_z} + t_1; t_1 = c_o P + c_1 t_o - c_2 \theta_v; c_0 = \frac{1}{G_n c_p - 0.5 \alpha F}; c_1 = 0.5 \alpha F + G_n c_p; c_2 = c_0 \alpha F; T_2 = \frac{m_n c_p}{\alpha'_v f'_z}; a_2 = \frac{G_n c_p + 0.5 \alpha'_v f'_z}{\alpha'_v f'_z}; b_2 = \frac{G_n c_p - 0.5 \alpha'_v f'_z}{\alpha'_v f'_z}; k(Bi_m) = \left(R^2 \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{Bi_m}\right)\right)^{-1};$$

a_3, b_3 – сталі коефіцієнти лінійної апроксимації функції $a_m(\theta)$.

Зводячи рівняння (4.122) і (4.123) до одного отримаємо розв'язок для змінних параметрів $\theta(\tau)$ і $t_2(\tau)$ (далі $t(\tau)$):

$$A \frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + B \frac{d\theta}{d\tau} + C\theta = D_1, \quad (4.126)$$

$$A \frac{d^2 t}{d\tau^2} + B \frac{dt}{d\tau} + C\theta = D_2, \quad (4.127)$$

Де

$$A = T_1 T_2; B = a_1 T_2 + a_2 T_1; C = a_1 a_2 - 1; \\ D_1 = b_1(\tau) + a_1 b_2; D_2 = a_2 b_1(\tau) + b_2.$$

При безперервному ІЧ-опроміненні віброкипачого шару при фільтрації повітря крізь шар матеріалу, коли можна вважати, що кожна частинка (при високочастотному осцилюванні) рівномірно опромінюється джерелом з величиною густини опромінення $E(\tau)$ (енергетична освітленість) буде величиною сталою $E = E_{max}$ і розв'язок рівняння (11) за початкових умов: $\tau = 0, \theta = \theta_0$ набуває вигляду:

$$\theta(\tau) = \frac{\theta_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1(\tau)}{C}, \quad (4.128)$$

де $r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ – корені характеристичного рівняння.

Аналітичний розв'язок має рівняння (4.126) (при $\tau = 0, t = t_1$):

З рівняння (4.128) і (4.118) матимемо рівняння кінетики сушіння:

$$\frac{u-u_1}{u-u_p} = \exp\left(-k(Bi_m)\left(\left(b_3 + \frac{D_1}{c}\right)\tau + k_t\left(\frac{r_1}{r_2}e^{r_2\tau} - \frac{r_2}{r_1}e^{r_1\tau}\right)\right)\right), \quad (4.129)$$

$$\text{де } k_t = \frac{\theta_0 c - D_1}{c(r_1 - r_2)}.$$

При наявності в контейнері циркуляційно-вихорного руху частинок, які опромінюються періодично з періодом T залежність $E(\tau)$ можна прийняти прямокутною у вигляді прямокутних хвиль і представлена відомим розкладенням в ряд Фур'є:

$$E(\tau) = E + \frac{4}{\pi} E \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\omega\tau}{2n-1} \max, \quad (4.130)$$

де $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – частота циркуляції матеріалу в контейнері.

Розв'язок рівняння (4.127) при періодичній зміні $E(\tau)$ за законом (4.130) отримано в роботах [143] у вигляді ряду, має дуже громіздкий вигляд, утруднюючи подальший аналіз процесу сушіння.

Для практичних оцінок процесу є можливим представити «прямокутну» функцію $E(\tau)$ наближеною косінусоїдальною залежністю:

$$E(\tau) = E_m(1 + \cos \omega \tau), \quad (4.131)$$

де E_m – діюча величина енергетичної освітленості.

Величину $D_1(\tau)$ з урахуванням (4.132) запишемо так:

$$D_1(\tau) = k_1 + B_1 \cos(\omega\tau), \quad (4.132)$$

де $k_1 = a_1 b_1 + t_1 + B$; $B_1 = \frac{2A_\lambda F_v E}{\alpha'_v f'_z}$.

Розв'язок рівняння (4.127) з урахуванням (4.132) при $\tau = 0, \theta = \theta_0, E = E_m$ після відповідних перетворень можна записати у вигляді:

$$\theta(\tau) = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau} + \frac{k_1}{c} + \frac{B_1}{a^2 + b^2} (b \sin \omega \tau - a \cos \omega \tau), \quad (4.133)$$

де

$$a = A\omega^2 - C; \quad b = B\omega; \quad C_1 = \frac{r_2}{r_2 - r_1} \left(\theta_0 + \frac{k_1}{c} + \frac{B_1}{a^2 + b^2} \left(a - \frac{b\omega}{r_2} \right) \right);$$

$$C_2 = \frac{r_1}{r_1 - r_2} \left(\theta_0 - \frac{k_1}{c} + \frac{B_1}{a^2 + b^2} \left(a - \frac{b\omega}{r_1} \right) \right).$$

Підставляючи отриману залежність зміни температури матеріалу (4.133) в рівняння (4.124) після поділу змінних та інтегрування в межах від u_1 до u і від $\tau = 0$ до τ ; після перетворень матимемо:

$$u(\tau) = u_p + (u_1 - u_p) \cdot \exp \left[-k(Bi_m) \left(b_3 + a_3 \frac{k_1}{c} \tau + a_3 \left(\frac{C_1}{r_1} e^{r_1 \tau} + \frac{C_2}{r_2} e^{r_2 \tau} \right) - \frac{B_1}{\omega(a^2 + b^2)} (b \cos \omega \tau - a \sin \omega \tau) \right) \right]. \quad (4.134)$$

Отримані рівняння (4.133) і (4.134) описують процеси зміни температури і вологовмісту матеріалу при сушінні радіаційно-конвективним теплопідведенням із змінною в часі потужністю джерела ІЧВ.

На рис. 4.33, рис. 4.34 наведено графічні залежності зміни температури і вологовмісту матеріалу за даними розрахунків і експериментів [7, 10].

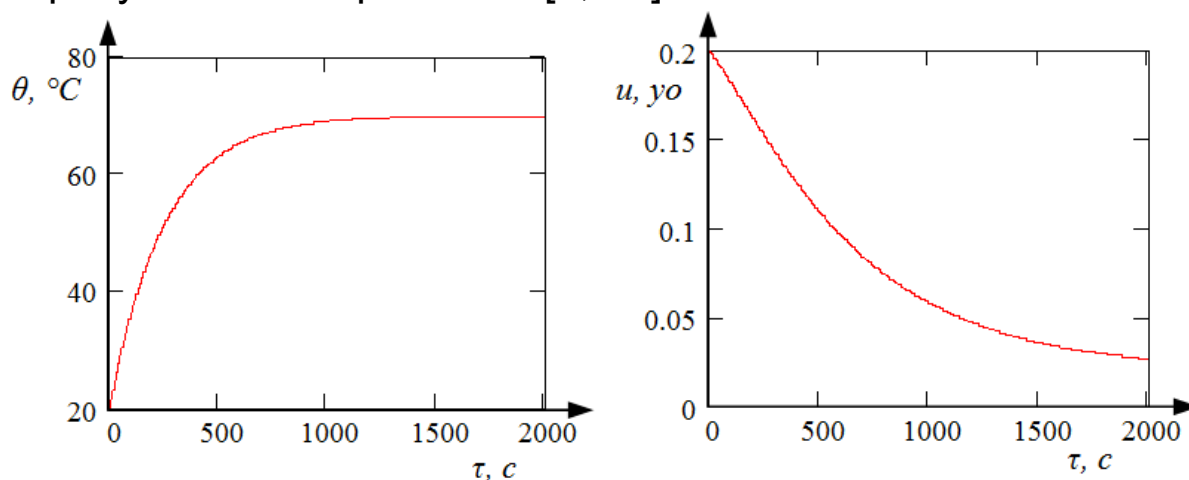


Рис. 4.33. Зміна параметрів процесу при безперервному опроміненні.

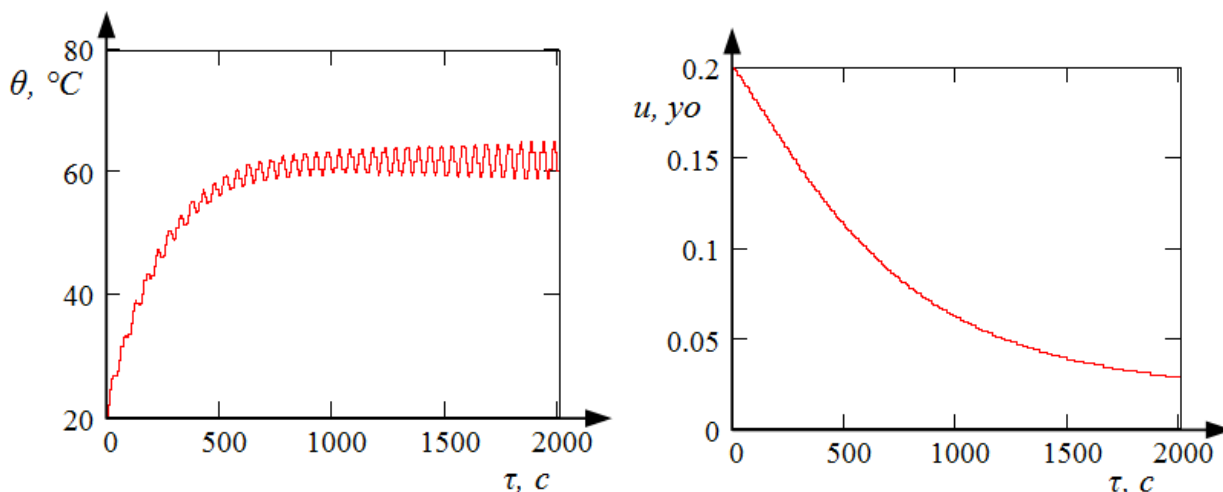


Рис. 4.34. Зміна параметрів процесу при імпульсному опроміненні.

Отримана замкнена математична модель процесу сушіння насіння радіаційно-конвективним підведенням енергії для періодичної вібросушарки. Визначено аналітичні залежності зміни параметрів процесу сушіння в часі при періодичному ІЧ-опроміненні.

4.7. Математичне моделювання та ідентифікація процесів тепломасообміну у вібраційній сушарці з ІЧ-енергопідведенням

Близько 15% від усього споживання енергії в агропромисловому комплексі розвинених країн припадає на процеси сушіння і термічної обробки сільськогосподарських матеріалів [1]. В Україні більшість наявних в господарствах сушарок і установок для високоінтенсивної термообробки зернових матеріалів мають завищені питомі витрати енергії на одиницю отриманого продукту [2]. Тому питання інтенсифікації і енергоефективності обладнання, що реалізує взаємопов'язані тепломасообмінні процеси з підготовки зернових матеріалів до зберігання або до споживання чи до згодовування надзвичайно актуальні.

Загальні підходи і особливості математичного моделювання тепломасообмінних процесів у сушарках сільськогосподарського призначення розкриті в роботах [3, 4]. Використання високоінтенсивного радіаційного нагріву і сушіння для підвищення якості готового продукту (декстринізація крохмального комплексу, інактивація пентазонів, інгібування уреаз, дезінфекція і дезінсекція, збільшення виходу олії, підвищення числа падіння) розглянуто в працях [5, 6]. З точки зору енергоефективності доцільність застосування ІЧ-енергопідведення для термообробки зернової сировини висвітлено в роботах [7, 8]. Але використання установок для високоінтенсивної ІЧ-обробки зернової сировини збільшує ризик втрати якості зернової сировини за рахунок підгоряння, а в деяких випадках призводить до завищених енергозатрат через недосконале технічне і режимне оформлення процесу [9].

Вирішення задач обґрунтування раціональних режимів і параметрів обладнання для ІЧ-термообробки ґрунтується на використанні математичних моделей теорії тепло-масобміну, фізичних законах, фізико-хімічних балансових співвідношеннях, узагальненні експериментальних даних – на основі теорії подібності, ймовірності і математичної статистики [10, 11]. Але крім проблеми вибору підходу і розробки математичної моделі існує ще одна проблема не менша – це параметрична ідентифікація моделей, оскільки більшість коефіцієнтів математичних співвідношень взаємопов'язані, залежать від вологості і температури, прямо не вимірюються і мають досить великі розходження в різних літературних джерелах, кількість яких обмежена.

Розглянемо сушарку, що являє собою вібруючу поверхню вздовж якої переміщується зерновий матеріал з якого видаляється волога за рахунок теплової енергії, що передається випромінюванням від інфрачервоних (ІЧ) випромінювачів. Випромінювачі розміщені паралельно шару

матеріалу вздовж усієї вібротранспортуючої поверхні. Для створення спрямованого потоку над випромінювачами розміщено екранний відбивач, а бокова поверхня сушарки екранована вертикальними поверхнями. Матеріал переміщується у віброзважаєному стані за рахунок вібрацій опорної поверхні—стрічки транспортера. При цьому матеріал сприймає енергію ІЧ-випромінювання що частково поглинається, а частково відбивається, а також конвекцією передається повітрю і оточуючим поверхням. Теплова енергія отримана матеріалом витрачається на нагрівання вологого матеріалу (збільшення його ентальпії), випаровування вологи і віддається в оточуюче середовище: повітря, бокові екрани, стрічка транспортера. При цьому теплота від матеріалу передається як випромінюванням так і конвекцією. Кондуктивна складова теплопереносу до віброуючої поверхні незрівнянно мала відносно конвективної і радіаційної складових. В процесі роботи сушарки матеріал безперервно переміщується від місця завантаження до місця вивантаження нагріваючись і зневоднюючись рис. 4.35. Повітря переміщується між стрічкою з матеріалом і джерелами випромінювання.

З метою спрощення аналізу даного процесу приймемо наступні загальноприйняті при математичному описі [12, 13] припущення:

- теплофізичні параметри матеріалу і повітря від температури не залежать і в першому наближенні приймаються середніми за процес;
- градієнти температури і вологовмісту за розміром частинок зернового матеріалу не враховуються (нагрів і зневоднення в окремих зернах безградієнтні);
- температура стрічки, екранів, випромінювачів однакові за довжиною і в поперечному перерізі апарату (сушарки);

– кількість води, що видаляється з матеріалу пропорційна вологовмісту, а коефіцієнт пропорційності залежить від температури лінійно.

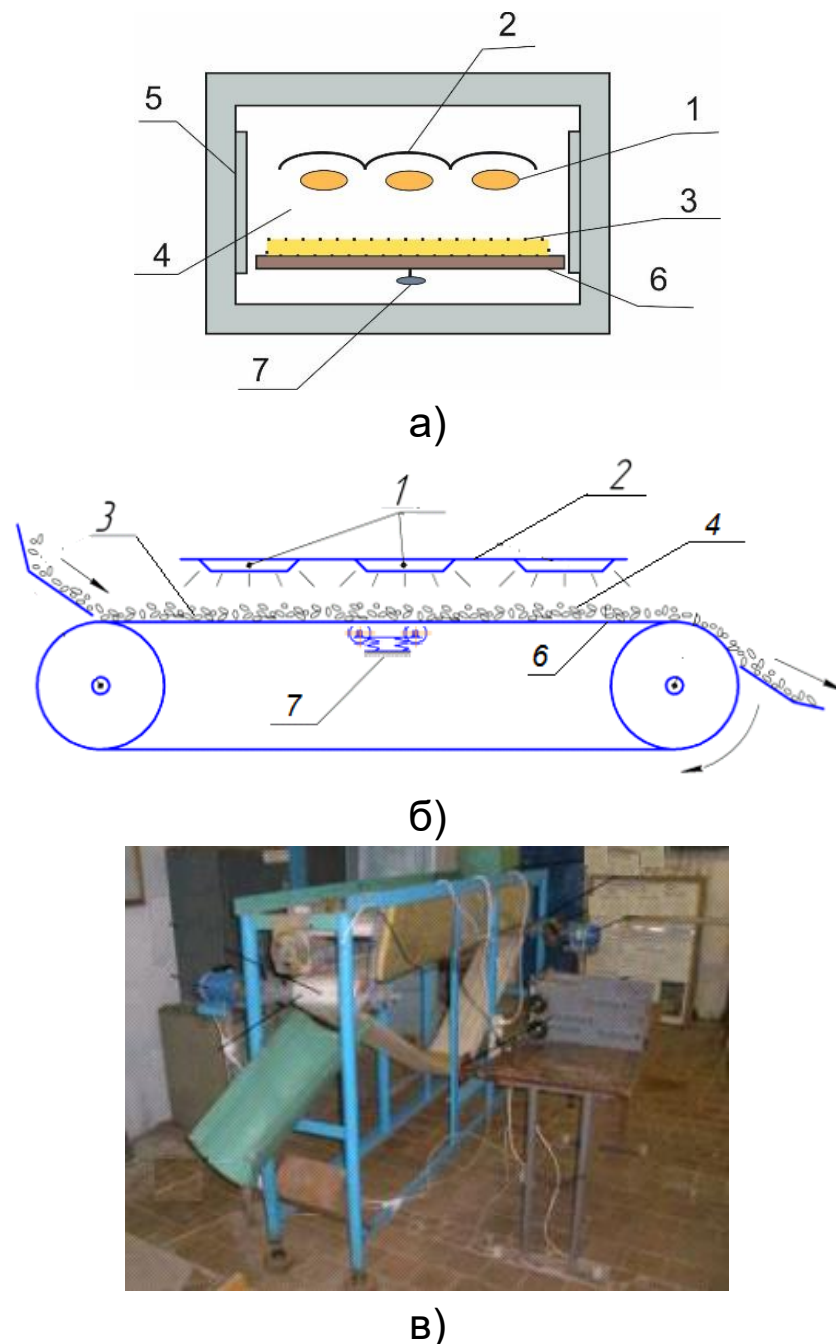


Рис. 4.35. Розрахункова (а), технологічна (б) схеми і зовнішній вигляд (в) експериментальної радіаційної сушарки:
 1–ІЧ-нагрівач; 2 – екран; 3 – віброзважений шар зерна; 4 – сушильний агент – повітря; 5–бокові екрани; 6 – транспортер; 7–віброзбуджувач.

Відповідно до наведеного опису і зроблених припущень напишемо рівняння теплового і матеріального балансів за час dt на відрізку du в напрямку руху шару зернового матеріалу у загальному вигляді:

$$dQ_0 = dQ_1 + dQ_{12} + dQ_{13} \pm dQ_{14} + dQ_{15}; \quad (4.135)$$

$$dQ_{12} = dQ_2 + dQ_{23} + dQ_{24} + dQ_{25}; \quad (4.136)$$

$$dQ_{13} + dQ_{14} = dQ_3 + dQ_{34} + dQ_{35} + dQ_w; \quad (4.137)$$

$$dQ_{35} = dQ_5 + dQ_{34}; \quad (4.138)$$

$$dQ_4 = dQ_{14} + dQ_{24} + dQ_{54} \pm dQ_{34}; \quad (4.139)$$

$$dQ_{36} = dQ_6 + dQ_{64}; \quad (4.140)$$

– $dM_4 = -dM_3$ – рівняння матеріального балансу;

де, dQ_0 – енергія підведена до джерела випромінювання (енергія яку виділяє ІЧ-випромінювач), Вт-с; $dQ_1, dQ_3, dQ_4, dQ_5, dQ_6$ – енергія, що витрачається на нагрівання елементів установки, відповідно: випромінювача (лампа, ТЕН), відбивного екрану, матеріалу, повітря, бокових екранів та транспортуючого засобу, Дж; $dQ_{12}, dQ_{13}, dQ_{15}, dQ_{25}, dQ_{23}, dQ_{58}$ – енергія, що передаються випромінюванням, від поверхні одного елемента до іншого, відповідно до індексів, Дж; $dQ_{14}, dQ_{24}, dQ_{34}, dQ_{36}, dQ_{54}, dQ_{64}$ – енергія, що передаються конвективним (або складним) теплообміном від одного елемента до іншого, Дж; dQ_w – енергія, що поглинута матеріалом і витрачається на випаровування вологи з нього, Дж.

Визначивши значення окремих складових теплового і матеріального балансу через відомі співвідношення [12, 13] можна записати систему диференціальних рівнянь (як математичну модель) в розгорнутому вигляді:

$$P = m_1 c_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + c_{12} F_{12} (T_1^4 - T_2^4) + c_{13} F_{13} (T_1^4 - T_3^4) + c_{15} F_{15} (T_1^4 - T_5^4) + \alpha'_{14} F_1 (\theta_1 - t); \quad (4.141)$$

$$c_{12}F_{12}(T_1^4 - T_2^4) = m_2c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} + c_{25}F_{25}(T_2^4 - T_5^4) + c_{23}F_{23}(T_2^4 - T_3^4) + \alpha'_{24}F_2(\theta_2 - t); \quad (4.142)$$

$$\begin{aligned} A_\lambda [c_{13}F_{13}(T_1^4 - T_3^4) + c_{23}F_{23}(T_2^4 - T_3^4)] \\ = m_3c_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + G_3c_3L \frac{\partial \theta_3}{\partial y} + \alpha'_{34}F_{34}(\theta_3 - t) + \\ + \alpha_e F_6(\theta_3 - \theta_6) \pm c_{35}F_{35}(T_3^4 - T_5^4) + r_0 \left[m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} + G_0L \frac{\partial U}{\partial y} \right]; \end{aligned} \quad (4.143)$$

$$\begin{aligned} m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \pm G_p c_p L \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha'_{14}F_1(\theta_1 - t) + \alpha'_{24}F_2(\theta_2 - t) + \\ \alpha'_{34}F_3(\theta_3 - t) + \alpha'_{54}F_5(\theta_5 - t); \end{aligned} \quad (4.144)$$

$$c_{15}F_{15}(T_1^4 - T_5^4) = m_5c_5 \frac{\partial \theta_5}{\partial \tau} + \alpha'_{54}F_{54}(\theta_5 - t); \quad (4.145)$$

$$\alpha'_e F_6(\theta_3 - \theta_6) = m_6c_6 \frac{\partial \theta_6}{\partial \tau} + \alpha'_6 F_6(\theta_6 - t'); \quad (4.146)$$

$$\frac{c_3}{Rb} \left(\frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + \frac{G_3L}{m_3} \frac{\partial \theta_3}{\partial y} \right) = -r_0 \left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{G_4L}{m_{30}} \frac{\partial U}{\partial y} \right); \quad (4.147)$$

$$- \left(m_3 \frac{\partial U}{\partial \tau} + G_3L \frac{\partial U}{\partial y} \right) = m_4G_4 \left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + G_4L \frac{\partial d}{\partial y} \right). \quad (4.148)$$

де, α' – коефіцієнти складеного теплообміну, (стандартні коефіцієнти у формулах 4.141-4.148)

Система нелінійних диференціальних рівнянь (4.141-4.148) являє математичну модель динамічних режимів сушильної установки з ІЧ-підведенням енергії і може бути розв'язана числовим методом при заданих граничних умовах і числових значеннях коефіцієнтів, які розрахунками визначить досить складно. Для теоретичного аналізу теплових масообмінних процесів в існуючих комп'ютерних середовищах і отримання аналітичних розрахункових залежностей спростимо математичний опис нестационарних процесів.

Щільність радіаційного потоку від поверхні випромінювання до поглинальної поверхні можна представити [12, 13], у вигляді аналогічному виразу для конвективного теплообміну:

$$q_{\text{вип}} = c_{\text{пр}} \cdot 10^{-8}(T_1^4 - T_2^4) = c_{\text{пр}} \cdot 10^{-8}(T_1^2 - T_2^2)(T_1^2 + T_2^2) = \alpha_{\text{л}}(\theta_1 - \theta_2) \quad (4.149)$$

де, $\alpha = c_{\text{пр}} \cdot 10^{-8}(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$ – лінійний коефіцієнт теплообміну випромінюванням.

Лінеаризуючи радіаційні складові в рівняннях (4.141)-(4.143), (4.144) перепишемо рівняння у вигляді:

$$m_1 c_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = P - \alpha_{12} F_{12}(\theta_1 - \theta_2) - \alpha_{13} F_{13}(\theta_1 - \theta_3) - \alpha_{15} F_{15}(\theta_1 - \theta_5) - \alpha'_{14} F_1(\theta_1 - t); \quad (4.150)$$

$$m_2 c_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} = \alpha_{12} F_{12}(\theta_1 - \theta_2) - \alpha_{25} F_{25}(\theta_2 - \theta_5) - \alpha_{23} F_{23}(\theta_2 - \theta_3) - \alpha'_{24} F_2(\theta_2 - t); \quad (4.151)$$

$$m_3 c_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + G_3 c_3 L \frac{\partial \theta_3}{\partial y} = A_{\lambda} \cdot \left[\alpha_{13} F_{13}(\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{23} F_{23}(\theta_2 - \theta_3) - \alpha'_{34} F_{34}(\theta_3 - t) - \right] + \left[-\alpha_e F_6(\theta_3 - \theta_6) \pm \alpha_{35} F_{35}(\theta_3 - \theta_5) \right] + r \left[m_0 \frac{\partial U}{\partial \tau} + G_0 L \frac{\partial U}{\partial y} \right]; \quad (4.152)$$

$$m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \pm G_p c_p L \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha'_{14} F_1(\theta_1 - t) + \alpha'_{32} F_3(\theta_3 - t) + \alpha'_{54} F_5(\theta_5 - t) + \alpha'_{24} F_4(\theta_2 - t); \quad (4.153)$$

$$m_5 c_5 \frac{\partial \theta_5}{\partial \tau} = \alpha_{15} F_{15}(\theta_1 - \theta_5) - \alpha'_{54} F_{54}(\theta_5 - t); \quad (4.154)$$

$$m_6 c_6 \frac{\partial \theta_6}{\partial \tau} = \alpha_e F_6(\theta_3 - \theta_6) - \alpha'_{36} F_{36}(\theta_6 - t'); \quad (4.155)$$

В рівнянні (4.152) замінимо останню складову, яка визначає кількість теплоти на випаровування вологи її тепловим аналогом з рівняння (4.147), отримаємо:

$$c_3 \left(m_3 - \frac{m_{30}}{Rb} \right) \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + c_3 L \left(G_3 - \frac{G_{03}}{Rb} \right) \frac{\partial \theta_3}{\partial y} = A_{\lambda} [\alpha_{13} F_{13}(\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{23} F_{23}(\theta_2 - \theta_3) - \alpha'_{34} F_{34}(\theta_3 - t) - \alpha'_e F_6(\theta_3 - \theta_6) \pm \alpha_{35} F_{35}(\theta_3 - \theta_5)];$$

Для режиму, що встановився, похідні за часом в рівняннях (4.150)-(4.155) будуть рівними нулю. І матимемо систему рівнянь для стаціонарного режиму:

$$P = \alpha_{12}F_{12}(\theta_1 - \theta_2) + \alpha_{13}F_{13}(\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{15}F_{15}(\theta_1 - \theta_5) + \alpha'_{14}F_1(\theta_1 - t); \quad (4.156)$$

$$\alpha_{12}F_{12}(\theta_1 - \theta_2) = \alpha_{25}F_{25}(\theta_2 - \theta_5) + \alpha_{23}F_{23}(\theta_2 - \theta_3) + \alpha'_{24}F_2(\theta_2 - t); \quad (4.157)$$

$$\alpha_{15}F_{15}(\theta_1 - \theta_5) = \alpha'_{54}F_{54}(\theta_5 - t) \quad (4.158)$$

$$\alpha_e F_6(\theta_3 - \theta_6) = \alpha'_{36}F_{36}(\theta_6 - t'); \quad (4.159)$$

$$c_3 L \left(G_3 - \frac{G_{03}}{Rb} \right) \frac{\partial \theta_3}{\partial y} = A_\lambda [\alpha_{13}F_{13}(\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{23}F_{23}(\theta_2 - \theta_3) - \alpha'_{34}F_{34}(\theta_3 - t) - \alpha_e F_6(\theta_3 - \theta_6) \pm \alpha_{35}F_{35}(\theta_3 - \theta_5)]; \quad (4.160)$$

$$G_p c_p L \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha'_{14}F_1(\theta_1 - t) + \alpha'_{32}F_3(\theta_3 - t) + \alpha'_{54}F_5(\theta_5 - t) + \alpha'_{24}F_4(\theta_2 - t); \quad (4.161)$$

З рівнянь (4.156)-(4.159) визначимо значення температури окремих елементів установки ($\theta_1, \theta_2, \theta_5, \theta_6$) через шукані значення t та θ_3 , отримаємо:

$$\theta_1 = k_1 \theta_3 + k_2 t \quad (4.162)$$

$$\theta_2 = k_{31} \theta_3 + k_4 t \quad (4.163)$$

$$\theta_5 = k_5 \theta_3 + k_6 t \quad (4.164)$$

$$\theta_6 = k_7 \theta_3 + k_8 t' \quad (4.165)$$

де, $k_1 \dots k_8$ – безрозмірні комплекси, що визначаються із конструктивних F_{ij} і режимних α_{ij} параметрів установки, що прийняти для розрахунків як сталі величини:

$$k_1 = \alpha_{13}F_{13}(\alpha_{12}F_{12} + \alpha'_{24}F_2 + \alpha_{25}F_{25})(\alpha_{15}F_{15} + \alpha_{54}F_{54})/K \quad ;$$

$$k_2 = \frac{(\alpha_{12}F_{12}(\alpha_{15}\alpha'_{14}F_{15}(F_1 + F_2) + \alpha_{54}(\alpha_{15}F_{15} + \alpha'_{14}(F_1 + F_2) + \alpha_{25}F_{25}) + F_{54}) + (\alpha_{\kappa-\lambda}F_2 + \alpha_{25}F_{25})(\alpha_{54}\alpha'_{14}F_1F_{54} + \alpha_{15}F_{15}(\alpha'_{14}F_1 + \alpha_{54}F_{54})))}{K};$$

$$\begin{aligned}
k_3 &= \alpha_{13}F_{13}(\alpha_{15}\alpha_{25}F_{15}F_{25} + \alpha_{12}F_{12}(\alpha_{15}F_{15} + \alpha_{54}F_{54}))/K; \\
k_4 &= \\
&\left(\alpha_{15}\alpha_{\kappa-\lambda}F_{15}(\alpha'_{14}F_1F_2 + \alpha_{13}F_{13}F_2 + \alpha_{12}F_{12}(F_1 + F_2) + \alpha_{25}F_1F_{25}) + \alpha_{54}F_{54} \times \right. \\
&\left. \times ((\alpha_{\kappa-\lambda}F_1 + \alpha_{13}F_{13} + \alpha_{15}F_{15})(\alpha_{\kappa-\lambda}F_2 + \alpha_{25}F_{25}) + \right. \\
&\left. + \alpha_{12}F_{12}(\alpha_{15}F_{15} + \alpha'_{14}(F_1 + F_2) + \alpha_{25}F_{25})) \right) / \\
&K; \\
k_5 &= \alpha_{13}\alpha_{15}F_{13}F_{15}(\alpha_{12}F_{12} + \alpha_{\kappa-\lambda}F_2 + \alpha_{25}F_{25})/K; \\
k_6 &= \\
&\left((\alpha_{\kappa-\lambda}F_2 + \alpha_{25}F_{25})(\alpha_{15}\alpha'_{14}F_1F_{15} + \alpha_{54}F_{54}(\alpha_{\kappa-\lambda}F_1 + \alpha_{13}F_{13} + \alpha_{15}F_{15})) + \alpha_{12}F_{12} \times \right. \\
&\left. \times (\alpha_{15}\alpha'_{14}F_{15}(F_1 + F_2) + \alpha_{54}F_{54}(\alpha_{13}F_{13} + \alpha_{15}F_{15} +) + \alpha'_{14}(F_1 + F_2) + \alpha_{25}F_{25}) \right) / \\
&K; \\
k_7 &= \frac{\alpha_e F_6}{\alpha_e F_6 + \alpha_{36} F_{36}}; \quad k_8 = \frac{\alpha_{36} F_{36}}{\alpha_e F_6 + \alpha_{36} F_{36}} \\
K &= (\alpha_{\kappa-\lambda}F_2 + \alpha_{25}F_{25})(\alpha_{54}F_{54}(\alpha'_{14}F_1 + \alpha_{13}F_{13}) \\
&\quad + \alpha_{15}F_{15}(\alpha'_{14}F_1 + \alpha_{13}F_{13} + \alpha_{54}F_{54})) + \\
&+ \alpha_{12}F_{12}(\alpha_{54}F_{54}(\alpha_{13}F_{13} + \alpha'_{14}(F_1 + F_2) + \alpha_{25}F_{25}) + \alpha_{15}F_{15}(\alpha_{13}F_{13} + \\
&\quad \alpha'_{14}(F_1 + F_2) + \alpha_{54}F_{54})).
\end{aligned}$$

Підставляючи отримані значення (4.161)-(4.165) в рівняння (4.160) та (4.161) після відповідних перетворень матимемо систему двох взаємопов'язаних рівнянь:

$$\bar{G}_1 \frac{d\theta_3(y)}{dy} = t - a_1\theta_3 + b_1 \quad (4.166)$$

$$\bar{G}_2 \frac{dt(y)}{dy} = \theta_3 - a_2t_2 \quad (4.167)$$

$$\begin{aligned}
\text{де, } \bar{G}_1 &= \frac{c_3 LG'}{A_\lambda(\alpha_{13}F_{13}k_2 + \alpha_{23}F_{23}k_4 + \alpha'_{34}F_{34} - \alpha_{35}F_{35}k_6)}; \quad G' = G_3 - \frac{G_{03}}{Rb}; \\
a_1 &= - \frac{\alpha_{13}F_{13}(k_1 - 1) + \alpha_{23}F_{23}(k_3 - 1) - \alpha'_{34}F_{34} + \alpha_{35}F_{35}(1 - k_5) + \alpha_e F_6(k_7 - 1)}{\alpha_{13}F_{13}k_2 + \alpha_{23}F_{23}k_4 + \alpha'_{34}F_{34} - \alpha_{35}F_{35}k_6}; \\
b_1 &= \frac{\alpha_e F_6 k_8 t'}{A_\lambda(\alpha_{13}F_{13}k_2 + \alpha_{23}F_{23}k_4 + \alpha'_{34}F_{34} - \alpha_{35}F_{35}k_6)}; \\
\bar{G}_2 &= \frac{c_p G_p L}{\alpha'_{14}F_1 k_1 + \alpha'_{24}F_2 k_3 + \alpha'_{34}F_3 + \alpha_{45}F_5 k_5}; \\
a_1 &= - \frac{\alpha'_{14}F_1(1 - k_2) + \alpha'_{24}F_2(1 - k_4) + \alpha'_{54}F_5(1 - k_6) + \alpha'_{34}F_3}{\alpha'_{14}F_1 k_1 + \alpha'_{24}F_2 k_3 + \alpha'_{34}F_3 + \alpha_{45}F_5 k_5}.
\end{aligned}$$

Розв'язуючи рівняння (4.166) і (4.167) відносно $t(y)$ і $\theta(y)$, після перетворень отримаємо:

$$A \frac{d^2 \theta_3}{dy^2} + B \frac{d\theta_3}{dy} + C\theta_3 = D_1 \quad (4.168)$$

$$A \frac{d^2 t}{dy^2} + B \frac{dt}{dy} + Ct = D_2 \quad (4.169)$$

де, $A = \bar{G}_1 \bar{G}_2$; $B = a_2 \bar{G}_1 + a_1 \bar{G}_2$; $C = a_1 a_2 - 1$; $D_1 = -b_1 a_2$, $D_2 = b_1$.

Загальний розв'язок рівнянь, за граничних умов, $y = 0$; $\theta_3 = \theta_0 = \theta_1$; $t = t_0 = t_1$; $\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} = 0$ відповідно до [12] має вигляд:

$$t(y) = c'_1(r_1 e^{r_2 y} - r_2 e^{r_1 y}) + \frac{D_2}{C} \quad (4.170)$$

$$\theta_3(y) = c'_2(r_1 e^{r_2 y} - r_2 e^{r_1 y}) + \frac{D_1}{C}; \quad (4.171)$$

$$\text{де, } r_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad c'_1 = \frac{t_0 C - D_2}{C(r_1 - r_2)}; \quad c'_2 = \frac{\theta_{03} C - D_1}{C(r_1 - r_2)}. \quad (4.172)$$

Для визначення розподілу вологовмісту матеріалу в процесі сушіння за довжиною сушильної камери в напрямку руху використаємо рівняння (4.148) при нульових значення похідної за часом:

$$\frac{c_3}{Rb} \frac{G_3 L}{m_3} \frac{\partial \theta_3}{\partial y} = -r_0 \frac{G_4 L}{m_{30}} \frac{\partial U}{\partial y} \quad (4.173)$$

Величина співвідношення $\frac{G_3}{m_3} L$ характеризує швидкість переміщення зернового матеріалу, оскільки $G_3 = \frac{m_3}{\tau}$; $\frac{L}{\tau} = v_3$; то $\frac{G}{m} L = v$ і остаточно матимемо:

$$\frac{1}{Rb(U)} c_3(U) \frac{d\theta_3}{dy} = -r_0 \frac{dU}{dy}. \quad (4.174)$$

Проодиференціювавши рівняння (4.171), маємо:

$$\frac{d\theta_3(y)}{dy} = K_T (r_1 r_2 e^{r_2 y} - r_2 r_1 e^{r_1 y}) = F_1(y) \quad (4.175)$$

де, $K_T = \frac{\theta_{03} C - D_1}{C(r_1 - r_2)}$. Підставивши отриману залежність в рівняння (4.173), матимемо:

$$-\frac{dU}{dy} = \frac{c_3(U) \cdot K_T}{Rb(U) \cdot r_0} (r_1 r_2 e^{r_2 y} - r_2 r_1 e^{r_1 y}) \quad (4.176)$$

де, $c(U)$ – теплоємність зернового матеріалу:

$$c_3(U) = U \cdot c_v + (1 - U) \cdot c_{c3} \quad (4.177)$$

де, c_v – питома теплоємність води, c_{c3} – питома теплоємність сухого зернового матеріалу.

За умови $\frac{Rb(U)}{c_3(U)} = A_R e^{nU}$, де A_R і n емпіричні коефіцієнти, проінтегрувавши рівняння (4.176) $-A_R r_0 \int_{U_1}^U e^{nU} dU = K_T r_1 r_2 [\int_0^y e^{r_2 y} dy - \int_0^y e^{r_1 y} dy]$, отримаємо:

$$U(y) = \frac{1}{n} \ln \left(e^{nU_1} - K_c \left[\frac{e^{r_2 y} - 1}{r_2} - \frac{e^{r_1 y} - 1}{r_1} \right] \right); \quad (4.178)$$

$$\text{де, } K_c = \frac{n \cdot K_T}{A_R \cdot r_0} r_1 r_2.$$

Для параметричної ідентифікації математичної моделі теплових і масообмінних процесів при ІЧ-сушінні зернових матеріалів (при вібраційному переміщенні) необхідно мати приблизні значення введених в рівняння коефіцієнтів, які теоретично можна визначити тільки ітераційними розрахунками використовуючи відомі літературні дані.

Ідентифікацію отриманих математичних моделей можна провести за даними експериментів [13] співставивши аналітичні і експериментально отримані залежності [14]. Але визначити параметри (температуру і вологовміст) матеріалу в рухомому шарі при наявності ІЧ-опромінення і вібрацій дуже складно. Тому визначимо кінцеві параметри температури і вологовмісту зерна на виході сушарки, при різній експозиції теплової обробки. Експериментальні дані апроксимувались поліномами другого порядку, графічна інтерпретація експериментальних даних і розрахункових кривих залежності зміни температури і вологовмісту представлені на рис. 4.36 і рис. 4.37.

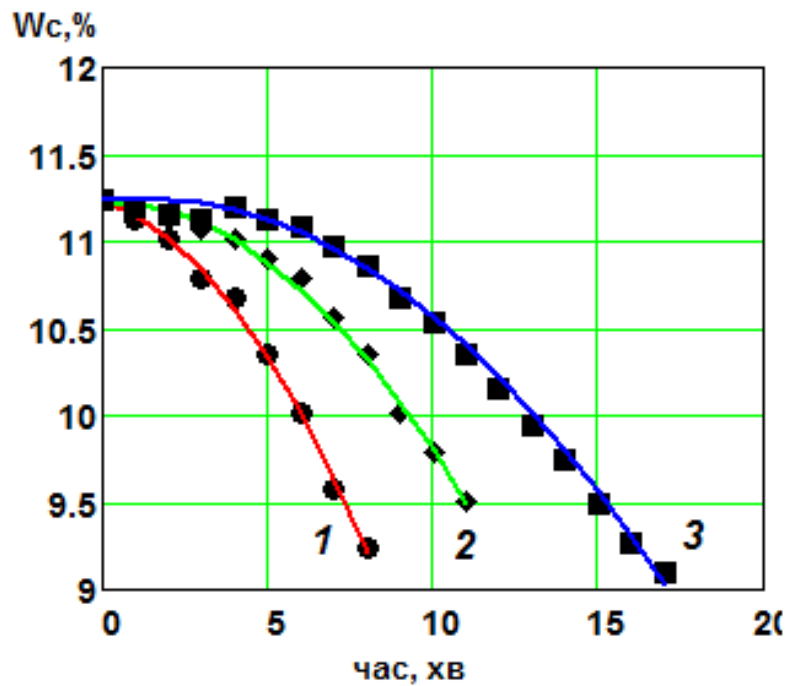


Рис. 4.36. Зміна вологості ріпака різномасних навісок при ІЧ-енергопідводі (експериментальні дані і криві поліноміальних регресій), $P=320$ Вт : 1 – 100 г; 2 – 200 г; 3 – 300 г.

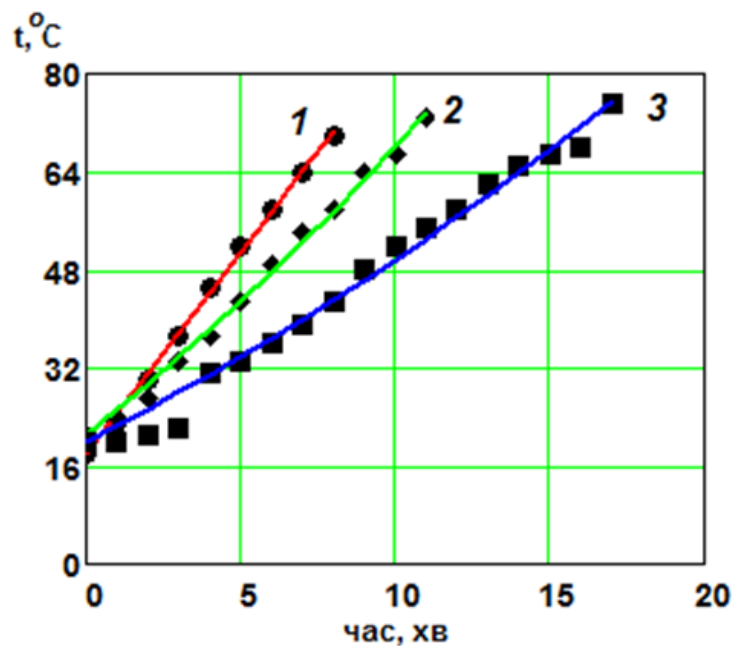


Рис. 4.37. Термограми сушінні різномасних навісок ріпаку при ІЧ-енергопідводі (експериментальні дані і криві поліноміальних регресій), $P=320$ Вт : 1 – 100 г; 2 – 200 г; 3 – 300 г.

Для визначення критерію Ребіндера експерименти проводились в періодичному режимі сушіння, а зміна

температури і маси фіксувалася в режимі реального часу, залежність зміни критерію Ребіндера від вологи матеріалу представлена на Рис. 4.38.

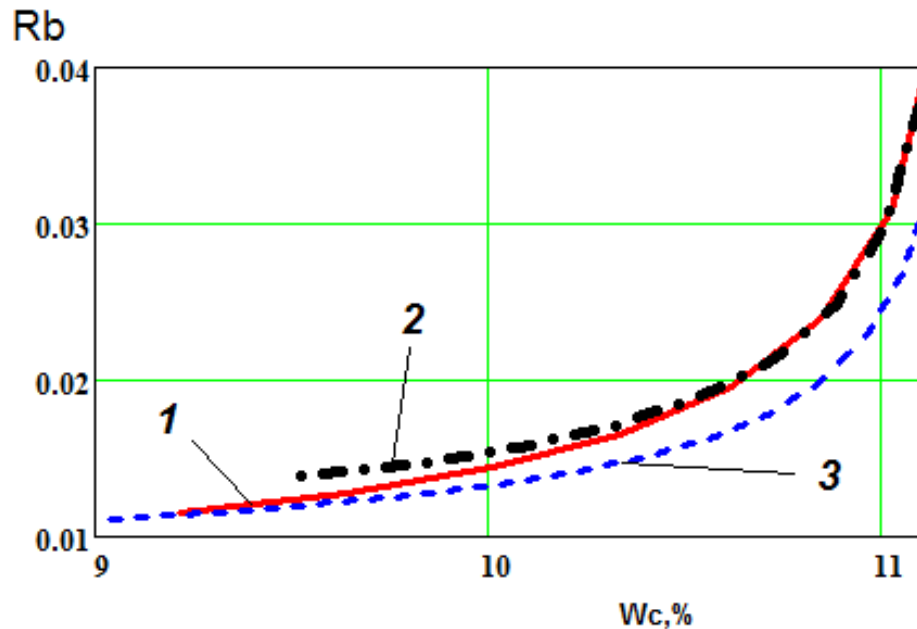


Рис. 4.38. Залежність критерію Ребіндера від вологості матеріалу, $P=320\text{Вт}$: 1 – 100г; 2 – 200 г; 3 – 300 г.

Зміна вологовмісту матеріалу в часі (крива сушіння) при роботі сушарки в безперервному режимі визначалась за методикою послідовного накладання експериментів, тобто фіксувалась зміна вологості при роботі сушарки за певний період часу.

Результати експериментів представлено графіками зміни вологості ріпаку в часі на рис. 4.39 (в рухомому шарі).

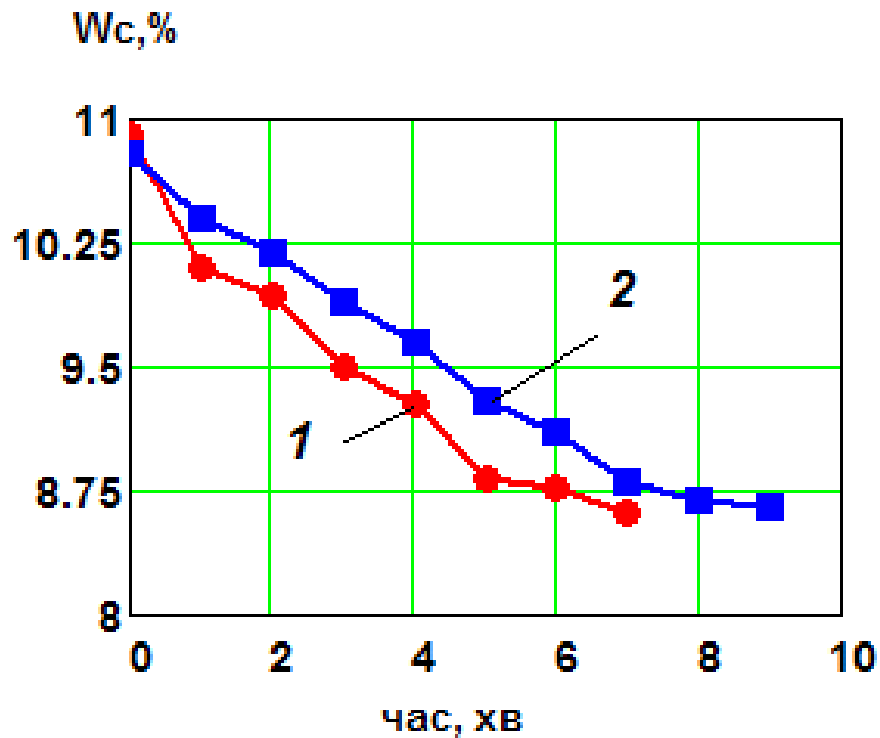


Рис. 4.39. Зміна вологості зерна в рухомому шарі:
1–P=500Вт, 2 – P=400 Вт.

Для отримання аналітичного виразу зміни вологості зерна в часі, треба мати залежність зміни температури матеріалу в часі. Підставимо вираз похідної температури зерна від координати $\frac{d\theta_3}{dy}$ з рівняння (41) у рівняння (18а), отримаємо:

$$c_3 \left(m_3 - \frac{m_{30}}{Rb} \right) \frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} + c_3 L \left(G_3 - \frac{G_{03}}{Rb} \right) F_1(y) =$$

$$= A_\lambda [\alpha_{13} F_{13}(\theta_1 - \theta_3) + \alpha_{23} F_{23}(\theta_2 - \theta_3) - \alpha'_{34} F_{34}(\theta_3 - t) - \alpha'_e F_6(\theta_3 - \theta_6) \pm c_{35} F_{35}(\theta_3 - \theta_5)] \quad (4.179)$$

Продиференціюємо рівняння (4.179):

$$\frac{dt(y)}{dy} = K_t (r_1 r_2 e^{r_2 y} - r_2 r_1 e^{r_1 y}) = F_2(y) \quad (4.180)$$

де, $K_e = \frac{t_{04} C - D_2}{C(r_1 - r_2)}$ та підставимо отриману залежність в рівняння (4.153), матимемо:

$$m_p c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \pm G_p c_p F_2(y) = \alpha'_{14} F_1(\theta_1 - t) + \alpha'_{32} F_3(\theta_3 - t) + \alpha'_{54} F_5(\theta_5 - t) + \alpha'_{24} F_4(\theta_2 - t); \quad (4.181)$$

Рівняння (4.179) і (4.181) та рівняння (4.160) і (4.161) мають однакові значення правої частини, тому використовуючи підстановку (4.162)-(4.165) отримаємо рівняння динаміки зміни параметрів $\theta_3(\tau, y)$ і $t(\tau, y)$ у такому вигляді:

$$T_1 \frac{d\theta_3}{d\tau} = t - a_1 \theta_3 + b_1(y); \quad (4.182)$$

$$T_2 \frac{dt}{d\tau} = \theta_3 - a_2 t + b_2(y); \quad (4.183)$$

де,

$$T_1 = \frac{c_3 m_3}{A_\lambda (\alpha_{13} F_{13} k_2 + \alpha_{23} F_{23} k_4 + \alpha'_{34} F_{34} - \alpha_{35} F_{35} k_6)};$$

$$T_2 = \frac{c_p m_p}{\alpha'_{14} F_1 k_1 + \alpha'_{24} F_2 k_3 + \alpha'_{34} F_3 + \alpha_{45} F_5 k_5};$$

$$b_1 = \frac{b_1 - G_3 c_3 L \cdot F_1(y)}{A_\lambda (\alpha_{13} F_{13} k_2 + \alpha_{23} F_{23} k_4 + \alpha'_{34} F_{34} - \alpha_{35} F_{35} k_6)};$$

$$b_2 = \frac{\pm G_3 c_3 L \cdot F_2(y)}{A_\lambda (\alpha_{13} F_{13} k_2 + \alpha_{23} F_{23} k_4 + \alpha'_{34} F_{34} - \alpha_{35} F_{35} k_6)}.$$

Розв'язок системи (4.182)-(4.183) аналогічний до розв'язку рівнянь (4.166), (4.167) за початкових умов: $\tau = 0$; $\theta_3 = \theta_0 = \theta_1$; $t = t_0 = t_1$; $\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau} = 0$, де θ_0 , t_0 – початкові значення температури зерна і повітря, які дорівнюють їх значенням на вході.

$$\theta_3(\tau, y) = \frac{\theta_{03} C - D_1(y)}{c(r'_1 - r'_2)} (r'_1 e^{r'_2 \tau} - r'_2 e^{r'_1 \tau}) + \frac{D_1(y)}{c}; \quad (4.184)$$

$$t(\tau, y) = \frac{\theta_{03} C - D_1(y)}{c(r'_1 - r'_2)} (r'_1 e^{r'_2 \tau} - r'_2 e^{r'_1 \tau}) + \frac{D_1(y)}{c}; \quad (4.185)$$

де, $r'_{1,2} = \frac{-B' \pm \sqrt{B'^2 - 4AC}}{2A'}$; $A' = T_1 T_2$; $B' = a_1 T_2 + a_2 T_1$; $C = (a_1 a_2 - 1)$; $D_1(y) = b_2(y) - a_2 b_1(y)$; $D_2(y) = b_1(y) - a_1 b_2(y)$.

Рівняння (4.184) і (4.185) описують зміну температури зерна і повітря в часі і за довжиною сушильної камери. Для отримання залежності зміни вологовмісту матеріалу за часом і координатою про диференціюємо рівняння (4.184) за часом:

$$\frac{d\theta_3(\tau, y)}{d\tau} = K_\tau(y) r'_1 r'_2 (e^{r'_2 \tau} - e^{r'_1 \tau}); \quad (4.186)$$

де, $K_{\tau}(y) = \frac{\theta_{03}C - D_1(y)}{C(r'_1 - r'_2)}$ і підставимо отримане значення в рівняння визначення критерію Ребіндера: $c_3(U) \frac{d\theta}{d\tau} = -Rb(U)r_0 \frac{dU}{d\tau}$, за умови $\frac{Rb(U)}{c_3(U)} = A_R e^{nU}$, проінтегрувавши рівняння (50):

$$-A_R r_0 \int_{U_1}^U e^{nU} dU = K_{\tau}(y) r'_1 r'_2 \left[\int_0^{\tau} e^{r'_2 y} d\tau - \int_0^{\tau} e^{r'_1 \tau} d\tau \right],$$

отримаємо:

$$U(\tau, y) = \frac{1}{n} \ln \left(e^{nU_1} - K_{c'}(y) \cdot \left[\frac{e^{r_2 \tau} - 1}{r_2} - \frac{e^{r_1 \tau} - 1}{r_1} \right] \right); \quad (4.187)$$

$$\text{де, } K_{c'}(y) = \frac{n \cdot K_{\tau}(y)}{A_R \cdot r_0} r'_1 r'_2.$$

Таким чином, основні динамічні характеристики режиму сушіння зернового матеріалу в безперервно діючій установці з ІЧ-енергопідведенням можна описати рівняннями (4.184) і (4.187). Які визначають розподіл температури і вологовмісту зернового матеріалу за довжиною для будь-якого моменту часу. Для визначення параметрів зернового матеріалу на виході потрібно прийняти: $y=L$. Тоді рівняння (4.184) і (4.187) будуть визначати зміну кінцевих параметрів матеріалу, тобто $U_2(\tau)$ і $\theta_2(\tau)$.

В цьому випадку аналітичну залежність можна використати для ідентифікації математичних моделей, шляхом її порівняння з експериментальними даними.

Використовуючи алгоритм Левенберга-Маркварда [13] та методику параметричної ідентифікації нагрівальних установок [14], визначено основні параметричні комплекси моделей (4.184) і (4.187), а саме, за отриманими даними розраховані зміна параметрів $U(\tau)$ і $\theta(\tau)$ процесу в часі, тобто криві кінетики нагріву і сушіння Рис. 4.40.

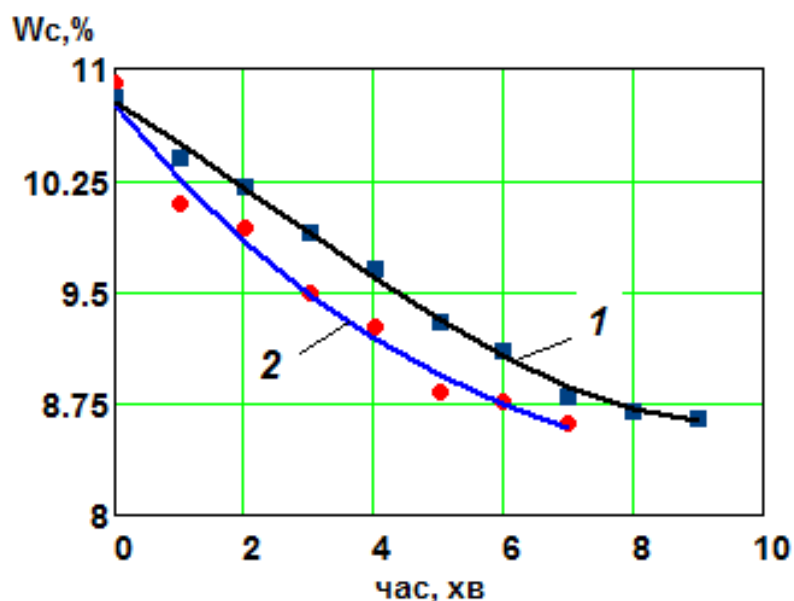


Рис. 4.40. Експериментальні дані і розрахункові криві:
1– $P=500$ Вт, 2 – $P=400$ Вт.

Аналітичний розв'язок наближеними методами балансових енергетичних і матеріальних рівнянь дозволяє за експериментальними даними визначити параметричні комплекси кінцевих залежностей.

Визначення параметричних комплексів кінцевих залежностей і використання стандартних методик обернених задач параметричної ідентифікації, дає можливість визначати коефіцієнти початкових балансових рівнянь.

4.8. Моделювання і розрахунок енергозберігаючих режимів сушіння зернових матеріалів під дією енергетичних полів

Проблема збереження якості зернових матеріалів при післязбиральній доробки і зберігання в значній мірі залежить від правильно реалізованого процесу сушіння. На даний час у агропромисловому виробництві в основному використовують затратні конвекційні зерносушарки. Основна доля непродуктивних затрат енергії приходить на нагрівання сушильного агенту, частина теплоти якого втрачається в

оточуюче середовище через робочі поверхні сушарки і з відпрацьованим теплоносієм. Радикальним способом зменшення таких витрат енергії є зменшення кількості сушильного агенту в процесі до величини необхідної для поглинання та видалення вологи із робочого об'єму сушарки і використання принципів адресної «доставки» енергії до оброблюваного матеріалу. Останні принципи успішно реалізуються шляхом використання безконтактного підведення енергії електромагнітних полів у вигляді опромінення матеріалу мікрохвильовим або інфрачервоним випромінюванням. Перспективність використання електромагнітного поля надвисокої частоти (ЕМП НВЧ) і інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) в процесах термообробки і сушіння зернових матеріалів, як самостійних джерел енергії, визначено результатами експериментальних досліджень. Але пошук комбінованих способів термообробки матеріалів в яких енергія до матеріалу підводиться тільки в кількості необхідної для досягнення конкретної дії (нагрів, видалення поверхневої або внутрішньої вологи) є досить актуальним і своєчасним.

Перспективність застосування спрямованої дії енергії на оброблюєми́й матеріал, а саме в термічних і сушильних процесах, шляхом адресного підведення енергії електромагнітного випромінювання надвисокої частоти описана в роботах [1-4]. Реалізація процесів мікрохвильового сушіння зерна в конкретних установках описана в публікаціях [5-10]. Енергетична і технологічна доцільність застосування енергії електромагнітного поля надвисокої частоти для інтенсифікації процесів сушіння обґрунтована в роботах [11-12]. Питання математичного опису і розрахунків сушильних процесів розглянуто в наукових працях [13-18]. Аналізом публікацій [10, 19, 20] доведено ефективність циклічного сушіння та імпульсної дії електромагнітного поля на матеріал. Але в теоретичному плані досліджень відсутні питання

математичного опису комбінованого-циклічного сушіння зернових матеріалів.

В загальному випадку процеси переносу теплоти і маси в капілярно-пористих тілах умовах НВЧ та ІЧ нагріву описують системою двох-трьох диференціальних рівнянь. О. Ликова в частинних похідних, розв'язок яких являє значні труднощі і в практично корисній формі може бути отримано тільки числовими методами. Оскільки труднощі розв'язку пов'язані з розподіленістю параметрів процесу при градієнтних формах переносу, використовуючи наближені зосередження параметрів переносу за об'ємом можна отримати аналітичні рішення для конкретних умов обробки продукту.

Розглядаючи сипкий (дисперсний) матеріал, що рухається або переміщується у тонкому (1–3 зернини) для якого НВЧ або ІЧ нагрів можна вважати рівномірним по об'єму зернинки можна значно спростити опис процесів нагріву і зневоднення прийнявши такі спрощуючі припущення:

- градієнти температури і вологості настільки малі, що ними можна знехтувати і розглядати середньо об'ємні значення температури $\theta_c(\tau)$ і вологості $U(\tau)$ матеріалу;
- надлишковий тиск в капілярах матеріалу зумовлений дією ЕМП є функцією температури матеріалу і враховується через температуру залежність коефіцієнту масопереносу (сушіння);
- існуючи закономірності розподілу потужності поглиненого випромінювання в товщі матеріалу, також можна осереднити за об'ємом (товщиною) вважаючи нагрів рівномірним.

За таких умов, розв'язок системи взаємопов'язаних рівнянь тепломасопереносу приводить до інтегрального рівняння тепломасообміну О. Ликова [11]:

$$q_f(\tau) = r\rho_0 R_v \frac{dU_c}{d\tau} + \rho_0 R_v C \frac{d\theta_c}{d\tau}, \quad (4.188)$$

де $R_v=V/F$ – гідравлічний радіус; V – об'єм (частки, шару); F – поверхня; ρ_0 – густина абсолютно сухого тіла; C – питома теплоємність; r – питома теплота пароутворення; θ , U – температура і вологовміст матеріалу; $q(\tau)$ – середній потік теплоти через поверхню матеріалу.

Розділивши всі члени рівняння (4.188) на R_v отримаємо:

$$q_v(\tau) = r\rho_0 \frac{d\bar{U}}{d\tau} + \rho_0 C \frac{d\bar{\theta}}{d\tau}, \quad (4.189)$$

де $q_v(\tau)$ – питома об'ємна потужність тепловиділень.

Величини $q_f(\tau)$ і $q_v(\tau)$ – визначаються відомими формулами [11, 13] для ІЧ-підведення енергії:

$$q_f(\tau) = A_\lambda \sigma_0 c_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (4.190)$$

$$q_v(\tau) = 0.555 \cdot 10^{-10} \varepsilon' f E^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (4.191)$$

де $c_{np}=(\varepsilon_1^{-1}+\varepsilon_2^{-1}-1)^{-1}$ – приведена випромінювальна здатність; ε_1 , ε_2 – ступінь чорноти поверхонь теплообміну; σ_0 – стала Стефана-Больцмана; A_λ – коефіцієнт поглинання матеріалом ІЧ-променів; ε' – діелектрична проникненість; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат; f , E – частота і напруженість електромагнітного поля.

Циклічне сушіння зернового матеріалу передбачає періодичне нагрівання зернового матеріалу мікрохвильовим джерелом з послідовним продуванням шару матеріалу повітря (з нагрівом і без нагріву). Для визначення впливу експозиції нагріву шару матеріалу і тривалості його примусового вентилявання (продування) без попереднього нагріву і нагрітим повітрям на основні характеристики сушіння (зміна температури і вологості матеріалу в процесі нагріву і продувки) та загальну тривалість процесу розглянемо періодичний режим роботи установки і безперервний.

Для всього об'єму матеріалу (в камері сушіння) процес нагріву внутрішнім джерелом потужністю P ($P=N\eta$, де N –

потужність джерел ЕМП НВЧ; η – коефіцієнт корисної дії мегатрона) при наявності теплообміну між матеріалом і нерухомим повітрям в камері рівняння теплового балансу матимуть вигляд:

$$\rho_0 V_m c_m \frac{d\theta}{d\tau} - \rho_0 r V_m \frac{dU}{d\tau} + \alpha f(\theta - t) = P, \quad (4.192)$$

$$\rho_v V_v c_v \frac{dt}{d\tau} = \alpha f(\theta - t), \quad (4.193)$$

де V_m, V_v – об'єм матеріалу і повітря в камері; c_m, c_v – теплоємність матеріалу і повітря; α – коефіцієнт теплообміну; θ, t – температура матеріалу та повітря.

Для замикання системи (4.192–4.193) рівнянь, скориставшись критерієм Ребиндера $Rb = cd\theta/dU$, отримаємо рівняння зв'язку:

$$-\frac{dU}{d\tau} = \frac{c}{rRb} \frac{d\theta}{d\tau}. \quad (4.194)$$

Підставляючи значення $dU/d\tau$ в рівняння (4.192) і розв'язуючи (4.192) і (4.193) при початкових умовах: $\tau=0, t=t_0, \theta=\theta_0$, отримаємо:

$$\theta(\tau) = \theta_0 + \frac{Q}{B}\tau - \frac{A}{B}\left(\frac{Q}{B} - T_0\right)\left(1 - e^{-\frac{B}{A}\tau}\right), \quad (4.195)$$

де $Q=P/\alpha F$; $A=(mc'm_v c_p)/(\alpha F)^2$; $B=(mc+m_v c_p)/\alpha F$; $c'=c(1+Rb^{-1})$; $T_0=(P/mc)+(\alpha F/mc)(t_0-\theta_0)$.

Рівняння описує зміну температури зернового матеріалу в процесі нагріву в ЕМП НВЧ.

Використовуючи експериментально отриману залежність [6] критерію Ребиндера від вологовмісту матеріалу: $Rb(U)=R_0 e^{aU}$ перепишемо рівняння (4.194) у вигляді:

$$R_0 e^{aU} \frac{dU}{d\tau} = \frac{c}{r} \frac{d\theta}{d\tau}.$$

Продиференціювавши залежність $\theta(\tau)$ і підставивши отримане значення в рівняння, після диференціювання в межах $U_1 \rightarrow U, 0 \rightarrow \tau$ отримаємо:

$$U(\tau) = \frac{1}{a} \ln \left[e^{aU_1} + \frac{c'a}{rR_0} \left(\frac{Q}{B}\tau + \left(\frac{Q}{B} - T_0 \right) \frac{A}{B} e^{-\frac{B}{A}\tau} \right) \right]. \quad (4.196)$$

Рівняння (4.196) описує зміну вологості матеріалу в процесі нагріву при дії ЕМП МВЧ.

В процесі вентилявання нагрітого зерна повітрям з температурою на вході в шар t_1 рівняння теплового балансу запишемо у вигляді

$$G_v c_p \eta (t_1 - \theta) = c' m \frac{d\theta}{d\tau}, \quad (4.197)$$

де $\eta = (t_1 - t_2) / (t_1 - \theta) = 1 - \exp(-\alpha F / G_v c_p)$; t_1, t_2 – температура на вході і виході шару зернового матеріалу.

Зміна вологовмісту за формулою О. Ликова:

$$-\frac{dU}{d\tau} = k(\theta)(U - U_p). \quad (4.198)$$

Розв'язок рівняння (9) за початкової умови: $\tau=0, \theta=\theta_0$, матиме вигляд:

$$\theta(\tau) = t_1 + (\theta_0 - t_1)e^{-\frac{\tau}{T}}, \quad (4.199)$$

де $T = c' m / G_v c_p \eta$.

Використовуючи лінійну апроксимацію залежності коефіцієнта сушіння від температури: $k(\theta) = k_1 \theta$ з рівнянь (4.198) і (4.199) отримаємо:

$$\frac{dU}{d\tau} = k_1 \left[t_1 + (\theta_0 - t_1)e^{-\frac{\tau}{T}} \right] d\tau. \quad (4.200)$$

Інтегруючи за умов: $\tau=0, U=U_0$ після перетворень матимемо:

$$U(\tau) = U_p + (U_1 - U_p) \exp \left(k_1 t_1 \tau - (\theta_0 - t_1) T e^{-\frac{\tau}{T}} \right). \quad (4.201)$$

Рівняння (4.201) описує зміне вологовмісту нагрітого зерна в процесі вентилявання.

Для безперервного процесу використовують рівняння (4.194, 4.196) і (4.199, 4.201) заміною $\tau = xV^{-1}$ (де V – швидкість переміщення матеріалу; x – координата напрямку руху

матеріалу). При зональному методі розрахунку в рівняннях заміняють $\Delta T_i = \Delta x_i V^{-1}$.

Отримані рівняння зміни в часі параметрів зернового матеріалу при нагріванні в ЕМП НВЧ і при вентиляванні зерна не підігрітим повітрям дозволяють розрахувати процес циклічного сушіння за такою схемою (рис. 4.41.).

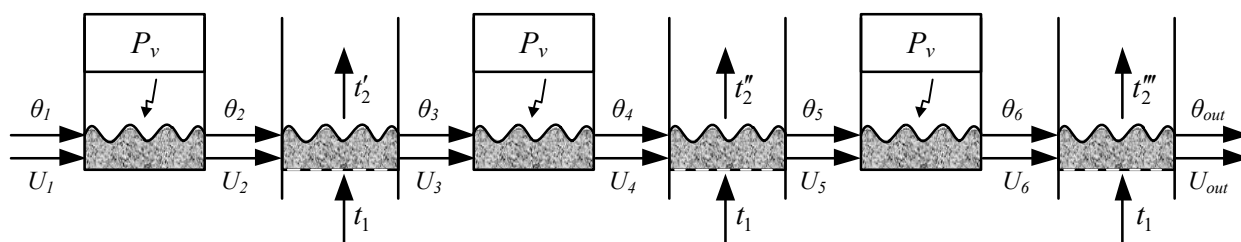


Рис. 4.41. Схема розрахунку циклічного сушіння зернового матеріалу

При використанні нагріву вологого матеріалу ІЧ випромінюванням в рівнянні (4.192) величину потужності внутрішнього джерела визначимо формулою (4.191) і перепишемо його у вигляді:

$$A_{\lambda} c'_{np} 10^{-8} (T_1^4 - T_2^4) F_w = m_m c_m \frac{d\theta}{d\tau} - m_{m0} r \frac{dU}{d\tau} + \alpha f (\theta - t).$$

Для отримання аналітичного розв'язку системи (4.191)–(4.192) лінеаризуємо складову лівої частини рівняння використовуючи [13] лінійний коефіцієнт теплообміну випромінюванням:

$$\alpha_l = c'_{np} 10^{-8} (T_1^2 + T_2^2) + (T_1 + T_2),$$

і відповідно заміну:

$$A_{\lambda} c'_{np} 10^{-8} (T_1^4 - T_2^4) F_w = \alpha_l F_w (\theta_w - \theta),$$

де $T_1 = 273 + \theta_w$, $T_2 = 273 + \theta$; θ_w – температура нагріву випромінювача у сталому режимі (після розігріву).

Запишемо рівняння кінетики нагрівання матеріалу і повітряного середовища камери у вигляді системи:

$$T_1 \frac{d\theta}{d\tau} + a_1 \theta - b_1 = t, \quad (4.201)$$

$$T_2 \frac{dt}{d\tau} + a_2 t - b_2 = \theta, \quad (4.202)$$

де $T_1 = \frac{m_m c_m}{\alpha F + \alpha_l F_w}$; $T_2 = \frac{m_p c_p}{\alpha F}$; $a_1 = \frac{\alpha F + \alpha_l F_w}{\alpha F}$; $b_1 = \frac{\alpha_l F_w}{\alpha F} \theta_w$; $a_2 = \frac{KF_0 + \alpha F}{\alpha F}$; $b_2 = \frac{KF_0}{\alpha F} t_0$.

Поєднуючи рівняння (4.201) і (4.202) в одне, тобто розв'язуючи систему відносно $\theta(\tau)$ і $t(\tau)$ матимемо два рівняння:

$$A \frac{d^2 \theta}{d\tau^2} + B \frac{d\theta}{d\tau} + C \theta = D_1, \quad (4.203)$$

$$A \frac{d^2 t}{d\tau^2} + B \frac{dt}{d\tau} + C t = D_2, \quad (4.204)$$

де $A = T_1 T_2$; $B = T_1 a_2 + T_2 a_1$; $C = (a_1 a_2 - 1)$; $D_1 = b_2 + a_2 b_1$; $D_2 = b_1 + a_1 b_2$.

Розв'язуючи диференціальні неординарні рівняння (4.203) і (4.204) за початкових умов: $\tau = 0$; $\theta = \theta_0$; $t = t_0$, матимемо після перетворень:

$$\theta(\tau) = \frac{C\theta_0 - D_1}{C(r_1 - r_2)} [r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}] + \frac{D_1}{C}, \quad (4.205)$$

$$t(\tau) = \frac{Ct_0 - D_2}{C(r_1 - r_2)} [r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}] + \frac{D_2}{C}. \quad (4.206)$$

Використовуючи апроксимацію експериментальної залежності критерію Ребіндера від вологості $Rb'(U)$ рівняння (6а), і похідну від $d\theta(\tau)/d\tau$ (4.205):

$$\frac{d\theta(\tau)}{d\tau} = K_1 r_1 r_2 (e^{r_2 \tau} - e^{r_1 \tau}),$$

отримаємо рівняння кінетики сушіння:

$$-R'_0 e^{a_1 U} \frac{dU}{d\tau} = K_1 r_1 r_2 (e^{r_2 \tau} - e^{r_1 \tau}). \quad (4.206)$$

де $K_1 = \frac{C\theta_0 - D_1}{C(r_1 - r_2)}$.

Розв'язок рівняння (4.206) за початкових умов: $\tau = 0$; $U = U_0$:

$$U(\tau) = \frac{1}{a_1} \ln \frac{a_1}{R_0} \left[\frac{R_0}{a_1} e^{a_1 U_0} - K_1 r_2 (1 - e^{r_1 \tau}) + K_1 r_1 (1 - e^{r_2 \tau}) \right]. \quad (4.207)$$

Рівняння (4.207) визначає зміну вологовмісту матеріалу при ІЧ опромінюванні з температурою випромінювача $\theta_w = const$ в повітряному середовищі з температурою $t = const$.

Зміна температури і вологовмісту матеріалу при вентиляванні нагрітого зерна визначається за рівняннями (4.197) і (4.199).

Алгоритм для розрахунку процесу циклічного сушіння складається з послідовного розрахунку кривих нагріву і зневоднення за формулами (4.193, 4.194) для мікрохвильового опромінення, та за формулами (4.197, 4.199) розраховують зміну температури матеріалу і його вологовмісту в режимі вентилявання шару матеріалу. При цьому початковими (вхідними) значеннями параметрів $\theta_1(x)$ і $U_1(x)$ для кожної наступної зони будуть кінцеві параметри $\theta_2(x)$ і $U_2(x)$ попередньої зони. Так наприклад, для першої зони мікрохвильового нагріву в напрямку руху шару зерна справедливі формули (4.193) і (4.194), які в прийнятих на схемі (Рис. 4.41) позначеннях записуються в такому вигляді (при $0 \leq x \leq L_1$, $x = L_1$, $\theta_1(x) = \theta_2$, $u_1(x) = u_2$):

$$\theta_1(x) = \theta_1 + \frac{Q}{Bv}x - \frac{A}{B}\left(\frac{Q}{B} - T_1\right)\left(1 - e^{-\frac{B}{vA}x}\right), \quad (4.207)$$

$$u_1(x) = \frac{1}{a} \ln \left[e^{au_1} + \frac{c'a}{rR_0} \left(\frac{Q}{Bv}x + \left(\frac{Q}{B} - T_1 \right) \frac{A}{B} e^{-\frac{B}{Av}x} \right) \right]. \quad (4.208)$$

Для наступної першої зони вентилявання (фільтрації повітря) рівняння кінетики нагріву і зневоднення записуються у вигляді (при $0 \leq x \leq L_2$, $x = L_2$, $\theta'_1(x) = \theta_3$, $u'_1(x) = u_3$):

$$\theta'_1(x) = t_1 + (\theta_2 - t_1)e^{-\frac{1}{vT}x}, \quad (4.209)$$

$$u'_1(x) = u_p + (u_2 - u_p) \exp \left(k_1 t_1 x v^{-1} - (\theta_2 - t_1) e^{-\frac{1}{vT}x} \right). \quad (4.210)$$

Для другої зони мікрохвильового нагріву (при $0 \leq x \leq L_1$, $x = L_1$, $\theta_3(x) = \theta_4$, $u_3(x) = u_4$):

$$\theta_2(x) = \theta_3 + \frac{Q}{Bv}x - \frac{A}{B}\left(\frac{Q}{B} - \theta_3\right)\left(1 - e^{-\frac{B}{vA}x}\right), \quad (4.211)$$

$$u_2(x) = \frac{1}{a} \ln \left[e^{au_3} + \frac{c'a}{rR_0} \left(\frac{Q}{Bv}x + \left(\frac{Q}{B} - \theta_3 \right) \frac{A}{B} e^{-\frac{B}{Av}x} \right) \right]. \quad (4.212)$$

Для другої зони вентиляювання (при $0 \leq x \leq L_2$, $x = L_2$, $\theta'_2(x) = \theta_5$, $u'_2(x) = u_5$):

$$\theta'_2(x) = t_1 + (\theta_4 - t_1)e^{-\frac{1}{vT}x}, \quad (4.213)$$

$$u'_2(x) = u_p + (u_4 - u_p) \exp\left(k_1 t_1 x v^{-1} - (\theta_4 - t_1)e^{-\frac{1}{vT}x}\right). \quad (4.214)$$

Для третьої зони мікрохвильового нагріву (при $0 \leq x \leq L_1$, $x = L_1$, $\theta_3(x) = \theta_6$, $u_3(x) = u_6$):

$$\theta_3(x) = \theta_5 + \frac{Q}{Bv}x - \frac{A}{B}\left(\frac{Q}{B} - \theta_5\right)\left(1 - e^{-\frac{B}{vA}x}\right), \quad (4.215)$$

$$u_3(x) = \frac{1}{a} \ln \left[e^{au_4} + \frac{c'a}{rR_0} \left(\frac{Q}{Bv}x + \left(\frac{Q}{B} - \theta_5 \right) \frac{A}{B} e^{-\frac{B}{Av}x} \right) \right]. \quad (4.216)$$

Для третьої зони вентиляювання (при $0 \leq x \leq L_2$, $x = L_2$, $\theta'_3(x) = \theta_{out}$, $u'_2(x) = u_{out}$):

$$\theta'_3(x) = t_1 + (\theta_6 - t_1)e^{-\frac{1}{vT}x}, \quad (4.217)$$

$$u'_3(x) = u_p + (u_6 - u_p) \exp\left(k_1 t_1 x v^{-1} - (\theta_4 - t_1)e^{-\frac{1}{vT}x}\right). \quad (4.218)$$

де θ_{out}, u_{out} – кінцеві значення температури і вологовмісту матеріалу.

На рис. 4.42, рис. 4.43 наведено графічні залежності зміни параметрів процесу циклічного сушіння.

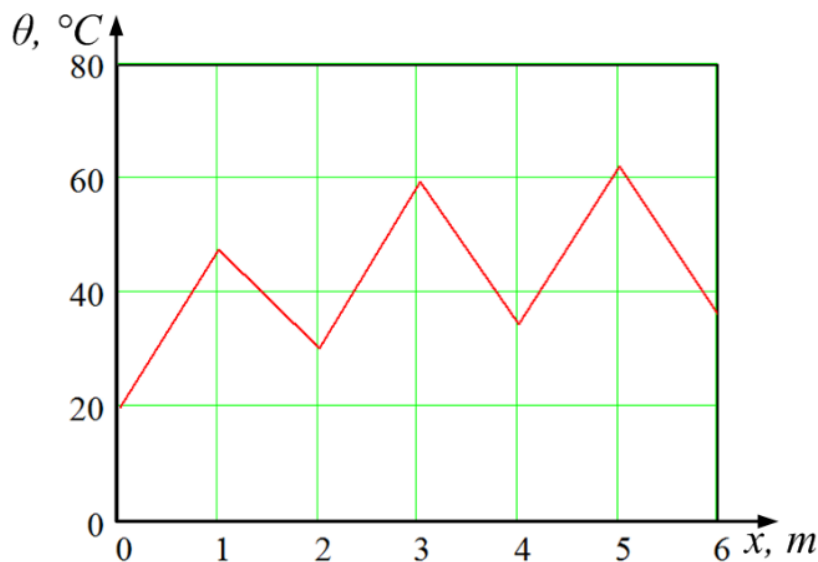


Рис. 4.42. Зміна температури зерна при циклічному сушінні нагрів в мікрохвильовому полі потужністю 400 Вт (маса 0.12 кг) і вентиляювання повітрям 21 °С.



Рис. 4.43. Зміна вологовмісту зерна в процесі циклічного сушіння.

В результаті проведених теоретичних досліджень сформульована математична модель сушіння матеріалу у циклічному режимі та спрощені формули для розрахунку процесів нагріву і сушіння з використанням НВЧ-нагріву і ІЧ-нагріву. Алгоритм загального розрахунку процесу циклічного сушіння дозволяє визначити раціональні режими проведення процесу, які забезпечують мінімізацію витрат енергії.

4.9. Математичне моделювання та ідентифікація тепломасопереносу в рослинному дисперсному матеріалі при сушінні і нагріванні електромагнітним полем надвисокої частоти

В системі заходів, які забезпечують тривале збереження врожаю зернових і олійних культур, важливе місце займає сушіння. До процесу сушіння і зерносушильних установок на сучасному етапі висуваються нові вимоги підвищення якості продукту, що висушується, енерго- і ресурсоекономічності та екологічності проведення процесу сушіння.

Найбільш розповсюджені зерносушильні установки з конвективний підведенням теплоти до матеріалу мають

коефіцієнт корисної дії (тепловий) порядку 39-42%, а можливості інтенсифікації обмежені технологічними (температура нагріву матеріалу) і енергетичними (збільшення питомих витрат сушильного агента вимогами до технічних засобів. Покращення складної ситуації, що склалася в питаннях подальшого вдосконалення сушильного парку зерно продукуючих господарств може бути досягнуто застосуванням принципів адресного підведення енергії безпосередньо до матеріалу без проміжних теплоносіїв або ж у комбінації з ними.

Одним із таких напрямків інтенсифікації процесу сушіння є використання електромагнітного поля надвисокої частоти (ЕМП НВЧ) – мікрохвильове підведення енергії (мікрохвильовий нагрів). Цей спосіб забезпечує рівномірний об'ємний нагрів зернового матеріалу з утворенням декількох градієнтів переносу, що мають одно направлену спрямованість, що суттєво інтенсифікує видалення вологи. Однак обмежує застосування даного методу висока вартість обладнання, що його реалізує і невисока потужність високочастотних установок. Тому суттєвого ефекту можна очікувати при комбінованих методах використання ЕМП НВЧ в спеціалізованих сушильних установках, наприклад, для сушіння насіннєвого матеріалу.

Враховуючи, що специфіка мікрохвильового сушіння вивчена недостатньо, то успішне застосування моделювання процесів тепло- і масопереносу в сушильних процесах із застосуванням ЕМП НВЧ може сприяти вибору раціональної технології і впровадженню перспективної техніки.

В технічній літературі [1-5] і наукових публікаціях останніх років [6-7], наведено достатньо даних, щодо особливостей теплових і масо переносних процесів у електромагнітному полі НВЧ [8,9], математичного опису процесів нагріву і сушіння [10-12] харчових продуктів і сільськогосподарських матеріалів. Особливості моделювання процесів сушіння і конкретні моделі

подано в статтях [10, 16]. Приклади практичної реалізації сушіння в ЕМП НВЧ розглянуто в роботах [13-15].

Аналіз результатів наведених досліджень дозволяє відмітити наступне. Особливості тепломасопереносу в матеріалі при НВЧ-нагріванні досить детально розглянуто у фундаментальній праці О.В.Ликова [16]. На основі феноменологічних законів переносу енергії і маси сформульована повна система диференціальних рівнянь тепломасопереносу в капілярно-пористому тілі у вигляді:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \nabla^2 \theta + \frac{\varepsilon}{c \cdot r} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{q_V}{c \cdot \rho_0}; \quad (4.219)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 U + a_m \delta \cdot \nabla^2 \theta + \varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (4.220)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \nabla^2 P + \frac{\varepsilon}{c_B} \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (4.221)$$

де, θ , U , P – температура, вологовміст матеріалу, тиск парогазової суміші в капіляра, відповідно; a , a_m – коефіцієнти температуропровідності і масо провідності (дифузії); δ – термоградієнтний коефіцієнт; ε – коефіцієнт фазового перетворення; a_p – коефіцієнт фільтраційного переносу; c – питома теплоємність матеріалу; c_B – ємність тіла у відношенні до вологого повітря, ρ_0 – густина сухого матеріалу.

Величина q_V – визначає теплову потужність, що виділяється в одиниці об'єму матеріалу:

$$q_V = 0.555 \cdot E^2 f \cdot \varepsilon'' \cdot \operatorname{tg} \rho \cdot 10^{-6}, \quad (4.222)$$

де, E – напруженість електромагнітного поля; f – частота; ε'' – діелектрична проникність середовища, $\operatorname{tg} \rho$ – тангенс діелектричних втрат.

Система диференціальних рівнянь (4.219)-(4.221) з відповідними коефіцієнтами для кожного варіанту процесу, описує нестационарний тепломасоперенос при дії електромагнітного поля і враховує усі діючі в тілі потенціали переносу і рушійні сили. Але розв'язок даної системи рівнянь для форми тіл з простою геометрією у практично корисній

формі може бути отриманий числовими методами для конкретних умов НВЧ-нагріву. Тому бажано мати наближені аналітичні розв'язки, які матимуть практичну цінність для розрахунку процесів сушіння і установок для їх реалізації.

В роботах [1, 10] на основі гіпотези про одночасну дію декількох процесів, в капілярно пористому тілі, які характеризуються конкретними значеннями рухомих сил і потенціалів, до системи рівнянь О.В.Ликова (4.219)-(4.221) додано, ще два рівняння переносу вологи в тілі. Аналізуючи складові рівняння, в роботі [10] визначено проблематичність використання такої моделі і пропонується перейти до моделі у критеріальній формі використавши дані експериментів, що призводить до втрати узагальнюючого характеру аналітичного опису.

В роботах [11, 12] математична модель представлена рівняннями теплового балансу для твердого матеріалу і газу, які описують нагрівання середовища додатковими джерелами теплоти потужність яких змінюється за координатою. Процес волого видалення пропонується визначати експериментально.

В роботі [9] нагрів матеріалу описано рівнянням Фур'є з додатковим джерелом (рівняння (4.219)), яке визначає кількість теплоти на випаровування вологи. Процес масопереносу також аналітичного рішення не має.

Таким чином відсутність аналітичних (і навіть спрощених) залежностей параметрів процесу від дії електромагнітного поля поки не дають можливості порівняння характеристики процесу і аналізу можливостей застосування.

При математичному моделюванні процесу сушіння дисперсних матеріалів з підведенням енергії електромагнітним полем НВЧ доцільно декомпонувати (поділити задачу) на два рівні [3]: мікрокінетичний – опис кінетики сушіння одиничних частинок, бажано з простою геометричною формою (пластина, куля, циліндр) і макрокінетичний – опис процесу сушіння матеріалу в робочому об'ємі сушильної установки.

Найбільш обґрунтовано реалізувати мікрокінетичний рівень опису кінетики сушіння одиничних частинок на основі системи взаємопов'язаних диференціальних рівнянь тепломасопереносу О.В.Ликова (4.219)-(4.221). Враховуючи, що найбільші труднощі при розрахунках макрокінетики сушіння за даною моделлю, є задання числових значень коефіцієнтів при частинних похідних, які, як відомо, змінюються в часі і за координатою частинки (або елементарного об'єму). Для подолання цих труднощів і отримання аналітичних (наближених) кінетичних залежностей які можна ідентифікувати за даними експериментів зробимо такі припущення спрощуючи систему (4.219)-(4.221), на основі наступних міркувань:

1) На основі даних експериментів узагальнених в роботах [5, 16], можна вважати, що процес термодифузії незначно впливає на швидкість масопереносу в капілярно пористому тілі і тому другим членом рівняння (4.220) можна знехтувати;

2) Надлишковий тиск у тілі в процесі НВЧ нагріву за даними експериментів [5] мало змінюється за об'ємом тіла, а більше залежить від інтенсивного фазового переходу рідина-пара, тому в рівнянні (4.221) перший член правої частини можна не враховувати;

3) Критерій фазового переходу ε зв'язаний з критерієм термомеханічного «втягнення» з капілярів матеріалу речовини в рідкій фазі (при високо інтенсивному нагріві ЕМП [18]), критерієм пароутворення ε (при звичайному режимі) визначається із співвідношення: $\varepsilon = \varepsilon' / (1 - \chi)$, де χ – критерій термомеханічного видалення рідини. Використання ε' дає змогу врахувати вологу, що видаляється з частинки в рідкому стані (без перетворення в пару);

4) Кількість теплоти, що витрачається на пароутворення в пару $r\Delta U$ і кількість теплоти на нагрів рідкої води до температури випаровування $c\Delta\theta$, можна оцінити

критерієм Ребіндера - $Rb = c_w d\theta / r dU$, або критерієм Косовича - $Ko = r dU / c_w d\theta$, де величина c_w є теплоємність вологи в матеріалі; в даному випадку швидкість зміни вологовмісту матеріалу буде пропорційна зміні температури матеріалу:

$$-\frac{dU}{d\tau} = \frac{c_w}{rRb} \frac{d\theta}{d\tau} \quad (4.223)$$

І використовуючи співвідношення (4.223) можна зменшити кількість невідомих у рівнянні (4.218).

Використовуючи співвідношення (4.223) з урахуванням зроблених припущень система рівнянь (4.218)-(4.221) набуває вигляду у одновірному просторі:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_{ef} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{q_v}{c_{ef} \rho_0}; \quad (4.223)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a' \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial U}{\partial x} \right); \quad (4.224)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = -\frac{\varepsilon}{c_B} \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (4.225)$$

де $a_{ef} = \frac{\lambda}{c_{ef} \rho}$, $c_{ef} = c_w \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon'}{Rb} \right)$, $a' = \frac{a_m}{1-\varepsilon}$ еквівалентні

коефіцієнти, що враховують вплив перемносу маси в рідкій і паровій фазах, Γ – коефіцієнт форми ($\Gamma=0$; 1; 2 – для пластини, кулі і циліндра, відповідно).

В отриманій моделі тепло- і масопереносу в процесі сушіння в ЕМП НВЧ рівняння (4.223) і (4.224) можна розв'язувати окремо і їх розв'язок відомий [17, 19] при визначених граничних і початкових умовах.

Рівняння (4.225) може бути розв'язане використовуючи розв'язок рівняння (4.224) для $\bar{U}(\tau)$.

Рівняння теплопередачі (4.223) враховує дію внутрішнього тепловиділення Q_v і непрямым шляхом враховує масоперенос (дифузійну складову).

Але рівняння (4.224) враховує дію внутрішнього джерела теплоти, що генерується ЕМП НВЧ тільки через еквівалентний коефіцієнт масопереносу (внутрішньої дифузії). Тому для визначення і врахування впливу внутрішнього тепловиділення розглянемо тепловий баланс частинки. Теплова енергія

внутрішнього джерела тепловиділення витрачається на нагрівання вологи в тілі до температури перетворення її в пару і на випаровування всередині капілярів [16], що можна кількісно визначити з рівняння:

$$d\tau \cdot q_V = m_w c_w d\theta + r m_0 dU. \quad (4.226)$$

Використовуючи критерій Ребіндера і очевидне співвідношення $\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{rRb}{c_w} \frac{dU}{d\tau}$ з рівняння (4.226) отримаємо:

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{q_V}{r(m_w Rb + m_0)}. \quad (4.227)$$

Підставляючи отримане значення $\frac{dU}{d\tau}$ в рівняння (4.219), з урахуванням припущень (першого) матимемо:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + Q_m, \quad (4.228)$$

де $Q_m = \frac{q_V \cdot \varepsilon}{r(m_w Rb + m_0)}$ інтенсивність пароутворення під дією ЕМП.

Отримане рівняння враховує вплив ЕМП НВЧ на інтенсивність зменшення вологовмісту (швидкості сушіння).

Оскільки сушіння зернового матеріалу ЕМП НВЧ відбувається, як правило, при контакті з повітряним середовищем, тобто має місце конвективний теплообмін і масообмін то граничними умовами для розв'язку рівняння (4.223) і (4.228) будуть умови III роду. Крайові умови для тіла у вигляді кулі сформулюються так:

$$\begin{aligned} \theta(r, 0) &= \theta_0; & \frac{\partial \theta(0, \tau)}{\partial r} &= 0; & \theta(0, \tau) &\neq \infty; \\ -\frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial r} + \frac{\alpha_{ef}}{\lambda} [t - \theta(R, \tau)] &= 0 \end{aligned} \quad (4.229)$$

де, θ_0 – початкове значення температури тіла, $\alpha_{ef} = \alpha \frac{Rb + \varepsilon}{Rb + 1}$ еквівалентний коефіцієнт теплообміну, що враховує масоперенос, R, r – радіус кулі і поточна координата, t – температура оточуючого середовища.

Середнє значення температури частинки за об'ємом визначається інтегруванням розподілу температури отриманого розв'язком рівняння (6) при крайових умовах (4.229), визначеного у [18], обмеживши розв'язок одним членом ряду запишеться у вигляді:

$$\frac{\theta(\tau) - \theta_0}{t_c - \theta_0} = 1 + \frac{Po}{15} \left(1 + \frac{5}{Bi}\right) - \left(1 + \frac{Po}{\mu_1^2}\right) \cdot B_1 \cdot \exp\left(-\mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2} \tau\right) \quad (4.230)$$

де, $Po = \frac{q_V R^2}{\lambda \cdot (t_c - \theta_0)}$ – критерій Померанцева; $Bi = \frac{\alpha_{ef}}{\lambda} R$ – критерій Біо; μ – корінь характеристичного рівняння $\mu = -(Bi - 1) \cdot tg \mu$; $B_1 = \frac{6 \cdot Bi^2}{\mu_1^2 (\mu_1^2 + Bi^2 - Bi)}$.

Продиференціювавши рівняння (4.230) за часом матимемо:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2} (t_c - \theta_0) \left(1 + \frac{Po}{\mu_1^2}\right) B_1 \exp\left(-\mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2} \tau\right), \quad (4.231)$$

З рівнянь (4.230) і (4.231) отримаємо:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2} (t_c - \theta) + \frac{Po \cdot \mu_1^2 \cdot a_{ef} \cdot (t_c - \theta_0)}{15 \cdot R^2} \quad (4.232)$$

або розкриваючи критерій Po , матимемо:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = K_T (t_c - \theta) + Q_V \quad (4.233)$$

де, $K_T = \mu_1^2 \frac{a_{ef}}{R^2}$; $Q_V = q_V \cdot \mu_1^2 \cdot \frac{a_{ef}}{\lambda}$.

В діапазоні зміни коефіцієнта теплообміну $\alpha = 5-95$ Вт/м²·К величину μ_1^2 можна визначити за формулою $\mu_1^2 = 2.53 Bi$.

Оскільки рівняння (4.227) за структурою аналогічне рівнянню (4.223), а крайові умови ідентичні:

$$\begin{aligned} U(r, 0) &= U_0; & \frac{\partial U(0, \tau)}{\partial r} &= 0; & U(0, \tau) &\neq \infty; \\ -\frac{\partial U(R, \tau)}{\partial r} + \frac{\beta}{a_m} [U(R, \tau) - U_p] &= 0 \end{aligned} \quad (4.234)$$

де U_p – рівноважний вологовміст частинки.

Розв'язок рівняння (4.228) за умов (4.234) (з використанням попередніх перетворень) запишемо у вигляді:

$$-\frac{dU}{d\tau} = K_C(U - U_p) + Q_m; \quad (4.235)$$

$$\text{де, } K_C = a_1 \cdot Bi_m \frac{a_m}{R^2} = a_1 \frac{\beta}{R}, \quad Q_m = \frac{q_V \cdot \varepsilon \cdot a_1 \cdot Bi_m}{15 \cdot r \cdot (m_w R b + m_0)} \left(1 + \frac{5}{Bi_m}\right).$$

Таким чином отримані рівняння (4.233) і (4.235) описують зміну температури і вологовмісту частинки у формі кулі, тобто кінетику нагріву і сушіння частинки зернового матеріалу в ЕМП НВЧ.

Залежності $\theta(\tau)$ і $U(\tau)$ можна використовувати для розрахунку процесів сушіння дисперсних матеріалів в ЕМП НВЧ в періодичному режимі при постійних параметрах оточуючого середовища ($t_c = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$).

Інтегруванням рівнянь (4.233) і (4.235) за початкових умов: $\tau=0$; $\theta(0) = \theta_0$; $U(0) = U_0$ отримаємо:

$$\bar{\theta}(\tau) = B - (B - \theta_0) \exp(-K_T \tau); \quad (4.236)$$

$$\bar{U}(\tau) = A - (A - U_0) \exp(-K_C \tau); \quad (4.237)$$

$$\text{де, } B = t_c + \frac{q_V}{K_T}; \quad A = U_p - \frac{Q_m}{K_C}.$$

Для ідентифікації дослідних даних кінетики нагріву і сушіння матеріалу за допомогою рівнянь (4.236) і (4.237) необхідно визначити константи процесів K_T , K_C , q_v , Q_m і відповідно до їх значень критерії Bi та Rb , і коефіцієнти a , a_m , β , α . Найбільш простим експериментальним дослідженням є періодичний процес, тобто експериментальне визначення кривих сушіння і нагріву матеріалу в нерухомому «елементарному» шарі при встановлених параметрах середовища в якому знаходиться матеріал. В кожному рівнянні дві невідомі K і Q , тому достатньо дві точки з кожного досліді: $\theta_1(\tau_1)$ і $\theta_2(\tau_2)$. Підставивши ці значення у (4.236) отримаємо два рівняння з яких обраховують величини K_T , Q_v та їхні складові q_V , α_{ef} , Bi . Аналогічно з кривих сушіння і для рівняння (4.237).

При розгляданні моделювання сушильного процесу на рівні макрокінетики в діючій установці безперервної дії врахуємо переміщення матеріалу і сушильного агента, тобто розглянемо процес при змінних параметрах в часі і за координатою.

Розкриваючи повні диференціали: $d\theta = \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx$, $dU = \frac{\partial U}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial U}{\partial x} dx$ і враховуючи, що $\frac{dx}{d\tau} = v$ (v – швидкість переміщення матеріалу) перепишемо рівняння (16) у вигляді:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial x} = K_T(t - \theta) + Q_V. \quad (4.238)$$

Оскільки величина температури сушильного агента t є змінною величиною: $t = t(x, t)$ запишемо рівняння теплового балансу:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v_p \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\alpha \cdot f}{m_p c_p} (\theta - t) - \frac{K \cdot F}{m_p c_p} (t - t_{o.c.}); \quad (4.239)$$

де, f, F – поверхня матеріалу і корпусу сушильної камери; K – коефіцієнт теплопередачі крізь стінки камери; v_z, v_p – швидкості матеріалу і теплоносія; c_p – питома теплоємність повітря; $t_{o.c.}$ – температура оточуючого середовища.

Оскільки розв'язок системи взаємопов'язаних рівнянь (4.238) і (4.239) в аналітичному вигляді вкрай утруднений розглянемо два етапи процесу стаціонарний режим і перехідний. Дослідження перехідного процесу необхідне для синтезу САК сушильної установки.

Як відомо у стаціонарному режимі параметри середовищ в кожній точці сушильного об'єму в часі не змінюються, тобто $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$. Другий член правої частини рівняння (4.239) визначає втрати теплоти установкою в оточуюче середовище.

Стаціонарний температурний режим сушильної установки описується системою диференціальних рівнянь представлених у такому вигляді:

$$\begin{cases} T_1 \frac{d\theta}{dx} + \theta - b_1 = t \\ T_2 \frac{dt}{dx} + a_2 t - b_2 = \theta \end{cases} \quad (4.240)$$

Для розв'язку системи диференціальних рівнянь (4.240) методом виключення змінної перетворимо систему (4.240) до вигляду:

$$A \frac{d^2\theta}{dx^2} + B \frac{d\theta}{dx} + C\theta = D_1 \quad (4.241)$$

$$\frac{d^2t}{dx^2} + B \frac{dt}{dx} + Ct = D_2 \quad (4.242)$$

Розв'язуючи неоднорідні диференціальні рівняння (4.241) і (4.242) за граничних умов: $x = 0$; $\theta(0) = \theta_1$; $t(0) = t_1$ (де θ_1 і t_1 значення температур зерна і теплоносія на вході в сушильну камеру при проточному русі потоків), матимемо:

$$\theta(x) = \frac{C \cdot \theta_1 - D_1}{C \cdot (r_1 - r_2)} (r_1 \cdot \exp(r_2 x) - r_2 \cdot \exp(r_1 x)) + \frac{D_1}{C}; \quad (4.243)$$

$$t(x) = \frac{C \cdot t_1 - D_2}{C \cdot (r_1 - r_2)} (r_1 \cdot \exp(r_2 x) - r_2 \cdot \exp(r_1 x)) + \frac{D_2}{C}; \quad (4.244)$$

де $r_1, r_2 = \frac{-B \pm \sqrt{4B^2 - 4AC}}{2A}$ корені характеристичного рівняння.

Отримані рівняння описують розподіл температури матеріалу і сушильного агента вздовж сушильного тракту (незалежно від способу переміщення).

Для визначення зміни вологовмісту матеріалу за довжиною камери в напрямку руху в залежності від температурного режиму (розподіленого за координатою) складемо рівняння теплового балансу:

$$G_p c_p L \frac{dt}{dx} = G_z c_z L \frac{d\theta}{dx} - G_0 r_0 L \frac{dU}{dx}; \quad (4.245)$$

де, G_p , G_z , G_0 – масові витрати сушильного агента, матеріалу, випареної води, L – довжина сушильної камери в напрямку руху.

Продиференціювавши за координатою рівняння (4.243) і (4.244) та підставивши отримані значення в рівняння (4.245), після перетворень отримаємо:

$$-G_0 r_0 \frac{dU}{dx} = (k_2 G_p c_p - k_1 G_z c_z)(\exp(r_1 x) - \exp(r_2 x)); \quad (4.246)$$

$$\text{де, } k_1 = \frac{C\theta_1 - D_1}{C(r_1 - r_2)}, \quad k_2 = \frac{Ct_1 - D_2}{C(r_1 - r_2)}.$$

Розв'язок рівняння (4.246) за граничних умов: $x = 0$; $U(0) = U_1$ отримано у вигляді:

$$U(x) = U_1 - \frac{1}{k_3} \left[\frac{1}{r_2} (1 - \exp(r_2 x)) - \frac{1}{r_1} (1 - \exp(r_1 x)) \right]; \quad (4.247)$$

$$\text{де, } k_3 = \frac{G_0 r}{k_2 G_p c_p - k_1 G_z c_z}.$$

Отримані рівняння визначають розподіл параметрів матеріалу і сушильного агента в напрямку руху. Підстановкою в рівняння значення $x=L$ отримаємо значення параметрів процесу на виході із сушильної установки θ_2 , U_2 і t_2 . Визначивши за даними експерименту значення θ_2 , U_2 і t_2 з отриманих рівнянь визначимо значення параметричних комплексів A , B , C , а з них і інші кінетичні коефіцієнти та константи і таким чином можливо ідентифікувати математичну модель сушильної установки (рівняння 4.245, 4.246, 4.247).

Підставляючи похідні від залежностей $\theta(x)$, $t(x)$, $U(x)$ в рівняння (4.238) і (4.239), а залежність $\frac{dU}{dx}$ в рівняння:

$$-\left(\frac{\partial U}{\partial \tau} + v \frac{\partial U}{\partial x}\right) = K_c(U - U_p) + Q_m. \quad (4.248)$$

Аналогічним розв'язком можна визначити рівняння перехідних процесів для $U(\tau)$, $\theta(\tau)$, $t(\tau)$.

В результаті проведених теоретичних досліджень удосконалена класична модель тепло- і масопереносу в процесах сушіння при дії електромагнітного поля надвисокої частоти. Отримані диференціальні рівняння допускають пряме інтегрування окремих рівнянь. Отримано аналітичний

розв'язок спрощених рівнянь, а також формули для розрахунку процесу сушіння в періодичному і безперервному режимах дозволяють розрахувати коефіцієнти і константи рівнянь процесів переносу теплоти і маси за даними натурних експериментів.

4.10. Кінетика сушіння зерноматеріалів в установках з переміжним підведенням енергії мікрохвильовим та інфрачервоним випромінюванням

Для стійкого тривалого зберігання врожаю зернових (колосових, круп'яних та олійних) культур необхідне термінове очищення та сушіння до вологості безпечної при зберіганні. Процес сушіння є найбільш енергоємним у комплексі технологічної підготовки та переробки зернового матеріалу. Існуючі традиційні способи сушіння зерна, використовують органічні види палива для нагрівання сушильного агента в зерносушарках. Теплота якого передається зерновому матеріалу шляхом конвективної теплопередачі (конвективне підведення енергії до вологого матеріалу), а волога відбирається з поверхні конвективним масообміном і виноситься насиченим сушильним агентом із сушильної зони.

Значні недоліки даного способу полягають в тому, що для підведення необхідної кількості теплоти до матеріалу конвекцією необхідна велика кількість сушильного агента (за рахунок незначної теплоємності), теплота якого не повністю використовується. В результаті значна кількість теплоти до 40% виноситься з відпрацьованим сушильним агентом. Ця обставина, зумовлює нераціональні втрати теплової енергії сучасними конвективними сушильними установками. Тому енергетично доцільно зменшення кількості сушильного агента до величини, що забезпечує поглинання і винос вологи. Суттєве зменшення кількості сушильного агента можна

досягти, застосуванням альтернативних способів підведення енергії до зернового матеріалу.

Перспективним напрямком удосконалення технології і техніки сушіння, зерна зниження непродуктивних затрат енергії, зменшення викидів відпрацьованих газів в атмосферу, і забезпечення екологічної безпеки кінцевого продукту є застосування адресного впливу енергії на вологу, що міститься в зерновому матеріалі [2], шляхом підведення енергії електромагнітним полем надвисокої частоти (НВЧ) та інфрачервоним випромінюванням (ІЧВ).

Перспективною є технологія сушіння комбінованого, зокрема, переміжного НВЧ-сушіння з інфрачервоним опроміненням матеріалу. При переміжному способі підведення енергії (НВЧ та ІЧ), недоліки обох видів енергопідведення – значні градієнти вологості при мікрохвильовому нагріві, перешкоджають руху вологи до поверхні, а градієнти температури в матеріалі при ІЧ-нагріві також гальмують переміщення вологи до поверхні яка при цьому швидко зневоднюється і перегрівається.

Переміжне опромінення електромагнітними хвилями різної довжини дозволяє забезпечити такий розподіл температури, щоб волога інтенсивно переміщувалася до поверхні і там випаровувалася.

Вплив інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) та поля надвисокої частоти (ПНВЧ) на зернові матеріали зумовлено електромагнітною природою випромінювання в обох випадках, що обумовлює можливість кількісно описати динаміку тепло- і масопереносу в процесі сушіння при ІЧ- і НВЧ- підведенні енергії єдиною системою диференціальних рівнянь О.В.Ликова [18]. Основна відмінність полягає в представленні внутрішнього джерела теплоти, що виникає в тілі під дією поглинаючого електромагнітного випромінювання (різної довжини хвилі) та граничних умов (взаємодії тіла з оточуючим середовищем).

Відомо [16, 17], що для випадку НВЧ-нагріву доцільно використовувати рівняння теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти, а для ІЧ-нагріву інтенсивність підведення теплоти враховувати в граничних умовах (другого роду).

Відповідно до основних особливостей НВЧ та ІЧ нагріву справедливі розв'язки нестационарних диференціальних рівнянь, що отримані О.В.Ликовим для НВЧ-нагріву:

$$\frac{\theta(r, \tau) - \theta_0}{t_c - \theta_0} = 1 + \frac{Po}{6} \left(1 + \frac{2}{Bi} - \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) \cdot A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a}{R^2} \tau \right); \quad (4.249)$$

для ІЧ-нагріву:

$$\frac{\theta(r, \tau) - \theta_0}{\theta^* - \theta_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a}{R^2} \tau \right); \quad \theta^* = t_c + \frac{Q_F}{\alpha}. \quad (4.250)$$

Для зміни вологовмісту кулястої зернівки:

$$\frac{U(r, \tau) - U_p}{U_0 - U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp \left(-\mu_n^2 \frac{a_m}{R^2} \tau \right); \quad (4.251)$$

де, θ_0 , $\theta(r, \tau)$, t_c – температура початкова матеріалу, поточна матеріалу, оточуючого середовища; U_0 , $U(r, \tau)$, U_p – вологовміст зерна початковий, поточний, рівноважний; $Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$, $Bi_m = \frac{\beta \cdot R}{a_m}$ критерій Біо тепловий і масообмінний; $Po = \frac{q_v R^2}{\lambda(t_c - \theta_0)}$ – критерій Померанцева; R , r – радіус тіла, поточний радіус; a , a_m – коефіцієнт температуропровідності і вологопровідності; α , β – коефіцієнти тепло і масообміну; λ – коефіцієнт теплопровідності; $q_v = 0.555 E^2 f \cdot \varepsilon' \cdot tg \delta$ – потужність внутрішнього тепловиділення при НВЧ-опроміненні; Q_F – інтенсивність джерела ІЧВ; ε' – діелектрична провідність речовини; E – напруженість електричного поля; $tg \delta$ – діелектричні втрати; μ_n – корені характеристичного рівняння

$\mu_n = (Bi - 1) \cdot \operatorname{tg} \mu_n$; $A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi \sqrt{\mu_n^2 + (Bi-1)^2}}{\mu_n^2 + Bi^2 - Bi}$ хвильова амплітуда.

Середнє за розміром значення параметрів $\bar{\theta}(\tau)$, $\bar{U}(\tau)$ визначається інтегруванням функцій (1)-(3) за очевидними формулами $\bar{\theta}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \theta(r, \tau) dr$, $\bar{U}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 U(r, \tau) dr$.

Інтегруючи залежності (4.249)-(4.251), обмежуючись тільки першими членами рядів, після відповідних перетворень [17], отримаємо рівняння кінетики нагріву і зневоднення в наступному вигляді:

при сушінні в полі НВЧ:

$$\frac{d\bar{\theta}(\tau)}{d\tau} = K_{T1}(t_c - \theta(\tau)) + Q_{T1}; \quad (4.252)$$

при сушінні в полі ІЧВ:

$$\frac{d\bar{\theta}(\tau)}{d\tau} = K_{T2}(t_c - \theta(\tau)) + Q_{T2}; \quad (4.253)$$

для зміни вологовмісту (кінетика зневоднення):

$$\frac{d\bar{U}(\tau)}{d\tau} = -K_C(\bar{U}(\tau) - U_p); \quad (4.254)$$

де,

$$K_{T1} = 3Bi \frac{a}{R^2}; \quad Q_{T1} = \frac{a}{\lambda} \left(1 + \frac{Bi}{5}\right) \cdot q_v = \frac{1}{\rho c} \left(1 + \frac{Bi}{5}\right) \cdot q_v;$$

$$K_{T2} = 3Bi \frac{a}{R^2}; \quad Q_{T2} = \frac{3a}{R\lambda} Q_F; \quad (4.255)$$

$$K_C = 3Bi_m \frac{a_m}{R^2}. \quad (4.256)$$

Рівняння (4.249)-(4.254) використовуються для визначення невідомих критеріїв Bi , Bi_m , та коефіцієнтів a , a_m методом зворотних задач теплопровідності [19] при наявності експериментальних залежностей зміни температури та вологовмісту матеріалу за часом.

Аналітичні розв'язки диференціальних рівнянь (4.252) - (4.254) представлені залежностями $\theta_{1,2}(\tau)$, $U_{1,2}(\tau)$ у вигляді:

для НВЧ (нижній індекс 1) та ІЧ (індекс 2) нагріву:

$$\theta_{1,2}(\tau) = t_c + \frac{Q_{T1,2}}{K_{T1,2}} - \frac{Q_{T1,2} + K_{T1,2}(t_c - \theta_0)}{K_{T1,2}} \exp[-K_{T1,2} \cdot \tau]; \quad (4.257)$$

$$U_{1,2}(\tau) = U_p + (U_0 - U_p) \exp[-K_{C1,2} \cdot \tau]; \quad (4.258)$$

Підставимо (4.255) у (4.257) отримаємо:

при нагрівання в полі НВЧ:

$$\theta_1(\tau) = t_c + t_{T1} + (\theta_0 - t_c - t_{T1}) \exp[-K_{T1} \cdot \tau] \quad (4.259)$$

де,

$$t_{T1} = \frac{R^2 \cdot q_V}{15 \cdot \lambda} + \frac{R \cdot q_V}{3 \cdot \alpha}; \quad (4.260)$$

при нагрівання в полі ІЧВ:

$$\theta_2(\tau) = t_c + t_{T2} + (\theta_0 - t_c - t_{T2}) \exp[-K_{T1} \cdot \tau]; \quad (4.261)$$

де,

$$t_{T2} = \frac{q_F}{\alpha}. \quad (4.262)$$

Експериментальні дослідження проведено на лабораторному стенді опис якого наведено в роботі [16]. Матеріал висушувався в касетах, середня температура вимірювалася термометром, поверхнева пірометром, вологовміст визначався за зміною ваги зерна в касеті.

На рис. 4.44 і рис. 4.45 наведено експериментальні точки 2, 4 і графічні залежності 1, 3 зміни середньої температури і вологовмісту в часі при мікрохвильовому (рис. 4.44) та інфрачервоному опроміненні (рис. 4.45), розрахункові криві отримані за рівняннями (4.258), (4.259) і (4.261) значення коефіцієнтів, що входять у рівняння отримані за методикою [19].

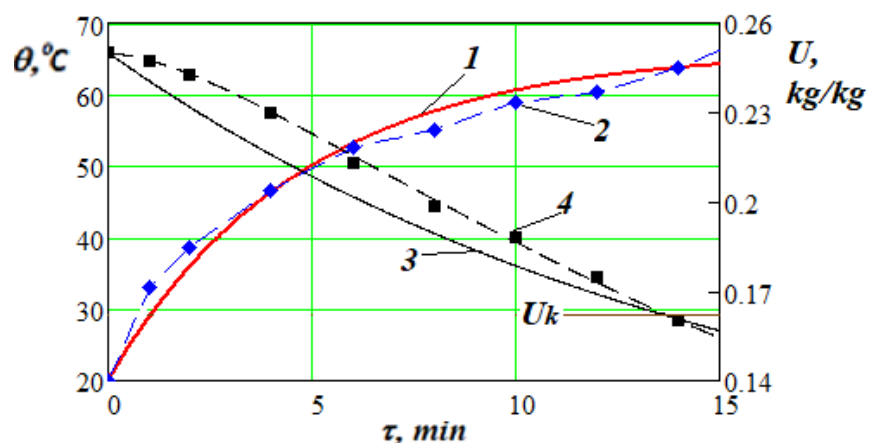


Рис. 4.44. Експериментальні криві з точками (◆,■) – 1 і розрахункові (—) залежності за (11) кінетики температури $\theta(\tau)$ – 2 і 3 – вологовмісту $\bar{U}(\tau)$ за (10) – від часу дії мікрохвильового випромінювання на об'єм зерна $V_3=0.2 \text{ м}^3$, потужність магнетрона $P=120\text{Вт}$.

Для експериментальних даних представлених на рис. 4.44 ідентифікація кінетики НВЧ-нагріву проведена за початкових умов: $t_c=20 \text{ }^\circ\text{C}$; $\theta_0=20 \text{ }^\circ\text{C}$; $U_0=0.25 \text{ кг/кг}$, визначені коефіцієнти рівняння (4.258) – $t_{T1}=46 \text{ }^\circ\text{C}$; $K_{T1}=3.5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$; теплофізичні параметри з рівнянь (4.255) – $q_v=457 \text{ Вт/дм}^3$; $Bi=0.041$. Ідентифікація кінетики сушіння проведена за рівнянням (10)– $K_{C1}=1.08 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$; $U_0=0.25 \text{ кг/кг}$, $U_p=0.1 \text{ кг/кг}$.

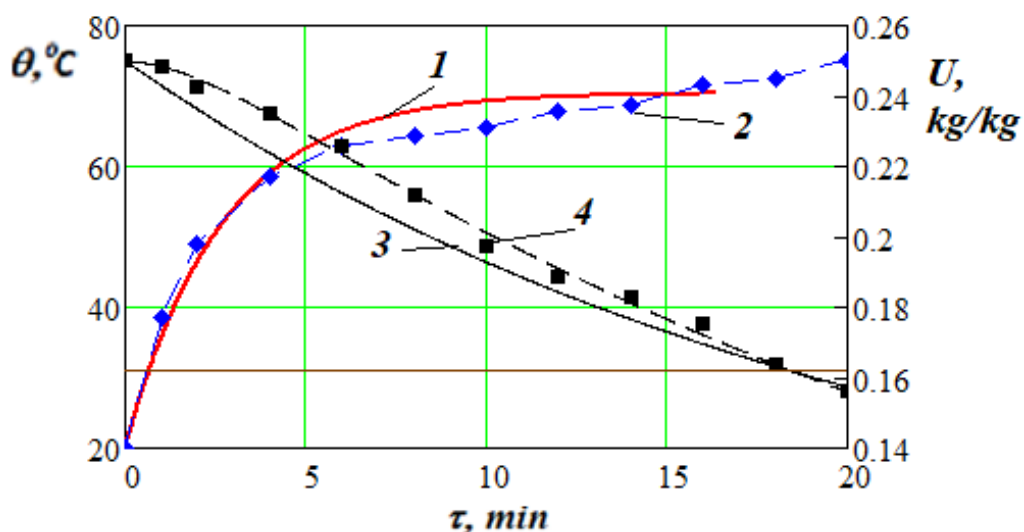


Рис. 4.45. Експериментальні точки (◆,■) і розрахункові (—) 1 – залежності зміни температури $\theta(\tau)$ і 3 – вологовмісту $\bar{U}(\tau)$ від часу дії інфрачервоного випромінювання.

Для експериментальних даних представлених на рис. 4.45 ідентифікація кінетики НВЧ-нагріву проведена за початкових умов: $t_c=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\theta_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $U_0=0.25\text{ кг/кг}$, визначені коефіцієнти рівняння (4.261) – $t_{T2}=50.4\text{ }^{\circ}\text{C}$; $K_{T2}=6.2\cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$; теплофізичні параметри з рівнянь (4.255) – $q_F=567\text{ Вт/м}^2$; $Bi=0.072$. Ідентифікація кінетики сушіння проведена за рівнянням (10) – $K_{C2}=0.8\cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$; $U_0=0.25\text{ кг/кг}$, $U_p=0.1\text{ кг/кг}$.

Рівняння (4.258), (4.259), (4.260) з експериментально ідентифікованими коефіцієнтами, мають достатню для інженерних розрахунків точність рис. 4.44-4.45 і можуть бути використані при моделюванні процесів нагрівання і сушіння з НВЧ та ІЧ-підведення енергії.

Для математичного опису процесів сушіння в установках безперервної дії, потрібно враховувати переміщення матеріалу, тобто зміну його параметрів за координатою в напрямку руху.

Використовуючи заміну $\frac{dy}{d\tau} = V$, де V – швидкість переміщення матеріалу, отримаємо:

$$\theta_{1,2}(y) = t_c + t_{T1,2} + (\theta_0 - t_c - t_{T1,2}) \exp\left[-\frac{K_{T1,2}}{V} y\right] \quad (4.263)$$

$$U_{1,2}(y) = U_p + (U_0 - U_p) \exp\left[-\frac{K_{C1,2}}{V} \cdot y\right]. \quad (4.264)$$

Отримані рівняння визначають зміну температури та вологовмісту матеріалу в процесі переміщення в сушильній установці при НВЧ та ІЧ-нагріві.

Розглянемо процес сушіння зерна при нормальних умовах функціонування стрічкової сушарки; режим сушіння є встановленим (стаціонарним), тобто в кожній точці робочого простору (матеріалу на стрічці його температура і вологовміст

залишаються незмінними в часі і процес нагріву і зневоднення є стаціонарним) рис. 4.46.

Розрахункова схема сушильної установки показана на рис. 4.46 (повна схема сушарки наведена в роботі [4]).

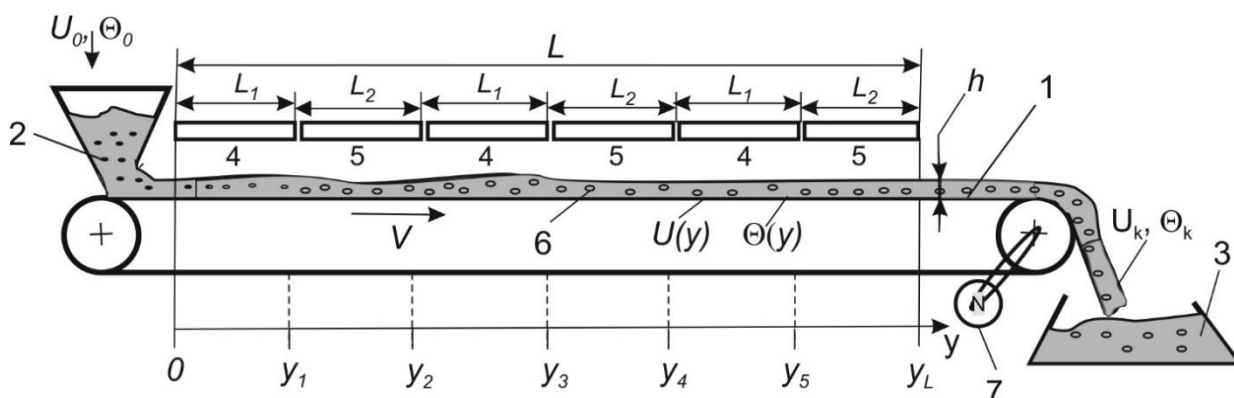


Рис. 4.46. Розрахункова схема сушильної установки: 1 – стрічковий конвеєр; 2 – завантажувальний бункер; 3 – бункер сухого зерна; 4 – магнетрони (НВЧ-випромінювачі); 5 – інфрачервоні випромінювачі; 6 – шар зерна; 7 – електропривод; L_1 і L_2 – розміри дії випромінювання; L – зона сушіння; h – висота шару.

Швидкість переміщення шару зерна постійна. Потужність генераторів НВЧ випромінювання та ІЧ-випромінювачів незмінна в часі. Температура і вологовміст зерна за висотою шару не змінюється і дорівнює середньому значенню. Температура оточуючого середовища в часі і за координатою не змінюється.

Алгоритм розрахунку процесу сушіння зерна при переміжному мікрохвильовому та інфрачервоному опроміненні полягає в послідовному розрахунку за рівняннями (4.263-4.264) для зон L_1 та L_2 – рис. 4.47. При цьому граничними значеннями параметрів $\theta_i(y)$ і $U_i(y)$ для кожної наступної зони L_2 після зони L_1 $\theta_{i+1}(y + 1)$ і $U_{i+1}(y + 1)$ будуть кінцеві значення параметрів попередньої зони.

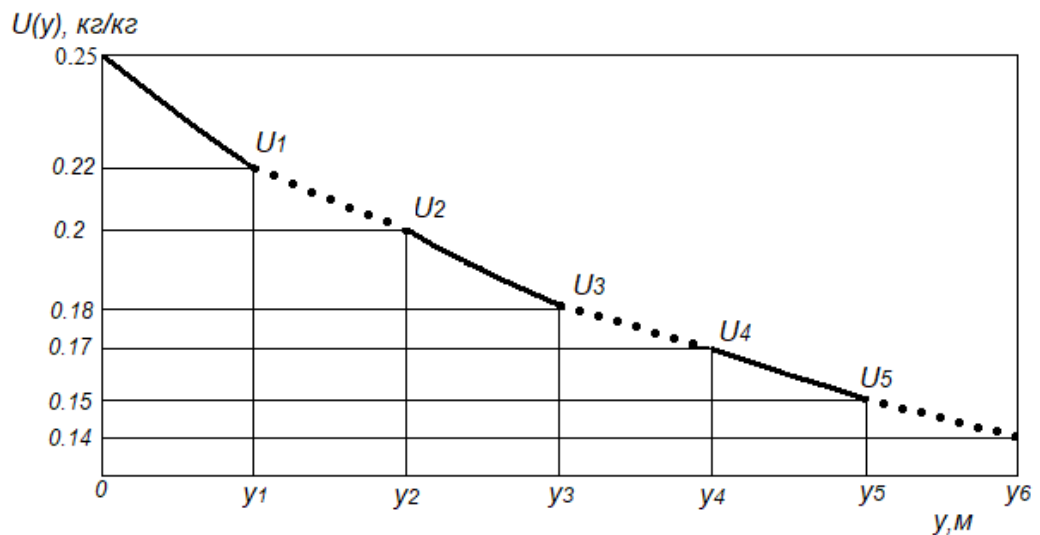


Рис. 4.47. Кінетика переміжного сушіння НВЧ - ІЧ

На рис. 4.48 представлений приклад розрахованих кінетик переміжного нагрівання і зневоднення зерна для визначених раціональних параметрів: НВЧ-випромінювання – $q_v=350$ Вт/дм³ та ІЧ-нагріву (криві 1 та 4) $q_v=350$ Вт/дм³ і конвективного охолодження $V_a=0.4$ м/с (криві 2 та 3).

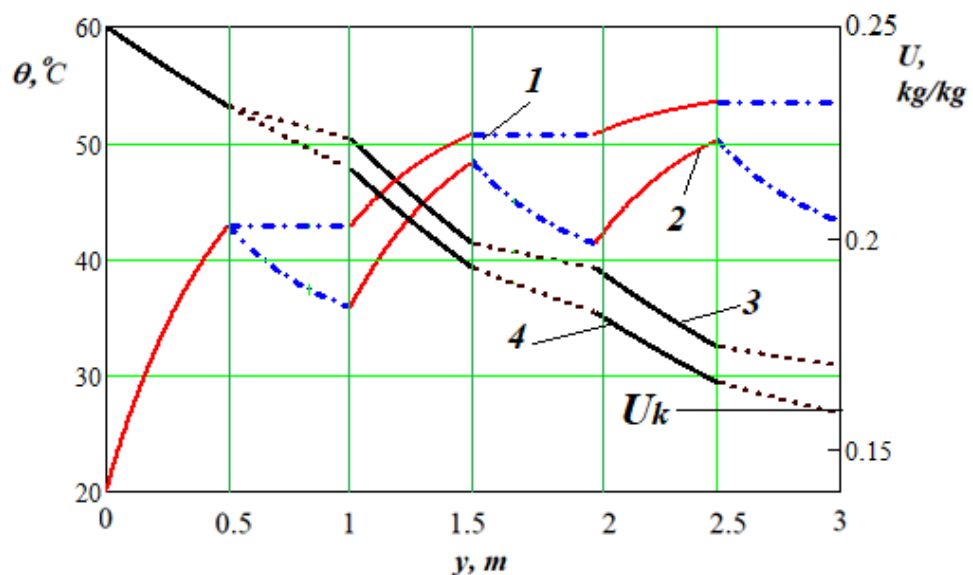


Рис. 4.48. Кінетики переміжного нагріву і сушіння зерна: 1,4 – НВЧ-ІЧ енергопідвід; 2,3 –НВЧ – вентилявання

Для кожного циклу ІЧ-енергопідводу визначалася така потужність ІЧ нагрівачів за формулою (4.262), що компенсує тепловий потік втрат енергії в зовнішнє середовище від

поверхні нагрітого зерна [21], також, при такому підході, в ІЧ-циклі температура зернівки вирівнюється за радіусом рис. 4.49.

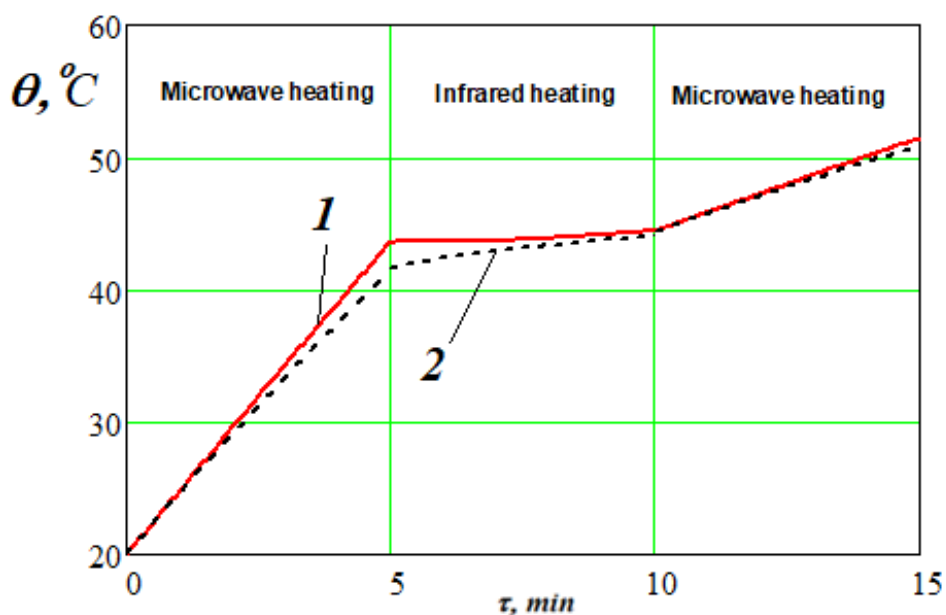


Рис. 4.49. Динаміки нагріву зернівки при НВЧ-ІЧ-енергопідводі:
1 – центр, 2 – поверхня зернівки.

Графічні залежності на рис. 4.49 отримані за формулами (4.249) і (4.250), теплофізичні коефіцієнти ідентифіковано за експериментальними даними і рівняннями (4.255).

На основі проведених досліджень представлених в тому числі у вигляді графіків (рис. 4.44–4.45) і (рис. 4.48–4.49) можна відмітити наступне.

Якщо застосовувати тільки НВЧ або ІЧ енергопідведення при сушінні зерна то виникає велика ймовірність перегріву зерна рис. 4.44–4.45, що негативно позначиться на його якості. Застосування НВЧ-випромінювання рис. 4.44, дозволяє висушувати зерно із більшою швидкістю порівняно з іншими видами енергопідведення, що пояснюється бародифузійним ефектом [4] і тим, що при конвективному або ІЧ-енергопідведенні градієнт температури направлений проти

руху вологи, що зменшує її швидкість переміщення до поверхні [18].

На рис. 4.48 показано, що при переміжному НВЧ та ІЧ енергопідведенні температура залишається в межах, оптимальних для обробки зерна, що забезпечує його високу якість. Підведена величина потужності ІЧВ визначається такою, щоб компенсувати теплові конвективні втрати теплоти від нагрітого матеріалу в оточуюче середовище, за рахунок цього підтримується стабільна температура матеріалу в ІЧ-циклі рис. 4.48 крива 1, в порівнянні з переміжним НВЧ і вентиляванням матеріалу рис. 4.48 крива 2. Сушіння із використанням НВЧ випромінювання та вентилявання повітрям призводить до зниження температури матеріалу в періодах вентилявання. За рахунок цього коефіцієнт сушіння, що залежить від температури, зменшується і це збільшує експозицію сушіння рис. 4.48 крива 3 і відповідно енерговитрати.

Застосування переміжного НВЧ та ІЧ-енергопідведення дозволяє скоротити загальний час експозиції сушіння, рис. 4.48 крива 4. Це, в свою чергу, підвищує продуктивність сушарки, знижує загальні енерговитрати на сушіння в порівнянні з іншими варіантами реалізації процесу.

Комбінація НВЧ та ІЧ енергопідведення забезпечує більш рівномірний розподіл температури в зернівці, запобігаючи локальному перегріванню, що властиве електромагнітному енергопідводу. На рис. 4.49 показано, що нерівномірність температури зернівки залишається в межах, оптимальних для обробки термолабільних матеріалів, зокрема зерна, що забезпечує збереження його якості.

Представлені математичні моделі тепло- та масообміну, дозволяють узагальнити експериментальні дані та розробити алгоритми для проектування комбінованих сушарок з НВЧ та ІЧ енергопідведенням.

Реалізована параметрична ідентифікація моделей сушіння зерна за умов переміжного підведення енергії дозволяє оптимізувати режими сушіння.

Проведені дослідження підтвердили доцільність преміжного НВЧ та ІЧ сушіння для термолабільних матеріалів. Такий підхід забезпечує: не перебільшення критичної температури матеріалу; підвищення швидкості сушіння; скорочення загальної експозиції сушіння, що підвищує енергоефективність установки.

Таким чином, використання комбінованого НВЧ та ІЧ сушіння є перспективним підходом для підвищення продуктивності сушарок і покращення якості кінцевого продукту.

4.11. Моделювання тепло-і масопереносу в процесах сушіння зерна під впливом електромагнітного поля

Процес сушіння зернових матеріалів традиційним конвективним підведенням теплової енергії, як правило, пов'язаний із значними непродуктивними затратами енергії. Найбільша частина втрат теплової енергії конвективними зерносушарками приходяться на втрати з відпрацьованим сушильним агентом. Тому найбільш раціональним способом підвищення енергетичної ефективності зерносушіння є зменшення кількості сушильного агента, який використовується в сушильному процесі для подачі теплоти до матеріалу. Для компенсації зменшеної кількості теплоти сушильного агента доцільно використовувати безконтактну передачу теплоти до зернового матеріалу шляхом його мікрохвильового (надвисокочастотного НВЧ) або інфрачервоного (ІЧ) опромінення. Для використання електромагнітних полів (різного діапазону довжини хвиль) необхідно мати математичний опис процесів тепломасопереносу у вологих матеріалах, який адекватно

враховує особливості перебігу процесів переносу теплоти під впливом електромагнітних полів і дозволяє кількісно оцінити кінетичні закономірності процесу сушіння конкретного матеріалу.

Аналіз фундаментальних наукових праць [1-4] дозволяє зробити висновок, що одним із перспективних методів інтенсифікації процесів сушіння рослинної сировини є використання безконтактного підведення енергії електромагнітного поля (надвисокочастотного та інфрачервоного діапазону хвиль) безпосередньо в об'єм матеріалу. Встановлено, що особливістю електромагнітного впливу на вологий матеріал є об'ємний характер теплової обробки з адресною доставкою енергії. Це дає можливість реалізувати процеси вибіркового (локального) нагріву в найбільш вологих зонах обробляемого матеріалу. НВЧ та ІЧ підведення енергії дозволяє генерувати в об'ємах зернового шару матеріалу [1, 5, 6] досить велику потужність, що значно скорочує тривалість процесів нагріву і випаровування вологи [11, 12].

Але процеси переносу енергії електромагнітних полів в матеріалі відрізняються від достатньо вивчених процесів [7-9] теплового сушіння, складністю і неоднорідністю розподілу температури і вологовмісту, являють собою доволі складні фізичні процеси, для вивчення яких недостатньо використовувати математичні моделі на основі балансових рівнянь [4-9].

Для складання більш точного математичного опису тепло- і масопереносу в нестационарних процесах сушіння необхідно формалізувати фізичні явища, які зумовлюють певні форми переносу теплоти і речовини під дією мікрохвильового поля та поля ІЧ-випромінювання. Формалізація тепломасопереносу при дії внутрішніх або поверхнево-локальних джерел теплової енергії може бути реалізована на

основі загальної теорії переносу теплоти і маси в капілярно пористих тілах [1, 3, 10, 14].

У зв'язку із необхідністю інтенсифікації процесів термообробки зернового матеріалу в промислових установках питання розв'язку задач внутрішнього тепломасопереносу набувають актуальності і своєчасності.

Сушіння зерна складний теплофізичний процес основним рушійним фактором якого є нагрівання вологого капілярно-пористого колоїдного матеріалу – зерна. Механізм процесу зумовлений характером переносу теплоти і вологи всередині окремої зернівки або зернового шару. Ці процеси взаємно впливають один на другий, а їх співвідношення залежить від режиму нагрівання і потужності внутрішнього джерела теплоти.

Відповідно до [10] Ликовим О.В. сформульована повна система дифереціальних рівнянь тепломасопереносу в умовах дії в тілі внутрішнього джерела енергії генерованої електромагнітним полем, яка записується у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_T \nabla^2 \theta + \frac{\varepsilon r_c}{c} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{Q_V}{c \cdot \rho}; \\ \frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 U + a_m \delta_T \nabla^2 \theta; \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \nabla^2 P + \frac{\varepsilon}{c_\mu} \frac{\partial U}{\partial \tau}; \end{cases} \quad (4.265)$$

де θ, U – температура і вологовміст матеріалу; a_T, a_m, δ_T – коефіцієнт температуропровідності, масопровідності і термоградієнтний коефіцієнт; ε – коефіцієнт фазових перетворень; c – питома теплоємність матеріалу; r_c – питома теплота пароутворення; ρ – густина матеріалу, c_μ – ємність капілярно-пористого тіла відносно вологого повітря; $\nabla \theta, \nabla U$ – градієнти поля температури і вологовмісту в тілі; Q_V – питома потужність тепловиділення в об'ємі продукту при підведенні

НВЧ енергії, ІЧ-випромінюванням або електричного поля (електроконтактний нагрів).

При розрахунках питомої потужності, що виділяється в одиниці об'єму застосовані напівемпіричні формули [3, 8]:

при НВЧ-нагріванні:

$$Q_V = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon''fE^2 = 0.555 \cdot 10^{-10}\varepsilon''fE^2; \quad (4.266)$$

де, f – частота, E – діюче значення напруженості електромагнітного поля; $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ – електрична стала; ε'' – уявна частина комплексної діелектричної провідності, що дорівнює $\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta$, де ε' – дійсна частина діелектричної проникності; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

При ІЧ – опроміненні волого матеріалу, енергія, що поглинута одиницею об'єму матеріалу (в площині ОХ, одновимірне поле) визначається інтегралом:

$$Q_V(x, \theta) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q_V(x, \lambda, \theta) \frac{\partial(x, \lambda, \theta)}{\partial x} d\lambda \quad (4.267)$$

де, q_V – енергія монохроматичного випромінювання, що проникає в середину матеріалу і поглинається за одиницю часу в середині об'єму з координатою x , розрахована для інтервалу довжини хвилі; λ – довжина хвилі випромінювання; $A=1-R-D$ – коефіцієнт поглинання; R – коефіцієнт відбивання; D – коефіцієнт пропускання ІЧ-променів (відповідно до закону Кірхгофа $A+R+D=1$).

Для інженерних розрахунків величину Q_V в першому рівнянні системи (4.265) визначають спрощеними співвідношеннями:

$$Q_V = EA \frac{F_{\text{опр}}}{V_{\text{мат}}} = \frac{EA}{l}; \quad (4.268)$$

$$E = g_f = \sigma_0 \varepsilon_{\text{пр}} \varphi_{1,2} \left[\left(\frac{T_H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right]; \quad (4.269)$$

де, $F_{\text{опр}}$ – опромінювана поверхня матеріалу; $V_{\text{мат}}$ – об'єм матеріалу; l – характеристичний розмір (товщина пластини, діаметр кулі); $E = \frac{P}{F_{\text{опр}}}$ – опроміненість (енергетична освітленість) – густина потоку енергії ІЧ-випромінювання, що

падає за одиницю часу на одиницю поверхні; P – теплова потужність випромінювача; $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ – стала Стефана-Больцмана; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений коефіцієнт випромінювання (для радіаційного теплообміну між двома паралельними пластинами $\varepsilon_{\text{пр}} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1}$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – ступінь чорноти взаємодіючих тіл); $\varphi_{1,2}$ – кутовий коефіцієнт; $T_{\text{н}} = \theta_{\text{н}} + 273$; $T_{\text{м}} = \theta_{\text{м}} + 273$; $\theta_{\text{н}}, \theta_{\text{м}}$ – температура нагрівача-випромінювача та матеріалу.

Використовуючи величину потужності, що споживається нагрівачем випромінювача N та коефіцієнт корисної дії випромінювача величину густини потоку випромінювання визначено очевидним співвідношенням:

$$E^* = \frac{N \cdot \eta}{F_{\text{опр}}}; \quad (4.270)$$

а величину об'ємного джерела теплової енергії виділеної при поглинанні ІЧ-променів за формулою (4.268):

$$Q_V = \frac{A \cdot N \cdot \eta}{l \cdot F_{\text{опр}}}; \quad (4.271)$$

Як відомо інтенсивність дії електромагнітного поля при поглинанні матеріалу затухає при проникненні в глибину матеріалу [3], за експоненціальним законом для одномірної геометрії тіла при НВЧ-нагріванні:

$$E(x) = E_0 \exp\left(-\frac{x}{\Delta}\right); \quad (4.272)$$

де, $\Delta = \frac{c}{\pi \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \tan \delta} = \frac{0.955 \cdot 10^8}{f \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot \tan \delta}$ – глибина проникнення НВЧ-поля в матеріал;

при ІЧ-нагріванні, відповідно до закону Бургера [10]

$$E(x) = E_0 \exp(-\chi x); \quad (4.273)$$

де, χ – показник поглинання ІЧ-променів речовиною; E_0 – інтенсивність випромінювання на поверхні

При індукційному нагріванні металевої пластини, щільність потоку потужності S , що переноситься площинною електромагнітною хвилею, зменшується в процесі проникнення хвилі в глибину тіла за законом:

$$S(x) = S_0 \exp\left(-2 \frac{x}{\Delta_0}\right); \quad (4.274)$$

де, S_0 – щільність потоку потужності на поверхні провідника; Δ_0 – еквівалентна глибина проникнення електромагнітного поля.

Таким чином, в узагальненому вигляді внутрішнє джерело теплоти змінне за координатою визначатиметься:

$$Q(x) = Q_0 \exp(-kx); \quad (4.275)$$

Враховуючи єдину електромагнітну природу випромінювання і динаміку нагріву «товстого» матеріалу при НВЧ та ІЧ підведенні енергії і те що формули (4.273)-(4.275) мають формальну аналогію, можна використати єдине рівняння теплопровідності з джерелом теплоти інтенсивність якого зменшується при проходженні хвиль (λ) в глибину матеріалу за експоненціальним законом (4.275). Найпростіше розглянути процес нагрівання матеріалу, як випадок розповсюдження теплоти в напівобмеженому тілі, яке являє собою напівобмежений стержень з теплоізованою боковою поверхнею, при постійній температурі оточуючого середовища $t_c = t_0$.

Використовуючи поняття ефективної температуропровідності, яке враховує теплоту фазового перетворення (випаровування вологи) і оцінюється коефіцієнтом a_f :

$$a_{ef} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c \cdot (1 - \varepsilon) \left(1 + \frac{\varepsilon}{Rb}\right)}; \quad (4.276)$$

де, $Rb = \frac{c \cdot d\theta}{r_c \cdot dU}$ – критерій Ребіндера;

З урахуванням (4.275) та (4.276) рівняння (4.265) перепишемо у вигляді:

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{ef} \frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{Q_0 \exp(-kx)}{c \cdot \rho}, \quad (\tau > 0; 0 < x < \infty); \quad (4.277)$$

з крайовими умовами:

$$\theta(x, 0) = \theta_0; \theta(0, \tau) = t_c = \text{const}; \frac{\partial \theta(\infty, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (4.278)$$

Розв'язок рівняння (4.278) відомий [10] і його можна записати у вигляді:

$$\theta(x, \tau) = t_c + \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_{ef}\tau}} - \frac{Q_0}{\lambda k^2 t_c} \left[\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_{ef}\tau}} - e^{-kx} - \frac{1}{2} e^{k^2 a_{ef}\tau - kx} \operatorname{erfc} \left(k\sqrt{a_{ef}\tau} - \frac{x}{2\sqrt{a_{ef}\tau}} \right) + \frac{1}{2} e^{k^2 a_{ef}\tau + kx} \operatorname{erfc} \left(k\sqrt{a_{ef}\tau} + \frac{x}{2\sqrt{a_{ef}\tau}} \right) \right]; \quad (4.279)$$

Коефіцієнти в рівнянні (4.279) визначаються: для НВЧ нагріву: $k = \frac{2}{\Delta}$; $Q_0 = 2\pi\epsilon_0\epsilon''fE^2$; для ІЧ нагріву $k=\chi$; $\frac{A \cdot N \cdot \eta}{l \cdot F_{\text{опр}}}$; $Q_0 = \frac{E^*(1-D)}{l}$.

Отриманий вираз (4.279) дає можливість розраховувати нестационарне температурне поле в твердому вологому тілі при дії джерела електромагнітного випромінювання потужність якого зменшується при збільшенні відстані від поверхні тіла і зробити аналіз впливу окремих параметрів ЕМП і електротехнологічних властивостей матеріалу при перебігу процесів тепло- і масообміну.

Надалі розглядаються процеси тепломасопереносу для випадку поглинання енергії електромагнітного поля можна вважати рівномірним для всього об'єму тіла ($x \ll \Delta$).

Основне завдання теоретичного дослідження сушильно-термічних процесів полягає у визначенні динаміки і кінетики зміни параметрів матеріалу (температура і вологість) в процесі нагріву і зневоднення матеріалу. Нестационарні поля температури і вологовмісту визначають динаміку процесу; зміна середньооб'ємних значень цих параметрів визначає кінетику процесів.

Для отримання раціональних аналітичних залежностей придатних для інженерних розрахунків на основі системи

рівнянь (4.265), введемо спрощуючі припущення у вихідну систему (4.265):

- введення коефіцієнта ефективної температуропровідності a_{ef} (4.275) дає можливість виключити із першого рівняння системи (4.265) складову, що визначає зміну в часі вологовмісту $\left(\frac{\partial U}{\partial \tau}\right)$;

- за малосності значення коефіцієнта термодифузії для більшості рослинних матеріалів, можна знехтувати складовою $a_m \delta_T \nabla^2 \theta$ в другому рівнянні системи (4.265);

- надлишковий тиск в матеріалі в процесі нагріву визначається процесом фазового перетворення який зумовлює зміну градієнта тиску, тому складову $\frac{\varepsilon}{c_\mu} \frac{\partial U}{\partial \tau}$ в третьому рівнянні системи (4.265) можна не враховувати.

Таким чином, при врахуванні зроблених спрощень, рівняння системи (4.265) можна розв'язувати незалежно одне від одного.

Оскільки, форму обробляемого матеріалу прийнято моделювати одновимірними тілами, то рівняння (4.265) теплопровідності доцільно подавати в узагальненому вигляді:

$$\frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{ef} \left[\frac{\partial^2 \theta(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial \theta(x, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{Q(\tau)}{c \cdot \rho}; \quad (4.280)$$

де, Γ – коефіцієнт форми; x – характеристичний розмір; (для пластини: $\Gamma=0$; $x=x$; для циліндру: $\Gamma=1$; $x=r$; для кулі: $\Gamma=2$; $x=r$ – радіус поточний).

Для опису процесу сушіння використовуємо за аналогією з (4.280) рівняння масопровідності:

$$\frac{\partial U(x, \tau)}{\partial \tau} = a_m \left[\frac{\partial^2 U(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial x} \right]. \quad (4.281)$$

Джерело теплової енергії, що генерується електромагнітним полем при НВЧ-нагріві моделюємо внутрішнім джерелом теплоти (4.266) – $Q_V(\tau)$, потужність якого змінюється за часом, так як в процесі сушіння змінюються електричні параметри матеріалу $\varepsilon', tg\delta$. При використанні інфрачервоного та індукційного підводу енергії внутрішнє

джерело підведення енергії відсутнє ($Q_V = 0$), і джерело теплоти з питомою потужністю Q_F , що віднесено до площі оброблюваної поверхні, вводимо в граничну умову:

$$-\lambda \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial x} = \alpha(t_c - \theta(\tau)) + Q_F; \quad (4.282)$$

де, λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу; α – коефіцієнт тепловіддачі.

Рівняння (4.282) характеризує теплообмін поверхні матеріалу конвекцією $\alpha(t_c - \theta(\tau))$ з оточуючим середовищем та радіаційно з джерелом випромінювання з потужністю, що визначається формулою (4.269). При використанні індукційного нагріву тепловиділяючого елемента (ТВЕ) величина Q_F – визначає теплову потужність ТВЕ генеровану індуктором.

Розв'язок рівняння (4.279) за граничної умови (4.282) відомий [10], тому наведемо лише кінцеві результати.

Нестационарне поле температур, при формі матеріалу у вигляді кулі, що обробляється потоком енергії електромагнітного поля НВЧ описується залежністю $\theta(r, \tau)$ в безрозмірних величинах [10]:

$$T(r, \tau) = \frac{\theta(r, \tau) - \theta_0}{t_c - \theta_0} = 1 + \frac{Po}{Pd} \left[1 - \frac{R \cdot Bi \cdot \sin \sqrt{Pd} \frac{r}{R}}{r[(Bi-1) \sin \sqrt{Pd} + \sqrt{Pd} \cos \sqrt{Pd}]} \right] e^{-Pd \cdot Fo} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{Pd - \mu_n} \right) A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} e^{-\mu_n^2 Fo}; \quad (4.282)$$

де, $A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cdot \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} = (-1)^n \frac{2Bi \sqrt{\mu_n^2 + (Bi-1)^2}}{\mu_n + Bi^2 - Bi}$; $Po = \frac{Q_0 R^2}{\lambda(t_c - \theta_0)}$ – критерій Померанцева; $Q_V(\tau) = Q_0 \exp(-k\tau)$; $Pd = \frac{k}{a_{ef}} R^2$ – критерій Предводителева; $Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$ – критерій Біо теплообмінний; $Fo = \frac{a_f}{R^2} \tau$ – критерій Фур'є теплообмінний; $\mu = (Bi - 1) \operatorname{tg} \mu$ – корені характеристичного рівняння; R – радіус кулі; θ_0 – початкова температура кулі.

Середня температура кулі визначається за формулою:

$$\bar{\theta}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 \theta(r, \tau) dr. \quad (4.283)$$

Для пластини, яка опромінюється з однієї сторони та друга сторона пластини має постійну температуру t_0 (модель ІЧ-нагріву шару матеріалу на поверхні транспортуючої стрічки) нестационарне температурне поле буде описуватися залежністю:

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 + \frac{Q_F}{\alpha} - \left(t_c + \frac{Q_F}{\alpha} - t_0 \right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n \cos \mu_n \frac{x}{R}}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} e^{-\mu_n^2 \frac{a_f}{R^2} \tau}; \quad (4.284)$$

де, t_c – температура оточуючого повітря; R – половина товщини пластини; $\mu = Bi \cdot \operatorname{ctg} \mu$ – корені характеристичного рівняння.

Середня температура пластини визначається очевидною рівністю:

$$\bar{\theta}(\tau) = \frac{1}{R} \int_0^R \theta(x, \tau) dx. \quad (4.285)$$

Для пластини, що нагрівається від поверхні металевої плити, яка знаходиться всередині «обмотки» індуктора граничні умови для розв'язку рівняння (4.279) при $Q(\tau) = Q_F$, задані у вигляді:

$$-\lambda \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial x} + Q_F = 0; \quad (4.286)$$

де, $Q_F = \frac{P_{\text{інд}} \eta}{F}$; $P_{\text{інд}}$ – потужність індуктора; η – ККД; F – поверхня ТВЕ.

Нестационарне одновимірне температурне поле, в пластині визначається залежністю:

$$\theta(x, \tau) = \theta_0 + \frac{Q_F}{\lambda} \left[\frac{a_f \tau}{R} - \frac{R - 3x^2}{6R} + R \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n^2} \cos \mu_n \frac{x}{R} e^{-\mu_n^2 \frac{a_f}{R^2} \tau} \right]. \quad (4.287)$$

Середнє значення отримаємо підставляючи (4.287) в (4.285):

$$\bar{\theta}(\tau) = \theta_0 + \frac{Q_F}{\lambda} \frac{a_f \tau}{R} + \frac{2Q_F R}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+2} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n^3} e^{-\mu_n^2 \frac{a_f}{R^2} \tau}. \quad (4.288)$$

Процес сушіння рослинних матеріалів під дією електромагнітних полів відбувається при конвективному масообміні матеріалу з оточуючим середовищем. Тому в якості

граничної умови до рівняння використовується балансова залежність:

$$-a_m \frac{\partial U(x, \tau)}{\partial x|_{x=0}} + \beta(U(\tau) - U_p) = 0. \quad (4.289)$$

За умови рівномірного розподілу вологовмісту за координатою x : $\frac{\partial U}{\partial x|_{\tau=0}}=0$; початкової умови: $\tau = 0$, $U(0) = U_0$, де a_m – коефіцієнт масопровідності; β – коефіцієнт масообміну; U – вологовміст матеріалу; U_p – рівноважний вологовміст.

Розв'язок рівняння (4.279) із граничною умовою (4.289) за аналогією з розв'язками рівнянь теплопровідності [10] можна записати в узагальнених змінних:

для пластини:

$$\frac{U(x, \tau) - U_p}{U_0 - U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m); \quad (4.290)$$

$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} = (-1)^{n+1} \frac{2 Bi_m \sqrt{Bi_m^2 + \mu_n^2}}{\mu_n (Bi_m^2 + Bi_m + \mu_n^2)}; \quad \mu = Bi_m \operatorname{ctg} \mu;$$

для кулі:

$$\frac{U(r, \tau) - U_p}{U_0 - U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m); \quad (4.291)$$

$$A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n} = (-1)^{n+1} \frac{2 Bi_m \sqrt{\mu_n^2 + (Bi_m - 1)^2}}{\mu_n^2 + Bi_m^2 - Bi_m}; \quad \operatorname{tg} \mu = -\frac{\mu}{Bi_m - 1};$$

для циліндра:

$$\frac{U(r, \tau) - U_p}{U_0 - U_p} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0 \left(\mu_n \frac{x}{R} \right) \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m); \quad (4.292)$$

$$A_n = \frac{2 J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} = (-1)^{n+1} \frac{2 Bi_m J_0(\mu_n)}{(\mu_n^2 + Bi_m^2)}; \quad \mu = Bi_m \frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)};$$

де, $Bi_m = \frac{\beta \cdot R}{\lambda}$ – критерій Біо масообмінний; $Fo = \frac{a_m}{R^2} \tau$ – критерій Фур'є; $a_m(\theta)$ – коефіцієнт масопровідності; β – коефіцієнт масообміну; $J_0(\mu)$, $J_1(\mu)$ – функції Бесселя дійсного аргументу нульового і першого порядку.

В загальному випадку коефіцієнт масопровідності матеріалу залежить від температури, і ця залежність може бути апроксимована квадратичною функцією:

$$a_m(\bar{\theta}) = a_0 + a_1\bar{\theta}(\tau) + a_2[\bar{\theta}(\tau)]^2; \quad (4.293)$$

де, $\bar{\theta}(\tau)$ – середні за координатою значення залежностей (4.283), (4.285) і (4.288).

Розрахунок кінетики сушіння проводився зональним методом за такою схемою: визначаються середні значення залежностей $\theta(x, \tau)$; вибирається проміжок часу, для якого температуру тіла можна вважати незмінною, рівною середньому значенню; за методикою [15, 16] визначаємо теплофізичні коефіцієнти a_m , β . З використанням визначених теплофізичних коефіцієнтів визначаємо динаміку полів температури і вологості в матеріалі під впливом електромагнітного поля.

Отримані аналітичні залежності дозволяють розрахувати нестационарні поля температури і вологовмісту в матеріалах з простою формою модельного тіла і визначити вплив параметрів електромагнітного поля (різних діапазонів довжини хвиль) на перебіг процесів нагріву і сушіння. Визначені залежності дозволяють ідентифікувати загальні моделі тепло і масопереносу за даними експериментів. Представлені математичні моделі дозволяють реалізувати аналітико-емпіричний метод визначення динаміки тепло-і масопереносу в капілярно-пористих дисперсних матеріалах для розрахунку раціональних режимів термообробки зернової сировини під дією електромагнітного поля.

4.12. Математичне моделювання нестационарних теплових процесів прес-екструдера з індукційним обігрівом як об'єкта з розподіленими параметрами

У процесах видалення олії із насіння олійних культур широко використовують шнекові преси - прес-екструдери. Незважаючи на відносно незначну продуктивність екструдерів витрати енергії на нагрівання складають вагомую частку усіх затрат енергії на пресування. Продуктивність прес-екструдера, кількість і якість отриманої олії особливо залежить від температури при якій переробляється продукт. Температура в свою чергу залежить від теплових процесів, що супроводжують процес пресування.

Ріпакова олія відрізняється від соняшникової як за жирокислотним складом, так і за кількісними та якісними характеристиками супутніх тригліцеридів. До її складу входять дві поліненасичені жирні кислоти: лінолева та ліноленова - обидві наш організм синтезувати не може і так само не може без них функціонувати. Вміст сполук сірки в нерафінованій ріпаковій олії варіює від 10 до 300, а в рафінованій від 0,5 до 5 мг/г. На технічні потреби ріпакову олію використовують у машинобудівній і металургійній промисловості, при виробництві нейлонів, клею, фарб, як сировину для виготовлення пральних порошків, мила та інших миючих засобів, а також у поліграфії.

Останнім часом намітився новий напрям використання ріпакової олії - вона виявилась цілком придатною як джерело паливної енергії для автомобільних двигунів. При цьому використовують чисту олію холодного пресування та етерифіковану. Французька компанія «Рено» успішно випробувала автомобіль, що працює на ріпаковому пальному. Оснащений таким пальним «Рено-21» пройшов 19 тис. км, показавши високу швидкість і економічність (витрати пального 4 л на 100 км). За оцінкою експертів втрата потужності двигуна

після переведення його на біопальне становить лише 5-10%. Отже пальне з ріпаку виявилось не лише екологічно чистим, але й конкурентоздатним та надійним у роботі.

Складність математичного моделювання полягає в тому, що інтенсивність теплових процесів суттєво змінюється за довжиною робочої зони преса. Тому для визначення раціональних режимів роботи пресів і реалізації системи автоматичного керування температурою необхідно мати температурну модель, що враховує зміну температури за координатою.

Фізична модель процесу: вздовж каналу утвореного внутрішньою поверхнею корпусу і валом шнека рухається зерновий матеріал з постійною швидкістю ($v = G/S$). Стінка циліндричного корпусу нагрівається циліндричним індуктором і її температурне поле рівномірне за усім об'ємом корпусу. Теплота від внутрішньої стінки корпусу кондуктивною теплопередачею передається шару зерна, що рухається. Завдяки частковим перемішуванням шару зерна його температура в радіальному напрямку приймається не змінною. Теплота від зовнішньої поверхні конвективним теплообміном передається в оточуюче середовище (зовнішнє повітря).

Для математичного опису приймемо такі припущення:

- прес розглядається як двоємнісний об'єкт: корпус - олійний матеріал;
- температура зерна і шнека однакова;
- теплофізичні властивості ємностей і коефіцієнти теплообміну від температури не залежать і в часі не змінюються;
- градієнтами температури в радіальному напрямку нехтуємо;
- корпус є інерційною ланкою з зосередженими параметрами.

Математичну модель установки визначимо у вигляді рівнянь динаміки зміни температури корпусу і зернопродукту на основі теплового балансу:

$$\begin{cases} m^1 c^1 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = P - \alpha^1 f^1 (\theta - t) - \alpha^2 f^2 (\theta - t_v) \\ m^2 c^2 \frac{\partial t}{\partial \tau} + c^2 GL \partial t / \partial x = \alpha^1 f^1 (\theta - t) \end{cases} \quad (4.294)$$

де P - потужність нагрівача, Вт;

$m^1 c^1$ - приведена теплоємність корпусу і нагрівача, Дж/°С;

$m^2 c^2$ - приведена теплоємність шнека та зерна, Дж/°С;

G - продуктивність, кг/год;

α_1, α_2 - коефіцієнти теплообміну кондуктивного і конвективного відповідно, Вт/м²°С;

f_1, f_2 - внутрішня і зовнішня поверхня корпусу, м²;

θ, t - температура корпусу та зерна, °С.

Визначення залежності $\theta(\tau, x)$ отримаємо наближеним розв'язком. За умови встановленого (сталого) режиму при $\frac{d\theta}{d\tau} = 0$ та $\frac{dt}{d\tau} = 0$, визначимо з першого рівняння системи (4.292) величину:

$$\theta = (P + \alpha^2 f^2 t_v) / (\alpha^1 f^1 + \alpha^2 f^2) + (\alpha^1 f^1) / (\alpha^1 f^1 + \alpha^2 f^2) \cdot t \quad (4.295)$$

Підставляємо в друге рівняння системи (4.292) та отримуємо:

$$\begin{aligned} c_2 GL / (\alpha_1 f_1) dt / dx = \\ = (P + \alpha_2 f_2 t_v) / (\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2) - (1 - (\alpha_1 f_1) / (\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2)) t \end{aligned} \quad (4.296)$$

Розв'язок рівняння (4.296) при граничних умовах $x = 0, t(x) = t_1$:

$$t(x) = a/b - (a/b - t_1) * e^{(-x/T_1 * b)} \quad (4.297)$$

$$T_1 = (c_2 GL)/(\alpha_1 f_1); a = (P + \alpha_2 f_2 t_v)/(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2);$$

$$b = 1 - (\alpha_1 f_1)/(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2).$$

Продиференціюємо $t(x)$ по x підставимо отримане значення в систему (4.294). Після перетворення систему запишемо у вигляді:

$$(T_1 d\Theta/d\tau = b_1 - a_1 \Theta + t)(d\Theta/d\tau = T_2 (d^2 t)/(d\tau^2) + dt/d\tau) \quad (4.298)$$

$$T_1 = (m_1 c_1)/(\alpha_1 f_1); T_2 = (m_2 c_2)/(\alpha_1 f_1);$$

$$b_1 = (P + \alpha_2 f_2 t_v)/(\alpha_1 f_1); b_2 = (c_2 GL)/(\alpha_1 f_1) f(x).$$

Отримаємо зміну температури зернопродукту в перехідному режимі:

$$T_1 T_2 (d^2 t)/(d\tau^2) + (T_1 + a_1 T_2) dt/d\tau + (a_1 - 1)t = b_1 - a_1 b_2 \quad (4.299)$$

Розв'язок рівняння (4.299) при $\tau = 0, t = t_0, \frac{dt}{d\tau} = 0$:

$$t(\tau, x) = (C t_0 - D)/(C(r_1 - r_2))(r_1 e^{(r_2 \tau)} - r_2 e^{(r_1 \tau)}) + D/C \quad (4.300)$$

$$r_{(1,2)} = \left(-B \pm \sqrt{(B^2 - 4AC)} \right) / (2A); D = (b_1 - a_1 b_2);$$

$$C = (a_1 - 1); B = T_1 + a_1 T_2; A = T_1 T_2.$$

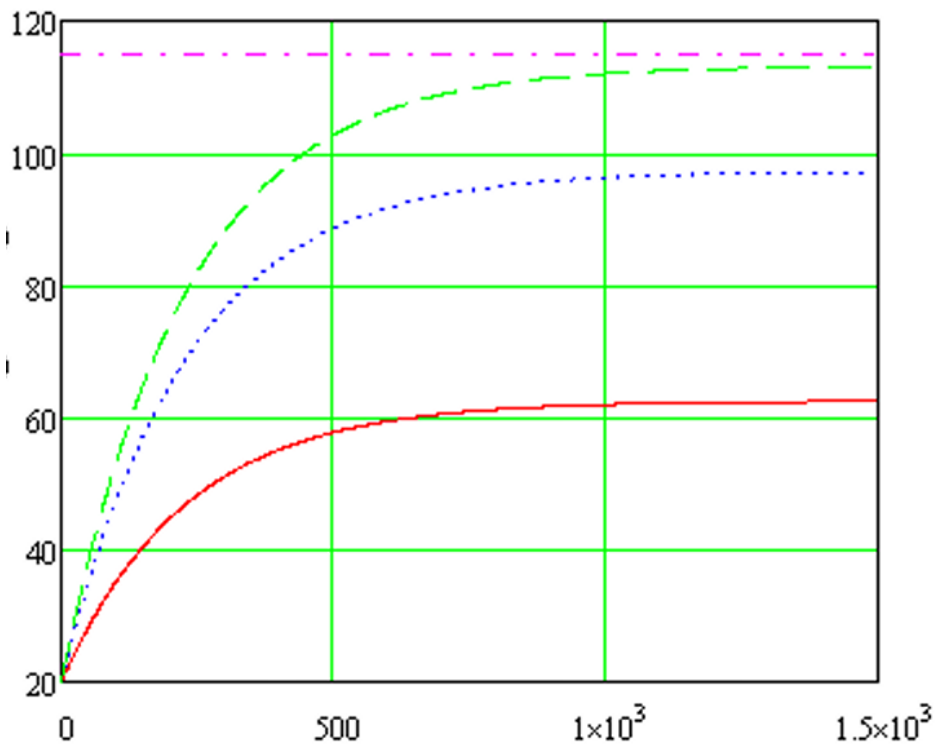


Рис. 4.50. Графік розподілу температури

На графіку рис. 4.50 зображено криві зміни температури $t(^{\circ}\text{C})$ від часу τ для різних відстаней x : 0.6 м, 1.0 м та 1.2 м від завантажувальної горловини. Максимальна температура стабілізації становить близько 115°C .

Створено математичну модель процесу нагріву зерна ріпаку в прес-екструдері при використанні індукційного нагріву з урахуванням розподілу температури в напрямку руху матеріалу. Встановлені основні закономірності зміни температури матеріалу в часі та за координатою.

4.13. Використання робочого органу універсального вібротлима для сушіння зернового матеріалу

Одним з перспективних напрямків інтенсифікації тепло і – масопереносу в процесах сушіння рослинних матеріалів і підвищення енергетичної ефективності сушильних установок є застосування вібраційного поля для перемішування зернового

матеріалу при переміщенні в сушильній камері. Аналізом існуючих вібраційних установок виявлено, що найбільш перспективним є використання вібропомельних камер з просторово – циркуляційним рухом матеріалу для реалізації термічної обробки зерна, зокрема сушіння. Таким чином, пропонується використовувати апробовану елементну базу вібраційного млина, в якості робочого органа якого є помельні камери з просторово – циркуляційним рухом завантаження.

Отримані диференціальні рівняння складають математичну модель нестационарного процесу безперервного сушіння зернового матеріалу і визначають зміну в часі, параметри зерна і парогазової суміші на виході зерносушильної камери. Побудована математична модель процесу сушіння дає змогу визначити режими нагріву та зневоднення зернового матеріалу при циркуляційному переміщенні у вібраційній камері з кондуктивним підведенням енергії і частковим вакуумуванням камери для розширення технологічних можливостей установок типу «вібромлин». Наведено графічні залежності зміни в часі температури і вологовмісту зерна, данні для побудови яких визначені експериментально при нагріві моношару зерна масою m на гріючій поверхні площею F при стабілізованій температурі поверхні θ_n . В роботі отримані показники кінетики сушіння і нагріву зерна, за якими розраховані параметри вібротермосушильної установки. Також використовуючи результати експериментів, встановлено показники функціонування вібросушарки, створеної на базі помельної камери вібромлина.

Одним із прогресивних напрямків інтенсифікації процесів обробки сипких сільськогосподарських матеріалів є застосування вібраційних технологій, які широко використовуються в різних галузях переробної промисловості і, зокрема вібраційних машин безперервної дії з просторово – циркуляційним рухом завантаження. Особливим класом таких

машин є вібраційні подрібнювачі сипких матеріалів – вібромлини. Технологічні особливості таких машин полягають в інтенсивному малоенергозатратному перемішуванні матеріалу в камері при його просторово – циркуляційному переміщенні в прямому або замкнутому циклах.

Практично матеріал (завантаження) під дією сформованого вібраційного поля обертається в циліндричних камерах утворюючи розпушений суцільний обертальний шар, який щільно контактує з внутрішньою поверхнею камери. Такий механізм процесу переміщення та перемішування сипкого матеріалу є дуже привабливим для організації процесів термообробки або сушіння вологих матеріалів шляхом підведення до матеріалу теплової енергії та видалення залишкової вологості з віброкамери.

Дослідження процесів перемішування і транспортування матеріалу у просторово – циркуляційному шарі, наприкладі, вібромлинів з різними варіантами використання вібраційних полів досить детально висвітлені в роботах [9, 10]. Однак, залишено маловивченими процеси тепло- і масообміну в апаратах з просторово – циркуляційним рухом матеріалу при кондуктивному теплопідводі, хоча ефективність такого способу передачі теплоти підтверджено в роботах [13, 14].

Таким чином, є реальна можливість використовувати створену і апробовану елементну базу, а саме сполучені помельні камери з просторово-циркуляційним рухом завантаження для нагріву або сушіння зернових матеріалів. Побудова математичної моделі процесу сушіння для визначення режимів нагріву та зневоднення зернового матеріалу при циркуляційному переміщенні у вібраційній камері з кондуктивним підведенням енергії і частковим вакуумуванням камери.

Враховуючи, що вібромеханічні для розширення технологічних можливостей установок типу «вібромлин». характеристики вібромлина достатньо вивчені і висвітлені в

публікаціях [9, 11] виникає необхідність аналітичного (як першого етапу) дослідження теплових процесів, які визначають режими процесу термічного сушіння матеріалу при циркуляційно-просторовому переміщенні.

Основним способом сушіння зерна в господарствах залишається – конвективне сушіння в щільному рухомому (переважно гравітаційному) шарі. Недоліками такого способу є екранування до 30 % поверхні теплообміну та значні втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом [1]. Суттєвої інтенсифікації сушіння зерна можна досягти застосуванням вібраційного зрідження зернового шару [2-5]. Вібраційна дія на зерновий матеріал розпушує щільний шар, збільшує рівномірність обробки зернівок сушильним агентом, виключає місцевий перегрів окремих частинок [4, 5].

Останніми роками дослідження в області сушіння у вібраційному шарі спрямовано за напрямками вдосконалення режимів сушіння [6], застосування комбінованих методів підведення енергії до матеріалу [7, 8], використанням інфрачервоного випромінювання [7], кондуктивної теплопередачі теплової енергії до матеріалу [12]. Проаналізовані дослідження [2-8, 12] стосуються в основному інтенсифікації конвективного тепло- і масообміну, але значні втрати енергії з відпрацьованим сушильним агентом, не дозволяють повно використовувати підведену до матеріалу енергію.

Разом з тим, значної енергетичної ефективності зерносушарок можна досягти, застосуванням кондуктивного теплопідводу безпосередньо в шар матеріалу [12, 14, 15] і використанням сушильного агента не як теплоносія, а як середовища для поглинання і видалення вологи. Хороші результати досягнуто також вакуумуванням сушильної камери [16].

В якості установки для нагрівання та сушіння зернового матеріалу використано робочий орган – помельну камеру рис.1

вібраційного млина [9, 10] додатково оснащеного електричним нагрівальним елементом для підведення теплової енергії до матеріала, що циркулює в камері та системою вакуумування об'єму камери обробки матеріалу. Камера рис. 2, виконана у вигляді двох циліндричних контейнерів 1 і 2 встановлених один від одного послідовно відкритими торцями і з'єднаних по твірних з'єднувальним жолобом 3 в тильній частині. Передні торці циліндричних контейнерів з'єднані перевантажувальним між жолобом собою 4, який складається з вертикального жолоба 1 (рис. 4.51, 4.52), що переходить у розвантажувальний лоток 2 з вивантажувальним клапаном 6.

На зовнішній поверхні циліндричних стінок 1, 2 закріплений нагрівальний елемент 9 у вигляді намотаного високоомного дроту 10 підключеного до джерела живлення. У торці перехідного жолоба (3) вмонтовано патрубок (7) для відсмоктування водяної пари, що виділяється із вологого продукту в камерах (1 і 2), за допомогою компресорної запобігання утворенню установки. «застійної Для зони» (малорухомого ядра матеріалу [10]) в центрі камери встановлюють циліндричну перфоровану вставку 11, з'єднану з патрубком 7, яку використовують як «колектор» пароповітряної суміші. Для герметизації камери на вході 5 та виході 6 встановлюють шлюзові затвори 12 та 13. Термосушильна вібраційна установка працює наступним чином.

Після запуску привода – віброзбудника та подачі напруги на нагрівальний елемент, під дією утворюваного плоского вібраційного поля, створюваного віброзбуджувачем контейнерів, їм передають коливання, внаслідок чого матеріалу передається просторовий циркуляційний рух уздовж контейнерів.

Матеріал набуває обертальний рух і контактуючі з нагрітою поверхнею контейнерів отримує від неї теплоту, яка витрачається на Вібрації в техніці та технологіях нагрів

вологого матеріалу і випаровування води, яка видаляється з камери у вигляді пароповітряної суміші.

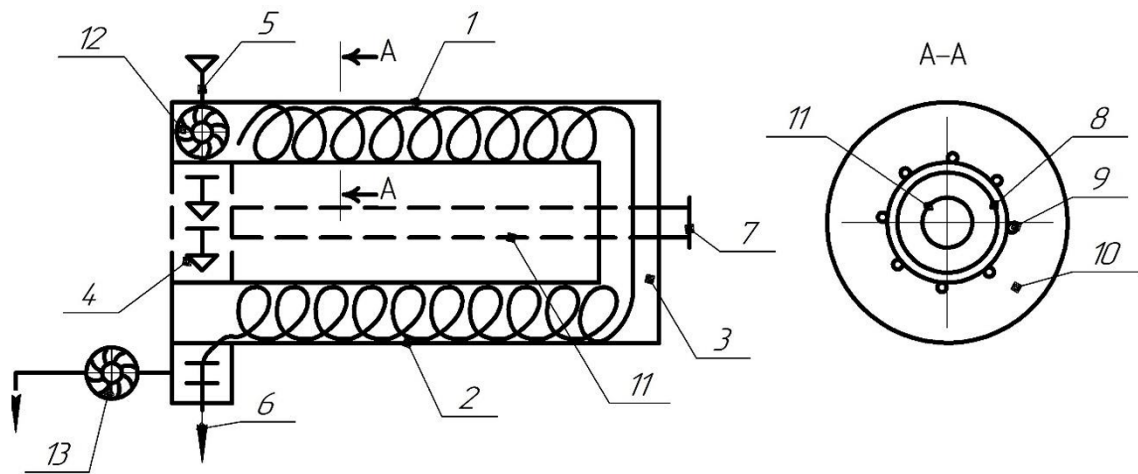


Рис. 4.51. Технологічна схема вібротермосушильної установки

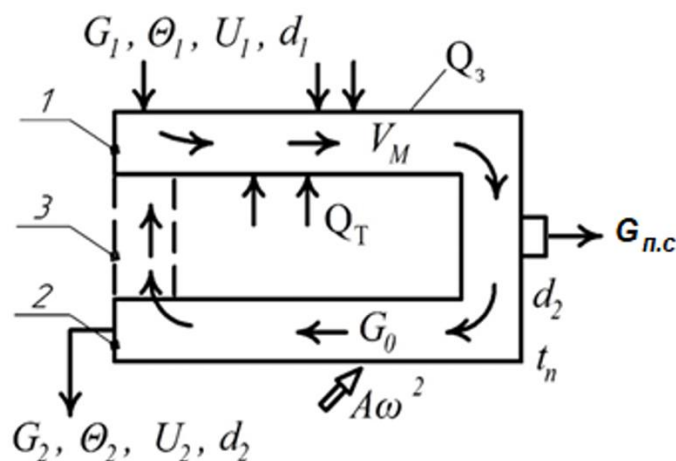


Рис. 4.52. Розрахункова схема установки

Сушильно-термічна віброустановка може функціонувати в двох гідродинамічних режимах: безперервне транспортування матеріалу від входу 1 до вивантаження 2 1 режим ідеального витиснення - установка працює безперервно; другий режим - періодичне завантаження (установка періодичної дії) - матеріал циркулює по замкненому контуру (1-2-3-1) - режим ідеального змішування.

Розглянемо процес тепломасопереносу при взаємодії віброзрідженого обертового шару зернового матеріалу з нагрітою поверхнею, яка здійснює коливальний площинний

рух. Як відомо [17], для інтенсифікації тепломасообмінних процесів, яким є сушіння зерна при контактній передачі теплової енергії, бажано щоб оброблювальний матеріал змінював своє положення відносно нагрітої поверхні, тобто щоб постійно змінювались умови тепло- і масообміну частинок з нагріваючою поверхнею.

Це досягається дією вібраційного поля на елементи (частинки) зернового матеріалу. Для кількісного визначення теплового потоку від нагрітого тіла до частинки, що нагрівається, О. Кришером [17] запропонована така схема: за час контакту температура на поверхні контактуючих зон буде на протязі контакту постійною і рівною t_n , а на зворотній поверхні частинки буде залишатися початкова температура t_3 .

При цьому кількість теплоти отримана частинкою за одиницю часу визначається виразом:

$$Q = F \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_k}} \cdot (\theta_n - \theta_3) \quad (4.301)$$

де F - поверхня теплопередачі, m^2 ; λ - коефіцієнт теплопровідності, $Вт/м \cdot ^\circ C$; c - питома теплоємність, $Дж/кг \cdot ^\circ C$; τ_k - час контакту, $с$; ρ - густина матеріалу, $кг/м^3$; θ_n - температура нагрівальної поверхні, $^\circ C$; θ_3 - температура матеріалу, $^\circ C$.

Для визначення сумарної кількості теплоти за час контакту інтегруванням добутку, отримано [17]:

$$Q_\tau = F \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \cdot \sqrt{\tau} \cdot (\theta_n - \theta_3) \quad (4.302)$$

При розрахунках теплообміну нагрівальної поверхні з рухомих середовищем зазвичай використовують коефіцієнт теплообміну α , а кількість переданої теплоти за одиницю часу визначають рівнянням Ньютона:

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (\theta_n - \theta_m) \quad (4.303)$$

де θ_m - температура рухомого теплоносія, $^\circ C$.

Враховуючи, що віброзріджуючий шар зерна є рухомих теплосприймаючим середовищем із співставлення (4.301) та (4.302) отримано значення коефіцієнта контактного теплообміну,

$$\alpha = 2\sqrt{(\lambda \cdot c \cdot \rho)} / \sqrt{(\pi)} \cdot 1/\sqrt{(\tau)} \quad (4.304)$$

Де $\sqrt{(\lambda \cdot c \cdot \rho)}$ - коефіцієнт проникнення теплоти, Дж/м² °С·с^{1/2}.

Диференціальні рівняння для визначення нестационарних параметрів процесу сушіння: температури $\theta(t)$, вологовмісту $u(t)$ на нагрівальній поверхні $\theta_n(t)$ можна отримати з рівнянь теплового і матеріального балансів при наступних припущеннях: теплота від нагрівальної поверхні до зерна передається контактною теплопровідністю і рушійною силою є температурний напір $(\theta_n - \theta_m)$; показником інтенсивності теплопередачі є коефіцієнт теплообміну α , що враховує складові теплообміну (кондуктивний, радіаційний); - волога із зерна видаляється за законом випаровування із вільної поверхні, дифузійним переносом від поверхні матеріалу в оточуюче середовище через пограничний шар парогазової суміші знехтуємо; потенціалом переносу є різниця парціальних тисків на поверхні матеріалу та в середовищі, або різниця концентрацій водяної пари на поверхні матеріалу та в оточуючому парогазовому середовищі. Інтенсивність випаровування за законом Дальтона визначається рівнянням:

$$m_0 \frac{du}{d\tau} = W = F \frac{\beta}{R_{\pi} \cdot T} (\rho_{\pi} - \rho_{\pi.c.}) \quad (4.305)$$

де m_0 - маса абсолютно сухого матеріалу, кг;

F - поверхня випаровування, м²;

β - коефіцієнт масообміну, моль/м²·с;

R_{π} - універсальна газова стала, $R = 8,314$ кДж/моль °С;

T - температура пари, °С;

W - випарна здатність поверхні, кг/с.,

$\rho_{\pi}, \rho_{\pi.c.}$ - парціальний тиск пари на поверхні (при температурі поверхні) та в оточуючому середовищі, Па.

Оскільки, $\frac{\rho_{\pi}}{R_{\pi} \cdot T} = \rho_{\pi}$ - густина (об'ємна концентрація) пари, то рівняння (4.305) можна переписати у вигляді:

$$W = F\beta(\rho_{\pi} - \rho_{\pi.c.}) \quad (4.306)$$

Але, оскільки, густина залежить від температури, простіше використовувати масову концентрацію - вологовміст пари. Тоді рівняння масообміну в диференціальній формі можна записати так:

$$-m_0 \frac{du}{d\tau} = F\beta(d_{\Pi} - d_{\Pi.C.}) \quad (4.307)$$

де $d_{\Pi}, d_{\Pi.C.}$, - масова концентрація пари на поверхні та в оточуючому середовищі, кг/м³.

Коефіцієнт масообміну β визначається з критеріального рівняння [17]:

$$\beta = Nu' \frac{D}{R_r},$$

де Nu' - критерій Нусельта масообмінний, моль/м⁴;

D - коефіцієнт дифузії пари, м²/с;

R_r - відстань руху пари (радіус зернівки), м.

Коефіцієнт дифузії водяної пари залежить від температури і тиску парогазової суміші, і визначають згідно [17] за формулою:

$$D = 0,112 \frac{P_B}{P_C} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81} \frac{1}{3600} \quad (4.308)$$

де P_B, P_C — барометричний тиск і тиск середовища в камері, Па. Оскільки при дифузійному переносі пари масообмінний критерій Нусельта дорівнює Nu' , то коефіцієнт масообміну визначається формулою:

$$\beta = 2 \cdot \frac{0,112}{3600} \frac{P_B}{P_C} \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81} R_r^{-1}. \quad (4.309)$$

При прийнятих припущеннях математичний опис процесу сушіння у вібраційний сушарці з циркуляційно просторовим рухом матеріалу в умовах вакууму сформуємо у вигляді диференціальних рівнянь теплового балансу: для сушильної камери з нагрівачем:

$$m_H C_H \frac{d\theta_H}{d\tau} = P_H - \alpha F(\theta_H - \bar{\theta}_3) - kF_3(\theta_H - t_3) \quad (4.310)$$

для зернового матеріалу в камері:

$$m_3 C_3 \frac{d\theta_3}{d\tau} = G_3 c_3(\theta_1 - \theta_3) + \alpha F(\theta_H - \bar{\theta}_3) - r\beta F[d_H(\theta_3) - \bar{d}_3] \quad (4.311)$$

для пароповітряної суміші:

$$m_{\text{пс}} c_{\text{пс}} \frac{dt}{d\tau} = G_{\text{пс}} c_{\text{пс}} (t_1 - t) - r \beta F [d_{\text{н}}(\theta_3) - \bar{d}_c] \quad (4.312)$$

та рівнянь матеріального балансу:

$$m_{\text{пс}} \frac{dd}{d\tau} = G_{\text{пс}} (d_1 - d) + \beta F [d_{\text{н}}(\theta_3) - \bar{d}_c] \quad (4.313)$$

$$-m_0 \frac{du}{d\tau} = G_0 (u_1 - u) + \beta F [d_{\text{н}}(\theta_3) - \bar{d}_c] \quad (4.314)$$

В рівняннях (4.310) – (4.314) позначено:

$\theta_{\text{н}}$, θ_3 , t - температура нагрівальної поверхні, зернового матеріалу та пароповітряної суміші, °С;

$P_{\text{н}}$ - потужність нагрівача нагрівальної поверхні, Вт;

α , β - коефіцієнти теплообміну і масообміну, Вт/м²·°С і кг/м²·с;

F , F_3 - поверхня нагріву зерна та зовнішня поверхня камери сушіння, м²;

c_3 , $c_{\text{пс}}$ - питома теплоємність зерна та пароповітряної суміші, Дж/кг °С;

$C_{\text{н}}$ - питома теплоємність матеріалу нагрівальної поверхні з нагрівальним елементом, Дж/кг °С;

$m_{\text{н}}$, m_3 , $m_{\text{пс}}$, m_0 - маса нагрівача, зернового матеріалу, пароповітряної суміші і сухого повітря в об'ємі камери, кг;

G_3 , G_0 - витрати (масові) вологого та абсолютно сухого зерна, кг/с;

$G_{\text{пс}}$ - витрати пароповітряної суміші, кг/с;

u_1 , u - початковий та поточний вологовміст зерна, кг/кг;

d_1 , d , $\bar{d}_c$ - початковий (на вході), поточний і середній вологовміст пароповітряної суміші, кг/кг;

$d_{\text{н}}(\theta_3)$ - вологовміст насиченої пари на поверхні зерна при його температурі, кг/кг;

t_1 , θ_1 - температура пароповітряної суміші та зернового матеріалу на вході в камеру, °С;

t_3 - температура зовнішнього середовища, °С;

k – коефіцієнт теплопередачі від нагрівача до зовнішнього середовища, Вт/м·°С.

Отримані рівняння складають математичну модель (проточна модель ідеального змішування) нестационарного процесу безперервного сушіння зернового матеріалу і визначає зміну в часі параметрів зерна і парогазової суміші на виході зерносушильної камери.

Для отримання аналітичних залежностей зміни параметрів зернового матеріалу в часі від впливових факторів зробимо спрощення системи рівнянь (4.314). Залежність насиченого вологовмісту пароповітряної суміші апроксимуємо виразом:

$$d''_H(\theta_3) = \alpha\theta_3 + b \quad (4.315)$$

Де α, b — коефіцієнти лінійної апроксимації, $\alpha = 3,4$; $b = -7,0$ г/кг.с.п;

За умови розігрітої нагрівальної поверхні $\frac{d\theta_H}{d\tau} = 0$ її температура визначається рівнянням:

$$\theta_H = A + B\theta_3, \quad (4.316)$$

Де $A = \frac{P_H + kF_3t_3}{\alpha F + k_3F_3}$, $B = \frac{\alpha F}{\alpha F + k_3F_3}$. Конвективну складову теплообміну не враховуємо, а температуру пароповітряної суміші на виході приймаємо рівній температурі зернового матеріалу ($t = \theta_3$). З урахуванням виразів (4.315) та (4.316) рівняння (4.311) та (4.313) набувають вигляду:

$$T_1 \frac{d\theta_3}{d\tau} + \alpha_1\theta_3 - b_1 = d, \quad (4.317)$$

$$T_2 \frac{dd}{d\tau} = \alpha_2 d - b_2 = \theta_3, \quad (4.318)$$

Де

$$T_1 = \frac{m_3c_3}{0,5r\beta F}, \quad \alpha_1 = \frac{\alpha F + r\beta Fb - \alpha Fb}{0,5r\beta F}, \quad b_1 = \frac{G_3c_3\theta_1 + 0,5r\beta Fd_1 - r\beta Fb}{0,5r\beta F},$$

$$T_2 = \frac{m_{nc}b}{\alpha\beta F}, \quad \alpha_2 = \frac{G_{nc} + 0,5\beta F}{\alpha\beta F}, \quad b_2 = \frac{(G_{nc} - 0,5\beta F)d_1 + \beta Fb}{\alpha\beta F}.$$

Зводячи рівняння (16) та (17) до одного матимемо:

$$A_1 \frac{d^2\theta}{d\tau^2} + B_1 \frac{d\theta}{d\tau} + C_1\theta = D_1, \quad (4.319)$$

$$A_1 \frac{d^2d}{d\tau^2} + B_1 \frac{dd}{d\tau} + C_1d = D_2, \quad (4.320)$$

Де $A_1 = T_1 T_2$ і $B_1 = \alpha_1 T_2 + \alpha_2 T_1$, $C_1 = \alpha_1 \alpha_2 - 1$, і $D_1 = b_2 + b_1 \alpha_2$, $D_1 = b_1 + b_2 \alpha_1$.

Розв'язок неоднорідних диференціальних рівнянь (4.319), (4.320) за початкових умов: $\tau = 0$, $\theta = \theta_0 = \theta_1$, $d = d_0 = d_1$, $\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{dd}{d\tau} = 0$,

$$\theta_3(\tau) = \frac{\theta_0 C_1 - D_1}{C_1(r_1 - r_2)} [r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}] + \frac{D_1}{C_1} \quad (4.321)$$

$$d(\tau) = \frac{d_0 C_1 - D_1}{C_1(r_1 - r_2)} [r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}] + \frac{D_2}{C_1} \quad (4.322)$$

Де $r_{1,2} = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4A_1 C_1}}{2A_1}$ - корені характеристичного рівняння.

При використанні вібраційної сушарки в періодичному режимі функціонування (разове завантаження зернового матеріалу масою m) параметри $\theta_3(\tau)$ і $d(\tau)$ визначаються залежностями (4.321), (4.322) при $G_3 = 0$.

Рівняння кінетики сушіння (4.313) при використанні рівнянь (4.314) та (4.321) набуває вигляду:

$$-\frac{m_0}{G_0} \frac{du}{d\tau} + u = u_1 + \frac{\beta F}{G_0} [\alpha_1 \theta(\tau) + C_1 - 0,5d_1 - 0,5d(\tau)] \quad (4.323)$$

Підставляючи значення $\theta_3(\tau)$ та $d(\tau)$ в рівняння (4.322) після перетворень матимемо:

$$-\frac{m_0}{G_0} \frac{du}{d\tau} + u = \left[u_1 + \frac{D_3}{C_1} (D_1 - D_2) \right] + r_1 P e^{r_2 \tau} - r_2 P e^{r_1 \tau} \quad (4.324)$$

Де $D_3 = \frac{\beta F}{G_0} (C_1 - 0,5d_1)$, $A_2 = \frac{G_0}{m_0} \left[u_1 + \frac{D_3}{C_1} (D_1 - D_2) \right]$, $P = D_3(\alpha P_1 - 0,5P_2)$,

$$P_1 = \frac{\theta_0 C_1 - D_1}{C_1(r_1 - r_2)}, \quad P_2 = \frac{d_0 C_1 - D_2}{C_1(r_1 - r_2)}, \quad B_2 = \frac{G_0 r_1 P}{m_0}, \quad B_3 = \frac{G_0 r_2 P}{m_0} \quad \text{і}$$

перепишемо рівняння (4.324) у вигляді:

$$-\frac{du}{d\tau} + \frac{G_0}{m_0} u = A_2 + B_2 e^{r_2 \tau} + B_3 e^{r_1 \tau} \quad (4.325)$$

Розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (4.325) отримуємо у вигляді суми рішень однорідного та неоднорідного рівнянь:

$$u_1(\tau) = C_0 e^{-A_3 \tau}, u_2(\tau) = R_1 + R_2 e^{r_2 \tau} + R_3 e^{r_1 \tau},$$

у вигляді:

$$u_1(\tau) = C_0 e^{-A_3 \tau} - A_2 \frac{m_0}{G_0} + \frac{B_2}{r_2 - A_3} e^{r_1 \tau} + \frac{B_3}{r_1 - A_3} e^{r_2 \tau} \quad (4.326)$$

Де $A_3 = \frac{G_0}{m_0}$, $u_2(\tau)$ отримано методом невизначених множників.

Стала інтегрування C_0 визначена з початкових умов: $T = 0$, $u = u_1$,

$$C_0 = u_1 - \frac{A_2}{A_3} + \frac{B_2}{r_2 - A_3} + \frac{B_3}{r_1 - A_3}$$

Таким чином, параметри процесу сушіння зерна у вібраційній сушарці в умовах вакууму: температура $\theta(\tau)$ і вологовміст $u(\tau)$ на виході сушарки визначаються з рівнянь (4.321) та (4.326).

При розрахунках параметрів сушарки за отриманими рівняннями (4.321) та (4.326) треба знати значення коефіцієнтів теплообміну α_k і масообміну β , та поверхонь: F_k – теплосприймаючої та випаровування F_k які можна визначити за даними експериментів використовуючи моделі періодичного сушіння (за О.В. Ликовим):

$$m_3 c_3 \frac{d\theta}{d\tau} - m_0 r \frac{du}{d\tau} = \alpha_k F_k (\theta - \theta_0), \quad (4.327)$$

та модифіковану за Морелем запис рівняння Дальтона:

$$m_0 \frac{du}{d\tau} = \beta' F_B \left[d''(\theta) - d_c \right] \frac{P_B}{P_c} \quad (4.328)$$

Де F_B - поверхня випаровування;

$d''(\theta) = \alpha \theta - c$ кг/кг;

d_c - вологовміст пароповітряного середовища, кг/кг;

З рівняння (4.327) матимемо (замінюючи похідні приростами ($dx = \Delta x$)) формулу для визначення α_k ;

$$\alpha_k F_k = \frac{m_3 c_3 \Delta \theta + m_0 r \Delta u}{\tau_c L N} \quad (4.329)$$

Де $LN = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln(\frac{\theta_K - \theta_1}{\theta_K - \theta_2})}$; $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, $\Delta u = u_1 - u_2$; θ_1, θ_2 і u_1, u_2 -

початкові та кінцеві значення температури матеріалу та вологовмісту, °C і %; τ_c – час сушіння, с.

Оскільки теплота від поверхні нагріву передається зернівкам не тільки контактом, а також випромінюванням, то за поверхню теплообміну F_k - приймається вся поверхня нагрівача на якій розміщено зерно.

Величина коефіцієнта масообміну β' визначається з рівняння (4.328):

$$\beta' F_B = \frac{m_0 \Delta u}{(\alpha \theta - c - d_c) \tau_c} \quad (4.330)$$

Величину поверхні випаровування можна визначити (наближено) із співвідношення:

$$F_B = \frac{\beta}{\beta'}, \quad (4.331)$$

Де β теоретичне значення за виразом (4.309).

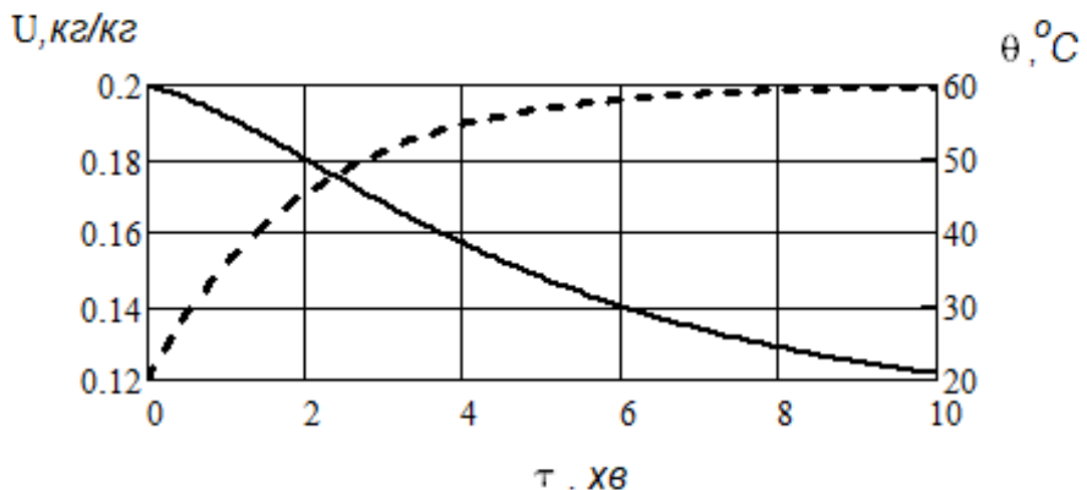


Рис. 4.53. Кінетика сушіння і нагрівання зерна при атмосферному тиску

На рис. 4.53. наведено графічні залежності зміни в часі температури і вологовмісту зерна визначені експериментально при нагріві моношару зерна масою m на гріючій поверхні площею F при стабілізованій температурі поверхні θ_H .

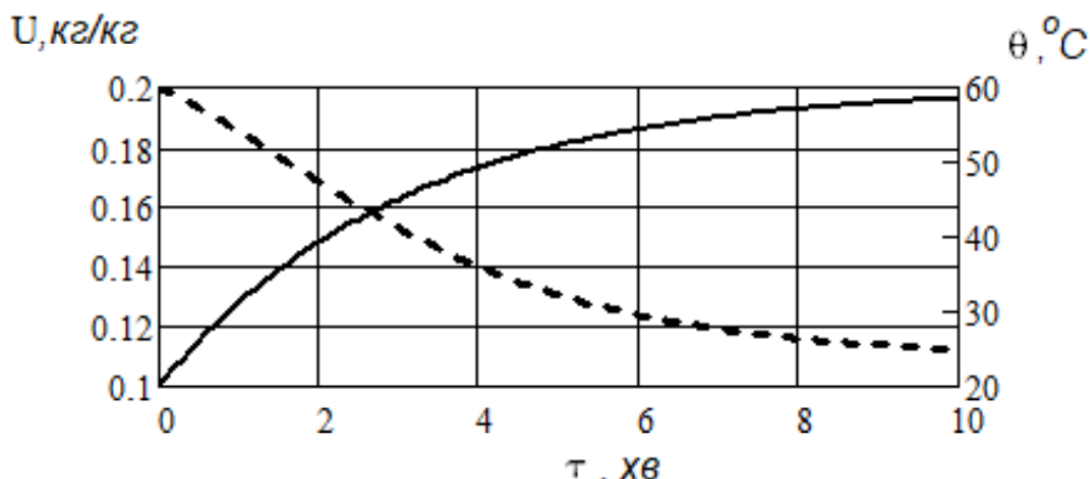


Рис. 4.54. Кінетика сушіння і нагрівання зерна у вакуумі ($P=20$ кПа)

На рис. 4.54. аналогічні залежності для сушіння у вакуумі ($P = 20$ кПа). З графіків визначаємо середні значення (за процес) швидкості сушіння $\frac{\Delta u}{d\tau}$ та нагріву $\frac{\Delta \theta}{d\tau}$ і розраховуємо коефіцієнти теплообміну $\alpha_{\text{ат}} = 38,6 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, $\alpha_{\text{вак}} = 78 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, критерій Ребіндера $R_{B_{\text{ат}}} = 0,33$; $R_{B_{\text{вак}}} = 0,23$.

Таким чином, визначене вакуумування камери сушіння дозволяє суттєво інтенсифікувати процес сушіння зернового матеріалу.

За даними літературного аналізу коефіцієнт теплообміну між нагрівальною поверхнею і матеріалом у віброзрідженому шарі збільшується з підвищенням параметрів вібрації. Узагальнена, за даними ряду дослідників, залежність коефіцієнта теплообміну від параметрів вібрації нагрівальної поверхні може бути апроксимована рівнянням:

$$\alpha_{\text{вібр}} = 86 + 6,7 \frac{A\omega^2}{g} \quad (4.332)$$

Де A, ω - амплітуда і частота коливань нагрівальної поверхні, мм, с^{-1} ;

g - прискорення сили тяжіння, м/с^2 .

Використовуючи критерій Ребіндера $\left(Rb = \frac{c}{r} \frac{d\theta}{du}\right)$ і апроксимуюче рівняння графічної залежності Θ_τ (рис. 4.54).

$$\theta_{\tau} = 60,1 - 40,2e^{-0,51\tau} \quad (4.333)$$

з рівняння (4.325) матимемо:

$$du = \frac{\alpha F(\theta_H - \theta_3)}{r \cdot m_3 R b} e^{-\frac{\alpha F}{m_3 c_3} \tau} d\tau \quad (4.334)$$

Графічна інтерпретація розв'язку рівняння (4.334) наведена на рис. 4.55. В якості теоретичної кривої сушіння зерна у вакуумній камері яка реалізує вібраційні коливання з частотою $\omega = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ [9].

Як впливає з графіка $U(\tau)$ експозицію сушіння можна зменшити до 223 с при застосуванні кондуктивного підведення теплоти у вакуумній сушильній камері за наявності вібрації нагрівальної поверхні.

Коефіцієнт масообміну визначений за даними графіка $U(\tau)$ по формулі (4.328) дорівнює $\beta = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$, за формулою (8) $\beta = 7,97 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$.

Таким чином отримана теоретична залежність відповідає прийнятим припущенням.

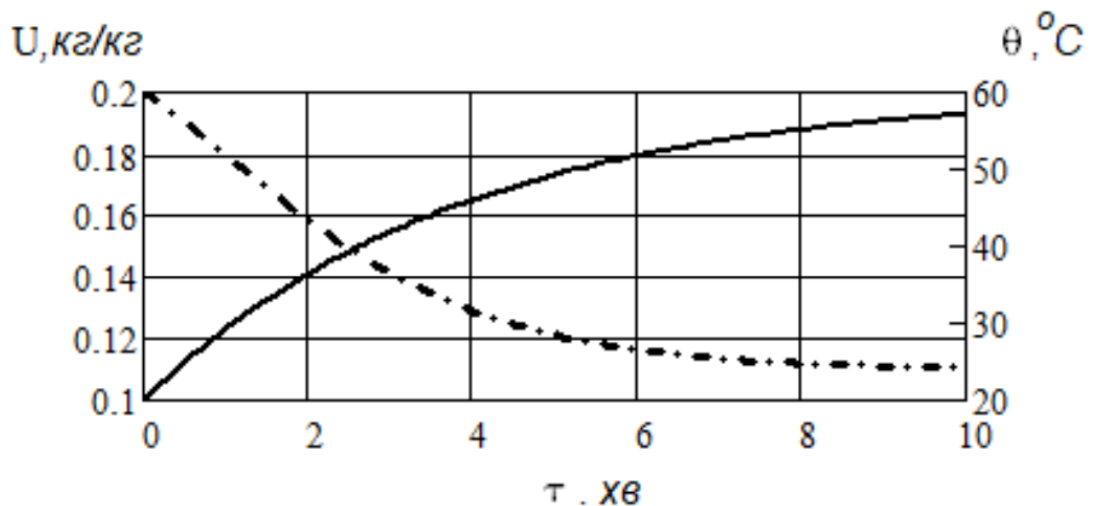


Рис. 4.55. Теоретичні криві сушіння і нагрівання зерна у вакуумі за наявності вібрації

Визначивши невідомі коефіцієнти і сталі величини, які містять рівняння (4.325) та (4.326) отримали графічні

залежності перехідного процесу сушіння зерна у вакуумній віброкамері, тобто зміну в часі температури $\theta_2(\tau)$ та вологовмісту $U_2(\tau)$ на виході з камери в безперервному режимі – рис.7.

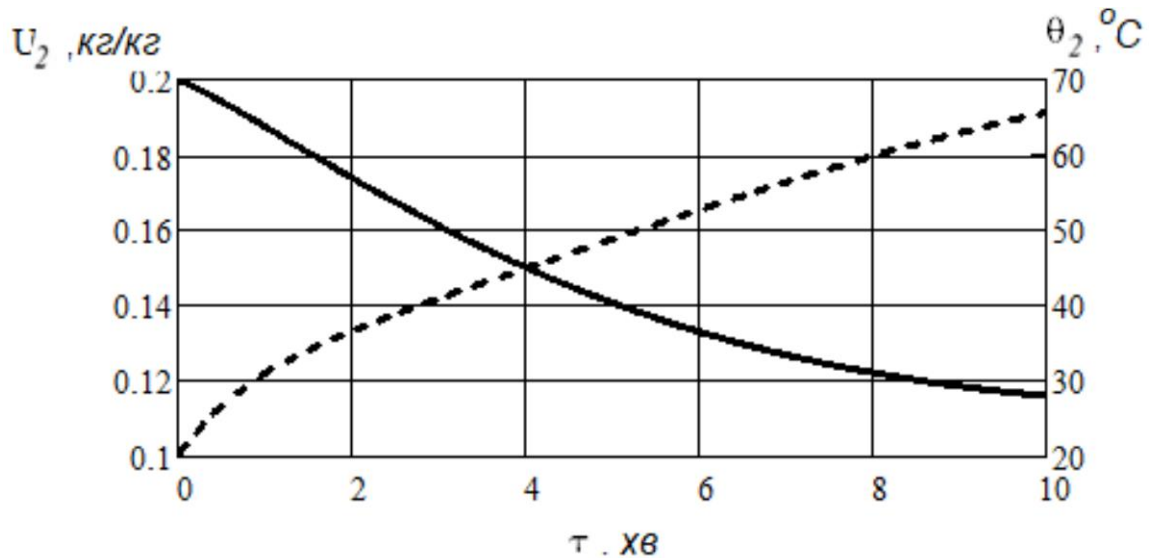


Рис. 4.56. Кінетичні залежності зміни параметрів матеріалу на виході камери $\theta_2(\tau)$, $U_2(\tau)$ від часу сушіння

Із графіку $U_2(\tau)$ визначається експозиція сушіння τ_c . Із емпіричної залежності швидкості переміщення матеріалу ($\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$) від параметрів вібраційного впливу A та ω :

$$V_3 = -27.67 + 0.16\omega + 11.25A1461.6 \cdot 10^{-3} + 0.0157A\omega - 3.44 \cdot 10^{-4}\omega^2 - 3.11A^2 - 9.9\rho^2 \cdot 10^{-8}$$

визначається швидкість переміщення V_3 зернового матеріалу. Знаючи ці параметри розраховується довжина камери за очевидним співвідношенням:

$$L = v_3 \tau_c \quad (4.335)$$

Де v_3 - швидкість руху зерна в сушарці, м/с.

Продуктивність сушарки залежить від режимних і конструкційних параметрів

$$G_3 = v_3 S_H S'_3 \quad (4.336)$$

Де S'_3 - площа поперечного перетину матеріалу в камері, м^2 ;

S_H - насипна щільність матеріалу, кг/м^3 .

Із співвідношення (4.335) та (4.336) матимемо:

$$G_3 = \frac{L}{\tau_c} S_H S'_3 = \frac{m_3}{\tau_c} \quad (4.337)$$

де m_3 – маса зерна в камері, кг ;

L – довжина камери, м .

Задаючись продуктивністю сушарки G_3 та визначивши τ_c із графіка (рис. 4.56) через $u(\tau)$ розраховують масу матеріалу в камері m_3 його об'єм V_3 та об'єм камери V_k :

$$V_k = \varepsilon V_3 = S'_k L \quad (4.338)$$

Де ε – коефіцієнт заповнення камери;

S'_k – площа поперечного перетину камери $S'_k = \frac{\pi D_k^2}{4}$, м^2 .

Із геометричних співвідношень визначаємо площу перетину камери:

$$S'_k = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{F_H}{\pi L}} \quad (4.339)$$

Де $F_H = \pi D_k L$ – поверхня нагріву, м^2 .

Енергетична характеристика сушарки визначається рівнянням енергетичного (теплового) балансу:

$$P_H = \alpha_k F_H (\theta_H - \bar{\theta}_H) = G_3 c_3 (\theta_2 - \theta_1) + G_0 r (u_1 - u_2) + k F_3 (\theta_H - t_3), \quad (4.340)$$

звідки

$$F_H = \frac{P_H}{\alpha_k (A, \omega)} (\theta_H - \bar{\theta}_H) \quad (4.341)$$

За отриманими даними кінетики сушіння і нагріву зерна $u(\tau)$, $\theta(\tau)$ та розрахунковими співвідношеннями (4.329), (4.331) – (4.341) розраховані параметри зерносушарки. Для базової моделі помельної камери вібромлина МВЕ-5 [9] при збільшенні об'єму камери до $14,5 \text{ дм}^3$, при потужності нагрівального елемента $7,5 \text{ кВт}$ продуктивність зерносушіння складатиме $=150 \text{ кг/год}$. При цьому вологонапруженість об'єму камери складатиме $25,2 \text{ кг/м}^3$, що в рази перевищує цей показник для конвективних сушарок.

Короткі висновки.

Аналізом попередніх досліджень встановлено високу ефективність і перспективність термообробки зернових матеріалів у вібраційних установках, зокрема з просторово-циркуляційним рухом обробляемого матеріалу. Сформульований математичний опис процесу сушіння зернового матеріалу у віброкамері з просторово-циркуляційним рухом матеріала при кондуктивному підведенні теплової енергії використано для визначення параметрів функціонування сушильної установки в безперервному та періодичному режимах.

Базуючи на отриманих розрахунках даних, встановлено, що при об'ємі сушильної камери $14,5 \text{ дм}^3$ і підведеній потужності нагрівального елемента $7,5 \text{ кВт}$ можна реалізувати процес сушіння зерна продуктивністю 157 кг/год .

4.14. Ідентифікація динаміки електричних установок термообробки фуражного зерна при виробництві комбікормів

Для збільшення виробництва високоякісних комбікормів в кількостях, що забезпечили б потреби тваринництва та птахівництва необхідно подальше вдосконалення існуючої технології і обладнання, що дозволить максимально автоматизувати технологічні процеси. В технологічних процесах виробництва повнораці- онних комбікормів все ширше застосовують операції інтенсивної термічної обробки фуражного зерна з метою підвищення його поживної цінності, до яких відноситься екструдкування і мікронізація. Для дослідження обрані в якості типових два об'єкти електронагрівальних установок: прес-екструдер з індукційним підведенням енергії та мікро- нізатор з ІЧ-випромінювачем [1-4].

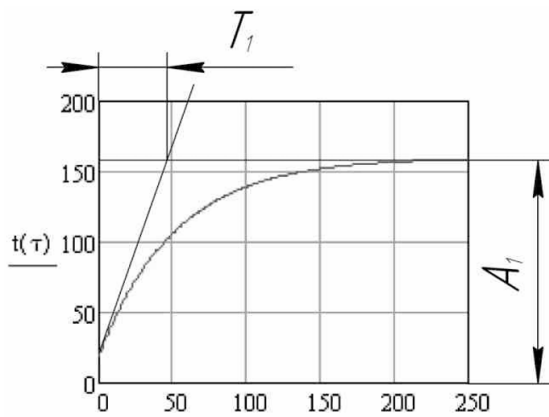
При вирішенні задач автоматизації керування температурними режимами суттєве значення має характер

залежностей регулювальних параметрів в часі при зміні (управляючих або збурюючих) параметрів технологічного процесу. Визначення динамічних властивостей об'єкта можна виконати експериментально або аналітично. Останній метод більш універсальний. Він дозволяє визначити структурну модель об'єкта без конкретизації параметрів елементів конструкцій та умов експлуатації, бо навіть типове обладнання має суттєві розбіжності які в значній мірі визначають динаміку об'єкта.

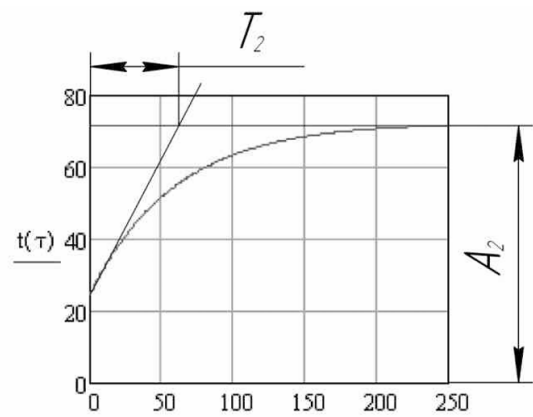
Аналізом існуючих методів дослідження процесів термообробки фуражного зерна електрофізичними методами [5, 6] встановлено, що динаміка зміни параметрів процесу визначається тільки для температури зерно матеріалів, а зміна температури нагрівачів не визначається, хоча саме нагрівач є регулюючим елементом об'єкта.

В даній роботі використано аналітично-експериментальний метод ідентифікації інерційних об'єктів (який є загальним для типових установок нагріву дисперсних матеріалів), сутність якого полягає в тому, що на першому етапі складаються диференціальні рівняння енергетичного балансу, які відображають технологічний процес. Після розв'язку рівнянь невідомі коефіцієнти та комплекси визначаються співставленням теоретичної і експериментальної залежностей.

З точки зору математичного опису електронагрівальні установки вказаного типу є складною багатопараметричною системою з багатьма вхідними і вихідними величинами. Попередніми експериментальними дослідженнями встановлено, що зміна температури матеріалу при кондуктивному і радіаційному підведенні теплоти має типовий експоненціальний характер (рис. 4.57). Дана обставина дозволяє будувати математичні моделі на основі аналізу теплового балансу, який визначає зв'язок між вхідними та вихідними параметрами



а)



б)

Рис. 4.57. Крива розгону системи «нагрівач-шар зерна»: а - при кондуктивному підведенні тепла; б - при ІЧ опроміненні.

Представимо типову електронагрівну установку, як систему з двома ємностями нагрівач та дисперсний матеріал. Вхідний параметр - підведена потужність, вихідний - температура матеріалу, збурюючий вплив температура оточуючого середовища.

Тепловий баланс за умов рівномірного (безградієнтного) прогріву цієї товщини матеріалу можна представити спрощеною схемою: енергія, що виділяється в нагрівному елементі витрачається на підвищення його температури і передається матеріалу, де витрачається на підвищення температури матеріалу та віддачу теплоти в оточуюче середовище.

Математичну модель взаємодії системи «нагрівач-матеріал» в процесах мікронізації та екструзії представлено системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} m_1 c_1 \frac{d\Theta}{d\tau} &= P - \alpha_{\lambda(e)} f_1(\Theta - t) - \alpha_v f_2(\Theta - t_v), \\ m_2 c_2 \frac{dt}{d\tau} &= \alpha_{\lambda(e)} f_1(\Theta - t) - \alpha_v f_3(t - t_v), \end{aligned} \quad (4.342)$$

де Θ , t , t_v - відповідно температура нагрівана, матеріалу та зовнішнього середовища, °С;

$m_1 c_1, m_2 c_2$, - теплоємність нагрівана та матеріалу, Дж/°С;
 f_1, f_2, f_3 - відповідно поверхня теплообміну, нагрівана матеріалу та нагрівана зовнішнього середовища, м²;
 a_λ, a_e, a_v - коефіцієнти теплообміну випромінюванням, кондук- тивний та конвективним переносом, Вт/м²°С;
 P - підведена потужність, Вт.

Параметри які підлягають визначенню експериментально є комплекси: $a_\lambda f_1, a_e f_2, a_v f_3$ та Θ . Оскільки випромінювач є складною конструкцією для подальшого аналізу використовують його ефективну температуру, а втрати в оточуюче середовище враховують коефіцієнтом корисної дії випромінювача η .

Тобі рівняння (4.342) спростимо:

$$m_1 c_1 \frac{d\Theta}{d\tau} = P\eta - \alpha_\lambda f_1 (\Theta - t). \quad (4.343)$$

За умови повністю розігрітого випромінювача, з рівнянь (4.342) та (4.343) при початкових умовах: $t=0$; отримаємо:

$$t(\tau) = A - (A - t_0) e^{-\frac{\tau}{T}}, \quad (4.344)$$

де

$$A = \frac{P_\lambda \eta A_1}{\alpha_v f_3} + t_v; T = \frac{m_2 c_2}{\alpha_v f_3}.$$

Величини A - значення температури в сталому режимі; T - стала часу, визначимо з кривої нагріву матеріалу (рис. 4.57а). Знаючи величини $T=T_1, A=A_1$ визначимо

$$\alpha_v = \frac{m_2 c_2}{f_3 T_1} \quad \eta = \frac{(A_1 - t_v) \alpha_v f_3}{P A_\lambda}$$

де A_λ - коефіцієнт поглинання випромінювання зерновим матеріалом.

Зміну температури нагрівана (випромінювача) отримуємо з рівняння (4.343), підставляючи в нього значення t з виразу (4.344)

$$\frac{m_1 c_1}{\alpha_1 f_1} \frac{d\Theta}{d\tau} + \Theta = \frac{P\eta}{\alpha_1 f_1} \left(A - \Delta e^{-\frac{\tau}{T}} \right). \quad (4.345)$$

де $\Delta = A - t_0$

Розв'язок неоднорідного рівняння (4.345) за початкової умови: $t=0$;

$$\Theta_n(\tau) = \left(\Theta_0 - \frac{B_1}{B_3} + \frac{B_2}{B_3 - k} \right) e^{-B_3 \tau} + \frac{B_1}{B_3} - \frac{B_2}{B_3 - k} e^{-k\tau} \quad (4.346)$$

Де

$$B_1 = \frac{P\eta + \alpha_1 f_1 \Theta_3}{m_1 c_1}; \quad B_2 = B_3(\Theta_3 - \Theta_0); \quad B_3 = \frac{\alpha_1 f_1}{m_1 c_1}; \quad k = \frac{1}{T}.$$

Θ_3 - температура зерна в усталеному режимі ($\Theta_3 = A_1$).

Величина $\frac{B_1}{B_3} = \frac{P\eta}{\alpha_1 f_1} + \Theta_3$ - є сталою температурою нагрівача

$$\alpha_1 f_1 = \frac{P\eta}{\Theta_1 - \Theta_3}. \quad (4.347)$$

Визначивши комплекси $a_1 f_1$ та $a_2 f_2$, при відомих сталих величинах можна розв'язувати рівняння (4.342) та (4.343) чисельним або аналітичним методом.

Розв'язуючи систему (4.342) та (4.343) рівнянь відносно Θ та t маємо:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Theta}{d\tau^2} + (T_1 + a_2 T_1) \frac{d\Theta}{d\tau} + (a_2 - 1) \Theta = D_1, \quad (4.348)$$

$$T_1 T_2 \frac{d^2 t}{d\tau^2} + (T_1 + a_2 T_1) \frac{dt}{d\tau} + (a_2 - 1) t = D_2, \quad (4.349)$$

Де

$$T_1 = \frac{m_1 c_1}{\alpha_1 f_1}; \quad T_2 = \frac{m_2 c_2}{\alpha_2 f_2 A_\lambda}; \quad a_2 = 1 + \frac{\alpha_3 f_3}{\alpha_1 f_1 A_\lambda};$$

$$D_1 = \frac{P\eta}{\alpha_1 f_1} a_2 + \frac{\alpha_3 f_3}{\alpha_1 f_1 A_\lambda} t_v; \quad D_2 = \frac{P\eta}{\alpha_1 f_1} + \frac{\alpha_3 f_3}{\alpha_1 f_1 A_\lambda}.$$

Розв'язок рівнянь (4.348) та (4.349) за початкових умов: $m=0$; $t=t_0$; $\Theta=\Theta_0$, після відповідних перетворень отримаємо:

$$\Theta(\tau) = \frac{\Theta_0 C - D_1}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_1}{C}, \quad (4.350)$$

$$t(\tau) = \frac{t_0 C - D_2}{C(r_1 - r_2)} (r_1 e^{r_2 \tau} - r_2 e^{r_1 \tau}) + \frac{D_2}{C}. \quad (4.351)$$

Графічну інтерпретація рівнянь (4.350) та (4.351) подано на рис. 4.58.

Аналогічним методом, використовуючи експериментальну залежність $t(\tau)$ нагріву зерна при кондуктивному підведенні теплоти від елемента поверхні, що нагрівається індуктором (рис. 4.57б) отримуємо значення ефективного коефіцієнту тепловіддачі $\alpha_{\text{еф}}$ від поверхні та коефіцієнту $\alpha_{\text{ш}}$, що характеризує тепловіддачу шнека. Це дає можливість ідентифікувати математичну модель теплового режиму прес-екструдера та за рівняннями типу (4.350) - (4.351) побудувати графіки перехідного процесу (рис. 4.59).

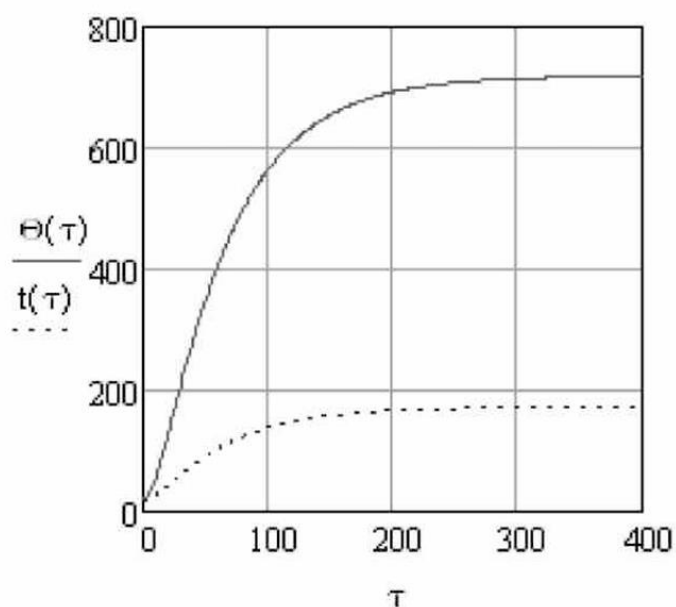


Рис. 4.58. Залежності зміни температури випромінювача $\Theta(\tau)$ та зерна $t(\tau)$ в перехідному режимі мікронізатора.

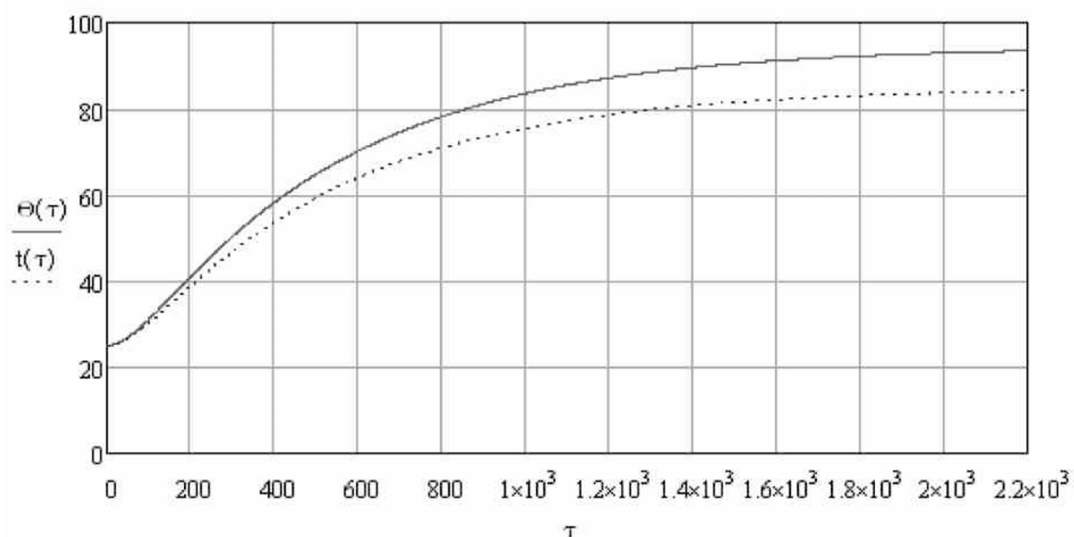


Рис. 4.59. Залежності зміни температури нагрівана $\Theta(\tau)$ та зерна $t(\tau)$ в перехідному режимі екструдера.

Запропоновані математичні моделі адекватно описують динамічні режими електронагрівальних установок. В процесах нагріву зерно матеріалів можливе перевищення їх максимально допустимої температури нагріву. Тому режими нагріву необхідно регулювати засобами автоматики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Котов Б. І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) [Текст] : [колект. монографія] / Котов Б. І. [та ін.] ; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". - Київ ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. - 551 с.
2. Калініченко Р.А. Енергоефективні режими роботи машин для високоінтенсивної термообробки зернових матеріалів : Монографія. / Р. А. Калініченко, В. Д. Войтюк. – Ніжин : НДУ імені М. Гоголя. 2017. – 261 с.
3. Солон О.В. Вібраційні машини з просторово-циркуляційним рухом завантаження для тонкого помелу сипких матеріалів : Монографія. / О.В. Солон. - Вінниця : ПБВ ВДАУ, 2008. - 133 с.
4. Burdo, O., Terziev, S., Burdo, A., Sirotuk, I., Pylypenko, E., Akimov, A., Molchanov, M. (2022). Energetics and Kinetics of Plant Raw Material Dehydration Processes. Problems of the Regional Energetics, 3 (55), 111–129. doi: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.09>
5. Котов Б. І. Математична модель динамічних режимів електротермічної установки для обробки зерноматеріалів імпульсними потоками інфрачервоного випромінювання / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, В. В. Кифяк // Вісник Харківського технічного університету сільського господарства, 2014, вип. 152., С. 181 – 190.
6. S. Zverev, O. Sesikashvili. (2018) Heating and dehydration of grain and cereals at a combined energy supply. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences, 12 (1) <https://doi.org/10.5219/840>
7. Pathiratne S.M., Shand Ph.J., Pickard M., Wanasundara J.P.D., (2015) Generating functional property variation in lentil (*Lens culinaris*) flour by seed micronization: Effects of seed moisture level and surface temperature. Food Research International 76(1), 122-131 <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.026>
8. Aboud SA, Altemimi AB, R S Al-Hilphy A, Yi-Chen L, Cacciola F. A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing Molecules. 2019 Nov 15;24(22):4125. doi: 10.3390/molecules24224125. PMID: 31731574; PMCID: PMC6891297.
9. Kipriyanov, F. et al (2023). A research review on coarse grain micronization. E3S Web of Conferences, 371, 03073. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337103073>
10. Hamanaka, D.; Uchino, T.; Furuse, N.; Han, W.; Tanaka, S. Effect of the wavelength of infrared heaters on the inactivation of bacterial spores at various water activities. Int. J. Food Microbiol. 2006, 108, 281–285.
11. Kirkpatrick, R.L. Infrared reduction for control of lesser grain borers and rice weevils in bulk wheat. J. Kans. Entomol. Soc. 1975, 48, 100–107.

12. Hay, Nguyen & Huy, Le & Kien, Pham. (2022). A Review of Drying Methods Assisted by Infrared Radiation, Microwave and Radio Frequency. 10.5772/intechopen.108650. <https://www.researchgate.net/publication/365990171>
13. Ramaj, I.; Schock, S.; Müller, J. Drying Kinetics of Wheat (*Triticum aestivum* L., cv. 'Pionier') during Thin-Layer Drying at Low Temperatures. *Appl. Sci.* 2021, 11, 9557. <https://doi.org/10.3390/app11209557>
14. Плавінська С.В. Мікронізація бобів сої – перспективний метод отримання якісного продукту для кормоприготування / С.В.Плавінська // Сучасне птахівництво. –2011.–№11/12. –с.26-28.
15. EL-Mesery, H. S., Abomohra, A. E.-F., Kang, C.-U., Cheon, J.-K., Basak, B., & Jeon, B.-H. (2019). Evaluation of Infrared Radiation Combined with Hot Air Convection for Energy-Efficient Drying of Biomass. *Energies*, 12(14), 2818. <https://doi.org/10.3390/en12142818>
16. S. Zverev, O. Sesikashvili. (2018) Heating and dehydration of grain and cereals at a combined energy supply. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 12 (1) <https://doi.org/10.5219/840>
17. Ilyasov, S.G.; Krasnikov, V.V. *Physical Principles of Infrared Radiation of Foodstuffs*; Hemisphere Publishing Corp: New York, NY, USA, 1991.
18. Pan, Z., Atungalu, G. G. 2010. *Infrared Heating for Food and Agricultural processing*. Boca Raton, Florida, US : CRC Press. 300 p. ISBN-13: 9781420090970.
19. Lykov, A. V., Mikhailov, Y. A. 1963. Theory of heat and mass-transfer. University of Michigan, USA : Israel Program for Scientific Translations publishers, 558 p.
20. Котов Б. І. Математична модель динамічних режимів електротермічної установки для обробки зерноматеріалів імпульсними потоками інфрачервоного випромінювання / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, В. В. Кифяк // Вісник Харківського технічного університету сільського господарства, 2014, вип. 152., С. 181 – 190.
21. Поперечний А.М. Кінетика процесу сушіння плодів кісточок у віброкиплячому шарі при інфрачервоному нагріванні / А.М.Поперечний, Н.О.Миронова // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства. Х. – 2007. Вип.58. С.122-129.
22. Ratti, Cristina & Mujumdar, A.. (2006). 8 Infrared Drying. 10.1201/9781420017618.ch18.
23. Bandura V. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply/V.Bandura, R.Kalinichenko, B.Kotov, A.Spirin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018.Vol.4, No 8(94), 50-58
24. Полевода Ю. А., Ревва В. Ю., Твердохліб І. В. Особливості процесу мікронізації зерна //Вібрації в техніці та технологіях. 2023.№ 1 (108). С. 94-100. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-1-9>
25. Burdo, O., Terziev, S., Burdo, A., Sirotuk, I., Pylypenko, E., Akimov, A., Molchanov, M. (2022). Energetics and Kinetics of Plant Raw

Material Dehydration Processes. Problems of the Regional Energetics, 3 (55), 111–129. doi: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.09>

26. Бардин Я.Б. Ріпак: від сівби до переробки. – К.: Світ, 2000. – 106 с.
27. Гайдаш В.Д. Ріпак - культура великих можливостей. – Ужгород: Карпати, 1986. – 62 с.
28. Гайдаш В.Д. Ріпак. – Івано-Франківськ: Сіверсія, 1998. – 224 с.
29. Касіянчук В.Д. Переробка насіння на олію. Ріпак. – Івано-Франківськ, 1998. – С. 189-205.
30. Лисенко В.П. Математичне моделювання теплових процесів // Науковий вісник. – К.: НУБіП, 2011. – № 166, ч. 4. – С. 113-119.
31. Сорочинський В.Ф. Зневоднення зерна за різних схем утилізації сушильного агента й охолоджуючого повітря може бути доволі ефективно // Зерно і хліб – 2011, №3 – С. 40 – 41.
32. Бурдо О.Г. Еволюція сушильних установок – Одеса: Полиграф, 2010 – 368 с.
33. Пазюк В.М. Напрямки розвитку новітніх технологій сушіння ріпаку та інших видів зернових матеріалів. Теплонасосні сушильні установки. В.М.Пазюк, Ю.Ф.Снежкін, Д.М.Чалаєв, О.Д.Пазюк/ Вібрації в техніці та технологіях. - 2009. - N 1. С.95-104.
34. Снежкін Ю.Ф., Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна / Ю.Ф. Снежкін, В.М. Пазюк, Ж.О. Петрова, Д.М. Чалаєв - Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. – 154 с.
35. Снежкін Ю. Ф. Інтенсифікація процесу сушіння насіннєвого зерна / Ю. Ф.Снежкін, Р. О. Шапар, Д. М. Чалаєв, В. С. Шаврин, В. М. Пазюк //Пром. теплотехника. - 2010.- 32, № 5. - С. 42-47.
36. Снежкін Ю. Ф.Енергозберігаючий спосіб сушіння насіння ріпаку на теплонасосній зерносушарці / Ю. Ф. Снежкін, В. М. Пазюк, Д. М. Чалаєв, В. С. Шаврін, В. Г. Олійніченко // Відновлюв. енергетика. - 2010. - № 2. - С. 56-59.
37. Ганжа, Є. П. Моделювання процесів в теплонасосній установці для сушіння деревини : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Ганжа Є. П. ; Держ. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського "ХАІ". Каф. аерокосм. теплотехніки; Ін-т пробл. машинобуд. ім. А. М. Підгорного. Від. моделювання теплових та мех. процесів. – Х., 2000. – 19 с.
38. Голуб Г.А., Кепко О.І. Математична модель теплонасосної системи тепlopостачання споруд закритого ґрунту. Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. 2002. Вип. 10. С. 275–278.
39. Нікулішин В.О. Теплові насоси та кондиціонери / В.О.Нікулішин, В.В.Височин.- Одеса: Медіа-Арт. – 2014. – 181с.
40. Котов Б.І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, М.І. Липунов // Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин.- Кіровоград, 2012. – №42. – с. 340 – 346.

41. Котов Б.І. Математичне моделювання динамічних режимів теплонасосної системи для теплопостачання технологічних об'єктів / Б.І. Котов, В.О.Грищенко, Ю.І.Панцир, І.Д.Герасимчук// Вібрації в техніці та технологіях, 2021, №2(101). –С.85-91.
42. Калініченко Р. А. Моделювання динамічних режимів нагрівання і сушіння зерна в протитечієвих установках/ Р.А.Калініченко, О. О. Добрицький, М. І. Липунов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України, 2011, N Вип. 166. Ч. 4.-С.229-233.
43. Грищенко В.О. Типові технологічні процеси і холодильне обладнання для зберігання рослинної продукції: моделювання, динамічні режими, керування : монографія.– Київ : ЦП "Компринт", 2018.– 247 с.
44. Бурдо О. Г., Безбак І. В., Донкоглов В. І. Кінетика сушіння пшениці в апаратах на базі термосифонів. *Наукові праці Од. НАХТ*. 2006. Вип. 36. Т. 1. С. 297–302.
45. Комарчук Д. С. Режими електротехнічного комплексу з системою автоматичного управління для теплової обробки зерна ріпаку: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2014. 205 с.
46. Індукційна установка для термообробки зерна ріпаку / І. П. Кондратенко, В. П. Лисенко, А. О. Березнюк, Д. С. Комарчук. *Вісник аграрної науки*. 2012. № 12. С. 55–58.
47. Котов Б. І., Хілініч Б. В. Математичне моделювання електричного нагріву насіння при видавлюванні олії гвинтовим пресом. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2005. Вип. 89. С. 322–327.
48. Патент на корисну модель № 72273. Установка для термообробки олії насіння / Д. С. Комарчук, Р. А. Калініченко, Б. І. Котов. 2012. Бюл. № 15.
49. Калініченко Р.А. Математична модель сушіння рослинної сировини в обертальному барабані за комбінованого підведення енергії [Текст] /Р.А.Калініченко, Б.І.Котов, А.В.Спірін // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. –2017. –№261. –С.217-225.
50. Калініченко Р.А. Енергоефективні режими роботи машин для високоінтенсивної термообробки зернових матеріалів [Текст] /Р.А.Калініченко, В.Д.Войтюк – Ніжин: Видавничий центр НДУ ім.Гоголя. 2017. – 261 с.
51. Незведська І.В. Обґрунтування параметрів сушильних барабанів з терморадіаційним енергопідведенням сушильного агента при сушінні коренів цикорію [Текст] / І.В. Незведська. // Матеріали V-міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми збалансованого природокористування» ПДАТУ. Кам'янець-Подільський.– 2010. – С. 170–172.
52. Калиниченко Р.А. Математическое моделирование виброперемещения зерна при термообработке [Текст] / Р.А.Калиниченко, С.П.Степаненко // Инновации в сельском хозяйстве. –2017.– №4(29). – с. 50-58.

53. Belyaev M.I. Teoreticheskie osnovy kombinirovanyh sposobov teplovoy obrabotki pischevyh produktov / M.I. Belyaev, P.L. Pahomov.– H .: HIOP Kommunist. 1991.–160.
54. Kotov B.I. 2014: Matematicheskaya model dinamicheskikh regimov elektrotermicheskoy ustanovki dlya obrabotki zernomaterialov impulsnymi potokami infrakrasnogo izlucheniya / B.I. Kotov, R.A. Kalinichenko, V.V. Kifyak // Vestnik Harkovskogo tehnikeskogo universiteta selskogo hozyaystva.– Vyp. 152. – 181 - 190.
55. Lahno V.A. 2011: Ispolzovanie kompyuternyh system dlya povysheniya effektivnosti informacionnoy poddergki infrakrasnoy sushki zerna / V.A.Lahno, D.A.Shiryaev. – Lugansk: Elton-2.–165.
56. Lykov A.V. 1971: Teplomassoobmen / A.V.Lykov. – M.: Energiya. – 560.
57. Lykov A.V. 1967: Teoriya teploprovodnosti / A.V.Lykov. –M.: Vysshaya shkola. – 599.
58. Andrejko D. 2011: Wplyw obrobki cieplnej promieniami podczerwonymi na process premialu ziarna pszenicy odmiany korynta / D.Andrejko, M.Kania, A. Latka, L.Rydzak // Motrol Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, t.13. 7-13.
59. Sumorek A. 2006: Podnoszenie współczynnika wymiany masy procesu suszenia konwekcyjnego za pomocą pola elektrycznego / A. Sumorek, W. Pietrzyk// Motrol Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, t.8, 204–210.
60. Лебедев Д. П., Голубкович А. В. Установка для сушки зерна в тонком падающем слое при радиационно-конвективном энергоподводе. Наукові праці ОНАХТ, 2007. Вип. 3(2). С.112–115.
61. Bandura, V. M., Tsurkan, O. V., Palamarchuk, V. I. (2015). Eksperymentalnoe yssledovanye tekhnolohycheskykh parametrov protsessa ynfkrasnoi sushky dvyzhushchehosia shara siria maslychnikh kultur. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, 17 (4), 211–214.
62. Бандура В. М., Друкований М. Ф., Зозуляк І. А. Обоснование конструкции вибрационной сушилки для подсолнечника // Харчова наука і технологія. 2012. № 3. С. 91–94
63. Зозуляк І. А. Обґрунтування параметрів сушіння зерна соняшника у вібраційних машинах з U-видним контейнером: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 / Зозуляк І. А.; Вінниц. нац. аграр. ун-т. Вінниця, 2015. 22 с.
64. Рудобашта С. П., Проничев С. А. Осциллирующая инфракрасная сушка семенного зерна // Сборник научных трудов ОНАПТ. 2006. Вып.29. С.25–30.
65. Котов Б. І., Кіфяк В. В., Калініченко Р. А. Математична модель динамічних режимів електротермічної установки для обробки зерноматеріалів імпульсними потоками інфрачервоного випромінювання // Вісник ХНТУСГ. 2014. Вип. 152. С.181–191.

66. Бомко А. С. Исследование процессов сушки зерна в потоке методами математического моделирования. Автореферат дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Одесса, 1971. 31 с.
67. Бандура В.М. Экспериментальное исследование технологических параметров процесса инфракрасной сушки движущегося шара сырья масличных культур / В.М.Бандура, О.В. Цуркан, В.И. Паламарчук // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2015. Vol. 17, №4. 211 -214.
68. Бандура В.М. Перспективи застосування віброконвеєрного інфрачервоного сушіння сировини олійного виробництва / В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // Матеріали МНТК [«Сучасні агротехнології: тенденції та інновації»]. – Вінниця. 2015. – С. 11-13.
69. Дубровин В. Моделирование динамики тепловых процессов при микронизации и сушении зернопродуктов в терморadiационных установках ИК-излучением / В.Дубровин, Р.Калиниченко, В.Кифяк // Motrol: International journal on operation of farm and agri-food industry machinery. – 2015. – Vol. 17, т.3 – Р. 150-157.
70. Котов Б. І. Ідентифікація динамічних режимів нагріву і сушіння зернопродуктів ІЧ-випромінюванням / Б. І. Котов, В. В. Кифяк // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. - 2014. - Вип. 194(2). - С. 165-170.
71. Лисенко В.П. Ідентифікація процесу нагріву зерна ріпаку / В.П. Лисенко, Р.А. Калініченко, Д.С. Комарчук // Науковий вісник НУБіП України. – 2012. – № 174, ч. 1. – С. 98–100.
72. Бурдо О.Г. Нанопищевые энерготехнологии /О.Г. Бурдо// Херсон. Из-во Гринь Д.С. 2013 – 304 с.
73. Бурдо О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях /О.Г. Бурдо// Инженерно-физический журнал. 2005г. 78 №1 с.88-93.
74. Бурдо О.Г. Особенности моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии /О.Г. Бурдо, В.Н. Бандура, И.И. Яровой// Наукові праці ОМАХТ. Одесса, 2011, Вип. 39 т.2- с 38-43.
75. Дементьева Т.Ю. Інтенсифікація процесів сушіння зернових матеріалів із застосуванням мікрохвильового електромагнітного поля. Автореф. дис. канд. техн. наук. Одеса 2012 – 20с.
76. Яровой І.І. Розробка стрічкової установки для зневоднення рослинної сировини електромагнітним полем. Автореф. дис. канд. техн. наук. Одеса. 2013 – 22с.
77. Ярошенко Л.В. Вібраційна моношарова сушильна машина переміжного нагрівання. 2000 №1. С74-76.
78. Беляев М.И. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов /М.И. Беляев, П.А. Пахомов// Харьков. ХИОП. -1991- 160с.
79. Сорочинский В.Ф. Снижение энергозатрат при конвективной сушке зерна / В.Ф. Сорочинский // Наукові праці ОНАХТ. 2010. вип.38(1). – С.78-82.

80. Степанов М.Т. Математическое имитационное моделирование зерносушилок как основа разработки эффективных систем управления / М.Т. Степанов, М.А. Еремин, П.А. Веридусов // Автоматизація технологічних і бізнес процесів. 2014. № 3. С.16-21.
81. Бурдо О.Г. Особенности моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии / О.Г. Бурдо, В.Н. Бандура, И.Н. Яровой // Наукові праці ОНАХТ. 2011. Вип.39(2). С.38–43.
82. Бошкова И.Л. Математические модели теплопереноса в движущемся плотном слое при микроволново-конвективном нагреве / И.Л. Бошкова, Е.В. Георгиев, Н.А. Колесниченко // Наукові праці ОНАХТ. 2014. Вип. 45(1). С.46–54.
83. Котов Б. І., Бандура В. М., Калініченко Р. А. Математичне моделювання та ідентифікація тепломасопереносу в рослинному дисперсному матеріалі при сушінні і нагріванні електромагнітним полем надвисокої частоти. Енергетика і автоматика. 2018. Вип. 6. С. 35–50
84. Календерьян В. А., Бошкова И. Л. Тепломассоперенос в аппаратах с плотным слоем дисперсного материала : монография. Киев: Слово, 2011. 184 с. ISBN 978-966-194-091-7.
85. Берник М.П. Теоретическое обоснование импульсного подвода внутреннего источника тепла в процессах сушки влажных материалов / М.П. Берник, А.С. Лукашенко, Л.Д. Иванов, Н.Я. Цислинская, О.М. Шаповаленко // Наукові праці ОНАХТ. 2011. Вип.39(2). С.26–30.
86. Беляев М.М. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов / М.М.Беляев, П.А.Тахомов. –Харьков: ХИОП, 1991.–160с.
87. Бурдо О.Г. Технологии направленного энергетического действия в АПК / О.Г.Бурдо // Наукові праці ОНАХТ. Вип.41. Т.1, 2015. – С.42-46.
88. Бурдо О.Г. Новые принципы обезвоживания зернового сырья / О.Г.Бурдо, И.И.Яровой, Н.В.Ружицкая, А.А.Борщ // Зерновые продукты и комбикорма, №1, 2012.–С.42-46.
89. Яровий І.І. Розробка стрічкової установки для зневоднення рослинної сировини електромагнітним полем. Автореф. дис. канд. техн. наук. Одеса, 2013.–22с.
90. Дементьева Т.Ю. Інтенсифікація сушіння зернових матеріалів із застосуванням мікрохвильового електромагнітного поля. Автореф. дис. канд. техн. наук. Одеса, 2012.–20с.
91. Бурдо О.Г. Особенности моделирования процессов сушки при электромагнитном подводе энергии / О.Г.Бурдо, В.Н.Бандура, И.И.Яровой // Наукові праці ОНАХТ. Вип.39.Т.2, 2015. –С.38-43.
92. Бошкова И.Л. Математические модели тепломассопереноса в движущемся плотном слое при микроволновом конвективном и микроволновом нагреве / И.Л.Бошкова, Е.В.Георгиев, Н.А.Колесниченко // Наукові праці ОНАХТ. Вип.45.Т.1, 2014. –С.46-54.
93. Календарьян В.А. Математические модели тепломассопереноса в процессе сушки дисперсных материалов при

использовании микроволновой энергии / В.А.Календарьян, И.Л.Бошкова. Е.В.Островская // Харчова наука і технологія. №1, 2008.—С.51-54.

94. Калинин Л.Г. Разработка микроволновых сушилок для зерна / Л.Г.Калинин, И.Л.Бошкова, Н.В.Волгушева // Хранение и переработка зерна. №7, 2004.—С.34-35.

95. Бошкова И.Л. Циклическая микроволновая сушка плотного слоя зерновых материалов / И.Л.Бошкова, Н.В.Волгушева // Промышленная теплотехника. Т.38. №4, 2016.—С.31-37.

96. Лыков А.В. Теория сушки / А.В.Лыков. М.: Энергия, 1968.—467с.

97. Лыков А.В. Теория теплопроводности /А.В.Лыков. М.: Высшая школа, 1967. —560с.

98. Бурдо О.Г. (2013). Пищевые наноэнерготехнологии: монография. Херсон: Изд. Гринь Д.С., 2013. 294 pp. ISBN 978-617-7123-13-1.

99. Bandura, V., Bezbah, I., Kupchuk, I., Fialkovska, L. (2023). Innovative methods of drying rapeseeds using microwave energy. Polityka Energetyczna, 26(2), 217–230. <https://doi.org/10.33223/epj/163328>

100. Burdo, O.G., Bandura, V.N., Levtrinskaya, Y.O. (2018) Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 54: 210–218. <https://doi.org/10.3103/S1068375518020047>

101. Bulgakov, V., Bandura, V., Arak, M., Olt, J. (2018). Intensification of rapeseed drying process through the use of infrared emitters. Agronomy Research, 16(2), 349–356 <http://dx.doi.org/10.15159/ar.18.054>

102. Бошкова И. Л., Георгиеш Е. В., Колесниченко Н. А. (2014). Математические модели теплопереноса в движущемся плотном слое при микроволново-конвективном и микроволновом нагреве. Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. Вип. 45(1). С. 46-54. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2014_45%281%29_12

103. Бошкова И. Л., Волгушева Н. В. (2016). Циклическая микроволновая сушка плотного слоя зерновых материалов. Промышленная теплотехника. Т.38, №4. С. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.4.2016.04>

104. Palamarchuk, I., Palamarchuk, V., Paziuk, V., Hulevych, R., Kalizhanova, A., & Sarsembayev, M. (2023). Analysis of power and energy parameters of the conveyor infrared dryer of oil-containing raw materials. Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Srodowiska. 13(2), 10-14 <https://doi.org/10.35784/iapgos.3487>

105. Новохат, О. А., & Татарчук, О. О. (2014). Дослідження роботи електричного інфрачервоного випромінювача для сушіння санітарно-гігієнічного паперу. Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій], (45 (2)), 90-93. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2014_45\(2\)_21](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2014_45(2)_21)

106. Безбах, І., Яровий, І., & Войтенко, О. (2019). Комбіновані способи енергопідведення в процесах сушіння рослинної сировини. Scientific Works, 83(2), 71-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1532>

107. Kundenko, N., & Pikh, E. (2021). Розробка технологічної схеми НВЧ – установки для сушіння зерна. Енергетика і автоматика, №5, 75-85. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.05.075>
108. Сидорук Ю. К. (2016). Пристрої опромінення діелектричних сипучих матеріалів електричним ВЧ та електромагнітним НВЧ полями. К.2016. Дис.канд. техн. наук. 219с.
109. Яровий І.І. (2013). Розробка стрічкової установки для зневоднення рослинної сировини електромагнітним полем.- Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.18.12, Одеса, ОНАХТ. 2013. 22 с.
110. Дементьева Т.Ю. Інтенсифікація процесів тепловологопереносу при сушінні зернового матеріалу із застосуванням мікрохвильового електромагнітного поля. - Автореф. дис. канд. техн. наук / Т.Ю. Дементьева. Одеса: ОНАХТ, 2012. 22 с.
111. Маренченко О.І. Інноваційні технології зневоднення харчової сировини. Дис. докт. філос. Одеса: ОНАХТ, 2020. 190 с.
112. Bandura, V., Kalinichenko, R., Kotov, B., Spirin A. (2018). Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.4, № 8(94), 50-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139314>
113. Котов, Б.І., Бандура, В.М., Калініченко, Р.А. (2018). Математичне моделювання та ідентифікація тепломасопереносу в рослинному дисперсному матеріалі при сушінні і нагріванні електромагнітним полем надвисокої частоти. Енергетика та автоматика. №6. 33–50. <http://dx.doi.org/10.31548/energiya2018.06.033>
114. Калініченко Р. А. (2016). Визначення теплофізичних коефіцієнтів в розв'язках рівняння теплопровідності для ідентифікації процесів термообробки зерноматеріалів. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2016. Вип. 241. 325-333.
115. Burdo, O., Bezbah I., Kepin N., Zykov A., Yarovyi I., Gavrillov A., Bandura V., Mazurenko I. (2019). Studying the operation of innovative equipment for thermomechanical treatment and dehydration of food raw materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 5/11 (101), 24 – 32. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>
116. Калініченко Р. А., Степаненко С.П., Котов Б.І. (2024). Дослідження розподілу теплових потоків за ІЧ-сушіння зернового матеріалу. Механіка та автоматика агропромислового виробництва. Вип. 4(118). 91-100.
117. Бандура В. М. Науково-практичне обґрунтування енергоефективних технологій переробки олійної сировини на основі механічних та електромагнітних інтенсифікаторів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12 / Бандура Валентина Миколаївна ; Одес. нац. акад. харч. технологій. - Одеса, 2021. - 45 с.
118. Беляев М.И., Пахомов П.Л. Теоретические основы комбинированных способов тепловой обработки пищевых продуктов. – Харьков: ХИОП.1991. –160с.

119. Календерьян, В. А. Тепломассоперенос в аппаратах с плотным слоем дисперсного материала: монография / Календерьян Виргиния Александровна, Бошкова Ирина Леонидовна. - Киев : Слово, 2011. - 184 с. - ISBN 978-966-194-091-7.

120. Дементьева Т.Ю. Интенсифікація процесів тепловологопереносу при сушінні зернового матеріалу із застосуванням мікрохвильового електромагнітного поля. - Автореф. дис. канд. техн. наук / Т.Ю. Дементьева. Одеса: ОНАХТ, 2012. 22 с.

121. Яровий І.І. (2013). Розробка стрічкової установки для зневоднення рослинної сировини електромагнітним полем.- Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.18.12, Одеса, ОНАХТ. 2013. 22 с.

122. Котов Б.І. Аналітичне дослідження перехідних режимів нагрівання зерна в електротерморадіаційних установках безперервної дії / Б.І.Котов, Р.А.Калініченко, В.В.Кіфяк //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.– 2012. – Випуск 131. – С.57-65.

123. Бошкова И. Л., Георгиеш Е. В., Колесниченко Н. А. (2014). Математические модели теплопереноса в движущемся плотном слое при микроволново-конвективном и микроволновом нагреве. Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. Вип. 45(1). С. 46-54. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2014_45%281%29_12

124. Котов Б. І., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д. (2018) Моделювання і розрахунків енергозберігаючих режимів сушіння і термообробки вологих матеріалів під дією енергетичних полів / Збірник тез доповідей ХІХ міжнародної наукової конференції: Сучасні проблеми землеробської механіки (17–19 жовтня 2018р.): присвячена 120-й річниці з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та 118-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. Київ. 2018. С.197-198.

125. Кулінченко В.Р. Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу): підруч. для студентів ВНЗ / [В. Р. Кулінченко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний] ; за ред. проф. Кулінченка В. Р. ; Нац. ун-т харч. технологій. - Київ : Фенікс, 2014. - 918 с.

126. Нездвєцька І.В. Формалізація параметрів ІЧ-сушильних установок імпульсної дії при моделюванні технологічних процесів сушіння / І.В.Нездвєцька, С.М.Кухарець, С.С.Бучик, Л.А.Сидорчук // Вісн. ЖДТУ. – 2012. – № 1. – С. 47–52.

127. Яровий, І., Кашкано, М., Маренченко, О., & Пилипенко, Є. (2019). Іноваційні способи енергопідведення у процесах сушіння термолабільної сировини. Scientific Works, 83(1), 122-128. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1429>

128. Лахно В. А. Использование компьютерных систем для повышения эффективности информационной поддержки инфракрасной сушки зерна : монография / В. А. Лахно, Д. А. Ширяев; Луган. нац. аграр. ун-т. - Луганск : Элтон-2, 2011. - 154 с.

129. Димніч А.Х. Теплопровідність: навч. посіб. для студ. техн. спец. вищ. навч. закладів / А. Х. Димніч, О. А. Троянський. - Донецьк : Норд-прес, 2004. - 370 с.

130. Калініченко Р.А. Алгоритм параметричної ідентифікації аналітичного математичного опису динаміки низькотемпературного сушіння зернових матеріалів / Калініченко Р.А. // Механізація та електрифікація сільського господарства. ННЦ "ІМЕСГ" / Глеваха – 2016. – №3(102)

131. Калініченко Р.А. Визначення теплофізичних коефіцієнтів в розв'язках рівняння теплопровідності для ідентифікації процесів термообробки зерно матеріалів / Р.А.Калініченко //Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК, №241, 2016 С.325-333.

132. S.P. Stepanenko, B.I. Kotov , A.V. Spirin , V.Yu. Kucheruk (2022) Scientific foundations of the movement of components of grain material with an artificially formed distribution of air velocity. *Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика».* № 1(105)/2022. DOI 10.31489/2022PH1/43-57

133. Stepanenko, S. P. (2017). Research pneumatic gravity separation grain materials. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources*, 63(2), 54–56.

134. Бакум, М. В., Крест, М. М., Абдуєв, М. М. (2010). До обґрунтування ефективності використання пневматичного сепаратора з нахиленим повітряним каналом для попередньої сепарації насіннєвих сумішей петрушки. *Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка*, 103, 267–274.

135. Igor SHEVCHENKO, Elchyn ALIEV, Gintas VISELGA, Jan Radek KAMINSKI (2021). Modeling Separation Process for Sunflower Seed Mixture on Vibro-Pneumatic Separators. *ISSN 1392–1207. MECHANIKA. 2021 Volume 27(4): 311–320.* doi.org/10.5755/j02.mech.27647

136. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasytkovskyi, O. M., Petrenko, D. I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH*, 53(3), 65–70.

137. Кюрчев, С.В., Колодий, А. С. (2013). Результаты исследования рациональных размеров вертикального аспирационного канала сепаратора семян сельскохозяйственных культур. *Motrol*, 15(2), 169–175.

138. Колодий, А. С., Кюрчев, С. В. (2015). Математическое описание поведения зерновок подсолнечника в воздушном потоке разделительных установок. *Motrol*, 14(9), 13–18.

139. Serhii Kharchenko , Yurii Borshch, Stepan Kovalyshyn, Mykhailo Piven, Magomed Abduev, Anna Miernik, Ernest Popardowski and Paweł Kielbasa (2021). Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. *Appl. Sci.* 2021, 11, 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>

140. Tomasz Reguła, Jarosław Fraczek and Jakub Fitas (2021). A Model of Transport of Particulate Biomass in a Stream of Fluid. *Processes* 2021, 9, 5. <https://dx.doi.org/10.3390/pr9010005>

141. V. Bulgakov, S. Nikolaenko, I. Holovach, A. Boris, S. Kiurchev, Ye. Ihnatiev and J. Olt. (2020). Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation. *Agronomy Research* 18(S2), 1177-1188, 2020. <https://doi.org/10.15159/AR.20.069>
142. Stepanenko, S.P.; Kotov, B.I. (2020) Pneumonitis fractionation of grain materials in air streams of variable structure. *Mach. Energ. J. Rural Prod. Res.* 2020, 11, 127–132.
143. Kovalyshyn, S., Dadak, V., Konyk, S. (2015). Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures. *Acta Technologica Agriculturae*, 18(4), 108–112.
144. Sosnowski, S., Kovalyshyn, S., Nishchenko, I., Dadak, V. (2014). Modelling of force action on ellipsoid-shape seed in pneumo-electric separator channel. *EconTechMod*, 4, 83–86.
145. Котов, Б. І., Панцир, Ю. І., Герасимчук, І. Д., Грищенко, В. О., Степаненко, С. П. (2018). Моделювання процесу фракціонування зерна в пневматичних каналах при накладеному електричному полі. *Промислова Гідравліка і Пневматика*, 2(60), 65–73.
146. Котов Б. І., Грищенко В. О., Степаненко С. П., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д. (2021). Математична модель динаміки системи утилізації теплоти вентиляційних викидів із проміжним теплоносієм як об'єкта автоматизації. *Механізація та електрифікація сільського господарства. Випуск 14 (113)*. DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-14-9>
147. Колодій О. С. Обґрунтування конструктивно - технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника / О. С. Колодій // Автореф. дис. канд. техн. наук. – Мелітополь: ТАДУ, 2015. – 23 с.
148. Бакум М. В. До обґрунтування ефективності використання пневматичного сепаратора з нахиленим повітряним каналом для попередньої сепарації насінневої суміші петрушки / М. В. Бакум, М. М. Крекот, М. М. Абдуев та інш. // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. М. Василенка*. – 2010. – Вип. 103. – С. 267–274.
149. Котов Б. І. Підвищення ефективності сепарації зернових сумішей використанням протитечевої подачі матеріалу в горизонтальний повітряний потік / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, І. С. Понадюк // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 2016. – Вип. 3. – С. 121–125.
150. Іноземцев Г. Б. Електросепарування насінневих сумішей та електростимуляція посівного матеріалу / Г. Б. Іноземцев, В. О. Паранюк // *Праці ТДАТУ*. 2008. – Вип. 8 (2). – С. 56–63. 88 "Енергетика і автоматика", №5, 2018 р.
151. Ковалишин С. Й. Електронна насіннеобробна машина барабанного типу для дрібнонасінневих сумішей / С. Й. Ковалишин, В. В. Соколюк // *Вісник ХНТУСГ*. 2014. – Вип. 144. – С. 60–65.
152. Котов, Б. І. Концептуальні основи створення технічних засобів первинної обробки зерна в умовах господарств АПК / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, Р. А. Калініченко // *Конструювання, виробництво та*

експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. 2017. – Вип. 47. – Ч. 1. – С.105–114.

153. Stepanenko, S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials (Исследование воздушногравитационной сепарации зерновых материалов) / S. P. Stepanenko // International scientific journal. Mechanization in agriculture, conserving of the resources. Scientific technical union of mechanical engineering industry-4.0 Bulgarian association of mechanization in agriculture. 2017. – Issue 2. – S.54–56.

154. Колодій, О. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника: автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.05.11 / О. С. Колодій. – Мелітополь, 2015. – 23 с.

155. Ермак, В. П. Концепція аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур та засоби її реалізації: автореф. дис.... докт. техн. наук : 05.05.11 / В. П. Ермак. – Тернопіль, ТДАУ, 2009. – 39 с.

156. Нестеренко, О. В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу: автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.05.11. / О. В. Нестеренко. – Кропивницький, – 2017. – 21 с.

157. Котов, Б. І. До питання пневмогравітаційної сепарації зернових матеріалів / Б. І. Котов, А. В. Спірін, І. В. Твердохліб // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2017. – Вип. 4. – С.51–55.

158. Кошулько, В. С. Тенденции развития технологии и технических средств для сепарации зерновых материалов / В. С. Кошулько // Хранение и переработка зерна. – 2014. – №2. – С.22–24.

159. Степаненко, С. П. Аналіз розвитку конструкцій пневмосепаруючих систем сепараторів / С. П. Степаненко, В. О. Швидя, І. С. Попадюк // Механізація та електрифікація с-г. – 2017. – Вип. 5. – С.132–142.

160. Колодій, О. С. Математическое описание поведения зерновок подсолнечника в воздушном потоке разделительных установок / О. С. Колодій, С. В. Кюрчев // Motrol, Lublin. – 2015. – Vol. 17. – №9. – P.9–17.

161. Дадак, В. О. Підвищення ефективності пневмосепарування насіння кормових трав / В. О. Дадак // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – 2014. – № 144. – С.225–232.

162. Ковалишин, С. Теоретичне дослідження розділення дрібнонасінневих сумішей у пневмоелектричному каналі / С. Ковалишин, І. Ніщенко, Ю. Ковальчук, В. Дадак // Вісник Львівського національного аграрного університету. – 2014. – №18. – С.86–95.

163. Присяжнюк Д. В. Аналіз обладнання для сушіння зернової сировини при післязбиральній обробці. Вібрації в техніці та технологіях. 2017. № 3(86). С. 136–144. (р. 14)

164. Цуркан О. В., Пришляк В. М., Присяжнюк Д. В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2017. №2(97). С. 99–103. (р. 14)
165. Цуркан О. В., Полевода Ю. А., Присяжнюк Д. В. та ін. Вібромеханічна інтенсифікація тепломасообмінних процесів при зневодненні зерна. Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 8-10 листопада 2016 р. Київ : К., 2016. С. 112–114. (р. 14)
166. Пазюк О. Д., Паламарчук І. П., Пазюк В. М. Вібраційні зерносушарки як спосіб інтенсифікації та підвищення економічності сушіння зерна. Вібрації в техніці та технологіях. 2020. № 4(64). С. 105–122. (р. 14)
167. Калетник Г. М., Цуркан О. В. Особливості конструкції вібраційного обладнання для сушіння високовологої насінневої сировини. Вібрації в техніці та технологіях. 2021. № 1(100). С. 5–12. (р. 14)
168. Пазюк В. М., Пазюк О. Д., Романенко О. Д. Енергозберігаючі режими сушіння насінневого зерна та реалізація їх у вібраційній зерносушарці. Вібрації в техніці та технологіях. 2016. № 3(83). С. 202–207. (р. 14)
169. Зозуляк І. А. Обґрунтування параметрів сушіння зерна соняшника у вібраційних машинах з U – видним контейнером: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук. : Вінниця, 2015. 22 с. (рр. 14-15)
170. Паламарчук І. П., Бандура В. М., Паламарчук В. І. Обґрунтування конструктивної та технологічної схеми конвейєрної вібраційної сушарки. Вібрації в техніці та технологіях. 2012. № 2(66). С. 116–128. (р. 15)
171. Солоня О. В. Вібраційні машини з просторово-циркуляційним рухом завантаження для тонкого помелу сипких матеріалів : монографія. Вінниця : РВВ ВДАУ, 2008. 133 с.
172. Солоня О. В., Білик Д. А. Вібраційні млини для помелу сипких матеріалів сільськогосподарського виробництва. Вібрації в техніці та технологіях. № 2 (70). 2013. С. 196–199. (р. 15)
173. Денісов П. Д., Бернік П. Є., Солоня О. В. Дослідження поведінки завантаження в сполучених помельних камерах вібраційних млинів безперервної дії. Машинознавство. 1999. № 12(30). С. 44–51. (р. 15)
174. Чубик Р. В., Зозуляк І. А., Бандура В. М. Електромеханічна модель адаптивної резонансної двохконтейнерної вібраційної сушарки. Вібрації в техніці та технологіях. 2012. № 1(63). С. 128–134. (р. 15)
175. Котов Б. І., Лисенко В. П., Комарчук Д. С. Математичне моделювання теплових процесів прес-екструдера з індукційним обігрівом. Науковий вісник НУБіП України. 2011. № 166, ч. 4. С. 113–118. (рр. 15-16)
176. Швидя В. О. Теоретичне обґрунтування використання контактного нагріву для сушіння насіння у вакуумі. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2019. Вип. № 10(103). С. 67–74. (р. 16)

177. Котов Б. І., Швидя В. О., Панцир Ю. І., Герасимчук І. Д. Математичне моделювання динамічних режимів зерносушарки з індукційним підведенням енергії. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2019. № 1(104). С. 64–70. (р. 16)
178. Адамчук В. В., Швидя В. О. Математична модель нагріву насіння перемішуванням в барабані вакуумної сушарки насіння. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2021. Вип. № 13 (112). С. 89–96. (р. 16)
179. Krischer O. Die Wissenschaftlichen GrundPagen der Trocknungstechnik. Berlin – Göttingen — Heldeeburg. 1956. 337 с. (Кришер О. Наукові основи техніки сушіння. М. 1961. 337 С. (переклад з німецької)). (р. 16)
180. Цуркан О. В. Вібромеханічна інтенсифікація сушіння насіння баштових культур у процесі післязбиральної обробки : автореф. дис. На здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : Глеваха, 2020. 40 с. (р. 15)
181. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Ліпунов М. І. Аналітичне визначення динамічних тепловологістних режимів зерносушарок безперервної дії. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2012. Вип. 42, ч. 2. С. 1–23. (рр. 15-16)
182. Швидя В. О., Анеляк М. М., Степаненко С. П. Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний збірник. Глеваха, 2019. Вип. №8 (107). С. 89–96. (рр. 15-16)
183. Станкевич, Г.М. Сушіння зерна: Підручник / Г. М. Станкевич, Т. В. Страхова, В. І. Атаназевич. К.: Либідь, 1997. 320 с.
184. Čiegis, R., Leonavičiene, T., Skakauskas, V., & Suboč, O. Mathematical modeling of grain drying. *Mathematical Modelling and Analysis*. 2003. Vol 8(2). P. 103-112. DOI: <https://doi.org/10.3846/13926292.2003.9637215>
185. Myhan R, Markowski M. Generalized Mathematical Model of the Grain Drying Process. *Processes*. 2022. Vol. 10(12): 2749. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10122749>
186. Mandas, N., Habte, M. Numerical simulation static-bed drying of barley. *Biosystems Engineering*. 2002, Vol. 82, P. 313–319. DOI: <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0075>
187. Srivastava V.K., John J. Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*. 2002. Vol. 43. P. 1689–1708. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00095-4)
188. Hemis M., Bettahar A., Singh C.B. , Bruneau D., Jayas D.S. An experimental study of wheat drying in thin layer and mathematical simulation of a fixed-bed convective dryer. *Drying Technology*. 2009. Vol. 27(10). P. 1142–1151. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373930903221739>
189. Константінов С. М., Панов Є. М. Теоретичні основи теплотехніки: підручник. Київ : Золоті ворота, 2012. 592 с.
190. Kaminski D.A., Jensen M.K. Introduction to Thermal and Fluids Engineering. John Wiley & Sons, NY, USA, 2017. 800 p.

191. Драганов Б. Х. Теплотехніка: підручник для студ. вищих техн. навч. закл. Київ : ІНКОС, 2005. 504 с.
192. Pabis S., Jayas D.S., Cenkowski S. Grain Drying: Theory and Practice, 1st ed.; John Wiley: New York, NY, USA, 1998. P. 116–295.
193. Dehli M., Doering E., Schedwill H. Fundamentals of Technical Thermodynamics. Textbook for Engineering Students. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-38910-9>
194. Гнатишин Я. М., Криштапович В. І. Теплотехніка: Навч. посіб. Київ : Знання, 2008. 364 с.
195. Швець І. Т., Кіраковський Н. Ф. Загальна теплотехніка та теплові двигуни. К. : Вища школа, 1977. 269 с.
196. Lykov A.V., Mikhailov Y.A. Theory of heat and mass-transfer. University of Michigan, USA, 1963. 558 p.
197. Burdo O., Terziev S., Burdo A., Sirotyuk I., Pylypenko E., Akimov A., Molchanov M. Energetics and Kinetics of Plant Raw Material Dehydration Processes. *Problems of the Regional Energetics*. 2022. Vol. 3 (55). P. 111–129. doi: DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.09>
198. Flor O, Palacios H, Suárez F, Salazar K, Reyes L, González M, Jiménez K. New Sensing Technologies for Grain Moisture. *Agriculture*. 2022. Vol. 12(3): 386. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12030386>
199. Jafari A., Tumbleson M., Rausch K.D. Evaluation of grain moisture measurement methods suited for developing countries. *Journal of Stored Products Research*. 2022. Vol. 98, 102001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.102001>
200. Jimoh K.A., Hashim N., Shamsudin R., Man H.C., Jahari M., Onwude D.I. Recent advances in the drying process of grains. *Food Engineering Reviews*. 2023. Vol. 15(3), P. 548-576. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7>
201. Yu P, Zhu W, Shen C, Qiao Y, Zhang W, Zhu Y, Gong J, Cai J. Current Status of Grain Drying Technology and Equipment Development: A Review. *Foods*. 2025. Vol. 14(14): 2426. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14142426>
202. Khan M.I.H., Batuwatta-Gamage C.P., Karim M.A., G.Y. Fundamental Understanding of Heat and Mass Transfer Processes for Physics-Informed Machine Learning-Based Drying Modelling. *Energies*. 2022. Vol. 15(24). 9347. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15249347>
203. Conceição R.S.G., Macêdo E.N., Pereira L.B.D., Quaresma J.N.N. Hybrid integral transform solution for the analysis of drying in spherical capillary-porous solids based on Luikov equations with pressure gradient. *International Journal of Thermal Sciences*. 2013. Vol. 71, P. 216-236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.04.011>
204. Котов Б.І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Моделювання і розрахунок режимних параметрів зерносушарок періодичної дії. Сільськогосп. машини. 2016. Вип. 34. С. 74-80.
205. Сиволапов В., Марченко В. Обробка насіння перед сівбою. *Agroexpert* №3(92). 2016.

206. Босий М. А. Обґрунтування нормативів шляхом моделювання за рівняннями регресії. Продуктивність агропромислового виробництва. 2007. № 6. С. 17–25.

207. Donnelly D.P. MathCAD for introductory physics. Addison-Wesley, 1992. 386 p.

208. Agricultural Dryer Market Size, Share, Growth Report, 2034. *Zion Market Research*. URL: <https://www.zionmarketresearch.com/report/agricultural-dryer-market> (дата звернення: 02.12.2025).

209. Grain Dryers Market Size, Share & Forecast 2035. *Market Research Future*. URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/grain-dryers-market-40113> (дата звернення: 02.12.2025)

210. Smart Grain Storage System Market Growth Analysis, Dynamics, Key Players and Innovations, Outlook and Forecast 2025-2032. *Intelmarket Research*. URL: <https://www.intelmarketresearch.com/smart-grain-storage-system-market-6596> (дата звернення: 02.12.2025).

211. Grain Dryers Market Report, Industry and Market Size & Revenue. *Strategic Market Research*. URL: <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/grain-dryers-market> (дата звернення: 02.12.2025).

212. Mobile Grain Dryer Market Forecast| Growth & Future Insights - 2035, *Business Research Insights*. URL: <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/mobile-grain-dryer-market-125256> (дата звернення: 02.12.2025).

213. Evaluation of the Agricultural Clean Technology Program. *Agriculture.Canada*. URL: <https://agriculture.canada.ca/en/departement/transparency/audits-evaluations/evaluation-agricultural-clean-technology-program> (дата звернення: 02.12.2025).

214. Government of Canada supports more efficient grain drying technologies across Canada. *Canada.ca*. URL: <https://www.canada.ca/en/agriculture-agri-food/news/2023/03/government-of-canada-supports-more-efficient-grain-drying-technologies-across-canada.html> (дата звернення: 02.12.2025).

215. Agribusiness 2025 - Brazil | Global Practice Guides - *Chambers and Partners*. URL: <https://practiceguides.chambers.com/practice-guides/agribusiness-2025/brazil/trends-and-developments> (дата звернення: 02.12.2025).

216. Santana P.A., Lopes D.C., Steidle Neto A.J. High-temperature grain drying: an economic analysis applied to Brazilian conditions. *Open Access Journal of Science*. 2020. Vol. 4(1). P. 24-29. DOI: 10.15406/oajs.2020.04.

217. Quequeto W.D., Resende O., Tfouni S.A., et al. Performance of industrial drying and soybean grains quality. *Food Sci. Technol*. 2023. Vol. 43, e101022. DOI: 10.1590/fst.101022.

218. Noise Emission in the Environment by Equipment for Use Outdoors Regulations 2001: Northern Ireland. GOV.UK. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/noise-emission-in-the-environment-by-equipment-for-use-outdoors-regulations-2001/noise-emission-in-the-environment-by-equipment-for-use-outdoors-regulations-2001-northern-ireland> (дата звернення: 02.12.2025).

219. Hou Y., Wu W., Li Z., Yu X., Zeng T. Effect of drying air supply temperature and internal heat exchanger on performance of a novel closed-loop transcritical CO₂ air source heat pump drying system. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 219, Part 2. 119516. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119516.

220. Tower Grain Dryer vs Mixed Flow. *Zhongfengnongke*. URL: <https://www.cngraindryer.com/news/3345.html> (дата звернення: 03.12.2025).

221. Boost Efficiency and Protect Your Harvest: How to Select the Right Grain Dryer. *SCI*. URL: <https://www.grainsystems.com/na/en/gsi-blog/boost-efficiency-and-protect-your-harvest-how-to-select-the-right-grain-dryer/> (дата звернення: 03.12.2025).

222. Tower Dryer vs. Cross-Flow Dryer: Choosing the Right Technology. *VNT*. URL: <https://vinanhatrang.com/tower-dryer-vs-cross-flow-dryer-choosing-the-right-technology/> (дата звернення: 03.12.2025).

223. In-depth comparison of the five major grain dryer types: advantages and disadvantages, production capacity and applicable scenarios. *Kbsilo*. URL: <https://kbsilo.com/in-depth-comparison-of-the-top-5-grain-dryer-types/> (дата звернення: 03.12.2025).

224. Comprehensive Analysis of Grain Dryer Types for Corn Farming Operations. *Grain Handling Direct*. URL: <https://grainhandlingdirect.com/blog/comprehensive-analysis-of-grain-dryer-types-for-corn-farming-operations/> (дата звернення: 03.12.2025).

225. Choose a grain dryer that best suits your operation. *Farm Progress*. URL: <https://www.farmprogress.com/farm-business/choose-a-grain-dryer-that-best-suits-your-operation> (дата звернення: 03.12.2025).

226. Continuous Flow Grain Dryers. *University of Wisconsin–Madison*. URL: <https://fyi.extension.wisc.edu/energy/grain-drying-and-storage/continuous-flow-grain-dryers/> (дата звернення: 03.12.2025).

227. Jokiniemi T., Ahokas J. Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. *Biosystems Engineering*. (2014). Vol. 121. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.01.002.

228. Grain Drying Energy Efficiency Checklist and Tips. *AgriSolar Clearinghouse*. URL: <https://www.agrisolarclearinghouse.org/wp-content/uploads/2022/02/Grain-Drying-Energy-Efficiency-Checklist.pdf> (дата звернення: 03.12.2025).

229. Grain Dryer Upgrades for Maximum Efficiency. *Elite Agri Solutions*. URL: <https://eliteagrisolutions.ca/articles/grain-dryer-upgrades-for-maximum-efficiency/> (дата звернення: 03.12.2025).

230. Energy Conservation for Continuous Flow Dryers. *University of Wisconsin–Madison*. URL: <https://fyi.extension.wisc.edu/energy/grain-drying->

and-storage/energy-conservation-for-continuous-flow-dryers/ (дата звернення: 03.12.2025).

231. Solar Heat for Grain Drying – Selection, Performance, Management. *Purdue Extension*. URL: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ae/ae-108.html> (дата звернення: 03.12.2025).

232. Solar grain drying system and method : Patent US20140047726A1 USA : F26B9/063, F26B25/10, F26B23/10 ; Pub. Date: Feb. 20, 2014.

233. Testing and validating the smart management system of the grain dryer Ai-robotics. *Github*. URL: https://github.com/ai-robotics-estonia/2024_Testing_and_validating_the_smart_management_system_of_the_grain_dryer (дата звернення: 03.12.2025).

234. Bagal S.A., Sahare Y.A., Rahate S.S., Borkar D.S. A Systematic Study of Measurement and Detection of Moisture Level in Grains. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 2025. Vol. 10(3). 220-225. DOI: 10.38124/ijisrt/25mar082.

235. Comparing Moisture Measurement Technologies. *MoistTech*, URL: <https://www.moisttech.com/a-comparison-guide-to-moisture-measurement/> (дата звернення: 03.12.2025).

236. Alyammahi S.A., Alhmoudi A., Alawadhi M., Alqaydi F. Low-Cost IoT-Based Smart Grain Monitoring System for Sustainable Storage Management. *Proceedings of the 12th International Electronic Conference on Sensors and Applications*, 12–14 November 2025. MDPI: Basel, Switzerland. DOI: 10.3390/ECSA-12-26545.

237. Ajisegiri, E.S.A. et al. Development of a Smart Grain Storage Silo Using the Internet of Things (IoT) Technology. *Int.Artif.Intell.&Mach.Learn.* 2022. Vol. 2(2) P. 35–55 DOI: 10.51483/IJAIML.2.2.2022.35-55

238. Smart Grain Elevator Systems Using IoT: Transforming Modern Agriculture. *WebbyLab*. URL: <https://webbylab.com/blog/smart-grain-elevator-system-using-iot/> (дата звернення: 03.12.2025).

239. Grain Handling Systems Market Size & Trends, 2035. *Global Growth Insights*, URL: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/grain-handling-systems-market-106828> (дата звернення: 03.12.2025).

240. Grain Management System: Why Every Modern Farm Needs it in 2026. *AgriChain*. URL: <https://agrichain.com/blog/grain-management-system> (дата звернення: 03.12.2025).

241. Agriculture ERP Software. *Microsoft Dynamics 365*, URL: <https://enterprise.trangotech.com/microsoft-dynamics-365-erp-for-agriculture/> (дата звернення: 03.12.2025).

242. U.S. Environmental Protection Agency (2024). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for PM (89 FR 16202).

243. Grain elevators, feed mills, and fertilizer mixing plants. *Minnesota Pollution Control Agency*, URL: <https://www.pca.state.mn.us/business-with-us/grain-elevators-feed-mills-and-fertilizer-mixing-plants> (дата звернення: 03.12.2025).

244. The Noise Emission in the Environment by Equipment for Use Outdoors (Amendment and Transitional) Regulations 2025. *Legislation.gov.uk*, URL: <https://www.legislation.gov.uk/ukxi/2025/1073/made> (дата звернення: 03.12.2025).

245. Wilson P. The sustainable approach to noise control carbon footprints. *British Safety Council*, URL: <https://www.britsafe.org/safety-management/2025/the-sustainable-approach-to-noise-control-carbon-footprints> (дата звернення: 03.12.2025).

246. Lubitz W., Teeter K., Parker E., Dalton R., Dyck J. Experimental Study of Grain Dryer Noise Emissions. *Environments*. 2023. 10, 100. DOI: 10.3390/environments10060100

247. Msg Agri for SAP Cloud ERP. *Msg*. URL: <https://www.msg-global.com/en/solutions/agribusiness-manufacturing/msg-agri-for-sap-cloud-erp> (дата звернення: 03.12.2025).

248. Сушіння зерна. *BukLib.net*. URL: <https://buklib.net/books/22982/> (дата звернення: 04.12.2025).

249. Гапонюк І.І. Науково-технічні основи високопродуктивних інноваційних технологій післязбиральної обробки зерна : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.18.02. Київ, 2012.

250. Харчова хімія: Тексти / Уклад.: Гуменюк О.Л. – Чернігів: ЧНТУ, 2018. – 129 с.

251. Тарасенко Т.А., Євлаш В.В., Неміріч О.В., Вашека О.М., Гавриш А.В., Кравченко О.І. Теоретичне дослідження способів сушіння овочів та фруктів. *Науковий вісник ЛНУВМБТ*. 2015. Том 17, № 4 (64), С148–158.

252. Основи збереження та первинної переробки сільськогосподарської продукції : Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 208 - «Агроінженерія» машинобудівного факультету денної та заочної форми навчання / В.Ф.Дідух – Луцьк: ЛНТУ, 2016. –52 с.

253. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Чалаєв Д.М. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна. Київ: ТОВ «ПоліграфСервіс», 2012. – 154 с.

254. Захарченко Р.В. Автоматизована система керування процесом сушіння зернових культур : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Полтавський національний технічний університет. Полтава, 2019. 214 с.

255. Процес сушіння. *Elib LNTU*, URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/part10.html (дата звернення: 04.12.2025)

256. Режими сушіння зерна. *Головне управління Держпродспоживслужби в Черкаській області*. URL: <https://www.cherk-consumer.gov.ua/novyny/4730-pezhymy-sushinnia-zerna> (дата звернення: 04.12.2025).

257. Довкола температур зерносушіння. *AgroTimes*, URL: <https://agrotimes.ua/article/dovkola-temperatur-zernosushinnya/> (дата звернення: 04.12.2025).

258. Кирпа М. Технологія післязбиральної обробки та сушіння зерна. *Пропозиція*. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnolohiyi-zberihannya-ta-pererobka/tekhnolo-hiya-pislyaz-ral-noyi-ob-rob-ky-ta> (дата звернення: 04.12.2025).
259. Гапонюк І. Вплив параметрів довкілля на сушіння зерна. *Ukrainian food journal*. 2013. Вип. 2, №. 3. С. 337–346.
260. Слободян М. В. Енергоефективність шахтних сушарок та критерії її оцінювання. Вінниця: ВНТУ, 2024. 87 с.
261. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с.
262. Yu P, Zhu W, Shen C, Qiao Y, Zhang W, Zhu Y, Gong J, Cai J. Current Status of Grain Drying Technology and Equipment Development: A Review. *Foods*. 2025. Vol. 14(14): 2426. DOI: 10.3390/foods14142426
263. Непорожній І., Непорожня Е. Жаростійкість овочевих рослин. Що далі – то спекотніше. *Пропозиція*. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnolohiyi-vyroshchuvannya/zharostiykist-ovochevykh-roslyn-shcho-dali-spekotnishe> (дата звернення: 04.12.2025).
264. ДСТУ 2949-94. Насіння сільськогосподарських культур. Держстандарт України, 1995. 49 с.
265. Як підвищити енергію проростання насіння. *AgroTimes*. URL: <https://agrotimes.ua/agronomiya/yak-pidvyshhyty-energiyu-prorostannya-nasinnya/> (дата звернення: 04.12.2025).
266. Оцінка життєздатності насіння: як інтерпретувати результати та використовувати їх для майбутніх проєктів. *Skol.if*. URL: <https://skol.if.ua/2025/10/ocinka-zhittiezdatnosti-nasinnja-jak-interpretuvati-rezultati-ta-vikoristovuvati-ih-dlja-majbutnih-proiektiv/> (дата звернення: 04.12.2025).
267. Ляшенко В.В., Сахно Т.В., Тригуб О.В., Семенов А.О. Фізіологічна реакція рослин сортів гречки посівної *fagopyrum esculentum* тоенш за умови різних режимів гідропраймінгу на ранніх етапах онтогенезу. *Вісник Полтавської Державної Аграрної Академії*. 2022. №2. С. 30–38. DOI: 10.31210/visnyk2022.02.03
268. Активне вентильовання зернових мас. *BukLib.net*. URL: <https://buklib.net/books/22844/> (дата звернення: 05.12.2025).
269. Вентильовання зерна - важливий технологічний процес, URL: <https://www.cherk-consumer.gov.ua/novyny/4157-> (дата звернення: 05.12.2025).
270. Попович О. Особливості сушіння зерна сільськогосподарських культур, URL: <https://www.cherk-consumer.gov.ua/novyny/4352-osoblyvosti-sushinnia-zerna-silskohospodarskykh-kultur> (дата звернення: 05.12.2025).
271. Опалко В., Гузь М., Шатров Р., Марченко В. Способи та технологія сушіння зерна різних культур. *Agroexpert*. 2017. №5.
272. Кирпа М. Сучасні технології сушіння зерна. *Агрономія сьогодні*, URL: <https://agronomy.com.ua/statti/515-suchasni-tekhnolohii-sushinnia-zerna.html>

273. Особливості сушіння зернобобових культур. *Новий Елеватор*. URL: <https://new-elevator.com.ua/blog/osoblyvosti-sushinnya-zernobobovyh-kultur/> (дата звернення: 05.12.2025). (дата звернення: 05.12.2025).
274. Кирпа М. Я., Кулик В.О. Енергоощадні прийоми у технологіях сушіння насіння кукурудзи. *Бюлетень Інституту сільського господарства степової зони НААН України*. 2016. № 11. С. 82–87.
275. Сушіння соняшнику. *Новий елеватор*. URL: <https://new-elevator.com.ua/blog/sushinnya-sonyashnyku/> (дата звернення: 05.12.2025).
276. Процес сушіння насіння соняшнику: поради фахівців. *Еліта агро*. URL: <https://elitaagro.com/content/protses-sushinnya-nasinnya-sonyashnyku-porady-fakhivtsiv> (дата звернення: 05.12.2025).
277. Технологія і режими активного вентилявання. *BukLib.net*. URL: <https://buklib.net/books/22919/> (дата звернення: 05.12.2025).
278. Stull R. Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science. 2017. Univ. of British Columbia. 940 p.
279. Mills A. Heat and Mass Transfer. CRC Press, 1995, 1278 P.
280. Li, C. Analytical theory study on latent heat coefficient of grain water vaporization. *Drying Technology*. 2021. Vol. 39(6), P. 803–819. DOI: 10.1080/07373937.2020.1720224.
281. Nese J. Phase Diagram for Water Vapor: Clausius Clapeyron Equation. *METEO 300: Fundamentals of Atmospheric Science*. URL: <https://courses.ems.psu.edu/meteo300/node/584> (дата звернення: 05.12.2025).
282. Nugent A., DeCou D., Russell S., Karamperidou C. Water Vapor. *Atmospheric Processes and Phenomena*. UH Pressbooks. URL: <https://pressbooks-dev.oer.hawaii.edu/atmo/chapter/chapter-4-water-vapor/> (дата звернення: 05.12.2025).
283. He Z., Zhao Z., Zhang Y., Ly H., Yi S. Convective Heat and Mass Transfer. Wood Research. 2015. Vol. 60 (6). P. 929–938.
284. Water Evaporation Rate. *Physics Van – University of Illinois*, URL: <https://van.physics.illinois.edu/ask/listing/1440> (дата звернення: 05.12.2025).
285. Energy Involved in the Phase Changes of Water. *HyperPhysics*. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/phase.html> (дата звернення: 05.12.2025).
286. Boiling, Pressure, Latent Heat | Physics Van - University of Illinois, доступ отримано лютого 20, 2026, <https://van.physics.illinois.edu/ask/listing/2461>
287. Henderson-Sellers, B. A new formula for latent heat of vaporization of water as a function of temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2006. Vol. 110. P. 1186 – 1190. DOI: 10.1002/qj.49711046626.
288. How Water Under Vacuum Cooling Works. *CleanCold Technologies*. URL: <https://www.cleancoldtech.com/the-science-behind-water-under-vacuum-cooling/> (дата звернення: 05.12.2025).

289. Schwartz L.J. Maxwell-boltzmann Distribution. *EBSCO Knowledge Advantage*. URL: <https://www.ebsco.com/research-starters/law/maxwell-boltzmann-distribution> (дата звернення: 05.12.2025).

290. Biçer C., Bakouch H.S., Biçer H.D., Alomair G., Hussain T., Almohisen A. Unit Maxwell-Boltzmann Distribution and Its Application to Concentrations Pollutant Data. *Axioms*. 2024. Vol. 13(4): 226. DOI: 10.3390/axioms13040226.

291. The Maxwell-Boltzmann Distribution. *TSFX*. URL: https://www.tsfx.edu.au/resources/N_-_E07.4.pdf (дата звернення: 05.12.2025).

292. The Intricacies of Water Evaporation: A Molecular Dance Below Boiling Point. *Medium*. URL: <https://medium.com/@quantumglyphs1/the-intricacies-of-water-evaporation-a-molecular-dance-below-boiling-point-76cbc98af52d> (дата звернення: 05.12.2025).

293. Anwar A. , Albano M., Hassan G., Delfini A., Volpini F., Marchetti M., Elfiky D. Vacuum Effect on Spacecraft Structure Materials. *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology*. 2015. Vol. 16. P. 1-10. DOI: 10.21608/asat.2015.22908.

294. Barni R, Zaka H, Pal D, Amjad I, Riccardi C. Characterization of a Supersonic Plasma Jet by Means of Optical Emission Spectroscopy. *Photonics*. 2025. Vol. 12(6): 595. DOI: 10.3390/photonics12060595

295. Kuzucan, A., Störi H., Taborelli M. Secondary Electron Yield on Cryogenic Surfaces as a Function of Physisorbed Gases. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 2012. Vol. 30. DOI: 10.1116/1.4736552.

296. Introduction to Vacuum Coating by Thermal Evaporation. *Leybold India*. URL: <https://www.leybold.com/en-in/knowledge/blog/vacuum-coating-thermal-evaporation> (дата звернення: 05.12.2025).

297. Poós T., Varju E. Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 153. 119500. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119500.

298. Ralys R., Yablonsky G.S., Slobodov, A. Determination of saturation vapor pressure of low volatile substances through the study of evaporation rate by thermogravimetric analysis. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2015. Vol. 15. P. 1072-1080. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-6-1072-1080.

299. The basis of vacuum evaporation. *Condorchem Enviro Solutions*. URL: <https://condorchem.com/en/blog/basis-vacuum-evaporation/> (дата звернення: 05.12.2025).

300. Amiri M., Ayani M., Ziółkowski P., Mikielwicz D. Numerical analysis of vacuum drying of a porous body in the integrated domain. *Journal of Food Process Engineering*. 2022. Vol. 45. DOI: 10.1111/jfpe.14006.

301. Heckmann T., Eser J. C., Altvater A., Dörr J., Lepère H., Scharfer P., Schabel W. Mass Transport in the Stefan-Knudsen Transition Region during Vacuum Drying at Different Pressures in a Porous Structure Resembling

Battery Electrodes. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*. 2023. Vol. 39(7). P. 2859–2869. DOI: 10.1021/acs.langmuir.2c03450.

302. Vasić M., Radojević Z., Grbavcic Z. Calculation of the effective diffusion coefficient during the drying of clay samples. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2012. Vol. 77. P. 523-533. DOI: 10.2298/JSC110717191V.

303. Pere C., Rodier E. Microwave vacuum drying of porous media: Experimental study and qualitative considerations of internal transfers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2002. Vol. 41. P. 427-436. DOI: 10.1016/S0255-2701(01)00161-1.

304. Knudsen diffusion. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Knudsen_diffusion (дата звернення: 05.12.2025).

305. Capillary condensation. *Wikipedia*, URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_condensation (дата звернення: 05.12.2025).

306. The Internal Mechanism of Drying. *Pharmaceutical Engineering*, URL: <https://www.pharmacy180.com/article/the-internal-mechanism-of-drying-2616/> (дата звернення: 05.12.2025).

307. Alvarez, J. C. Evaluation of Moisture Diffusion Theories in Porous Materials. *VTechWorks*, URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/items/176cbb9b-9be9-4941-a95b-4495689f7649> (дата звернення: 05.12.2025).

308. Modeling of Drying Process in Porous Media. *University of Delaware*, URL: <https://www1.udel.edu/dedwards/camp/reports/23drying.pdf> (дата звернення: 05.12.2025).

309. Haghi, A. Transport phenomena in porous media: A review. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2006. Vol. 40. P. 14-26. DOI: 10.1134/S0040579506010039.

310. Differences Between Vacuum Drying and Lyophilization Freeze Drying. *Vikumer*, URL: <https://vikumer.com/differences-between-vacuum-drying-and-lyophilization-freeze-drying/> (дата звернення: 05.12.2025).

311. Abeysena I., Darrington R.. Drying of Problematic Purification Samples by Lyophilization in a Centrifugal Evaporator. *American laboratory*. 2011. Vol. 43. P. 38-41.

312. Barley J. Basic Principles of Freeze-Drying. URL: <https://scientificproducts.com/wp-content/uploads/sites/58/2023/08/SP-Tech-Note-Basic-Principles-of-Freeze-Drying-6.pdf> (дата звернення: 05.12.2025).

313. Adams G., Cook I., Ward K. The Principles of Freeze-Drying. *Methods in molecular biology*. 2015. 1257. P. 121-43. DOI: 10.1007/978-1-4939-2193-5_4.

314. Hu X, Zhang B, Du X, Zhang H, Zhu T, Zhang S, Yang X, Zhang Z, Yang T, Wang X, et al. Recent Advances and Future Perspectives on Heat and Mass Transfer Mechanisms Enhanced by Preformed Porous Media in Vacuum Freeze-Drying of Agricultural and Food Products. *Foods*. 2025. Vol. 14(17): 2966. DOI: 10.3390/foods14172966.

315. Srikiatden J., Roberts J. S. Moisture Transfer in Solid Food Materials: A Review of Mechanisms, Models, and Measurements. *International*

Journal of Food Properties. 2007. Vol. 10(4). P. 739–777. DOI: 10.1080/10942910601161672.

316. Mari A., Parisouli D.N., Krokida M. Exploring Osmotic Dehydration for Food Preservation: Methods, Modelling, and Modern Applications. *Foods*. 2024. Vol. 13(17): 2783. DOI: 10.3390/foods13172783.

317. Fukui K, Takada S. Impact of air entrapment on capillary absorption in porous building materials. *Journal of Building Physics*. 2024. Vol. 48(3). P. 318-339. DOI: 10.1177/17442591241238437

Наукове видання

КОТОВ Б.І., СТЕПАНЕНКО С.П., КАЛІНІЧЕНКО Р.А.

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЦЕСАХ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ
ОБРОБКИ, ЗБЕРІГАННЯ І ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНА**

МОНОГРАФІЯ

Видання друкується за авторським редагуванням

Підписано до друку 18.06.2026 р. Формат 60х84/8 Папір офсетний.
Гарнітура Times Ум. друк арк. 22,79 Обл. вид. арк. 20,07
Тираж 130 прим. Зам № 2404

Видавець ПП Лисенко М. М.
м. Ніжин, пл. Гоголя, 13
Тел. (067) 4412124
E-mail: vidavec.lisenko@gmail.com

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 2776 від 26.02.2007 р.