

с 46

Міністерство освіти України
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Станкевич Георгій Миколайович



УДК [664.723+636.085].001

**НАУКОВІ ОСНОВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА
ТА КОРМОВИХ ЗАСОБІВ**

Спеціальність 05.18.03 — первинна обробка та зберігання
продуктів рослинництва

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Одеса — 1997

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Одеській державній академії харчових технологій (ОДАХТ) Міністерства освіти України

- Науковий консультант — доктор технічних наук, професор Остапчук Микола Васильович, ОДАХТ, професор кафедри процесів та апаратів.
- Офіційні опоненти — доктор технічних наук, професор Загоруйко Василь Онисимович, Одеський державний морський університет, професор кафедри суднового енергетичного устаткування та технічної експлуатації флоту;
- доктор технічних наук, професор Федоров Володимир Гаврилович, Український державний університет харчових технологій, професор кафедри теплотехніки;
- доктор технічних наук, професор Безусов Анатолій Тимофійович, ОДАХТ, технології консервування.

Пі... фізики АН України, обмінних процесів та

Автор. v 017306

С 46 | Станкевич Г. М.

Наук. осн. вдоскон. суш.

1994 | 6/5

в ____ год.

3 при Одеській державній

на ак

ак

Одеської державної

1997 р.

І.С.Крестінков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. До складу комбікормів та білково-вітамінних добавок здебільшого входить 60...80 % зернових компонентів і до 40 % кормових продуктів харчових виробництв. Залучають та використовують також нові види сировини, частіше всього відходи АПК, вологість яких складає 70...80%. Тобто більшість зернових культур та високовологі відходи повинні при первинній обробці та зберіганні підлягати одній з найголовніших операцій — штучному сушінню.

Однак, теплове сушіння — це дуже енергомісткий процес. Вартість палива та електроенергії складають біля 60 % загальних витрат, при чому паливо займає більше 90 % від загальних енерговитрат. Тепловий к.к.д. сучасних сушарок складає біля 50 %. Незважаючи на те, що процеси сушіння безперервно вдосконалюються, можливості зменшення витрат палива на сушіння далеко не вичерпані. Процес сушіння проходить з великою різницею між припустимою та фактичною температурою нагрівання матеріалу, що значно зменшує ефективність сушіння, а значна нерівномірність обробки матеріалу в сушарках не дозволяє повністю використати потенціальні можливості сушильного агенту. Недостатньо уваги надано питанням оптимізації роботи топки та тепловентиляційної системи сушарок. Наявні методи визначення режимів сушіння та конструктивних елементів сушарок засновані, як правило, на рівняннях статичного процесу, без урахування кінетичних і динамічних характеристик. Використання в розрахунках відомих аналітичних залежностей, до яких входять коефіцієнти внутрішнього переносу, з-за недостатньої точності їх визначення призводить до похибок в 100...300%.

Математичний опис кінетики сушіння не враховує змінність характеристик сушильного агенту та матеріалу. Відсутність надійного математичного опису процесів не дозволяє визначити оптимальні режими та конструктивні параметри сушарок. Велика кількість недостатньо надійних технічних засобів контролю та регулювання значно ускладнює систему керування сушарками та не дозволяє підтримувати режими сушіння на нормативному або оптимальному рівні.

Таким чином, способи та засоби вдосконалення процесу сушіння зерна і кормових засобів, що спрямовані на підвищення його ефективності, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота має зв'язок з планами держбюджетних та госпрозрахункових робіт ОДАХТ, зокрема, з темами № 66/89 "Розробити ресурсозберігаючі технології в виробництві комбікормів на основі відходів АПК", № 35/91 "Розробити технологію одержання кормових продуктів з відходів хімікофармацевтичних та консервних заводів" та № 4/96 "Впровадження еконо-

ОНАХТ 18.06.12
Наукові основи вдоск



v017306

мічно та екологічно ефективних технологій сушіння зерна з коректуванням, затвердженням та виданням нової інструкції”.

Мета і задачі дослідження. Основною метою роботи є наукове обґрунтування підвищення ефективності режимів і технологічних схем сушильних агрегатів для сушіння зерна та кормових засобів, що забезпечують зниження всіх видів витрат на сушіння.

Конкретними задачами роботи є:

- визначення фізичних властивостей та теплофізичних характеристик нових кормових засобів;
- уточнення та систематизація закономірностей кінетики сушіння зерна та кормових засобів;
- розробка системи математичних моделей (ММ) процесів сушіння зерна та кормових засобів, що відповідають наявним структурам технологічних схем сушарок;
- обґрунтування узагальненого алгоритму синтезу оптимальних багатоступеневих режимів сушіння зерна та кормових засобів;
- теоретичне обґрунтування та визначення заходів по зниженню нерівномірності сушіння зерна в сушильних агрегатах і підвищення ефективності їх роботи;
- розробка технологічних схем сушильних агрегатів з підвищеною надійністю функціонування;
- складання банку початкових даних та пакету прикладних програм для автоматизованого розрахунку оптимальних режимних та конструктивних параметрів сушильних агрегатів;
- розробка рекомендацій промисловості.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в:

- визначенні фізичних властивостей та теплофізичних характеристик нових кормових засобів;
- розвитку нових модельних уявлень про кінетику сушіння, встановленні її закономірностей при сушінні зерна і кормових засобів при змінних режимах та створенні їх математичного опису;
- складенні системи ММ, що дозволяє дати кількісну оцінку процесам сушіння та сушильним агрегатам;
- розробці алгоритмів синтезу багатоступеневих режимів сушіння, заснованих на нових модельних уявленнях та їх математичних моделях, що забезпечують одержання кормових засобів заданої якості при знижених енерговитратах;
- обґрунтуванні технологічних схем сушильних агрегатів з елементами саморегулювання та режимів багатоконтурного сушіння зерна з регульованим його охолодженням.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено, спроектовано та частково впроваджено у виробництво нові технологічні схеми сушін-

ня зерна, запропоновано нові вузли обладнання для реконструкції діючих та створення нових конструкцій сушильних агрегатів.

Результати роботи реалізовані в

- рекомендаціях по вдосконаленню режимів сушіння зерна та кормових засобів та переведенню сушарок на більш ефективні методи сушіння;
- розроблених режимах сушіння зерна в прямоточних і рециркуляційних сушарках;
- технічних умовах, технологічних інструкціях і режимах сушіння нових кормових засобів на базі високовологих відходів АПК та хіміко-фармацевтичних підприсмств;
- в новій відомчій “Інструкції по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок”, затверженої та введеної в дію ДАК “Хліб України” з 01.04.97 р.

Результати роботи впроваджено при сушінні зерна на одинарних та спарених сушарних агрегатах на базі шахтних сушарок типу ДСП на Комратському КХП (Молдова), Вигодянському, Березинському та Весело-Кутському КХП Одеського представництва ДАК “Хліб України”.

Особистий внесок здобувача. В опублікованих роботах, що надруковані в співавторстві, дисертанту належать основні ідеї, наукові обґрунтування головних теоретичних положень, розробка математичних моделей та алгоритмів їх реалізації, постановка та науковий аналіз результатів досліджень, формулювання і узагальнення основних висновків та пропозицій.

Апробація результатів дисертації. Головні результати теоретичних і експериментальних досліджень доповідались та одержали позитивну оцінку на:

- IX Міжнародній конференції “Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв” (Одеса, 1996);
- першій та другій національних науково-практичних конференціях “Хлебопродукты-94” (Одеса, 1994) і “Хлебопродукты-97” (Одеса, 1997);
- всесоюзних наукових конференціях “Технология сыпучих материалов – химтехника 86” (Россия, Белгород, 1986), “Технология сыпучих материалов” (Россия, Ярославль, 1989), “Проблемы индустриализации общественного питания страны” (Харків, 1989), “Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания” (Харків, 1990);
- республіканських науково-технічних конференціях “Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств”, (Львов, 1988), “Интенсификация технологий и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК” (Киев, 1989);
- обласній міжвузівській науково-практичній конференції “Социально-экономическое и научно-технические проблемы агропромышленного комплекса” (Одесса, 1989);

науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ОДАХТ (1981...1997).

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображені в 64 наукових працях, які опубліковані в навчальному посібнику, в наукових журналах (22 статті), в матеріалах конференцій (28 тез), в інформаційному листку, оформлені як авторські свідоцтва (4) та депоновані (8 статей).

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, семи глав, загальних висновків і рекомендацій, списку використаної літератури та додатків. Робота викладена на 597 сторінках машинописного тексту, із них 287 сторінок займають зміст, 52 рисунка, 71 таблиця, 54 додатка та список літератури з 273 найменувань, в тому числі 33 іноземних.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, показане її народногосподарське значення.

В **главі 1** викладено аналіз способів, режимів і технологічних схем сушарок для зерна та кормових засобів.

Розглянута структура кормових засобів, викладено аналіз матеріалів як об'єктів сушіння за основними групами показників: структурно-механічні та гігроскопічні властивості, теплофізичні характеристики (ТФХ), а також технологічні характеристики (хімічний склад, припустима температура нагрівання тощо). Порівняльний аналіз чисельних літературних даних за гігроскопічними властивостями та ТФХ показав, що вони мають суперечливий характер, а формули для їх обчислення не мають узагальненого характеру і подані у вузьких діапазонах зміни початкових (первинних) умов сушіння. Показано, що для деяких зернових культур та багатьох видів традиційних і нетрадиційних кормових засобів гігроскопічні властивості та ТФХ не відомі взагалі. Більшість властивостей і характеристик зерна та кормових засобів наведені в літературі в табличному вигляді і лише для деяких показників (густина, об'ємна маса, шпаруватість тощо) є емпіричні, здебільшого лінійні, залежності від їх вологості. Надійні узагальнюючі зв'язки між хімічним складом, вологістю та припустимою температурою нагрівання зерна відсутні.

Розглянуто також характеристики і особливості нетрадиційних кормових засобів як об'єктів сушіння. Це велика група відходів від переробки лікарських рослин на хімікофармацевтичних підприємствах — шротів лікарських рослин (ШЛР): плоди шипшини, чабрець (тим'ян повзучий), квітки ромашки аптечної, нагідки лікарські (календула), валеріана лікарська, женьшень, м'ята перцева, пустирник сердечний, чорнушка Дамаська. Розглянуто також відходи харчоконцентратних (кавовий шлам) та цукрорафінадних (фільтраційний осад — цукровий дефекат) заводів.

Аналіз способів і режимів сушіння зерна та кормових засобів показав, що для їх сушіння застосовуються конвективні та комбіновані способи із

застосуванням різних сушильних агрегатів (шахтні, барабанні прямоточні, пневмобарабанні, стрічкові та ін.). Широко використовуються також рециркуляційні сушарки для зерна. Режими сушіння нетрадиційних кормових засобів практично в літературі не висвітлені. Встановлено, що наявні режими сушіння в більшості випадків не оптимальні, не враховують всебічні фактори та способи сушіння, призначення продуктів сушіння тощо. Аналіз технологічних схем сушильних агрегатів показав, що можливості інтенсифікації конвективного та комбінованого сушіння далеко не вичерпані.

У **другій главі** коротко викладені теоретичні основи процесів сушіння та шляхи їх удосконалення.

На основі аналізу критеріїв якості процесу сушіння показано, що мета процесу може відрізнитись і оцінюватись різними показниками якості, що не дозволяє дати їй однозначну оцінку. Аналіз різних форм опису кінетики сушіння показав, що в силу значної нелінійності систем диференціальних рівнянь тепло- і масопереносу на практиці використовують приблизні аналітичні рівняння кінетики сушіння, а коефіцієнти, які входять до них, визначають емпірично. Проте, методика визначення кінетичних коефіцієнтів заснована на використанні переважно графічних методів, що зумовлює значну похибку в їх визначенні.

Встановлено, що загальні принципи і методи розрахунків процесу сушіння, викладені в роботах В.Н. Стабнікова, Н.Є. Федорова, А.С. Гінзбурга, В.С. Сажина, В.І. Муштаєва, М.В. Ликова і ін., стосуються в основному проектування нових типорозмірів і конструктивних параметрів сушильного устаткування, але перевірочні розрахунки, які мають важливе практичне значення, практично не висвітлені.

Питання оптимізації процесів сушіння зерна розглядалися багатьма дослідниками, однак, найбільш систематизовано вони викладені в працях М.В. Остапчука. Для оптимізації та оцінки ефективності процесів сушіння критеріїв, що відповідали б одночасно вимогам однозначності, універсальності, статистичної ефективності, простоти, ясного фізичного змісту тощо, не існує. Через те, задачі оптимізації сушіння являються багатокритеріальними, а для їх розв'язання необхідна розробка відповідних алгоритмів та їх програмового забезпечення.

На основі теоретичних уявлень про процес сушіння нами була запропонована класифікація методів його інтенсифікації, яка систематизує їх на основі відомих наукових положень, упорядковує уявлення про потенціальні можливості інтенсифікації і дозволяє визначити найбільш доступні методи розрахунку. Найбільшого ефекту можна досягти накладенням інтенсифікуючого впливу при оптимальних режимах кожного методу інтенсифікації або спрямованим послідовним з'єднанням різних методів. Тому оптимізація може мати суттєве, а інколи й першорядне значення при інтенсифікації технологічних процесів сушіння. Наведена класифікація моделей.

В третій главі наведено результати дослідження і математичного моделювання процесів та об'єктів сушіння.

Складення математичних моделей проводили згідно із запропонованою нами універсальною структурною схемою. Для складення і аналізу регресійних математичних моделей на основі експериментальних даних, розробили систему алгоритмів і програм PLAN для персональних ЕОМ, яка включає 10 програмних блоків для реалізації методу найменших квадратів, послідовного регресійного та статистичного аналізу, виводу на друк коефіцієнтів регресії, їх статистичних характеристик та результатів обробки дослідів і одержаного рівняння регресії, а також екстремального аналізу та побудови поверхні відгуку за регресійними моделями. Вказані та подальші програмні продукти написані на мові програмування Turbo Pascal і можуть бути використані на IBM-сумісних персональних комп'ютерах. Описана система алгоритмів і програм опублікована в навчальному посібнику [1] і використовується нами більше 10 років в наукових дослідженнях, а також в навчальному процесі.

Порівняльний аналіз наведених в літературі емпіричних рівнянь для визначення параметрів стану повітря, водяної пари та сушильного агенту показав, що вони дають розбіжність в 10...12 і більше відсотків, оскільки в них не завжди врахована залежність окремих коефіцієнтів від температури повітря та інших факторів. Для зменшення похибок та зручності проведення теплових розрахунків на ЕОМ в даному розділі наведено математичні вирази для визначення параметрів сухого і вологого повітря з урахуванням їх уточнення, які зведені в загальну підпрограму JD-FUNK, що включає формули для обчислення параметрів стану повітря (сушильного агенту): парціального тиску $P_{п}(t)$, кПа; вологовмісту $d(B,t,\phi)$, г/кг; відносної вологості $\phi(B,t,d)$, %; питомого об'єму $v_{п}(B,t,\phi)$ і $v_{п}(B,t,d)$, м³/кг; питомої теплої пароутворення $r(t)$, кДж/кг; ентальпії вологого повітря $J_{вп}(t,d)$, кДж/кг; питомої теплоємності c , кДж/(кг·К), коефіцієнтів температуропровідності a , м²/с, теплопровідності λ , Вт/(м·К) і кінематичної в'язкості $\nu(t)$, м²/с сухого повітря. При цьому для обчислення характеристик сухого повітря рекомендовано систему формул, що одержана апроксимацією літературних даних:

$$\begin{aligned} c &= 1,004161 + 0,000053t, \text{ кДж/(кг·К)}, \\ a &= (1,876827 + 1,25337 \cdot 10^{-4}t + 1,442398 \cdot 10^{-5}t^2) \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2/\text{с}, \\ \lambda &= 2,376274 + 7,0588 \cdot 10^{-3}t - 1,583324 \cdot 10^{-6}t^2, \text{ Вт/(м·К)}, \\ \nu &= 13,77414 + 9,061342 \cdot 10^{-2}t + 1,04652 \cdot 10^{-4}t^2, \text{ м}^2/\text{с}, \end{aligned} \quad (1)$$

Формула для визначення c справедлива в діапазоні температури повітря $t=0...800$ °С, а останні — для $t=0...180$ °С при атмосферному тиску.

Відповідно до задач дослідження нами були встановлені фізичні та технологічні властивості нетрадиційних кормових засобів. Для ШЛР були визначені об'ємна маса γ , густина ρ , крупність частинок d , гранулометрич-

ний склад, кут природнього нахилу α , коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя та ряд інших (табл. 1).

Аналіз результатів дослідження фізико-технологічних властивостей КШ і ФО показав, що за рядом показників КШ аналогічний шротам і висівкам, але внаслідок значної різниці в анатомоморфології і гранулометричному складі — у них різні розпорозуваність та коефіцієнти зовнішнього тертя. Щоб уникнути втрат через високу розпорозуваність, ФО не потрібно пересушувати нище 8...10%. На основі узагальнення літературних даних та результатів проведених досліджень нами розроблено технічні умови на КШ і ФО.

Таблиця 1.

Фізико-технологічні властивості ШЛР

Шроти лікарських рослин	W, %	γ , кг/м ³	ρ , кг/м ³	α , град	d, мм	Коефіц. тертя	
						внутр.	зовн.
Ромашка аптечна	8.7	341	475	50	1,63	0,623	0,154
Коріння валеріани	12.1	460	460	45	2,55	—	—
Шипшина	5.0	261	1075	48	5,45	0,938	0,117
Чорнушка Дамаська	7.2	282	1449	55	2,35	0,725	0,250
Сунвіття календули	10.1	170	—	60	0,75	—	—
Чабрець	7.3	77	—	62	3,82	0,558	0,126
Шалфей	10.0	162	—	67	3,20	1,154	0,175

В зв'язку з відсутністю літературних даних по гігроскопічних властивостях кормових засобів — відходів різних виробництв, нами експериментально визначені ці властивості, що необхідні для обґрунтування режимів їх сушіння та зберігання. Рівноважну вологість W_p визначали тензіметричним методом при температурі повітря $t=18$ °С. Згладжування експериментальних даних по кінетиці зволоження ШЛР проводили апроксимаційним виразом вигляду $W=\tau/(a+b\tau)$, а для кавового шламу і фільтраційного осаду $W=a \cdot \exp(b\tau)$. Якість апроксимації залежності $W=f(\tau)$ оцінювали по середньоквадратичному відхиленню s . За вказаними апроксимаційними виразами можна прогнозувати вологість ШЛР, або визначати тривалість їх безпечного зберігання. Узагальненні результати досліджень гігроскопічних властивостей по деяким видам нетрадиційних кормових засобів наведено в табл. 2.

Аналіз отриманих даних, а також проведених мікробіологічних досліджень показав, що шроти перелічених лікарських рослин можуть зберігатися в діапазоні відносної вологості повітря $\phi=0...80$ % протягом 1...2 місяців, оскільки їх рівноважна вологість W_p при цьому є безпечною й не призводить до розвитку плісневих грибів.

Визначення ТФХ матеріалів проводили зондовим методом вистигаючої пластини. Для підвищення точності обробку експериментальних даних

виконували на ЕОМ за опрацьованими нами програмами в декілька етапів, які включають апроксимаційне згладжування, розрахунки екстремальних та інших характерних точок, розрахунки значень питомої теплоємності c , коефіцієнтів температуропровідності a , теплопровідності λ і теплової активності ε , узагальнення даних за допомогою регресійного аналізу та статистичну оцінку отриманих результатів. Так, були отримані узагальнені емпіричні залежності ТФХ від вологості W і температури θ навути при $W = 11,09 \dots 21,9 \%$ та $\theta = 14,1 \dots 40,0 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} c &= 1701,520 + 1,718 W \theta, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K}); \\ a &= (17,982 + 3,373 \theta - 0,074 \theta^2 + 0,114 W \theta) 10^{-9}, \text{ м}^2/\text{с}; \\ \lambda &= 0,064 + 0,000284 W \theta, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K}); \\ \varepsilon &= 312,900 + 0,634 W \theta, \text{ Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{K}\cdot\text{с}^{0,5}). \end{aligned} \quad (2)$$

Таблиця 2.

Гігроскопічні властивості деяких кормових засобів

Кормові засоби	φ , %	W_p , %	τ_p , діб	Коефіцієнти		s , %
				a	b	
Шрот шипшини	50	5,54	15	0,1487	0,1705	0,0900
	60	7,32	14	0,0729	0,1314	0,1100
	80	10,19	22	0,0965	0,0940	0,2100
	90	14,00	23	0,0544	0,0692	0,1600
Шрот женьшеню	50	0,41	14	0,0583	0,1149	0,2600
	60	10,63	15	0,0393	0,0914	0,4200
	90	19,21	31	0,0530	0,0503	0,3700
Кавовий шлам	50	7,40	16	6,8000	0,0063	0,1965
	60	8,20	12	7,7900	0,0046	0,1710
	90	16,00	11	13,010	0,0160	0,5220
Фільтраційний осад	50	0,73	13	0,7000	0,0019	0,0051
	60	0,83	12	0,6700	0,0186	0,0550
	90	0,94	11	0,9200	0,0013	0,0110

Аналогічні формули отримані для борошна томатного кормового при $W=6 \dots 18 \%$ і $\theta=20 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$ та для кавового шламу при $W=8,3 \dots 77,6 \%$ і $\theta=17,1 \dots 43,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Були визначені також ТФХ фільтраційного осаду при $W=7,2 \%$ та $\theta=18 \text{ }^\circ\text{C}$.

Умови дослідів та розрахункові значення теплофізичних показників ШЛР зведені у табл. 3.

Аналіз цих даних показав, що теплофізичні характеристики досліджених ШЛР мають нелінійну залежність від їх вологості та температури. Характер цієї залежності для різних ШЛР неодинаковий, що зумовлено різними формами зв'язку води з матеріалом, його структурою, хімічним складом та іншими факторами. Сумісне використання цих даних з табличними

значеннями c , a , λ , та ε для води дозволяє за формулою змішування розрахувати теплофізичні характеристики ФО при будь-якій вологості.

Була встановлена також термостійкість деяких бобових культур. Досліджували вплив початкової вологості зерна навути, сої, кормових бобів і сочевиці та температури сушильного агента на змінювання деяких показників їх якості (в залежності від призначення). Визначали вміст сирого протеїну, перетравлюваності білку та вмісту інгібітора трипсина. Крім того, визначали розколеність, яка має суттєве значення для зерна, що призначене для тривалого зберігання. Аналіз закономірностей зміни показників якості було використано в подальшому для уточнення гранично-припустимих температур нагрівання бобових культур. Спосіб оцінки поживної цінності зерна бобових культур захищено а.с. 1354107.

Таблиця 3.

Теплофізичні характеристики ШЛР

Шроти лікарських рослин	Умови дослідів			Теплофізичні показники			
	ШЛР		зонд	c , Дж/(кг·K)	$a \cdot 10^9$, м ² /с	λ , Вт/(м·K)	ε , Дж/(м ² ·K·с ^{0,5})
	W , %	θ , °C					
Плоди шипшини	0,2	3	23	556,8	43,20	0,0108	51,10
	10,2	18	37	1553,9	74,50	0,0521	190,90
	0,2	25	49	1723,8	100,09	0,0450	142,34
Насіння чорнушки Дамаської	10,2	41	59	1848,8	104,30	0,0872	269,30
	8,0	20	40	3858,0	93,74	0,1020	333,10
	8,0	26	50	2403,4	108,70	0,0737	223,45
Ромашка аптечна	8,0	34	60	2228,8	82,59	0,0519	180,62
	12,4	17	41	2277,8	123,08	0,0956	272,49
	12,4	27	47	2252,9	103,21	0,0793	246,81
	12,4	36	56	1779,9	92,77	0,0563	184,86

У главі 4 викладені результати досліджень процесів нагрівання, сушіння і охолодження зерна та кормових засобів за допомогою складених нами моделей кінетики і динаміки.

Спочатку визначили порівняльні характеристики факторів, які впливають на кінетику сушіння зерна в щільному шарі: температури t і швидкості v сушильного агента та товщини шару зерна h . Спільний вплив, а також кількісну оцінку міри взаємного впливу факторів t , v та h на кінетику процесу сушіння зерна пшениці проводили за середніми швидкостями сушіння і нагрівання

$$N_w = (W_p - W_k) \tau; \quad N_{w1} = (W_p - W_1) \tau_1; \quad N_{w2} = (W_1 - W_k) \tau_2; \quad N_\theta = (\theta_k - \theta_p) \tau,$$

де W_p , W_1 і W_k – значення вологовмісту зерна, відповідно з початку, в кінці першого етапу та в кінці сушіння, % на абсолютно суху масу ($W_p = 30,15 \%$,

$W_1=21,40\%$, $W_k=16,00\%$); θ_n та θ_k — температура зерна на початку та в кінці сушіння, °C; τ_1 , τ_2 , τ — тривалість сушіння і нагрівання, яка відповідає вологовмісту на першому і другому етапах та загальна, хв.

Після обробки результатів дослідів і статистичного аналізу здобутих даних за програмою PLAN отримали рівняння:

$$N_w = 0,6191 + 0,2414x_1 + 0,1084x_2 - 0,2376x_3 + 0,0516x_1x_2 - 0,1259x_1x_3;$$

$$N_{w1} = 0,7237 + 0,2467x_1 + 0,1015x_2 - 0,2840x_3 - 0,1045x_2x_3;$$

$$N_{w2} = 0,5053 + 0,2230x_1 + 0,1102x_2 - 0,1903x_3 + 0,0675x_1x_2 - 0,0133x_1x_3;$$

$$N_\theta = 3,0522 - 0,2950x_1 + 0,7325x_1x_2 - 0,3075x_1x_3,$$

де x_1 , x_2 , x_3 — кодовані значення факторів t (°C), v (м/с) та h (мм):

$$x_1 = (t - 120)/30; \quad x_2 = (v - 0,55)/0,25; \quad x_3 = (h - 150)/50.$$

Наявність значущих ефектів взаємодії b_{ij} в одержаних рівняннях регресії відповідає суперечливому характеру взаємовпливу факторів t , v та h на процес сушіння. Аналіз цього впливу був прослідкований за квазіоднофакторними моделями вигляду

$$z_i = (b_i + \sum_{j=1}^k b_{ij}x_j) \cdot x_i,$$

що отримані з рівнянь для кожного i -го фактору. Аналіз квазіоднофакторних моделей показав, що ефект взаємодії b_{ij} змінює значення лінійного ефекту b_i . Отже, швидкість зміни N_w , N_{w1} , N_{w2} і N_θ залежить від рівня ($k-1$) факторів x_i і не є сталою характеристикою впливу фактора x_1 . Єдину числову оцінку міри впливу їх на критерій Y не можна дати доти, доки не будуть вказані рівні стабілізації решти ($k-1$) факторів. Таким чином, вплив кожного з розглянутих факторів на кінетику сушіння та нагрівання зерна пшениці залежить від рівня решти. Це не дозволяє дати однозначну відповідь на питання про вплив факторів t , v і h , що відображає діалектичні суперечності реальних сушильних процесів.

Для підвищення точності експериментального опису кривих сушіння та нагрівання розробили алгоритм аналітичної оптимальної ідентифікації коефіцієнтів кінетики (коефіцієнти A , β та m в рівнянні Г.К.Філоненко, коефіцієнт K в рівнянні А.В.Ликова, коефіцієнти A і B в рівнянні Н.Д.Дочкаєва і М.С.Смирнова тощо), який базується безпосередньо на дослідних даних, рівняннях аналітичної геометрії, методі найменших квадратів та статистичному аналізу, а не на суто графічних методах. Розроблений нами метод дозволив, зокрема, використовувати узагальнену форму лінеаризуючого виразу в рівнянні кінетики Г.К.Філоненко та визначити оптимальні значення коефіцієнту m , а не одне із його дискретних значень, кратних 0.5, тобто 0.5, 1.0, 1.5 або 2.0. Крім того, алгоритмом передбачено і візуальну оцінку результатів ідентифікації. Виконані на ЕОМ обчислення по складених програмах FILON, LYKOV та DOK-SM показали значне підвищення точності визначення кінетичних коефіцієнтів.

Для визначення W_p в діапазоні температур повітря 60...100 °C, яке входить до багатьох рівнянь кінетики, нами запропонований отриманий апроксимацією літературних даних вираз

$$W_p = 8,727 - 0,0204t - 0,000628t^2, \% \quad (3)$$

який дає добре узгодження з даними М.О.Гришина та інших авторів.

Використовуючи опис кінетики процесів сушіння різними типами рівнянь, що зображують у явному чи неявному вигляді функціональні залежності $W=f(t)$ або $dW/dt=f(W)$ можна визначити тривалість процесів сушіння τ від W_n до W_k при сталих протягом всього процесу температурних режимах сушіння. Це накладає обмеження на застосування рівнянь кінетики для розрахунку тривалості сушіння в реальних сушарках, що працюють, як правило, за багатоступеневими температурними режимами. Крім того, багато способів опису кінетики сушіння представлені трансцендентними та ірраціональними рівняннями і для визначення τ вимагають застосування спеціальних обчислювальних процедур та їх програмного забезпечення.

Один із способів, що дозволяє визначити τ при багатоступеневому сушінні, пов'язаний із зображенням коефіцієнтів кінетики у вигляді функціональних залежностей від режимів сушіння. Так, наприклад, якщо величини N , A , β , а також W_p і $W_{кр}$ в рівнянні кінетики сушіння Г.К.Філоненко або величини K , W_p та $W_{кр}$ в рівнянні А.В.Ликова зобразити у вигляді функціональних залежностей

$$N, A, \beta, W_p, W_{кр}, K = f(t, h, v, \dots), \quad (4)$$

то, задаючи значення режимних параметрів (t , h , v та інш.) на кожній ступені сушіння, можна визначити відповідні значення τ , а потім і загальну тривалість сушіння $\tau_{заг}$ від W_n до W_k .

Із запропонованого нами підходу та відомого рівняння кінетики Г.К.Філоненко одержано математичний опис кінетики багатоступеневого сушіння пророщеного ячменю. Для визначення сталих N , A , β та $W_{кр}$, які входять у рівняння Г.К.Філоненко, провели серію дослідів на лабораторній установці, що моделювала умови сушіння у щільному шарі. Далі, були одержані регресійні залежності перерахованих кінетичних параметрів (N , $W_{кр}$, A та β) від режимів сушіння (температури сушильного агента t та питомого навантаження q), складена система рівнянь та алгоритм і програма TAUFIL для ЕОМ, які були використані в подальшому при розробці математичної моделі для розрахунку тривалості сушіння при ступеневій зміні температури t в стрічковій сушарці.

Були встановлені закономірності кінетики сушіння навути, кормових бобів, сої і сочевиці та отримано їх математичний опис у вигляді рівнянь М.В.Ликова

$$W = W_p + (W_n - W_p) \cdot \exp(-K\tau), \quad \tau = \{\ln[(W_n - W_p)/(W - W_p)]\} / K. \quad (5)$$

Для визначення тривалості сушіння бобових при змінному ступеневому режимі, що характерний для шахтних зерносушильних агрегатів, коефіцієнт

сушіння K в рівнянні кінетики (5) був зображений у вигляді функціональної залежності від початкових та режимних параметрів сушіння

$$K = f(W_0, t) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 = b_0 + b_1 W_0 + b_2 t + b_{12} W_0 t, \quad (6)$$

де b_i – коефіцієнти регресії.

Значення товщини шару зерна було прийняте $h=0,1$ м, а швидкість сушильного агента $v=0,3$ м/ч, що відповідає умовам сушіння в шахтних сушарках типу ДСП з діагональним розташуванням коробів.

Оскільки визначення залежності (5) проводять на основі дослідних даних, то з метою скорочення кількості дослідів, підвищення вірогідності отримуваних результатів застосували методи планування багатофакторних експериментів та відповідні розроблені нами програми (PLAN, LYKOV, GRAFIK та ін.). Після реалізації дослідів, їх поетапної обробки та узагальнення з використанням регресійного аналізу були отримані рівняння для K типу (6). Зведені дані по коефіцієнтах в рівняннях регресії в кодованих та натуральних змінних, а також деякі статистичні характеристики отриманих рівнянь наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Зведені дані з рівнянь регресії для залежності $K \cdot 10^3 = f(W_0, t)$

Характеристики	Культура			
	навуг	соя	кормові боби	сочевиця
Коефіцієнти для змінних:				
кодованих b_0	22,0410	28,0581	14,7218	52,0768
b_1	-7,6960	10,7285	-4,0670	0
b_2	14,7218	-2,0250	6,3160	0
b_{12}	-4,0670	0	0	0
натуральних b_0	-23,5134	22,8097	0	-25,7560
b_1	0,6088	-1,3297	-0,2713	-0,7826
b_2	0,7599	0,3989	0,2279	1,0561
b_{12}	-0,0183	0	0	0
Середьоквадратичне відхилення S_y	1,3410	1,4720	0,9042	1,2560
$S_{неад}$	0,5344	1,2519	1,3927	1,6909
Критерій Фішера F_p	6,2964	1,3848	2,737	1,8125
$F_{кр}$	199,5	19,0	19,0	19,0

Аналіз наведених даних показав, що при сушінні всіх культур статистично незначущі квадратичні ефекти. Характер впливу факторів W_0 та t на K для всіх культур в центрі експерименту однаковий — із зменшенням W_0 та збільшенням t коефіцієнт сушіння зростає (а час сушіння відповідно зменщується). У всіх випадках вплив температури сушильного агента t на K вищий, ніж вплив на нього початкової вологості зерна W_0 . Вплив W_0 та t на K лінійний. І лише для наугу виявився значущим коефіцієнт парної

взаємодії $b_{12} = -4,0670 \cdot 10^{-3}$. Однак він змінює лише силу впливу W_0 та t на K , а не їх характер:

$$b_1' \cdot 10^3 = (-7,6960 - 4,0670 x_2) x_1; \quad b_1' \cdot 10^3 = (10,7285 - 4,0670 x_1) x_2.$$

Крім кінетики сушіння в цих же серіях дослідів встановлено закономірності нагрівання зерна наугу, кормових бобів, сої та сочевиці в процесі їх сушіння в щільному шарі, що характерний для шахтних зерносушарок. Для згладжування експериментальних даних по нагріванню зерна та узагальненню закономірностей кінетики провели апроксимацію кривих нагрівання по модифікованому нами рівнянню Н.Ф.Докучаєва та М.С.Смирнова:

$$\theta = \theta_0 + \tau / (A + B\tau) \quad (7)$$

Прийнята форма рівняння кінетики нагрівання дала задовільну збіжність з експериментальними даними. Дані з кінетики нагрівання були узагальнені та отримані рівняння регресії для залежностей коефіцієнтів A та B від факторів W_0 і t вигляду (3).

Спільний аналіз кривих нагрівання досліджуваних бобових та показників їх якості дозволив уточнити гранично-припустимі температури нагрівання. Для збереження якості зерна, що йде на зберігання та кормові цілі, температура нагрівання зерна не повинна перевищувати 40 °С для наугу, сої і сочевиці та 35 °С для кормових бобів. Це може бути забезпечене при температурах сушильного агента до 60 °С при однобічному продуванні. При зміні напрямку продувки або відлежуванні зерна можуть бути застосовані більш високі значення t , однак при цьому треба визначити тривалість продування в одному напрямку τ на снові одержаних нами рівнянь кінетики нагрівання. Вказаний спосіб сушіння з чергуванням напрямків продування забезпечується в шахтних зерносушарках, для яких в подальшому нами була обгрунтована раціональна робота випускних пристроїв.

Для одержання кількісної оцінки кінетики сушіння та нагрівання зерна кукурудзи у щільному шарі кінетичні закономірності також були представлені описаним вище способом з введенням поняття зведеної вологості, що дозволяє врахувати вплив на кінетику сушіння поглиблення зони випаровування і подолати несумісність факторів при експериментальному визначенні необхідних коефіцієнтів у рівняннях кінетики сушіння. В цьому випадку кінетика процесу зображується у вигляді функціональних залежностей відносних коефіцієнтів сушіння та нагрівання

$$K_w = f_1(W_0, W_i^*, \theta_0, t, W^*), \quad K_t = f_2(W_0, W_i^*, \theta_0, t, W^*),$$

де K_w, K_t – відносні коефіцієнти сушіння та нагрівання:

$$K_w = 1/N = (\tau - \tau_0) / (W_i - W), \quad K_t = (\theta - \theta_0) / (W_i - W);$$

W_i^*, W^* – зведені значення вологості, що характеризують відповідно початок кожної зони сушіння та кінетичний параметр:

$$W_i^* = (W_i - W_0) / (W_i - W_k); \quad W^* = (W_i - W) / (W_i - W_k).$$

Експозиція сушіння та нагрівання зерна визначаються за рівняннями

$$\tau = \tau_i + K_w (W_i - W); \quad \theta = \theta_i + K_t (W_i - W).$$

Для експериментального визначення вказаних рівнянь кінетики була проведена серія дослідів за D-оптимальним планом Бокса типу B_5 і, після їх обробки, одержані рівняння в натуральних значеннях змінних:

$$K_w = 9,9102 + 7,1803W_i^* - 0,0816\theta_i - 0,0498t + 3,0645W^* - 0,0004514W_0^2 + 0,00007450t^2 + 1,0208(W^*)^2 + 0,04031W_0W^* + 0,0001148W_0t + 0,01112W_0W^* + 0,04805W_i^*\theta_i - 0,03953W_i^*t - 1,7100W_i^*W^* + 0,0001955\theta_i t + 0,02241\theta_i W^* - 0,01935tW^*;$$

$$K_t = -9,2824 + 0,08980W_0 + 14,4756W_i^* - 0,06896\theta_i + 0,07961t + 5,9981W^* - 7,2036(W_i^*)^2 - 0,09449W_0W_i^* + 0,001308W_0\theta_i - 0,0009602W_0t - 0,04082W_0W^* + 0,03172W_i^*\theta_i - 4,8769W_i^*W^* - 0,0002775\theta_i t - 0,003313tW^*.$$

Рівняння справедливі при товщині шару зерна $\delta=200$ мм, швидкості сушильного агента $v=0,4$ м/с. Область зміни факторів W_0 , W_i^* , θ_i , t та W^* обмежена нерівностями

$$18\% < W_0 < 36\%; \quad 0 < W_i^* < 0,8; \quad 45^\circ\text{C} < \theta_i < 65^\circ\text{C}; \quad 80^\circ\text{C} < t < 200^\circ\text{C}; \quad 0 < W^* < 1,0.$$

Одержані інтерполяційні формули є вигідною формою для розробки процедури оптимізації, оскільки така форма запису інваріантна відносно початкових умов і кінетичних параметрів. Розрахунки, проведені з використанням наведених рівнянь, показали задовільну збіжність з експериментальними даними.

Охолодження зерна в зерносушарці з відомими конструктивними характеристиками оцінюється двома показниками якості продукту — кінцевою температурою θ_k і вологістю u_k , які визначаються вхідними температурою θ_n і вологістю u_n зерна, температурою t , відносною вологістю φ та швидкістю v зовнішнього повітря, а також часом охолодження τ , тобто

$$\theta_k = f_1(u_n, \theta_n, t, v, \varphi, \tau), \quad u_k = f_2(u_n, \theta_n, t, v, \varphi, \tau).$$

Особливістю кінетики охолодження зерна в охолоджувальній зоні шахтної зерносушарки є велика кількість факторів, що впливають на неї, та незначна зміна вологості при охолодженні зерна. Тому кінетику сушіння та охолодження можна описати звичайними регресійними рівняннями, отриманими обробкою експериментальних даних, не удаючись до загальноприйнятих рівнянь кінетики сушіння. Кількісні зв'язки між u_k і θ_k зерна пшениці та змінними параметрами, що їх обумовлюють, були визначені на основі реалізації багатофакторного насиченого плану Рехтшафнера R_6 та обробки експериментальних даних за програмою PLAN

$$u_k = 0,5307 + 0,9828 u_n - 2,0952v - 0,008893\tau + 0,0001933t^2 + 2,4698v^2 + 0,0001188 \tau^2 - 0,000878 u_n\theta_n + 0,0001503 u_n\tau - 0,0003005 u_n\tau - 0,0003554 \theta_n\tau - 0,01727 \theta_n v + 0,003842 \theta_n \varphi - 0,0001786 \theta_n\tau + 0,0212 tv - 0,006865 t\varphi + 0,000222 t\tau + 0,006606 v\tau + 0,001067 \tau\varphi; \quad (8)$$

$$\theta_k = 6,8729 + 0,6470\theta_n + 0,3734t - 0,2593\tau - 28,7629v - 0,002394\tau^2 + 32,1051v^2 -$$

$$- 0,002486 \theta_n\tau - 0,004565 \theta_n\tau - 0,4293 \theta_nv + 0,0005427 \tau\tau + 0,4959tv + 0,1297tv.$$

Рівняння справедливі в такій області визначення факторів:

$$15\% < u_n < 18\%; \quad 35^\circ\text{C} < \theta_n < 55^\circ\text{C}; \quad 5^\circ\text{C} < t < 30^\circ\text{C};$$

$$10 \text{ хв} < \tau < 75 \text{ хв}; \quad 0,1 < \varphi < 0,7; \quad 0,2 \text{ м/с} < v < 0,5 \text{ м/с}.$$

Як видно із розглянутого варіанта зображення кінетики охолодження зерна на основі дослідних даних, для випадку навіть насиченого плану треба виконати порівняно велику кількість дослідів — 29. Тому більш доцільними є аналітичні методи опису кінетики охолодження зерна. Для цього використали згадане вище модифіковане рівняння (7), коефіцієнти якого визначаються виразами

$$A = 1/N_t,$$

$$B = 1/(\theta_n - t).$$

Максимальну швидкість охолодження N_t , що відповідає початковому моменту процесу охолодження ($\tau=0$), визначали за формулою

$$N_t = [L(c_b + c_n d) \theta_n + r + 1000c_n \theta_n N_w \rho + Q_{втр}] / (1000c_s V\rho).$$

Математичні моделі охолоджувальної зони шахтної зерносушарки з використанням наведених експериментальних та аналітичних залежностей, були реалізовані нами при визначенні режимів охолодження зерна (глава 5).

Використавши диференціальні рівняння, що описують кінетичні та динамічні закономірності процесу сушіння вологих сипких матеріалів в товстому шарі, спрощений механізм тепло- та масообміну в тонких ("елементарних") шарах, була складена система відомих алгебраїчних рівнянь, які відображують закони збереження енергії і речовини в процесі сушіння, а також розроблені алгоритми і програми SLOY для чисельного визначення тривалості процесу, полей вологості та температури матеріалу і сушильного агента як по висоті шару, так і в часі при різних способах сушіння: в товстому нерухомому шарі, зі зміною напрямку продувок, з перемішуванням матеріалу тощо.

Кондуктивне нагрівання матеріалу зустрічається в різних типах сушарок. При постійних теплофізичних характеристиках і відсутності внутрішніх джерел теплоти для математичного опису нестационарного процесу теплопровідності в дисперсних матеріалах застосовують ті ж відомі диференціальні рівняння теплопровідності Фур'є, що і для суцільного тіла. Тому, розв'язати задачу нестационарної теплопередачі у випадку, коли теплосміність стінки коробу має кінцеве значення, яке відрізняється від нуля, а температура стінки значно змінюється, можна на основі принципу суперпозиції, використовуючи відомі методи розв'язання елементарних задач.

Для розрахунку температури поверхні стінки коробу t_i в кінці кожного інтервалу часу τ_i та температури θ_i на різній відстані x від поверхні коробу в момент часу τ_i нами було одержано такі рекурентні вирази

$$t_i = \left\{ \alpha(2 \cdot t_{ac} - t_0 - t_1) \cdot \tau_i + (2\varepsilon / \sqrt{\pi})(2\theta_0 - t_0 - t_1) \sqrt{\tau_i} + 2c_F t_0 + \right.$$

$$+\sum(t_{j-2}-t_j)\left[\alpha/(\tau_i-\tau_{i-1})+(2\varepsilon/\sqrt{\pi})\sqrt{\tau_i-\tau_{j-1}}\right] / [2c_F + \alpha(\tau_i - \tau_{i-1}) + (2\varepsilon/\sqrt{\pi})\sqrt{\tau_i - \tau_{i-1}}]; \quad (10)$$

$$\Theta_i = \Theta_0 + \sum_{j=1}^i \Delta\Theta_j = \Theta_0 + \sum_{j=1}^i (t_j - t_{j-1})(1 - \Theta_j^*),$$

де i – номер інтервалу часу, на які поділено тривалість циклу τ_n ($m-1, \dots, n$); j – номер теплового джерела, яке діє на i -тому інтервалі часу ($j-2, \dots, i$); $\Delta\theta_j$ – додаткові прирощення температури зерна від джерел j .

Використовуючи методику розрахунку температури зерна, побудовану на принципах суперпозиції, складені нами рекурентні вирази (10), а також наведені раніше формули для розрахунку теплової активності зерна, склали алгоритм і програму, що реалізує математичну модель нестационарної теплопровідності. Це дозволило визначити температурні поля при кондуктивному нагріванні зерна пшениці і насіння навути в шахтних сушарках.

В главі 5 описано розроблені нами математичні моделі для визначення тривалості сушіння (часу перебування) зерна та кормових засобів в різних типах сушарок.

Задача визначення тривалості ступеневого сушіння за рівняннями кінетики з урахуванням конструктивних особливостей сушарок була сформульована так: при заданих температурних режимах сушіння визначити за відомим рівнянням кінетики сушіння $\tau=f(W)$ загальну тривалість сушіння τ_3 від початкової W_n до кінцевої W_k вологості, а також розподіл вологостей матеріалу W_i та часу сушіння τ_i в кожній із n зон сушарки з урахуванням конструктивно заданих співвідношень $\tau_1: \tau_2: \tau_i: \tau_{n-1}: \tau_n$.

Для розв'язання цієї задачі розроблено спеціальний алгоритм числового розрахунку та складена програма KINETIKA з підпрограмами TAUWC і WSTAU, перша з яких розв'язує пряму задачу розрахунку тривалості сушіння τ_i матеріалу в кожній із сушильних зон в залежності від його вологості на вході W_{i-1} та виході W_i сушильної зони, а друга — зворотню, тобто визначає вологість матеріалу на виході W_i сушильної зони при заданій тривалості сушіння τ_i в ній. Для забезпечення необхідної точності обчислень, скорочення кількості ітераційних перерахунків за трансцендентними та ірраціональними рівняннями кінетики і забезпечення швидкої збіжності обчислювальної процедури був застосований метод дихотомії.

Розрахунки за розробленими програмами кінетики сушіння проведені стосовно сушіння пророщеного ячменю на стрічковій сушарці типу СПК-90. Крім того, вказані програми були апробовані при розрахунках режимів сушіння шпинату і підтвердили добру збіжність розрахункових та виробничих даних.

Тривалість сушіння матеріалу від початкової w_1 до кінцевої w_2 вологості, що визначена згідно з закономірностями тепло-масообмінних процесів за рівнянням кінетики, повинна забезпечуватись відповідною кон-

струкцією сушарки, тобто повинна бути рівність (відповідність) часу, визначеного з урахуванням кінетики і часом фактичного перебування матеріалу в сушарці. Використовуючи дані про конструктивні розміри шахт, підвідних та відвідних коробів, їх кількість, а також ряд інших параметрів, стосовно шахтних зерносушарок були отримані вирази для визначення умовного середньоінтегрального часу перебування в них зерна τ :

$$\tau = \frac{V_m (\gamma_1 + \gamma_2)(100 - w_2)}{G_1(200 - w_1 - w_2)} = \frac{V_m (\gamma_1 + \gamma_2)(100 - w_2)}{G_2(200 - w_1 - w_2)} = \frac{V_m (\gamma_1 + \gamma_2)(w_1 - w_2)}{W(200 - w_1 - w_2)}, \quad (11)$$

де $\gamma_1, \gamma_2, G_1, G_2$ – відповідно об'ємна маса зерна та продуктивність на вході і виході сушарки (зони); W – продуктивність сушарки по випареній волозі; V_m – об'єм, що займає зерно в шахтах сушарки

$$V_m = zB \left[AH - a \left(\sum_{i=1}^k n_{mi} + \sum_{i=1}^k n_{bi} \right) (0.5h_1 + h_1 + 0.25a \operatorname{tg} \alpha) \right]$$

z – число шахт; A, B та H – габаритні розміри шахт; α – кут природнього нахилу зерна; n_{m1}, n_{b1} – кількість підвідних та відвідних коробів в шахті сушарки; h_1 – розмір короба; k – кількість зон в сушарці (для ДСП-32от $k=3$).

Використовуючи літературні дані, отримали емпіричний вираз для залежності $\gamma=f(w)$ при вологості зерна пшениці $w=10..35\%$, що був використаний при розрахунках τ :

$$\gamma = 990 - 22,2 w + 0,36 w^2, \text{ кг/м}^3; \quad s = 5,9 \text{ кг/м}^3. \quad (12)$$

Виходячи із конструктивних особливостей сушарок ДСП-32от, час перебування зерна в кожній сушильній (τ_1, τ_2) або охолоджувальній (τ_3) зонах у першому наближенні можна визначити із наступних відношень $\tau_1:\tau_2:\tau_3 = 1,8:1,0:2,8$. Більш точне значення часу перебування зерна в зонах сушарки можна визначити із системи рівнянь, складених з урахуванням конструктивних характеристик шахт і закономірностей зміни параметрів зерна (w, γ, α та ін.) в процесі сушіння.

На завершення була проведена чисельна оцінка впливу розглянутих факторів G, γ та α на величину τ , що дозволила дати ряд рекомендацій по експлуатації шахтних зерносушарок.

Стосовно стрічкових (конвейєрних) сушарок були отримані такі формули для визначення τ

$$\tau = 1/60vc = 60hbl\gamma/G = 60qbl/G = 120qbl/(G_1 + G_2), \quad (13)$$

де h, b, l – розміри шару продукту на стрічці; vc – швидкість стрічки; q – питома навантаження на стрічку; G_1, G_2, G – продуктивність сушарки по вологому і просушеному продукту та середня; γ – середня об'ємна маса продукту.

В реальних сушарках (наприклад, типу СПК, КСК) стрічки 1, 3 та 5 пов'язані загальним приводом з відповідним передаточним співвідношенням між ними. Стрічки 2 та 4 також конструктивно пов'язані між собою. Тому

v 014306

достатньо знати чи задати швидкість руху першої та другої стрічки, щоб визначити по них τ_1 і τ_2 , а потім, з урахуванням конструктивно заданих передаточних співвідношень, τ_i на інших стрічках сушарки та $\tau_{\text{заг}} = \sum \tau_i$.

Для визначення тривалості перебування матеріалу в барабанній сушарці також було отримано кілька виразів

$$\tau = \frac{V_6 \beta \gamma}{G} = \frac{2V_6 \cdot \beta \cdot \gamma (w_0 - w_k)}{W[200 - (w_0 + w_k)]} = \frac{2 \cdot \beta \cdot \gamma (w_0 - w_k)}{A[200 - (w_0 + w_k)]}, \text{ г}$$

де V_6 – об'єм барабану, м^3 ; β – коефіцієнти заповнення барабану матеріалом; G – усереднена продуктивність сушарки, кг/г ; W – продуктивність сушарки по випару вологи, кг/г ; γ – усереднена об'ємна маса матеріалу, кг/м^3 ; A – вологонапряга барабану по волозі, $\text{кг/(\text{м}^3 \cdot \text{г})}$.

В пневмобарабаних сушарках, на відміну від барабаних, сушильний барабан встановлено горизонтально. Тому частинки матеріалу по довжині барабану преміщуються виключно під дією швидкісного напору сушильного агента та обертання барабана. Для визначення тривалості сушіння, яка залежить від властивостей матеріалу (швидкості зваження v_3), режимних (частоти обертання барабана ω та швидкості сушильного агента $v_{\text{са}}$) і конструктивних (довжини барабана L , висоти падіння h та кута відлежування Θ_B) параметрів, нами модифіковано рівняння В.Ю. Валушиса, яке набуло такого вигляду

$$\tau = \frac{L(K\tau_n + \Theta_B/W)}{v_{\text{са}}K\tau_n + \frac{v_3^2}{g} \ln \left[\frac{K\tau_n v_{\text{са}} g}{v_3} + 1 \right]}, \quad (14)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; τ_n – час падіння частин із лопатів барабана, с ; K – поправочний коефіцієнт, що враховує зміну величини τ_n в залежності від h і v_B .

Емпіричне рівняння для поправочного коефіцієнта K в діапазонах змінення $h=0...3,2$ м та $v_3=1,85...7,5$ м/с було одержане нами на основі графічних залежностей В.Ю. Валушиса

$$K = 1,1118 + 0,2677h - 0,0180v_3 - 0,0355hv_3, \quad (15)$$

Оскільки v_3 змінюється в залежності від вологості матеріалу w в розрахунках потрібно приймати усереднене (середньозважене) значення v_3 .

Використовуючи наведений математичний опис, склали алгоритм і програму TAUPNEV для розрахунку τ . Отримані результати розрахунків задовільно погоджуються з експериментальними даними В.Ю. Валушиса.

На багатьох підприємствах при одинарних або спарених сушарках типу ДСП-32от з рециркуляційним способом сушіння встановлені конвективні теплообмінники каскадного типу (наприклад, комплекту обладнання УІ-УКЗ-50), що використовуються для попереднього нагрівання зерна або його регульованого охолодження. Внаслідок короткочасності проходження тепломасообмінних процесів (біля 8...15 с), експериментальне визначення

часу обробки зерна в таких теплообмінниках утруднене. Грунтуючись на відомих законах фізики (закони кінематики для вільного падіння тіл і руху тіла, кинутого горизонтально, закони динаміки, що описують рух тіл по нахилених площинах) для кожної з виділених 7 характерних ділянок були складені рівняння руху зернового потоку, які дозволили визначити час перебування зерна в теплообміннику в залежності від його конструктивних особливостей, культури і початкових параметрів зерна та сушильного агента. Основні вирази отриманої системи рівнянь такі:

$$\tau = K_v \sqrt{2gh/g}; \quad K_v = (v_3 - v_{\text{са}})v_3;$$

$$\tau = \frac{2l \cos \phi}{\sqrt{g \sin(\alpha - \phi)}}; \quad \tau = \frac{2l \cos \phi}{\sqrt{g \sin(\beta - \phi)}};$$

$$\beta = \alpha + \delta; \quad \delta = \arcsin \{G/(2 \cdot 3600 b l \gamma (v_k - v_n))\};$$

де τ – час руху зерна на різних ділянках теплообмінника; K_v – коефіцієнт аеродинамічного гальмування; g – прискорення вільного падіння; h – висота падіння, м ; v_3 , $v_{\text{са}}$ – відповідно зважена швидкість зерна та сушильного агента; l – довжина похилих площин гальмівних елементів ґратчастих полиць; α – кут нахилу площини до горизонту; β – кут динамічно утвореної поверхні шару зерна; ϕ – найменший кут, при якому шар зерна рівномірно рухається по похилій площині; δ – приріст кута динамічно утвореної поверхні шару зерна відносно кута нахилу полиці; G – продуктивність теплообмінника; b – ширина розгінної поверхні; γ – об'ємна маса зерна; v_n , $v_{\text{взк}}$ – початкова та кінцева швидкості руху зерна.

При рециркуляційному способі сушіння проходить безперервне змішування потоку зерна G_0 , який надходить в сушарку, з частиною уже просушеного G_p в ній. Це практично виключає можливість експериментального визначення тривалості знаходження зернової маси і окремих зернин в рециркуляційному контурі. В зв'язку з цим, середня тривалість обробки (сушіння) зерна в рециркуляційних контурах сушарок була визначена нами аналітично. Так, тривалість перебування окремих зернин в i -тому контурі рециркуляційної сушарки, що пройшли j разів через головну гілку (камеру нагрівання, сушильну шахту тощо), складає

$$\tau_{ij} = j\tau_{i1} + (j-1)\tau_{pi},$$

де i – номер рециркуляційного контура ($1 < i < k$); k – число контурів в сушильному агрегаті; j – число проходів зернин через головну гілку i -го рециркуляційного контура ($j = 1, 2, 3, \dots, \infty$); τ_{i1} та τ_{pi} – тривалість перебування зерна в головній та рециркуляційній гілках i -го контуру.

Виходячи з означення математичного сподівання, середня тривалість обробки продукту в i -тому контурі дорівнює:

$$\bar{\tau}_i = \sum_{j=1}^{\infty} \tau_{ij} P_{ij} = \sum_{j=1}^{\infty} [j\tau_{i1} + (j-1)\tau_{pi}] (N_i - 1)^{j-1} / N_i^j = N_i \tau_{i1} + (N_i - 1) \tau_{pi},$$

де P_{ij} – ймовірність знаходження в вихідному потоці зернин, що пройшли i -тій контур j разів

$$P_{ij} = (N_i - 1)^{j-1} / N_i^j;$$

N_i – коефіцієнт рециркуляції в i -тому контурі, який уявляє собою відношення потоку суміші зерна G_{cmi} до вхідного потоку G_i

$$N_i = G_{cmi} / G_{i-1} = (G_{i-1} + G_p) / G_{i-1}. \quad (16)$$

Загальне значення середньої тривалості обробки дисперсного матеріалу в агрегаті з k послідовними контурами буде

$$\bar{\tau} = \sum_{i=1}^k \bar{\tau}_i = \sum_{i=1}^k [N_i \tau_{pi} + (N_i - 1) \tau_{pi}] = N \tau_r + (N - 1) \tau_p$$

Практично визначення N_i в рециркуляційних контурах за формулою (16) важке із-за складності безпосереднього вимірювання витрат зерна в головних і рециркуляційних гілках існуючих зерносушильних агрегатів. Тому, для обчислення коефіцієнтів рециркуляції можна використати інші співвідношення, наприклад, засновані на результатах вимірювання вологості чи температури зерна

$$N_i = (W_{i-1} - W_0) / (W_{cmi} - W_i) = (\theta_i - \theta_{i-1}) / (\theta_i - \theta_{cmi}),$$

де W_{i-1} та θ_{i-1} – вологість та температура зерна на вході в i -тій контур; W_{cmi} та θ_{cmi} – вологість та температура зерна в головній гільці i -того контуру (до обробки в контурі); W_i та θ_i – вологість та температура зерна на виході з i -того контура.

Тоді взаємозв'язок між вологістю зерна, його температурою і тривалістю обробки в i -тому контурі буде визначатись співвідношеннями

$$\tau_{cp} = (\delta_w \tau_{pi} + \Delta_w \tau_{pi}) / (\Delta_w + \delta_w) = (\delta_\tau \tau_{pi} + \Delta_\tau \tau_{pi}) / (\delta_\tau + \Delta_\tau),$$

де $\delta_w = W_{i-1} - W_i$; $\Delta_w = W_{i-1} - W_{cmi}$; $\delta_\tau = \theta_i - \theta_{i-1}$; $\Delta_\tau = \theta_{cmi} - \theta_{i-1}$.

Одержані аналітичні вирази дозволяють визначити тривалість сушіння окремих зернин і зернової маси при рециркуляції.

В главі 6 викладено результати аналізу і синтезу оптимальних режимів сушіння та конструктивних елементів сушарок.

Для визначення інтенсивних режимів сушіння матеріалів в будь-якій багатозонній прямоточній або рециркуляційній сушарці та проведення її техніко-економічної оцінки за різними критеріями оптимальності нами розроблений узагальнений алгоритм, в основу якого покладено: система балансових рівнянь теплоти та вологи, доповнених рівняннями кінетики сушіння; початкові та граничні умови сушіння при температурі матеріалу, близької до гранично-припустимої; принципи інваріантності відносно початкових і граничних умов, кількості зон, структури та гідродинаміки рециркуляційних потоків. Суть розрахунку режимів сушіння полягає в тому, що шляхом розв'язання системи кінетичних та балансових рівнянь, доповненими в випадку рециркуляційного сушіння балансовими рівняннями

змішування по теплоті та волозі, знаходять розподіл температур сушильного агента по зонах сушильного агрегату з урахуванням заданих граничних умов. Числові рішення системи рівнянь побудовано на ітераційних принципах, які дозволили на кожному етапі забезпечити необхідну точність розрахунків.

Використовуючи відомі співвідношення матеріального і теплового балансів процесу сушіння та охолодження, отримані нами математичні описи стану повітря (JD-FUNK) та розрахунку тривалості сушіння, складена універсальна статична теплова модель зони сушарки для визначення в ній параметрів матеріалу, сушильного агента та повітря, а також її техніко-економічних показників. Розрахунки, що проведені за запропонованою моделлю та програмою ZONA стосовно існуючих типів зерносушарок, адекватно відображають процес сушіння і задовільно співпадають з літературними даними та технічними характеристиками зерносушарок.

Для визначення параметрів зерна при його обробці в каскадних теплообмінниках складена математична модель та програма KASKAD, яка включає рівняння кінетики тепловологообміну в розпушеному шарі зерна, що каскадно рухається, та системи рівнянь для визначення тривалості його обробки.

Математичні моделі для розрахунку процесу охолодження зерна в шахтних зерносушарках складено на основі рівнянь кінетики, що отримані експериментально та аналітично (глава 4), з урахуванням рівнянь матеріального і теплового балансів та конструктивних параметрів охолоджувальних зон сушарок. Для обчислення параметрів стану повітря (d_{ca} , J_p , J_k , r_n , φ_k) була використана підпрограма JD-FUNK, а для визначення часу знаходження зерна τ в охолоджувальній зоні сушарки – наведені раніше рівняння. Оскільки в такій системі відсутні формальні зв'язки між параметрами зерна, повітря і конструктивними параметрами охолоджувальних зон сушарок, то розв'язання системи рівнянь з декількома невідомими було одержано методом послідовних наближень. Розроблені моделі реалізують розв'язання як прямої, так і зворотньої задачі. Програми розрахунку режимів охолодження ZONA-O-A і ZONA-O-E можуть бути використані при спільних розрахунках сушарних і охолоджувальних зон шахтних зерносушарок. Проведені за вказаними моделями охолоджувальних зон обчислення показали, що максимальна відносна розбіжність розрахованих та експериментальних значень параметрів складає 6 % по температурі зерна та 2 % по вологості зерна. Це вказує на цілком задовільну надійність даних, одержаних за розробленими моделями.

Складено також математичну модель для визначення режимів охолодження навути в охолоджувальній колонці після його вологотеплової обробки (ВТО). За початкові дані взяли параметри навути, зовнішнього повітря та параметри, що характеризують конструкцію охолоджувальної колонки Б6-ДГВ-III. Розрахунок проведено на ЕОМ з використанням відомих ба-

лансових співвідношень, що складені за вихідними даними. Теплофізичні характеристики навути на вході та виході із охолоджувача в залежності від W і θ визначали за отриманими нами формулами (2). Із рівняння теплового балансу після певних перетворень було отримано вираз для визначення температури відпрацьованого повітря

$$t_2 = \{1000[G_2 c_2 (\theta_1 - \theta_2) + \Delta W (c_a \theta_1 - q_{втр})] + L(J_1 - 2,5d_2)\} / L(c_a + 0,001842d_2), \text{ } ^\circ\text{C}$$

при різних вихідних параметрах зовнішнього повітря — температури $t_0 = 5...20 \text{ } ^\circ\text{C}$ та його відносної вологості $\phi_0 = 60...90 \%$. Одержані результати показали, що для всіх розглянутих значень параметрів зовнішнього повітря забезпечується охолодження навути до нормованих величин ($\theta_2 = t_0 + 5...10 \text{ } ^\circ\text{C}$), а температура відпрацьованого в колонці повітря знаходиться в рекомендованих межах, тобто $t_p < t_2 < \theta_{ср}$ (де t_p — температура точки роси, $^\circ\text{C}$; $\theta_{ср}$ — середня температура навути в охолоджувачі, $^\circ\text{C}$). При цьому продуктивність колонки по охолодженню навути складас $G_2 = 2,97 \text{ т/год}$, тривалість охолодження $\tau = 27,2 \text{ хв.}$, а питомі витрати зовнішнього повітря $v_1 = 5000 \text{ кг повітря на 1 кг навути.}$

В зв'язку з тим, що в усьому діапазоні зміни параметрів зовнішнього повітря не в повній мірі використовується вологопоглинна здібність повітря, нами була визначена продуктивність вентилятора колонки Б6-ДГВ, що необхідна для забезпечення нормативних та рекомендованих показників зерна і відпрацьованого повітря після охолодження, яка склала $450...500 \text{ м}^3/\text{год}$ зовнішнього повітря.

Використовуючи узагальнений алгоритм розрахунку режимів сушіння зерна в багатозонних сушарках і статичну теплову модель зони сушарки, розроблено математичні моделі для визначення техніко-економічних показників шахтних зерносушарок при сушінні зерна як в прямої (SHACHTA), так і з його рециркуляцією (SHCH-RZ), а також з рециркуляцією сушального агента (SHCH-RZ). Отримані моделі дозволяють вибрати економічно доцільні режими сушіння зерна, що забезпечують високу інтенсивність процесу при збереженні якості зерна.

Проведені за математичною моделлю шахтної прямої зерносушарки розрахунки показали, що для зниження питомих витрат палива, підвищення термічного к.п.д. сушарки та поліпшення других техніко-економічних показників її роботи необхідно в залежності від початкових параметрів зерна відрегулювати до необхідних значень подачу сушального агента в сушальних зонах.

Дослідження математичної моделі шахтної рециркуляційної зерносушарки показало, що при сушінні зерна з його рециркуляцією підвищується продуктивність сушарки, поліпшується ступінь використання сушального агента. Однак, як і для прямої сушарки, існують резерви підвищення термічного к.п.д. та зниження питомих витрат палива шляхом регулювання витрат сушального агента в сушальних зонах.

Комп'ютерне моделювання сушіння зерна в шахтних зерносушарках з різними варіантами рециркуляції відпрацьованих сушального агента і повітря показало, що повне повернення в топку відпрацьованого в зоні охолодження зерна зовнішнього повітря, а також повне або часткове (в залежності від початкових параметрів зерна) повернення відпрацьованого у другій зоні сушального агента підвищує термічний к.п.д. сушарки при одночасному зниженні питомих витрат палива на сушіння. Це підтверджує доцільність переведення зерносушарок на спосіб сушіння з рециркуляцією відпрацьованих сушального агента та повітря.

Грунтуючись на запропонованому узагальненому алгоритмі розрахунку режимів сушіння, отриманих рівняннях кінетики багатоступінчатого сушіння і нагрівання зерна нами стосовно зерносушарок типу ДСП розроблено спрощену методику, алгоритм та програму SHCH-KIN для визначення температури сушального агента та тривалості сушіння в окремих зонах, що задовольняють в комплексі заданим умовам по досягненню вологості і нагрівання зерна в сушарках.

Використовуючи математичний опис кінетики багатоступеневого сушіння з урахуванням конструктивних особливостей сушарок, підпрограми для обчислення параметрів стану повітря і для розрахунку тривалості сушіння з урахуванням конструктивних співвідношень між швидкостями окремих стрічок, а також ряд других отриманих нами співвідношень, складено математичну модель стрічкової сушарки (LENTA), що дозволила виконати проектні розрахунки режимів сушіння, витрати сушального агента, теплоти та необхідних для цього параметрів калориферів і вентиляторів. Отримані режими сушіння пророщеного ячменю і листових овочів були підтверджені в промислових умовах.

На основі розроблених нами математичних моделей і програм барабанних та пневмобарабанних сушарок (BARABAN) було проведено на ЕВМ чисельне дослідження і визначені режими сушіння нетрадиційних кормових засобів (відходів) в сушарках вказаного типу с урахуванням даних, отриманих при вивченні їх фізико-технологічних властивостей та теплофізичних характеристик. Встановлено, що при вологості відходів в межах $70...75 \%$ число обертів барабану сушарки повинно дорівнювати $5...6 \text{ хв.}^{-1}$, а при вологості $35...38 \%$ — $4...5 \text{ хв.}^{-1}$. Температура сушального агента при цих режимах буде знаходитись в межах $295...337 \text{ } ^\circ\text{C}$, а питомі витрати теплоти складуть $4510...3657 \text{ кДж/кг}$ відповідно. Зі зменшенням початкової вологості відходів питомі витрати теплоти на їх сушіння збільшуються, що викликано більш міцним зв'язком вологи у сухих віходах.

Алгоритм синтезу оптимальних за різними критеріями ступеневих режимів сушіння розроблено на основі запропонованого нами методу опису кінетики багатоступеневого сушіння та принципів динамічного програмування. Суть розробленого алгоритму полягає в тому, що процес сушіння поділяють на ряд N окремих зон і, використавши описані в главі 4 матема-

тичні моделі кінетики сушіння $W=f(W_0, \theta, t, \tau, \dots)$, в кожній з них визначають скалярні величини $q_{sk}(j)=f(t, \tau)$, які виражають витрати теплоти на сушіння матеріалу при різних значеннях керуючих параметрів (температури t та ін.), вологості W і температури θ матеріалу на вході в зону та на виході з неї. Загальні витрати теплоти Q усього процесу сушіння визначають як адитивну функцію витрат $Q=\sum q_{i,s}(j)$. У відповідності з принципом оптимальності, що покладений в основу динамічного програмування, для j -тої зони справедливе рекурентне співвідношення

$$q_{o,s}^{opt}(j) = \min [q_{i,s}(j) + q_{o,s}^{opt}(l)] \quad (j=1, 2, \dots, N),$$

яке дозволяє визначити оптимальні значення на кожному етапі $q_{o,s}^{opt}(j)$, $t(j)$ та точки (s,k) , що відповідають оптимальному веденню процесу сушіння від початкового W_0 до кінцевого W_k стану з урахуванням різних обмежень (на якість матеріалу θ , на область зміни режимних параметрів та ін.), тобто отриманню просушеного продукту з заданими показниками якості при мінімальних витратах теплоти Q . Замість витрат теплоти можуть бути використані будь-які інші критерії оцінки процесу сушіння.

В главі 7 викладено перспективні напрямки удосконалення сушіння зерна та кормових засобів. Перша частина її містить рекомендації по удосконаленню сушіння зерна.

В результаті аналізу побудованих за експериментальними даними статичних характеристик контура попереднього нагрівання і рециркуляції зерна з каскадними нагрівачами, обладнаними лопатевими (шлюзовими) та безприводними живильниками, було встановлено, що в основному діапазоні зміни параметрів $35^\circ\text{C} < \theta_k < 65^\circ\text{C}$, $10^\circ\text{C} < \theta_{cm} < 30^\circ\text{C}$, $140^\circ\text{C} < t < 200^\circ\text{C}$, $14\% < W_0 < 28\%$ живильники лопатевого типу менш чутливі до змін витрат та температури початкового зерна, а їх статичні характеристики $\theta_k = f(W_0)$, $\theta_k = f(\theta_{cm})$ та $\theta_k = f(t)$ мають лінійний вигляд. Це забезпечує більш сталу роботу всього рециркуляційного агрегату, полегшує аналіз динамічних властивостей процесу та синтез автоматичної системи управління процесом.

Для забезпечення сталості температурних режимів в кожній із паралельних гілок тепловентиляційної мережі реконструйованих зерносушарок необхідно забезпечити постійність аеродинамічного опору нагрівача регульованим витрат сирого і рециркулюючого потоків зерна з застосуванням для цієї мети засобів саморегулювання або автоматики; використовувати для регулювання температури сушильного агента (шляхом підсмоктування атмосферного повітря) гілки з найменшими витратами сушильного агента; застосовувати в патрубках для підсмоктування атмосферного повітря та газоходах від топки спарені дросельні заслінки; застосовувати автоматичне регулювання температури сушильного агента в кожній гілці з урахуванням їх динамічних властивостей; реконструювати топку з установкою в камері змішування перегородок, що зменшують об'єм газоходів тепловентиляційної мережі. Рекомендовано також зміну схеми

руху сирого та рециркуляційного зерна з організацією в відключеному від топки нагрівачі інтенсивного регульованого охолодження зерна в розпушеному шарі.

Для аналізу рівномірності обробки сипучих матеріалів в рециркуляційних сушарках на основі ймовірнісного підходу з урахуванням потокового графу функціональних зв'язків елементів сушарки, було складено математичний опис процесів змішування і розподілу рециркуляційних потоків в умовах нагрівання та сушіння. Отримані вирази для визначення в багатоконтурних агрегатах ймовірності знаходження в вихідному потоці i -го контура зернин з середнім часом обробки τ_{cp} , а також загальної ймовірності знаходження в вихідному потоці зернин з τ_{cp}

$$P_i = (N_i - 1)^{N_i - 1} / N_i^{N_i}; \quad P = \prod_{i=1}^k [(N_i - 1)^{N_i - 1} / N_i^{N_i}] \quad \text{при } j=N.$$

Для випадку $N=k \cdot N_i$ останній вираз набуває вигляду

$$P = C_{N-1}^{k-1} \prod_{i=1}^k [(N_i - 1)^{N_i - 1} / N_i^{N_i}] = \frac{(N-1)!}{(k-1)! (N-1)!} \left[\frac{(N-1)^{N-1}}{N^N} \right]^k$$

Нерівномірність обробки матеріалу в рециркуляційному контурі оцінювали коефіцієнтом варіації, який являє собою відношення стандартного відхилення до математичного сподівання середньої тривалості обробки матеріалу в агрегаті

$$V = \sqrt{\sum (\tau_i - \tau_{cp})^2 / P_i} = \sqrt{(N-1) / N}$$

Як показує аналіз цього виразу, найбільше зростання коефіцієнта варіації V відбувається при збільшенні коефіцієнта рециркуляції N з 1 до 4. Подальше збільшення N незначно підвищує коефіцієнт варіації.

Таким чином, властиву зерносушаркам з рециркуляцією зерна нерівномірність сушіння та нагрівання окремих зернин, спричинену різним часом знаходження їх в головній гілці агрегату, можна зменшити шляхом подрібнення контура рециркуляції зерна на ряд проміжних контурів.

Аналіз схеми продування зерна у шахтних зерносушарках при рядовому і діагональному розшташуванні коробів дозволив обґрунтувати для періодичних випускних механізмів величину порцій зерна, що випускаються із сушарки та при яких забезпечується найбільш раціональне продування зерна з рівномірним чергуванням періодів інтенсивного питомого енергопідведення з періодами відлежування, що сприятливо впливає на умови сушіння зерна та його якість.

Для реалізації описаного вище багатоконтурного сушіння зерна з елементами саморегулювання рівня зерна в усіх бункерах апарата, з можливістю регулювання ступеню охолодження просушеного зерна, нами запропоновано спосіб теплового сушіння і технологічна схема рециркуляційної зерносушарки (а.с. 1128070, 1241044), яка має два сушарних рециркуляційних

контура з щільним шаром та один охолоджувальний рециркуляційний контур з розпушеним шаром. Вказаний спосіб сушіння зерна усуває загальний недолік багатьох рециркуляційних зерносушарок з камерами нагрівання зерна, в яких на стадії попереднього нагрівання зерна відокремлюються важкосипкі легковагі відходи та шупле зерно підвищеної вологості, котрі придатні для кормових потреб, але вимагають сушіння в спеціальних сушарках.

Виробнича перевірка реконструйованих зерносушарок показала, що поряд з підвищенням їх продуктивності, зниженням питомих енерговитрат, підвищується якість просушеного зерна завдяки більш рівномірній обробці. Річна економія від реконструкції сушарок складала 856,8...5465,0 крб. на рік (в цінах до 1992 р.).

Для утилізації теплоти відпрацьованих сушильного агента та повітря нами запропонована та захищена а.с. 1210029 схема їх руху в рециркуляційній зерносушарці з камерою нагрівання (наприклад, типу РД-2х25). При цьому питомі витрати палива знижуються на 16...21 % (в залежності від температури зовнішнього повітря), продуктивність сушарки зростає на 35...38 %, спрощується її управління та обслуговування, зумовлене простою конструкції і зниженням числа контрольованих параметрів.

При визначенні ефективності роботи сушильних установок, розрахунках оптимальних режимів сушіння, виборі оптимальних конструктивних рішень необхідно враховувати комплекс техніко-економічних показників (критеріїв оптимальності): продуктивність зерносушарок, прямі витрати на сушіння, питомі витрати палива та електроенергії і ін. Стосовно діючих сушарок узагальнений критерій ефективності E

$$E = \prod_{i=1}^n e_i^{S_i} = e_r \cdot e_g^{0.58} \cdot e_q^{0.41} \cdot e_c^{0.67}$$

де e_i – комплексний груповий або одиничний показник; S_i – коефіцієнт вагомості; i – номер показника; n – кількість показників; e_g , e_r , e_q , e_c – показники, що характеризують відповідно кількісні результати функціонування, рівень використання ресурсів, збереження якості зерна при сушінні та рівень контролю і управління процесом сушіння.

Оцінка значущості показників (коефіцієнтів вагомості S_i), що введені в узагальнений критерій ефективності, одержана за звітними даними хлібоприймальних підприємств Одеської області методом регресійних залежностей для середньозважених геометричних показників.

В другій частині цієї ж глави наведено принципи технологічні схеми лінії сушіння нетрадиційних кормових засобів з барабанною та пневмобарабанною сушарками. Перша схема краща при сушінні невеликих партій високовологих, схилих до налипання відходів (плоди шипшини тощо), а друга — для великих партій сипких відходів. У виробничих умовах на промислового агрегаті АВМ-1,5 були просушені дослідні партії КШ та ФО, а потім проведена їх зоотехнічна оцінка як кормового засобу. Розрахунок

економічної ефективності показав, що сума річного народногосподарського економічного ефекту при використанні в комбікормах просушеного КШ складала 662,2 тис. крб., а для ФО — 350,9 млн. крб. (в цінах 1990 р.)

Розроблені режими сушіння ШЛР ввійшли складовою частиною в технологічний регламент виробництва комбікормів та кормових концентрованих добавок. В результаті виробничих випробувань згідно з технологічним регламентом на промислового агрегаті АВМ-1,5 було просушено шрот шипшини, визначено його хімічний склад і ряд показників поживності, а також проведено зоотехнічні випробування комбікормів, що вироблені з сухими ШЛР. Сума річного економічного ефекту тільки від використання сухих ШЛР Одеського хімфармоб'єднання (близько 300 т на рік) складала 25694 тис. крб. (в цінах 1992 р.). На заключному етапі дослідження були вивчені гігроскопічні властивості кормових добавок та комбікормів зі ШЛР, на основі яких визначені режими їх зберігання.

Висновки.

1. Теоретично обґрунтовано та запропоновано нові методи інтенсифікації сушіння зерна і кормових засобів та методики визначення режимів та конструктивних параметрів сушарок, що засновані на нових та вдосконалених кінетичних закономірностях.

2. Визначено фізичні властивості та теплофізичні характеристики зерна деяких бобових культур та нових кормових засобів, які є високовологими відходами АПК. Отримано емпіричні вирази для визначення цих характеристик в залежності від вологості та температури відходів.

3. Складено нові форми опису закономірностей кінетики нагрівання, сушіння і охолодження зерна та кормових засобів, а також встановлені їх кількісні характеристики для різних форм сушильних шарів в умовах прямого та рециркуляційного сушіння.

4. Складено узагальнену структуру формалізованих технологічних схем зерносушильних агрегатів та досліджено найбільш важливі її елементи (функціональні підсистеми), удосконалення яких дає найбільший ефект.

5. Розроблено методики, алгоритми та синтезовані багатоступеневі режими прямого та рециркуляційного сушіння зерна.

6. Розроблено методику та складено алгоритм розрахунку оптимальної стратегії керування багатостадійним процесом сушіння, який заснований на принципах динамічного програмування та дозволяє здійснити послідовне перебирання обмеженого числа варіантів при дискретній зміні параметрів процесу та характеристик висушеного матеріалу за різними функціоналами оптимальності.

7. Розроблено систему ММ процесу сушіння зерна, що охоплює різноманітні варіанти технологічних схем прямого та рециркуляційного сушіння. Адекватність ММ реальному процесу перевірено в виробничих умовах. Система ММ реалізована в пакетах прикладних програм на мові

програмування Turbo Pascal для персональних ЕОМ та може служити основою для створення САПР.

8. За допомогою цих систем ММ, що зв'язують режимні параметри та техніко-економічні показники сушарок, встановлено шляхи зниження різних видів витрат на сушіння зерна та кормових засобів.

Основний зміст дисертації опубліковано в 64 роботах, головними з яких є такі:

1. Математическое моделирование процессов пищевых производств: Сб. задач / Н.В. Остапчук, В.Д. Каминский, Г.Н. Станкевич, В.П. Чучуй / Под ред. Н.В. Остапчука — К.: Вища шк., 1992. — 175 с.

2. Станкевич Г. Оптимальний режим сушіння відходів // Харчова і переробна промисловість. — 1992. — № 8. — С. 26.

3. Станкевич Г. Узагальнений алгоритм розрахунку режимів сушіння зерна // Харчова і переробна промисловість. — 1995. — № 5. — С. 12–13.

4. Станкевич Г.М. Алгоритм ідентифікації параметрів рівнянь кінетики сушіння // Наук. пр. Одеської держ. акад. харчових технологій. — Одеса. — 1996. — Вип. 16. — С. 263–268.

5. Станкевич Г.М. Порівняльна характеристика факторів, що визначають кінетику сушіння зерна в щільному шарі // Наук. пр. Одеської держ. акад. харчових технологій. — Одеса. — 1996. — Вип. 17. — С. 325–328.

6. Станкевич Г.М. Вдосконалення зерносушарок // Проблеми та перспективи розвитку та споживання хлібопродуктів: Наук. праці. — Одеса: ОДАХТ. — 1997. — С. 11–13.

7. Станкевич Г. Багатоконтурне сушіння збіжжя. // Зерно і хліб. — 1997. — №4. — С. 28.

8. Алейников В.И., Станкевич Г.Н. Расчет температуры теплоносителя при сушке зерна кукурузы с предварительным подогревом. // Сб. "Хранение и переработка зерна", серия "Элеваторная промышленность". — М., ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1981, вып. 4, с. 7–10.

9. Особенности планирования экспериментов для получения описания кинетики нагрева и сушки термолabileльных продуктов. / Г.Н.Станкевич, Н.В.Остапчук, В.А.Одинок, П.Д.Федунец // Технология и оборудование пищевой промышленности и пищевое машиностроение. — Краснодар: политехн. ин-т. — 1986. — С.115–120.

10. Остапчук Н.В., Станкевич Г.Н., Чучуй В.П. Методические основы изучения методов математического моделирования на ЭВМ // Опыт применения ТСО и ЭВМ в активизации учебного процесса вузов: Методические рекомендации для преподавателей вузов / Под ред. А.В. Васильева. — К.: УМК ВО, 1991. — С. 65–69.

11. Исследование теплофизических свойств муки томатной кормовой /Соловых С.И., Станкевич Г.Н., Макаров А.П., Кочетова А.А. // Совершенствование и повышение эффективности использования средств механизации в сельскохозяйственном производстве юга Украины: Сб. научных трудов. — Одесса: Одесский СХИ. — 1990. — С. 43–49.

12. Остапчук Н.В., Станкевич Г.Н. Обобщенная структура системы управления сушильными процессами // Вопросы повышения эффективности систем управления технологическими процессами. — Ереван: АРМТЕГ — 1991. — С. 33–36.

13. Шроти лікарських рослин, як сировина для комбікормової промисловості і їх фізико-технологічні властивості / А.О.Кочетова, М.М.Мадані, Г.М.Станкевич, Л.Д.Дмитренко // Наук. пр. Одеської держ. акад. харчових технологій. — Одеса. — 1996. — Вип. 16. — С. 9–15.

14. Дослідження кінетики сушіння науту / Г.М.Станкевич, Альхоган Адель, Л.К.Овсянникова, О.Л.Станевський // Наук. пр. Одеської держ. акад. харчових технологій. — Одеса. — 1996. — Вип. 16. — С. 258–263.

15. Остапчук Н.В., Шашкин А.Б., Станкевич Г.Н. Устойчивость температурных режимов. // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность. — 1985. — № 6. — С. 27.

16. Отходы пищевой промышленности /А.Левицкий, А.Кочетова, Г.Станкевич, Л.Дмитренко, И.Магистрова, И.Мариненкова, С.Носкачева, Л.Звягинцева //Комбикормовая промышленность. — 1991. — № 6. — С.25–27.

17. Фильтрационный осадок — компонент комбикорма / А.П. Левицкий, А.А. Кочетова, Г.Н. Станкевич, В.М. Турчинская, Л.Д. Дмитренко, И.Б. Магистрова, С.Ю. Носкачева // Сахарная промышленность. — 1992. — № 2. — С. 23–24.

18. Після спеціальної обробки /значно зростає поживна цінність зернобобових /О.Левицький, А.Кочетова, Г.Станкевич, Л.Дмитренко, А.Дьяконова, В.Семенюк //Харчова і переробна промисловість.— 1993. —№ 6. — С. 29.

19. Исследование кинетики многоступенчатого процесса сушки шпината /Л.Н.Пилипенко, Г.Н.Станкевич, М.А.Гришин, Л.Д.Зеленская //Известия вузов. Пищевая технология. — 1993. — № 3-4. С. 72–74.

20. Шроти з лікарської сировини /О.Левицький, В.Шерстобитов, А.Кочетова, Г.Станкевич, Л.Дмитренко, М.Ратушна // Харчова і переробна промисловість. — 1995. — № 2. — С. 26.

21. Шаповаленко О.І., Станкевич Г.М., Страхова Т.В. Особливості нової інструкції по сушінню зерна // Проблеми та перспективи розвитку та споживання хлібопродуктів: Наук. пр. — Одеса: ОДАХТ. — 1997. — С. 9–10.

22. А.с. 1128070 СССР, МКИ F 26 В 3/06. Способ тепловой обработки зерна в рециркуляционном режиме / В.И. Жидко, Н.В. Остапчук, Г.Н.

Станкевич, А.Б. Шашкин, И.А. Богомолов, В.Д. Каминский (СССР). – Заявка № 3636277/24-06; Заявл. 21.09.83; Опубл. 07.12.84. Бюл. № 45.

23. А.с. 1210029 СССР, МКИ F 26 В 17/12. Рециркуляционная сушилка / Н.В. Остапчук, В.И. Жидко, А.Б. Шашкин, Г.Н. Станкевич, В.Д. Каминский (СССР). – Заявка № 3800266/24-06; Заявл. 11.10.84; Опубл. 07.02.86. Бюл. № 5.

24. А.с. 1241044 СССР, МКИ F 26 В 17/12. Способ обеспечения постоянного расхода сыпучего материала через аппарат в процессе обработки / Н.В. Остапчук, В.И. Жидко, Г.Н. Станкевич, А.Б. Шашкин, В.Д. Каминский (СССР). – Заявка № 371066/24-06; Заявл. 15.05.84; Опубл. 30.06.86. Бюл. № 24.

25. А.с. 1354107 СССР, МКИ G 01 N 33/10. Способ оценки питательной ценности зерна бобовых культур / Б.В. Егоров, А.В. Егорова, А.П. Левицкий, В.В. Шерстобитов, И.К. Чайка, Г.Н. Станкевич (СССР). – Заявка № 4031206/30-13; Заявл. 03.03.86; Опубл. 23.11.87. Бюл. N 43.

26. Алейников В., Станкевич Г., Пизик А., Бульченко Н. Подработка зерна в зимних условиях через подогревательную колонку. Информационный листок. — Одесса: ОЦНТИ, 1978, № 114-78.

27. Жидко В.И., Шашкин А.Б., Станкевич Г.Н. Статические характеристики подогревателей для зерна. – Одесса, 1982. – 8 с. // Депонированные научные работы: ВИНТИ, 1983, № 5, с. 89.

28. Шашкин А.Б., Шашкина Т.Б., Станкевич Г.Н. Комплексная оценка эффективности использования зерносушилок. – Одесса, 1984. – 6 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ Минзага СССР 24.12.84 г. № 517зг-Д84. // Реф. ж. Оборудование пищевой промышленности. — М.: ВИНТИ, 1985, №4, с. 14–15.

29. Оптимизация процесса сушки на основе уравнений кинетики / Г.Н. Станкевич, Н.В. Остапчук, В.А. Одинокоев, П.Д. Федунец. – Одесса, 1985. – 11 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ Минзага СССР 1.02.85 г., № 529зг-Д85. // Депонированные научные работы — М.: ВИНТИ, 1985, № 5, с. 108.

30. Анализ процессов смешивания зерна при сушке в рециркуляционных сушилках / Н.В. Остапчук, А.Б. Шашкин, Г.Н. Станкевич, Т.Н. Гросул. – Одесса, 1985. – 7с. – Деп. в ЦНИИТЭИ Минзага СССР 1.02.85 г. № 530зг-Д85. // Депонированные научные работы. – М.: ВИНТИ, 1985, № 5, с. 108.

31. Статические и динамические характеристики тепловентиляционной сети зерносушилок. / Н.В. Остапчук, В.И. Жидко, Г.Н. Станкевич, А.Б. Шашкин. – Одесса, 1984. – 8с. – Деп. в ЦНИИТЭИ Минзага СССР 11.05.85г. № 551зг-Д85. // Депонированные научные работы – М.: ВИНТИ, 1985, № 8, с. 121.

32. Математическое моделирование процесса охлаждения зерна / В.Т. Бадай, В.П. Чучуй, Г.Н. Станкевич. – Одесса, 1988. – 21 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ Минхлебопродукта 27.01.88, № 884. // Депонированные научные работы. — М.: ВИНТИ, 1988, № 5, с. 151–152.

33. Математическое описание процесса охлаждения зерна в зерносушилках шахтного типа. / В.Т. Бадай, Н.В. Остапчук, Г.Н. Станкевич, А.Б. Шашкин, В.П. Чучуй. – Одесса, 1988. – 32 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ Минхлебопродукта 27.01.88, № 885. // Депонированные научные работы. — М.: ВИНТИ, 1988, № 5, с. 152.

34. Модели для определения режимов обработки сыпучих материалов в рециркуляционных агрегатах. / Н.В. Остапчук, Г.Н. Станкевич, А.Б. Шашкин, Т.Н. Гросул // Тез. докл. Всес. конф. “Технология сыпучих материалов - химтехника 86”, ч. 2. – Белгород, 1986. – С. 10–11.

35. Бадай В.Т., Станкевич Г.Н. Система математических моделей для расчета процесса сушки зерна. // Тез. докл. 7 Респ. конф. “Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов химических производств”, ч. 2. — Львов, 1988. – С. 57–58.

36. Станкевич Г.Н. Особенности расчета режимов сушки зерна в агрегатах с рециклами. // Тез. докл. обл. межвузовской научно-практич. конф. “Социально-экономическое и научно-технические проблемы агропромышленного комплекса”. — Одесса, 1989. – С. 65.

37. Остапчук Н.В., Станкевич Г.Н. Устойчивость режимов сушки и качества зерна в рециркуляционных сушилках. // Тез. докл. респ. научно-техн. конф. “Интенсификация технологий и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК” / Под ред. П.С. Циганкова. — Киев: КТИПП, 1989. – С. 215.

38. Станкевич Г.Н., Остапчук Н.В. Оптимизация режимов тепловой обработки пищевых продуктов. // Тез. докл. 2-й Всес. научной конф. “Проблемы индустриализации общественного питания страны”. — Харьков, 1989. – С. 415.

39. Бадай В.Т., Станкевич Г.Н., Шашкин А.Б. Оценка качества рециркуляционной обработки сыпучих материалов. // Тез. докл. Всес. конф. “Технология сыпучих материалов”, том 2. — Ярославль, 1989. – С. 107.

40. Станкевич Г.Н. Оптимизация режимов тепловой сушки пищевых продуктов. // Тез. докл. Всес. научной конф. “Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания”. — Харьков, 1990. – С. 463–464.

41. Станкевич Г.Н. Оптимизация режимов сушки зерна в зерносушильных агрегатах. // Тез. докл. юбилейной 50-й научно-практич. конф. ОТИПП им. М.В. Ломоносова “Научно-технические проблемы развития агропромышленного комплекса”. — Одесса, 1990. – С. 98.

42. Станкевич Г.Н. Совершенствование сушки зерна и кормовых средств. // Тез. докл. 52-й юбилейной научной конференции института. — Одесса: ОТИПП. – 1992. – С. 32.

43. Кочетова А.А., Станкевич Г.Н., Ратушна М.М. Аминокислотный состав шротов лекарственных растений. // Тез. докл. 53-й научной конференции института. – Одесса: ОТИПП. – 1993. – С. 30.

44. Станкевич Г.М., Шашкин А.Б. Техніка і технологія рециркуляційного сушіння зерна. // Тез. докл. Первой национальной научно-практич. конф. “Хлебопродукты-94”. – Одесса, 1994. – С.174.

45. Макаров О.П., Станкевич Г.М. Вивчення теплофізичних властивостей зернових культур. // Тез. докл. Первой национальной научно-практич. конф. “Хлебопродукты-94”. — Одесса, 1994. – С.175.

46. Станкевич Г.М. Математична модель ступеневого сушіння продуктів. // Тез. доп. IX Міжнародної конф. “Удосконалення процесів та апаратів хімічних, харчових та нафтохімічних виробництв”. – Частина 5. — Одеса: ОДАХТ. – 1996. – С. 42.

Станкевич Г.М. Наукові основи вдосконалення сушіння зерна та кормових засобів. — Рукопис.

Диссертация на зодобуття на зодобуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.18.03 — первинна обробка та зберігання продуктів рослинництва, Одеська державна академія харчових технологій, Одеса, 1997.

Досліджені фізичні, теплофізичні та технологічні властивості зерна і нових кормових засобів як об'єктів сушіння та зберігання. Розроблена система математичних моделей процесів нагрівання, сушіння і охолодження та різноманітних типів сушарок, яка дозволяє синтезувати оптимальні режими сушіння зерна та кормових засобів. Запропоновані ефективні технології і техніка сушіння зерна та кормових засобів. Промислова апробація підтвердила економічну ефективність результатів роботи.

Ключові слова:

зерно, кормові засоби, сушіння, кінетика, моделювання, алгоритм.

Станкевич Г.Н. Научные основы совершенствования сушки зерна и кормовых средств. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.03 — первичная обработка и хранение продукции растениеводства, Одесская государственная академия пищевых технологий, Одесса, 1997.

Исследованы физические, теплофизические и технологические свойства зерна и новых кормовых средств как объектов сушки и хранения. Разработана система математических моделей процессов нагрева, сушки и охлаждения и различных типов сушилок, которая позволяет синтезировать опти-

мальные режимы сушки зерна и кормовых средств. Предложены эффективные технологии и техника сушки зерна и кормовых средств. Промышленная апробация подтвердила экономическую эффективность результатов работы.

Ключевые слова:

зерно, кормовые средства, сушка, кинетика, моделирование, алгоритм.

Stankevitch G.N. Scientific foundations of grain drying and fodder means improvement. — Manuscript.

Thesis for a doctor's degree in the technical sciences by speciality 05.18.03 — primary treatment and storage of plant products. Odessa State Academy of Food Technologies, Odessa, 1997.

Physical, heat engineering and technological properties of grain and new fodder means, as objects of drying and storage, have been investigated. The system of mathematical model of heat, drying and cooling processes and different types of dryers, which allows to synthesize optimum drying conditions of grain and fodder means has been developed. Effective technologies and the technique of grain and fodder means drying have been offered. The industrial approval has confirmed economical effectiveness of the results of the work.

Key words: grain, fodder means, drying, kinetics, modeling, algorithm.