

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Луцький національний технічний університет

Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ
СУШІННЯ ВОРОХУ НАСІННЯ ТРАВ**

МОНОГРАФІЯ

Редакційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
ЛУЦЬК 2013

УДК 631.563.2 (066)

ББК: 41.47в6

З 12

Забродоцька Л.Ю.

Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння трав:
Монографія / Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ,
2013. – 164 с.

Рецензенти:

Підгурський М.І., доктор технічних наук, професор, завідувач
кафедрою технології і обладнання зварювального виробництва
Тернопільського національного технічного університету імені І.
Пулюя;

Дідух В.Ф., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою
експлуатації та технічного сервісу машин імені професора
О.Д. Семковича Львівського національного аграрного університету.

У монографії представлені відомості про фізико-механічні властивості
вороху насіння трав як об'єкта сушіння. Проаналізовано способи та засоби
механізації сушіння сипких сільськогосподарських матеріалів. Представлено
теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, яка
полягає у забезпеченні інтенсифікації технологічного процесу сушіння вороху
насіння трав шляхом перемішування шару матеріалу з врахуванням його
структурних характеристик у запропонованій сушарці.

Рекомендується науковцям, аспірантам, студентам та інженерним
працівникам, які займаються питаннями механізації сушіння сипких
матеріалів.

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Луцького національного технічного університету
(протокол № 7 від 28 лютого 2013 року)*

ISBN 978-617-672-021-8

© Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук, 2013

ПЕРЕДМОВА

Сушіння, без якого стають проблематичними питання довготривалого зберігання насіння трав, є однією з головних і найбільш енергетичних технологічних операцій післязбиральної обробки. Якісне сушіння не тільки забезпечує зберігання зібраного урожаю, запобігає його втратам, але й підвищує якість готового продукту. На цій стадії витрачається до 80% всієї енергії післязбиральної обробки насіння, а корисне використання енергії в самих сушарках складає до 40-45%. Саме тому, у даній монографії більш ґрунтовно розглянуто способи та засоби сушіння вороху насіння трав.

Широке впровадження стаціонарних технологій післязбирального обробітку вороху насіння трав стримується кількома причинами, в тому числі й нестачею високопродуктивних засобів для сушіння насінневого вороху. Усунути дану перепону можна, якщо застосовувати для сушіння вороху насіння трав високопродуктивні сушарки. Проте до теперішнього часу недосконаліми є наявні конструктивні рішення, які не дозволяють здійснювати цей процес без зниження якісних показників матеріалу. Тому актуальною є розробка енергозберігаючих методів сушіння та засобів їх реалізації, які б забезпечували максимальне використання потенціалу сушильного агента. Окрім того, з метою інтенсифікації процесу сушіння, доцільним є перемішування матеріалу, що піддається обробці.

Встановлення закономірностей протікання процесу сушіння рослинних сільськогосподарських матеріалів будь-якої початкової вологості, вибір раціональних режимів та методів сушіння дає змогу зробити правильний вибір у створенні універсальних сушарок, які при незначному переналагодженні чи заміні окремих вузлів та агрегатів змогли б якісно забезпечити процес сушіння сільськогосподарських матеріалів з різними фізико-механічними властивостями.

Не зважаючи на значну кількість теоретичних і експериментальних досліджень, присвячених загальній теорії сушіння, тепломасообміну та інтенсифікації процесів

перенесення вологи, а також широкому впровадженню технологічних енергозберігаючих заходів у операції сушіння, залишається багато не використаних резервів. Тому дослідження в цьому напрямку залишаються актуальними і своєчасними.

Відсутність однозначної теорії сушіння сільськогосподарської рослинної продукції, яка має певні особливості, не дозволяє визначитись із стратегією розвитку конкурентноздатної техніки.

Метою монографії являється: систематизація фізико-механічних властивостей вороху насіння трав як об'єкта сушіння; огляд засобів сушіння; наукове обґрунтування енергоощадних способів сушіння насіннєвого матеріалу; визначення напрямків удосконалення техніки для сушіння вороху насіння трав.

РОЗДІЛ 1. ВЛАСТИВОСТІ ВОРОХУ НАСІННЯ ТРАВ, ОДЕРЖАНОГО У РЕЗУЛЬТАТІ ЗБИРАННЯ

1.1. Морфологічні та біологічні особливості насіння трав

Однією з умов успішного вирощування сіяних трав є забезпечення господарств якісним насінням. Однак, упродовж останніх років потреби сільського господарства у насінні повністю не задовольняються. Це пояснюється рядом причин, у тому числі й вирішенням питання комплексної механізації післязбирального обробітку вороху насіння трав, що включає операцію сушіння.

Кормові трави поділяють на злакові і бобові, багаторічні і однорічні. До однорічних злакових трав відносять райграс однорічний, суданську траву, могар, сорго, пайзу, вівсяницю червону, до багаторічних – тимофіївку пасовищну, стоколос безостий, мятлик пасовищний, різні сорти вівсяниці, райграса, житняка, пирія, лисохвоста (рис. 1.1)

Значна кількість кормових трав – багаторічні бобові культури – різні сорти конюшини, люцерни, донника, еспарцета, а також люпин багаторічний, горошок тощо. До однорічних бобових культур відносять вику, червону конюшину, люпин однорічний, донник однорічний, пелюшку, сераделлу посівну та інші види кормового гороху.

Ця різноманітність злакових і бобових трав зумовлює різні масообмінні, фізичні і аеродинамічні властивості насіння, які необхідно враховувати при виборі способів і режимів сушіння, а також конструкції сушарок.

Насіння трав у біологічному відношенні – живий організм, активність якого залежить від виду насіння, ступеня стиглості, вологості та умов зберігання. Насіння трав за своєю природою є колоїдами, а за структурою – капілярно-пористими тілами, котрі складаються з оболонки і ядра або ендосперму. Мікро- та макрокапілярами цього тіла переміщується волога, яка є не тільки на поверхні, але і в середині клітини, що формують різні складові частини насінини.

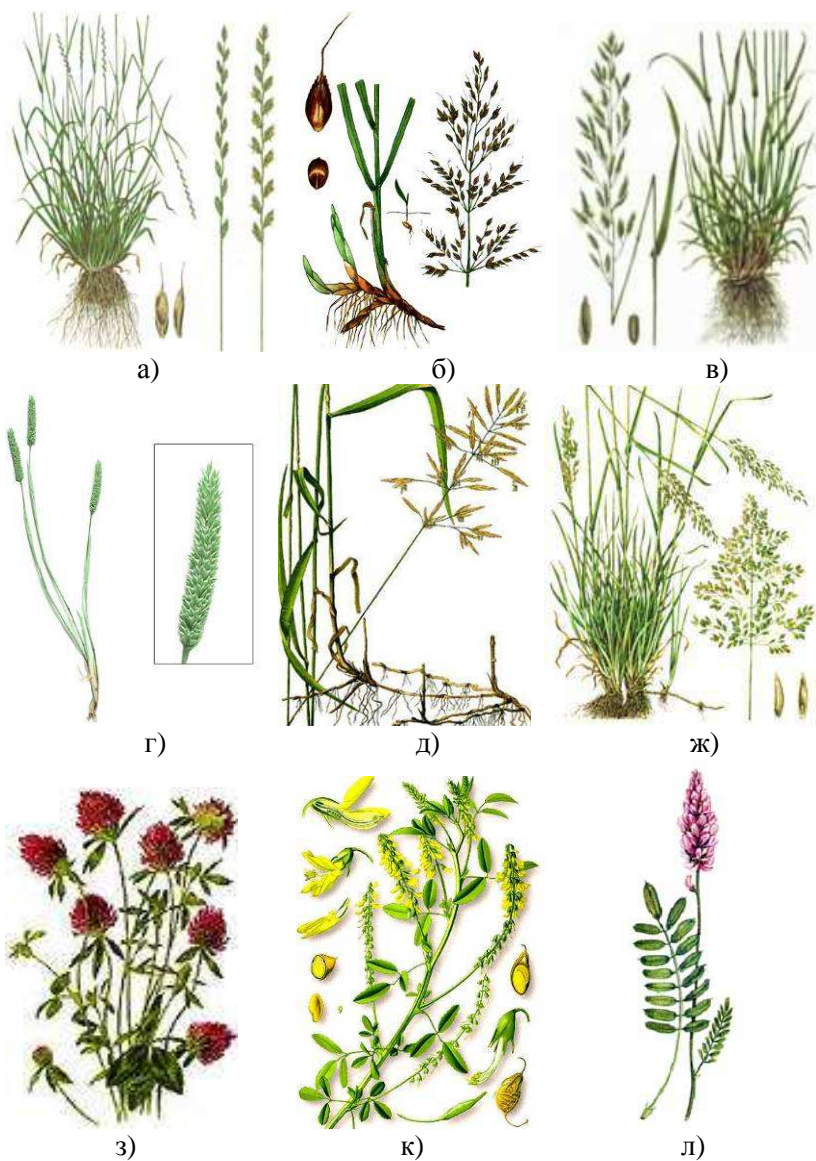


Рис. 1.1. Кормові трави: а) райграс однорічний; б) суданська трава; в) вівсяниця; г) тимофіївка; д) стоколос безостий; ж) мятлик; з) конюшина червона; к) донник; л) еспарцет

Поверхня насінин багаторічних злакових трав плівкова. Під плівкою знаходиться ендосперм – основна маса речовини, необхідної для живлення зародка насінини в період проростання.

Насінини більшості бобових кормових трав мають округлу, овальну або серцеподібну форму, іноді сплюснуту з рубчиком. Насінинна складається з зародка з двома сім'ядолями, де знаходиться основний запас поживних речовин. За вагою і об'ємом сім'ядолі займають основну частину насінини, а відносно невеликий корінець зародка знаходиться між ними. Поживні речовини до зародка надходять через сім'ядолі з ендосперму під час його розвитку. Зародок знаходиться в насінневій оболонці, через яку практично не проникає вода і повітря. Це часто зумовлює твердонасінність, при якій насінини після посіву погано проростають, хоча їхній зародок може зберігати життєздатність, перебуваючи в стані спокою. Причиною такої твердонасінності вважають опробкування судинно-волокнистих пучків насінневого рубчика та ущільнення палісадного шару оболонки [1].

Насінини бобових трав мають доволі великий зародок, покритий тонкою насінневою оболонкою. Це поліпшує умови живлення, але може негативно впливати на життєздатність насінин у процесі сушіння. Складність процесу ще у тому, що корінець і зародок мають більшу вологість, ніж інша частина насінини. Тому, коли насіння перегрівають, енергія проростання та схожість знижується в першу чергу, тоді як харчові якості повністю зберігаються.

Насінини більшості злакових кормових трав мають видовжену, округлу, сплюснуту, інколи майже тригранну форму і складаються із зародка та ендосперма, котрі вкриті плодовою та насінневою оболонками. У насінин деяких культур додатково є ости – видовжені верхівки квіткової луски, які підвищують здатність до склепоутворення при вивантаженні з бункерів різних машин у процесі збирання та післязбиральної обробки. Винятком є бекманія звичайна та тимофіївка пасовищна, насінини котрих – дрібні: від серцеподібної до неправильної ромбо- та яйцеподібної форм, “текучість” яких достатньо

висока, а відтак виникає необхідність додатково герметизувати машини і апарати для обробки цих культур.

Формування зародків в основному закінчується у фазі молочної стиглості, коли колір насінин зелений, а їх вміст нагадує густе молоко. Всі тканини зародка складаються із живих клітин, дуже чутливих до теплової дії, які легко пошкоджуються при нераціональних режимах сушіння. Тому такий нюанс необхідно враховувати при виборі способів і режимів сушіння.

1.2. Властивості насіння трав як об'єкта післязбирального обробітку

Насіння кормових трав, як і насіння більшості інших сільськогосподарських культур, мають три фази стиглості:

- молочна – колір насіння зелений, при роздавлюванні виходить молочно-пастоподібна маса, частина насіння здатна до проростання;

- жовта або воскова – насінини ще не затверділи, зовні змінюють фіолетове забарвлення на сіре, але більшість насінин зберігають злегка зеленуватий відтінок;

- повна – насінини тверді, колір сірий або світло-сірий [2].

Збирання насінників трав є одним із найбільш важливих питань у справі комплексної механізації виробництва насіння трав. У кожному конкретному випадку найбільш раціональним способом збирання є такий, при якому втрачається найменша кількість насіння.

В насінництві, зважаючи на біологічні особливості стиглості насіння та метеорологічні умови, застосовують декілька способів збирання кормових трав: пряме і двофазне комбайнування, а також роздільне збирання – скошування з подальшим обмолотом комбайнами [3].

При зволіканні зі збиранням насінників бобових трав на 5-6 днів, втрати врожаю досягають понад 50 %, а насіння злакових трав може повністю осипатись. Ось чому в період досягання насінників трав за ними встановлюють щоденний ретельний нагляд. Збирати трави можна прямим комбайнуванням після

попередньої десикації, роздільним способом і так званім способом двофазного комбайнування.

Злакові трави збирають прямим комбайнуванням, а бобові – роздільним способом. При збиранні роздільним способом насінники бобових трав скошують у валки упродовж 2-3 днів.

Підбирати валки трав починають тоді, коли рослинна маса достатньо підсохне, а насіння досягає такого рівня вологості, коли його можна зберігати без додаткового просушування. Слід пам'ятати, що тривале перебування валків на полі призводить до осипання достиглого насіння.

Насінники злакових трав збирають переважно способом прямого комбайнування, беручись до цієї роботи у фазі кінця воскової або ж на початку повної стиглості насіння. Роздільним способом збирають лише полегли посіви у фазі воскової стиглості насіння. Пряме комбайнування злакових трав проводять на високому зрізі. Стерню скошують на сіно не раніше, ніж через 15-20 днів після збирання насіння. Такий агрозахід у поєднанні з підживленням посівів сприяє підвищенню насінневої продуктивності в наступному році.

Насіння трав, що, як правило, має підвищену вологість, відразу після перевезення на тік розсипають тонким шаром під накриттям або на сонці, постійно перемішують і повністю висушують.

Характерною особливістю вороху насіння трав, який надходить на обробіток, є те, що його відносна вологість може досягати за несприятливих погодних умовах 40...45 %, а іноді й до 60%. Склад вороху також не постійний: може коливатись у широких межах. Вміст насіння основної культури – 51...81 %, домішок – 12...49 % (частинки стебел, листочки, грудочки землі, зелена маса бур'янів). Аби правильно вибрати технологію обробітку вороху, необхідно враховувати фізико-механічні властивості матеріалу: вологість, чистоту, насипну масу, фрикційні властивості.

Багатьма дослідниками упродовж тривалого часу проводились досліді щодо визначення цих показників. Проте матеріал, який надійшов із поля на обробіток після обмолоту,

досліджений не повністю. Тому, у господарствах, що займаються виробництвом насіння трав, виникають труднощі, пов'язані з визначенням раціональної технології обробки обмолоченого вороху.

Післязбиральний обробіток вороху насіння трав, залежно від якості, погодних умов збирання, наявності і характеристики сушарок, можна проводити, включаючи такі операції, як очистка, сушіння, тимчасове зберігання та активне вентилявання.

Із аналізу можливих схем післязбиральної обробки вороху випливає:

– сушіння вороху насіння трав із подальшим очищенням насіння від домішок можливе при невисокій засміченості чи у випадку застосування сушарок, які обробляють насіння з високою засміченістю;

– очищення вороху від органічних домішок (насінників, стебел і листків) з подальшим сушінням істотно підвищує сипучість вороху, знижує витрати теплоти на сушіння і покращує умови тимчасового зберігання насіння;

– тимчасове зберігання засміченого вороху на асфальтованих майданчиках без застосування активного вентилявання обмежене в термінах і можливе перед сушінням в сушарках, які придатні до обробки вороху насіння з високою засміченістю;

– застосування активного вентилявання вороху атмосферним чи підігрітим повітрям для підсушування підвищує сипучість вороху, що покращує умови роботи очисних машин і сушарок.

Існує декілька схем обробки вороху (рис. 1.2), згідно з якими відбувається технологічний процес. Обираючи раціональну схему, необхідно враховувати склад і вологість матеріалу та інші фізико-механічні показники.

Обробка повинна проводитись таким чином, щоб насінини не втрачали схожості та енергії проростання і за короткий час були доведені до необхідних кондицій при мінімальних затратах на виконання даних операцій.



Рис. 1.2. Основні схеми обробітку вороху насіння трав у господарствах

Для зон України з підвищеною вологістю найбільш придатною є четверта (IV) схема обробітку вороху насіння трав (рис. 1.1). Згідно з цією схемою необхідно передбачити місце для накопичення вороху перед сушінням з метою забезпечення безперервної роботи сушарки, а також – спеціальні приміщення, що вентилуються, для тимчасового зберігання великих партій насіння, які потім будуть перевезені на насінневі заводи.

В багатьох технологічних схемах післязбиральної обробки вороху насіння трав використовують барабанні сушарки, в яких можливе сушіння насіння високої засміченості. Одна із таких схем зображена на рис. 1.3.

Ворох із автомобіля вивантажують у прийомний бункер і норією 1 подають у машину 2 для попереднього очищення. Насіння трав, що пройшло попереднє очищення, норією 3 завантажують у барабанні сушарки, які, зважаючи на рівень вологості насіння, можуть працювати паралельно або послідовно.

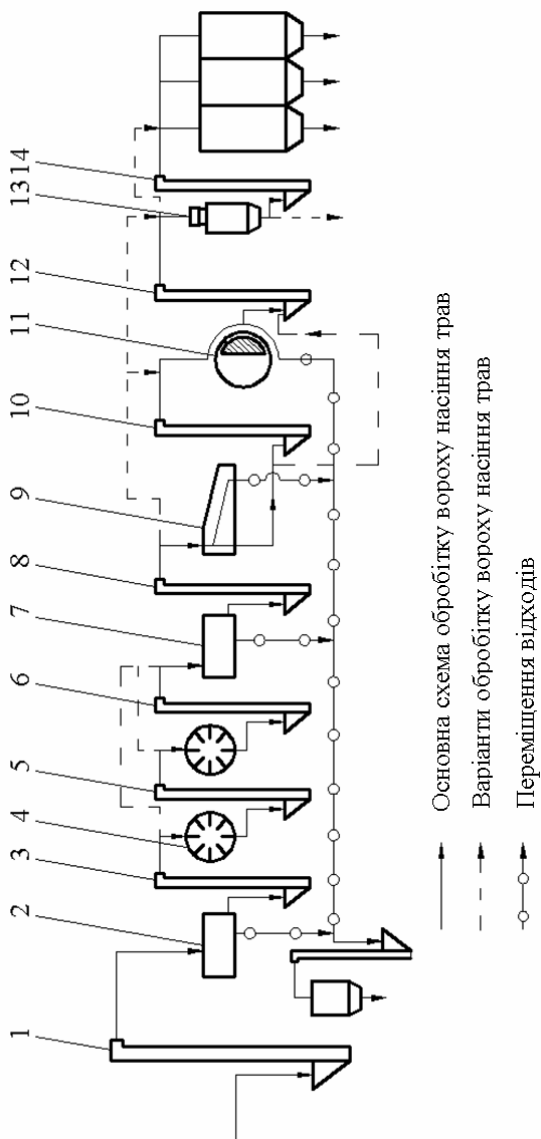


Рис. 1.3. Схема очисно-сушильного пункту вороху насіння трав: 1, 3, 5, 6, 8, 10, 12, 14 – норії; 2, 7 – машини для очищення насіння; 4 – барабанна сушарка; 9 – пневматичний сортувальний стіл; 11 – електромагнітна очищувальна машина; 13 – автоматичні ваги

Висушене насіння норією 6 подають у машину 7 для основного очищення і далі – норіями 8, 10, 12, 14 відповідно на пневматичний сортувальний стіл 9, в електромагнітну очищувальну машину 11, автоматичні ваги 13, в бункер для очищеного насіння або в склад для зберігання. Виділені відходи норією завантажують у бункер для відходів і в подальшому використовують на корм. Можлива обробка вороху насіння за скороченою схемою, наприклад, не використовуючи машини 9 і 11. Згідно ДСТУ 2240-93 “Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови” вологість насіння багаторічних бобових трав при зберіганні і транспортуванні повинна бути не більше 13 %, еспарцета – 14 %, багаторічних і однорічних злакових трав – 15 % і однорічних бобових – 16 % [4].

1.3. Властивості насіння трав як об'єкта сушіння

Правильно організоване сушіння вороху насіння трав та інших культур неможливе без знання особливостей процесу сушіння та фізико-механічних властивостей матеріалу. Такі дослідження проводились у різні роки в Україні та за кордоном. До них належать роботи Птіцина С.Д., Птіциної Л.В., Попова Н.Я., Котова Б.І., Лісецького В.О., Калініченка Р.А., Дідуха В.Ф., Дударєва І.М., Єгорова П.Є., Коп'йова І.П., Валушиса В.Ю., Петерса Ф., Вудфорда І., Лупенко С.А. [5...17].

Попов М.Я. [7] досліджував процес конвективного сушіння насіння вівсяниці та конюшини у киплячому шарі і встановив, що при попередньому нагріві і підсушуванні насіння можна рекомендувати висоту шару 200...250 мм для насіння злакових трав і 100...150 мм для насіння багаторічних бобових трав. Температура сушильного агента – 80...90°C, а його швидкість – 1,7...2 м/с. При рециркуляційному сушінні насіння трав у киплячому шарі доцільно приймати температуру сушильного агента – 70...90°C, його швидкість – 1,5...2,0 м/с, висоту щільного шару насіння – 100...150 мм для бобових та 150...200 мм для злакових трав, час сушіння – 20...30 хв,

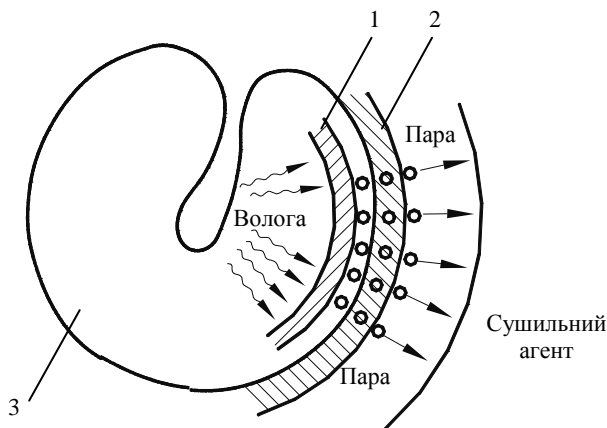
температуру нагріву – не більше 45...50°C для злакових і 40...45°C для бобових трав.

Птіцина Л.В. [6] досліджувала процес сушіння насіння конюшини, люцерни та люпину. Вона відзначила, що при температурі сушильного агента 50...70°C, при $\tau = 10...70$ хв схожість та енергія проростання насіння конюшини та люцерни не знижується, а в деяких випадках навіть підвищується. При температурі сушильного агента 80...90°C, $\tau = 46...55$ хв для конюшини і $\tau = 31...40$ хв для люцерни схожість та енергія проростання зменшується. Насіння люпину незалежно від його початкової вологи, можна сушити при температурі агента сушіння 50°C. Подальше її підвищення призводить до нагрівання насіння вище 30°C, після чого схожість та енергія проростання зменшується.

Великий вклад у розробку теорії процесу сушіння різних матеріалів внесли Ликов А.В., Крішер О., Лур'є М.Ю., Гінзбург А.С., Красніков В.В. [18...22]. Вони обґрунтували закономірність зміни температури теплоносія і вологості матеріалу при сушінні у тонкому шарі.

При найпоширенішому конвективному сушінні насінину обтікає сушильний агент і біля її поверхні утворюється примежовий шар, через який відбувається передача теплоти від агента сушіння до поверхні насінини та дифузія молекул пари з поверхні в зовнішнє середовище. Механізм випаровування пари з насінини під час сушіння схематично можна подати так, як показано на рис. 1.4 [23]. Уздовж поверхні вологої насінини 3 рухається сушильний агент з певними параметрами P_n , t . Тепло від нього конвективним способом передається насінині, її поверхня нагрівається до температури θ , і частина вологи, що знаходиться біля поверхні, випаровується. Як наслідок, по товщині насінини утворюються градієнти вологовмісту, температури та тиску, під дією яких волога безперервно підводиться до поверхні та випаровується. Молекули пари дифундують крізь примежовий шар 2 та поглинається агентом сушіння. Обов'язковою умовою випаровування вологи з

поверхні насінини є наявність різниці між тиском P_n на її поверхні та в сушильному агенті ($P_n > P_n$).



Волога випаровується не з поверхні, а з конкретної зони 1, розташованої у периферійній частині насінини. Більше того, положення цієї зони не лишається сталим; вона поступово рухається (поглиблюється) всередину зернини. Початок поглиблення зони випаровування багато дослідників пов'язують із початком видалення з насінини зв'язаної вологи. При поглибленні зони випаровування поверхня насінини залишається обезводненою, позбавленою захисної властивості, через що вона може нагріватися до високих температур.

Якщо використовувати теорію подібності, то в загальному вигляді вологообмін між вологим матеріалом і навколишнім середовищем характеризується вологообмінним критерієм Нуссельта [23]:

$$Nu_m = A Re^n Pr_m^k Gu^l \left(\frac{\theta_{nc}}{\theta} \right)^2, \quad (1.1)$$

де Re – гідродинамічний критерій Рейнольдса;

Pr_m – масообмінний критерій Прандтля;

Gu – критерій Гурмана;

θ_{nc} , θ – температури навколишнього середовища та матеріалу;

A , k , n , l – сталі коефіцієнти, що залежать від критерію Рейнольдса.

Сушіння – нестационарний процес, тобто – вологість, температура матеріалу та швидкість його обезводнення змінюються з часом. У теорії сушіння усі зміни прийнято ілюструвати графічно у вигляді трьох типових кривих: сушіння, швидкості сушіння, зміни температури (рис. 1.5) [10]. Крива сушіння (I) показує зміну середньоінтегральної вологості матеріалу з часом $W = f(\tau)$.

Крива швидкості сушіння (II) характеризує процес зміни швидкості процесу сушіння з часом $\frac{dW}{d\tau} = f(\tau)$, залежно від середньоінтегральної вологості матеріалу.

Крива температури (III) матеріалу показує зміну температури матеріалу в процесі сушіння залежно від середньої вологості $\theta = f(W)$.

Для вологих матеріалів характерні три періоди сушіння: період нагрівання, 1-й період (період постійної швидкості сушіння), 2-й період (період падаючої швидкості сушіння).

У стадії прогрівання насіння теплота, що підводиться до нього агентом сушіння, витрачається в основному на нагрівання насіння. Його температура різко підвищується, також різко зростає швидкість сушіння від нуля до максимально можливого

для даних умов значення $\frac{dW}{d\tau} \rightarrow \max$ [10].

У рослинних сільськогосподарських матеріалах найважливішим можна вважати 1-й період, коли видаляється основна маса вологи і середньоінтегральне значення вологості наближається до кондиційного. При такому значенні матеріали можна зберігати тривалий час в процесі його подальшого обробітку. Даний період характеризується сталою швидкістю сушіння [24]:

$$-\frac{dW}{d\tau} = N = const, \quad (1.2)$$

де $\frac{dW}{d\tau}$ – похідна вологості по часу;

N – швидкість сушіння 1-й період, %/хв.

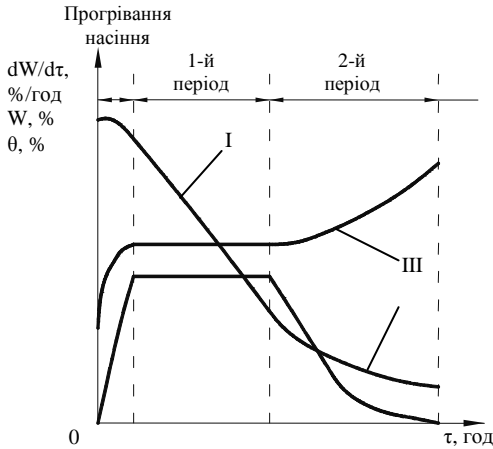


Рис. 1.5. Загальна схема процесу сушіння

У 2-ому періоді спостерігається уповільнення швидкості сушіння насіння згідно з законом:

$$-\frac{dW}{d\tau} = K(W - W_p), \quad (1.3)$$

де K – коефіцієнт сушіння, який залежить від властивостей матеріалу і режиму сушіння, хв^{-1} ;

W_p – рівноважна вологість матеріалу, %.

Інтегруючи рівняння (1.3) отримаємо рівняння кривої сушіння в 2-му періоді:

$$\frac{W - W_p}{W_{к.в.} - W_p} = \exp(-K\tau), \quad (1.4)$$

де $W_{к.в.}$ – приведена критична вологість, %.

Температура матеріалу при досягненні рівноважної вологості дорівнює температурі сушильного агента. Аналогічно до періоду прогріву, на протязі 2-ого періоду виникає градієнт температури, який зникає після завершення процесу сушіння.

Температура нагрівання матеріалу зумовлює збереження його якісних показників. Для рослинного матеріалу існує гранично допустима температура нагрівання, при якій не погіршуються якісні показники. Гранично допустима температура залежить від вологості матеріалу і тривалості перебування його у нагрітому стані.

Встановлена математична залежність гранично допустимої температури $t_{z.d.}$ нагріву насіння від вологості W_i і часу τ теплової обробки у Птіцина С.Д. має вигляд [10]:

$$t_{z.d.} = \frac{2350}{0,37(100 - W_i) + W_i} + 20 - \lg \tau. \quad (1.5)$$

Інші вчені, при дослідженні впливу температури і часу, використовували у своїх розрахунках формули Птіцина С.Д. з невеликими поправками.

В свою чергу Хатчинсон Д. для визначення $t_{z.d.}$ запропонував наступні емпіричні формули [10]:

$$t'_{z.d.} = 122,0 - 5,4 \lg \tau - 43,87 \lg W, \quad (1.6)$$

$$t''_{z.d.} = 130,0 - 5,4 \lg \tau - 43,87 \lg W, \quad (1.7)$$

де $t'_{z.d.}$ – температура насіння, при якій відбувається зниження його посівних якостей, °С;

$t''_{z.d.}$ – температура, що зумовлює повну втрату схожості насіння, °С.

Філоненко Г.К. [23], досліджуючи криві сушіння одного і того ж матеріалу при різних режимах, встановив, що різні криві сушіння, здобуті при цих режимах, суміщаються в одну загальну криву, якщо її побудувати в системі координат

швидкість сушіння $\frac{dW}{d\tau}$ – зведена швидкість сушіння γ .

Остання є відношенням швидкості сушіння в будь-який момент часу до швидкості сушіння N у перший період:

$$\gamma = \frac{I}{N} \cdot \frac{dW}{d\tau}. \quad (1.8)$$

Зведена швидкість сушіння визначається виразом:

$$\gamma = \frac{(W - W_p)^a}{A + B(W - W_p)^a}, \quad (1.9)$$

де A , B – коефіцієнти, що залежать від товщини матеріалу й визначаються дослідним шляхом;

a – коефіцієнт, який залежить від характеру зв'язку вологи зі скелетом матеріалу.

Філоненком Г.К. запропонована формула для визначення тривалості сушіння матеріалу [23]:

$$\tau = \frac{I}{N} \left[2,3A \lg \left(\frac{W_1 - W_p}{W_2 - W_p} \right) + B(W_1 - W_2) \right], \quad (1.10)$$

де W_1 , W_2 – початкова та кінцева вологість матеріалу.

Для визначення опору шару льонвороху повітряному потоку Копьйов І.П. використав відому формулу Рамзіна П.К. [15]:

$$\Delta S = AhV^n, \quad (1.11)$$

де ΔS – опір шару;

h – висота шару;

V^n – швидкість повітряного потоку.

A і n – величини, які залежать від властивостей і шару матеріалу. Окунем Г.С. [25], на основі проведених досліджень встановлена точка K , яка характерна для процесу сушіння зерна пшениці. Ця точка K знаходиться на перетині кривої часу, необхідного для зниження вологості зерна пшениці з 21% до 15%, і часу сушіння, при перевищенні якого відбувається зниження схожості насіння (рис. 1.6).

Як правило, дослідження проводились на тонкому шарі матеріалу з наступним переходом до товстого шару. При цьому брали до уваги ряд припущень і спрощень.

Теплове сушіння, без якого питання довготривалого зберігання насінневих мас в різних типах сховища стають проблематичними, є однією з головних і найбільш енергоємних

технологічних операцій післязбирального обробітку вороху насіння трав. Крім того у процесі зберігання, який передбачає збереження якості насіння шляхом очищення, кондиціонування та інших операцій важливу роль відіграє сушіння і, звичайно, обладнання, за допомогою якого воно виконується.

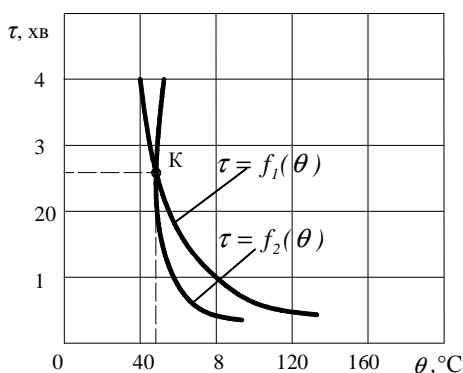


Рис. 1.6. Визначення температури нагріву насінневого матеріалу пшениці

Для сушіння вороху насіння трав не існує спеціальних високо механізованих сушарок. У той же час створювати сушарку лише для вороху насіння трав недоцільно. Господарствам набагато вигідніше мати сушарки, в яких можна сушити сільськогосподарські культури з різними фізико-механічними властивостями. У зв'язку з цим важливо проводити модернізацію обладнання, що випускаються промисловістю.

1.4. Фізико-механічні та технологічні властивості вороху насіння трав

Насіння трав різних культур значно відрізняються за фізичними властивостями, що суттєво впливає на вибір раціональних способів післязбирального обробітку і ефективності використання машин і механізмів.

Із фізичних властивостей насіння трав найбільше значення мають показники, які характеризують його крупність, питому поверхню (табл. 1.1). Як видно із даних таблиці, навіть для насіння однієї культури величина одних і тих самих показників істотно змінюється, що пояснюється впливом багатьох факторів (грунтового-кліматичними умовами, ступенем зрілості насіння, його вологістю і т.д.).

Для виявлення технологічної ефективності сушіння використовують такі показники, як маса насіння, його об'єм і еквівалентний діаметр, питома поверхня 1 кг насіння, величина яких суттєво залежить від вологості (табл. 1.2).

В табл. 1.3. вказані межі зміни кута тертя маси очищеного насіння із різними матеріалами в спокої (табл. 1.3) [26].

Властивості насіння трав можуть змінюватись залежно від рівня вологості, яка може бути виражена у відсотках стосовно загальної маси вологого матеріалу W або – до маси абсолютно сухої речовини насіння W_c :

$$W = 100 \cdot \frac{w}{G}, \quad (1.12)$$

$$W_c = 100 \cdot \frac{w}{G_c}, \quad (1.13)$$

де w – кількість води, що утримується в насінні, кг;

G – вага вологого насіння, кг;

G_c – вага сухого насіння, кг.

На практиці для оцінки якості насіння визначають вологість W за формулою (1.12). Для аналізу кінетики процесу сушіння насіння та інших залежностей використовують формулу (1.13). В деяких випадках при незначних змінах вологості краще оперуватися поняттям вологовміст d (кг/кг).

Волога у насінні є не тільки на його поверхні та у капілярах, а й у середині клітини різних складових частин. Вона має виключно важливе значення для життєдіяльності насіння, але її надлишок призводить до інтенсифікації життєвих процесів, самозігрівання та погіршення якості насіння.

Таблиця 1.1

Культура	Основні показники фізичних властивостей насіння різних трав						Швидкість витання, м/с
	Розміри, мм		Маса 1000 насіння, г	Густина, г/см ³	6	7	
	довжина	ширина					
1	2	3	4	5	6	7	
Багаторічні злакові трави							
Гречка	4,3...8,2	0,8...2,5	0,5...1,5	0,85...1,90	0,62...1,06		0,8...6,0
Житняк	3,5...6,8	0,9...2,0	0,6...1,3	1,45...2,70	0,80...1,20		0,8...5,2
Вівсяниця	2,7...7,8	1,0...2,5	0,5...1,5	1,60...3,32	0,80...1,04		0,5...3,7
Мятлик пасовищний	2,0...3,4	0,5...1,0	0,5...0,7	0,20...0,36	0,54...1,02		0,2...4,5
Пирій	5,5...11,0	1,1...2,3	0,6...1,5	2,20...3,80	0,80...1,08		0,8...6,5
Райграс	4,0...8,4	1,0...3,5	0,5...2,5	1,65...3,50	0,80...1,15		1,5...5,5
Тимофійка	1,2...2,4	0,6...1,3	0,4...1,0	0,30...0,60	0,75...1,08		-
Однорічні злакові трави							
Могар	2,2...3,5	1,0...2,2	0,8...1,5	1,95...3,25	1,20...1,90		1,8...6,0
Суданська трава	5,0...6,2	2,2...3,4	1,8...2,8	5,50...9,90	1,16...1,90		-
Райграс пасовищний	4,3...7,5	1,0...1,8	0,6...1,2	1,80...1,90	1,20...1,90		1,8...6,0
Багаторічні бобові трави							
Конюшина	0,8...2,4	0,8...2,0	0,4...1,4	0,5...2,1	0,90...1,50		2,0...8,0
Еспарцет	4,0...8,0	3,0...6,8	1,7...4,0	10,0...22,6	0,70...1,11		3,5...8,5
Люпин	3,3...4,8	1,7...3,5	1,8...2,6	10,5...25,2	-		-
Люцерна	1,1...2,8	0,8...2,0	0,5...1,3	1,20...2,35	0,90...1,36		2,5...8,0
Однорічні бобові трави							
Вика озима	2,9...4,0	2,8...3,8	2,6...3,6	25,0...40,0	-		-
Вика ярова	3,2...6,0	3,0...5,5	2,5...5,2	35,0...57,0	1,14...1,30		13,2...17,0
Кормовий горох	4,0...9,5	4,0...9,0	3,0...9,0	100...170	1,30...1,50		15,5...17,5
Люпин	7,0...12,0	6,0...11,0	4,0...4,5	130...400	-		-
Лядвенець рогатий	1,3...1,8	0,9...1,7	0,7...1,4	0,8...1,5	1,15...1,32		2,5...8,0

Таблиця 1.2

Зміна показників фізичних властивостей насіння

Культура	Абсолютна маса 1000 насіння, г	Зміна показників при вологості від 9,1% до 33,3%			
		маси 1000 насіння, г	об'єму однієї насіння, мм ³	еквівалентного діаметра насіння, мм	питомої поверхні насіння, м ² /кг
Тимофійка	0,40	0,44...0,60	0,41...0,53	0,78...1,02	4,3...4,1
Гростія	1,27	1,40...1,90	1,44...1,98	1,41...1,57	4,4...3,1
Конюшина червона	1,39	1,53...2,08	1,27...1,94	1,35...1,56	3,7...2,8
Вівсяниця	2,17	2,40...3,30	2,15...3,22	1,62...1,85	3,4...2,5
Райграс пасовищний	2,19	2,41...3,30	2,03...2,63	1,58...1,73	3,2...2,1
Еспарцет	13,72	15,10...20,60	15,80...25,00	3,12...3,65	2,0...1,4
Вика ярова	50,50	55,60...75,80	38,50...54,00	4,30...4,40	1,0...0,9

Таблиця 1.3

Кут тертя насіння вологістю 13,8%...34,5% із різними матеріалами в стані спокою

Культура	Кут тертя, град. із		
	металевим листом	орєсклом	транспортною стрічкою
Тимофійка	9...38	10...49	27...55
Конюшина червона	13...32	15...30	21...60
Райграс пасовищний	18...39	18...42	43...73
Еспарцет	19...44	26...43	30...40
Вівсяниця	22...43	23...59	36...68
Гростія	26...54	24...51	47...70
Вика ярова	6...27	-	10...36
Кормові боби	5...23	-	8...31
Горох	4...22	-	6...27

Для аналізу впливу вологості на зміну коефіцієнта тертя вороху насіння трав побудовано графічну залежність (рис. 1.7).

Проведені дослідження з визначення значень коефіцієнтів тертя показали, що коефіцієнт тертя вороху насіння вівсяниці лучної зростає внаслідок підвищення вологості матеріалу і шорсткості поверхні тертя. Так для матеріалу вологістю $W = 14,5...45,7\%$ мінімальне значення коефіцієнтів тертя поверхнею тертя №3 становить: статичний $f_c = 0,39...0,56$ і динамічний $f_p = 0,36...0,53$.

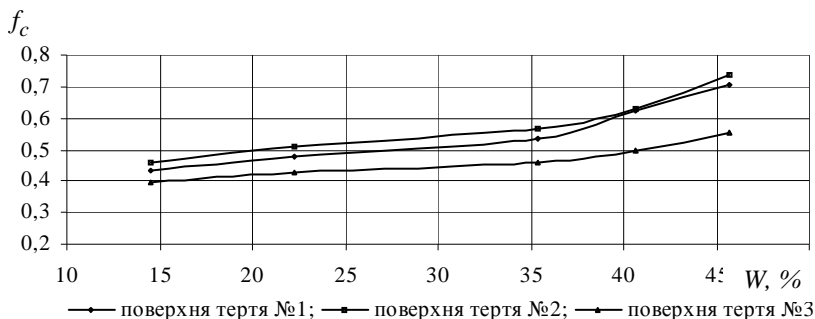


Рис. 1.7. Залежність зміни статичного коефіцієнта тертя f_c вороху насіння вівсяниці лучної від вологості W

Як площини тертя використовували три зразки поверхонь (рис. 1.8): поверхня №1 – \varnothing отвору 2 мм; поверхня №2 – \varnothing отвору 1 мм; поверхня №3 – \varnothing отвору 0,7 мм.

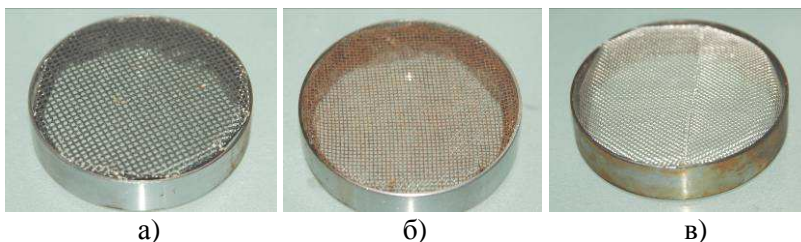


Рис. 1.8. Зразки поверхонь тертя: а – \varnothing отвору 2 мм; б – \varnothing отвору 1 мм; в – \varnothing отвору 0,7 мм

Стан поверхні, який характеризується коефіцієнтом тертя насінини об насінину, залежить від виду культури. З підвищенням вологості шпаруватість насінневої маси зростає (рис. 1.9) внаслідок збільшення як коефіцієнта тертя насінини об насінину, так і об'єму насінини. Так зі зміною вологості вороху насіння трав від 14,5% до 49,9% шпаруватість збільшується від 0,69 до 0,8.

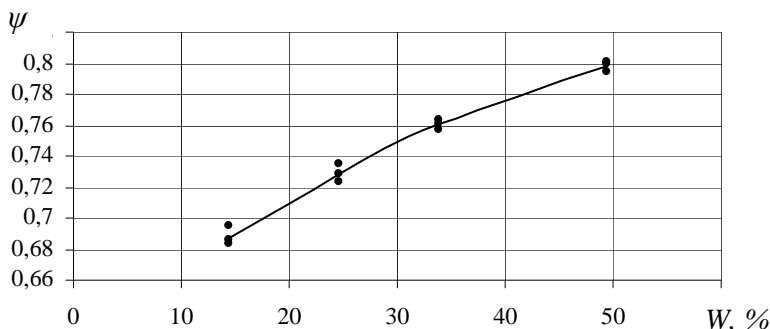


Рис. 1.9. Залежність зміни шпаруватості ψ вороху насіння вівсяниці лучної вологістю від вологості W (14,5...49,9 %)

Із насінням основної культури потрапляють частинки стебла та листків, насіння бур'янів та інші домішки. Середня вологість такого вороху може сягати 35...40 %, іноді – до 60 %, а засміченість – 30 % і вище [1]. Висока вологість і наявність грубих домішок також знижують “текучість” вороху та підвищують здатність до склепуотворень при вивантаженні насіння із бункерів. Для усунення такого недоліку, ворох на токах піддають первинній обробці, очищаючи насіння від грубих домішок, підсушуючи його. Встановлено, що вологість і засміченість вороху збільшується внаслідок нерівномірності досягання насіння трав на початку збирання, а ніж вкінці. Вологість насіння також підвищується, якщо його збирають вранці або в похмуру погоду, коли спостерігається більш висока відносна вологість атмосферного повітря.

Фракційний склад насінневого матеріалу характеризується відносним вмістом частинок різної величини [27].

Відсотковий вміст фракцій визначається за формулою:

$$C = \frac{m_{\phi} \cdot 100}{m_{\Sigma}}, \quad (1.14)$$

m_{ϕ} – маса фракцій, г;

m_{Σ} – сумарна маса початкової наважки, г.

Оскільки лінійні параметри недостатньо характеризують ворох, тому потрібно розрахувати статистичні коефіцієнти нерівномірності (табл. 1.4):

– масово-поверхневий

$$K_{ms} = \frac{m}{s}; \quad (1.15)$$

– поверхнево-масовий

$$K_{sm} = \frac{s}{m}; \quad (1.16)$$

– масово-лінійний

$$K_{ml} = \frac{m}{l}; \quad (1.17)$$

– поверхнево-лінійний

$$K_{sl} = \frac{s}{l}; \quad (1.18)$$

де m – середня маса частинки вороху насіння трав, г;

l – середня довжина частинки вороху насіння трав, мм;

s – середня площа поверхні частинки вороху насіння трав, мм².

Лінійні параметри складових вороху насіння трав (вороху насіння райграса пасовищного вологістю $W = 14,5\%$) вказують на те, що їх форма є продовгувато-пластинчатою (рис. 1.10). Довжина частинок значно перевищує їх ширину, а ширина – товщину. Таким чином, складові вороху насіння трав можна віднести до дромірних.

Розрахунок статистичних коефіцієнтів нерівномірності показує, що із зростанням довжини частинок вороху насіння трав (табл. 1.4):

– зменшується масово-поверхневий коефіцієнт, тобто маса, що припадає на одиницю площі поверхні частинки, зменшується;

– зростає поверхнево-масовий коефіцієнт, тобто площа поверхні частинки, що припадає на одиницю її маси, збільшується;

– зменшується масово-лінійний коефіцієнт, тобто маса частинки, що припадає на одиницю її довжини, зменшується;

– зростає поверхнево-лінійний коефіцієнт, тобто площа поверхні частинки, що припадає на одиницю її довжини, зростає.

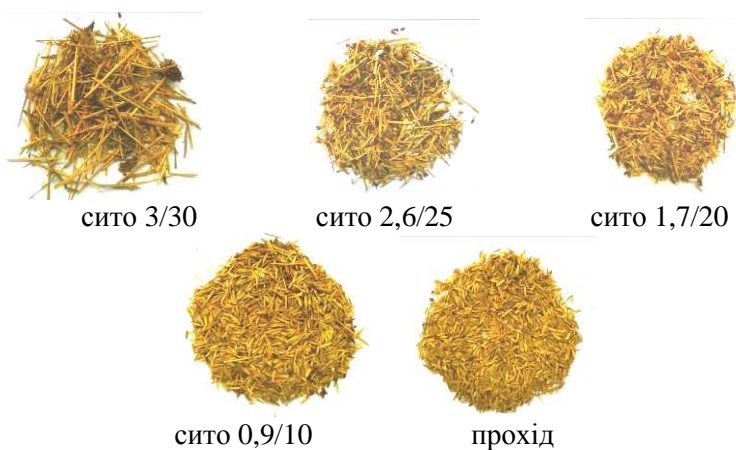


Рис. 1.10. Форма складових вороху насіння райграса пасовищного за ситовим аналізом

Насіння кормових трав, як і зернових культур, у процесі післязбирального обробітку та зберіганні може змінювати вологість до рівноважної: частина вологи випаровується або поглинається. Рівноважною є вологість, коли не спостерігається ні виділення, ні поглинання вологи при даній температурі і відносній вологості повітря. Рівноважна вологість насіння трав залежить від температури, будови і хімічного складу насіння та від температури і відносної вологості повітря (табл. 1.5) [1].

Таблиця 1.4
Залежності статистичних коефіцієнтів нерівномірності від довжини частинок бороху насіння трав

Середня довжина складової бороху l , мм	Статистичні коефіцієнти нерівномірності				K_{st} , мм
	K_{ms} , г/мм ²	K_{ms} , мм ² /г	K_{ms} , г/мм	K_{st} , мм	
27	$0,31 \times 10^{-4}$	$2,91 \times 10^4$	$0,40 \times 10^{-4}$	1,29	
25	$0,39 \times 10^{-4}$	$2,52 \times 10^4$	$0,45 \times 10^{-4}$	1,11	
20	$0,47 \times 10^{-4}$	$2,01 \times 10^4$	$0,51 \times 10^{-4}$	1,05	
13	$0,53 \times 10^{-4}$	$1,69 \times 10^4$	$0,53 \times 10^{-4}$	0,95	
5	$1,03 \times 10^{-4}$	$0,92 \times 10^4$	$0,79 \times 10^{-4}$	0,78	

Таблиця 1.5
Рівноважна вологість насіння трав (у % до загальної ваги)

Насіння	Відносна вологість повітря, %										Температура повітря, °С
	10	20	30	40	50	60	70	80			
Конюшина червона	4,8	6,0	7,0	8,2	9,8	10,2	-	-	0		
Вівсяниця	5,1	6,9	8,0	8,7	9,5	10,7	13,0	16,0	0		
Тимофійка	5,3	7,0	8,2	9,0	10,0	11,1	13,3	17,0	0		
Конюшина червона	4,4	5,8	6,9	7,6	8,4	9,2	11,2	13,5	20		
Вівсяниця	4,6	6,2	7,2	7,9	8,7	10,0	12,0	15,2	20		
Тимофійка	4,8	6,4	7,6	8,6	9,6	10,9	13,2	16,2	20		
Конюшина червона	3,5	4,8	6,0	6,8	7,6	8,8	10,5	13,0	40		
Вівсяниця	4,0	5,4	6,4	7,0	8,0	9,2	11,2	14,6	40		
Тимофійка	4,0	5,5	6,8	7,9	8,8	10,0	12,4	15,7	40		
Конюшина червона	3,0	4,0	5,2	6,0	7,0	8,0	10,0	12,5	60		
Вівсяниця	3,0	4,3	5,3	6,1	7,1	8,4	10,6	13,8	60		
Тимофійка	3,0	4,4	5,3	6,2	7,2	8,8	11,3	15,2	60		

Рівноважна вологість насіння зі збільшенням відносної вологості повітря підвищується, що знижує інтенсивність підсушування при обробітку вологим атмосферним повітрям. Саме тому післязбиральний обробіток насіння можливо проводити лише тоді, коли його рівноважна вологість буде менша за фактичну, а величина останньої знижуватиметься, наближаючись до рівноважної вологості насіння. Винятком є сушіння насіння підігрітим повітрям, коли зі збільшенням його температури знижується і відносна вологість повітря, і відповідно рівноважна вологість насіння, величина якої є нижчою за фактичну вологість насіння.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Форми зв'язку вологи з матеріалами і їх класифікація

Однією з основних операцій під час переробки складових рослини льону-довгунця є сушіння. Для пояснення перебігу процесу сушіння льоносировини та компонентів льоновороху розглянемо теоретичні основи процесу сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів.

Процес видалення вологи з матеріалу вимагає певних затрат енергії. Тому класифікація форм зв'язку вологи з матеріалом, побудована акад. Ребіндером П.А. за принципом інтенсивності енергії зв'язку, враховує також і його характер. Кожна із трьох форм зв'язку (хімічний, фізико-хімічний, фізико-механічний) за Ребіндером П.А., характеризується сімома ознаками.

Хімічний зв'язок вологи, який проявляється у точних відношеннях, найбільш міцний і при нагріванні матеріалу до 120...150°C не розривається.

Фізико-хімічний зв'язок проявляється у різних не строго виражених співвідношеннях. Такий зв'язок характерний для адсорбційної, осмотичної і структурної вологи.

Абсорбційна волога утримується молекулярним силовим полем на внутрішніх і зовнішніх активних поверхнях матеріалу. Даний зв'язок можна спостерігати при виділенні теплоти в процесі поглинання тілом рідини або теплоти адсорбції. Енергія зв'язку у такому випадку надзвичайно велика. Вода, яка знаходиться при цьому у стиснутому стані, змінює свої властивості (температуру замерзання, щільність і т.д.).

Осмотична волога проникає всередину замкнених клітинок рослинних матеріалів шляхом дифузії (осмосу) в результаті дії осмотичного тиску.

Структурна волога – це також внутрішньоклітинна рідина, яка утворюється в період росту рослин.

Вказані види вологи можуть переміщатись під дією сил тяжіння. Тому за своїми фізичними властивостями вони не

відрізняються від звичайної рідини. Але видалення її із матеріалів можна досягти лише за допомогою тиску.

Під фізико-механічною зв'язаною вологою розуміють рідину, яка знаходиться у капілярах і рідину змочування.

Капіляри з радіусом $r < 10^{-5}$ см називають мікрокапілярами, а капіляри з радіусом $r > 10^{-5}$ см – макрокапілярами. Волога із мікрокапілярів може випаровуватися тільки при достатньо низькій вологості оточуючого середовища, коли парціальний тиск насиченої пари над меніском більший парціального тиску пари в оточуючому середовищі. Така волога нерухома під дією сил тяжіння.

Волога в макрокапілярах, порах, пустотах, а також поверхнева волога змочування утримується у матеріалі виключно механічно і переміщається під дією сили тяжіння. Така волога може бути видалена як механічним шляхом, так і частково випаровуванням.

Отже, підсумовуючи вище сказане, волога у рослинних матеріалах може знаходитись у зв'язаному і вільному стані (рис. 2.1).

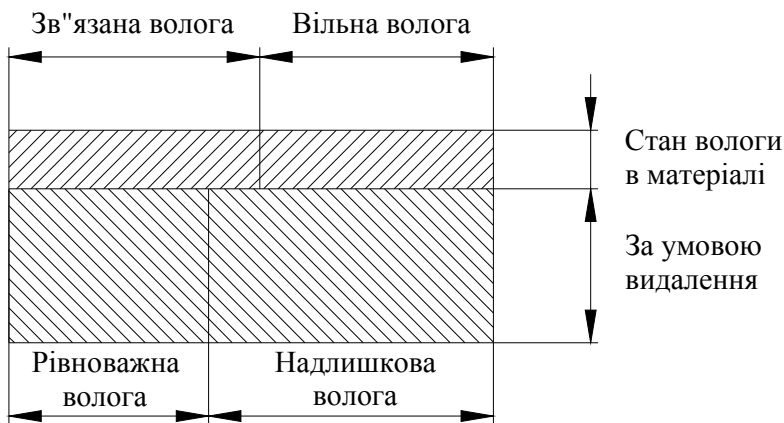


Рис. 2.1. Види вологи в матеріалі за станом і умовою видалення під час сушіння

При дослідженні процесів сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів необхідно звернути увагу на вільну вологу.

Вільна волога – волога макрокапілярів, пор і пустот, осмотична, структурна, змочування. Зв'язана волога – це загалом волога мікрокапілярів і адсорбційна.

Під надлишковою вологою розуміють частину вологи в матеріалі, від якої можна звільнитись при даних умовах сушіння, які залежать від температури і відносної вологості сушильного агента (t_{ca} , φ_{ca}).

Відповідно, рівноважна волога – це волога від якої не можна звільнитись при тих же умовах. Після взаємодії двох об'єктів з різними початковими параметрами настає рівноважний стан.

Рівноважний стан матеріалів має важливе значення при виборі режимів і часу сушіння, створенні умов зберігання.

За фізичними властивостями вологі матеріали поділяють на три основних види: колоїдні, капілярно-пористі та капілярно-пористі колоїдні тіла.

Усі сільськогосподарські матеріали, в тому числі рослинні, можна віднести до капілярно-пористих колоїдних тіл, у яких присутні в тій чи іншій мірі властивості перших двох видів. Вони мають капілярно-пористу будову, а стінки їх капілярів володіють властивостями набухаючих гелів.

Складність будови рослинних сільськогосподарських матеріалів вимагає особливого підходу до їх післязбирального обробітку і дозволяє в окремих випадках інтенсифікувати процес сушіння підвищенням температури сушильного агента t_{ca} . Так, наприклад, насіннева коробочка має захисну частину біологічного зародку у вигляді коробочки.

З іншого боку, стеблові матеріали, як правило, мають трубчасту форму. Нерівномірність розміщення розмірів пор, пустот і капілярів від центра до периферії обмежує підвищення температури їх нагрівання.

2.2. Тепловий спосіб видалення вологи

Якщо в процесі взаємодії двох об'єктів: оточуючого середовища і матеріалу відбувається поглинання матеріалом вологи, то таке явище називається сорбцією або вологопоглинанням.

Вологість матеріалу при цьому змінюється від нуля до гігроскопічного максимуму.

Зворотній процес видалення з матеріалу зв'язної вологи шляхом її випаровування називається десорбцією. Процес десорбції починається після випаровування вільної вологи. Отже, сушінням вологих матеріалів називається процес видалення вологи шляхом її випаровування. Криві зміни рівноважної вологи від відносної вологості оточуючого середовища при його постійній температурі називають ізотермами сорбції (рис. 2.2).

Характер цих кривих залежить від особливості зв'язку вологи з матеріалом. Необхідно відмітити, що десорбція (крива 1) і сорбція (крива 3) не являються абсолютно точними зворотними процесами. Нерівномірність стійкості вологості при різних напрямках процесу носить назву гістерезиса сорбції. Існує ряд гіпотез появи гістерезису сорбції. Тому в дослідженнях використовують середню стійкість матеріалу в оточуючому середовищі, яку називають рівноважною.

Тепловий спосіб сушіння матеріалів – це складний теплофізичний процес, в основу якого покладені явища перенесення. До головних фізичних явищ необхідно віднести:

- теплообмін між поверхнею матеріалу і оточуючим середовищем (сушильним агентом), в процесі якого відбувається проникнення тепла до центру окремих тіл;
- переміщення вологи в матеріалі або вологопереміщення;
- випаровування вологи з поверхні матеріалу в оточуюче середовище (насичення вологою сушильного агента або вологовіддача).

Якщо вологість матеріалу знаходиться вище вологості гігроскопічної точки, то матеріал знаходиться у сирому стані і

його сушіння буде відбуватися при будь-яких параметрах повітря (сушильного агента) при умові $\varphi < 100\%$.

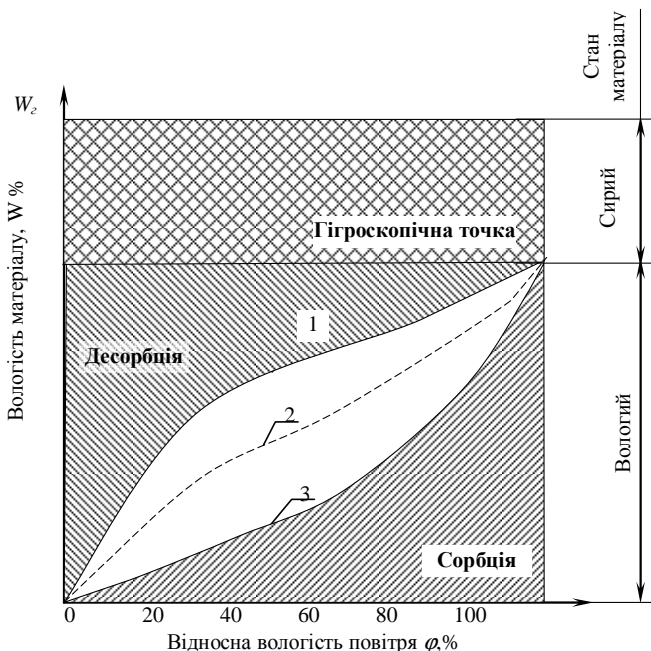


Рис. 2.2. Залежність вологості матеріалу W від вологості повітря φ , при $t = \text{const}$

При сушінні об'ємних тіл їх внутрішні шари можуть утримувати вільну вологу. У той же час вологість поверхневих шарів буде нижчою гігроскопічної точки.

Для переміщення вологи до поверхні матеріалу необхідно створити відповідні умови, які виражаються наявністю градієнтів: вологості, температури, тиску.

Переміщення вологи під дією градієнта вологості називається вологопроникністю, а температури – термовологопровідністю.

Якщо всередині матеріалу виникає надлишковий тиск (градієнт тиску) пароповітряної суміші, то волога також буде рухатись до поверхні випаровування.

У сільськогосподарському виробництві основні енергетичні затрати приходяться на збирання і післязбиральний обробіток. Тому перевагу при зниженні вологості у рослинних матеріалах надають природному (радіаційному) сушінню. Але забезпечення максимальної механізації і автоматизації пов'язано із конвективним сушінням.

При цьому способі сушіння тонких і дрібнодисперсних матеріалів з розвинутою поверхнею випаровування швидкість процесу визначається умовами тепло- і вологообміну між поверхнею матеріалу і оточуючим середовищем. Рослинні сільськогосподарські матеріали можна віднести до об'ємних тіл. Тоді в початковий момент швидкість звільнення від вільної вологи з поверхневих шарів визначається аналогічно до тонких і дрібнодисперсних матеріалів. Після видалення з матеріалу основної частини вільної вологи швидкість процесу буде залежати від вологоперенесення – швидкості підведення вологи із внутрішніх шарів до поверхні випаровування під дією градієнта вологості.

Термовологопровідність при конвективному сушінні може давати і негативний ефект, коли температура поверхні вища температури внутрішніх шарів і потік тепла направляєтся до центру тіла. Тому, при наявності у матеріалах вільної вологи, його нагрів вище 100°C не допускається. Відповідно, дія надлишкового тиску (градієнту тиску) при таких умовах відсутня.

У багатьох випадках при сушінні сільськогосподарських рослинних матеріалів має місце велика їх неоднорідність. Тоді можуть мати місце наступні варіанти вологоперенесення:

- відсутність переміщення вологи між складниками при різній їх вологості;
- переміщення вологи при однаковій вологості;
- переміщення вологи від тіла з більшою вологістю до тіла з меншою вологістю і в окремих випадках навпаки.

Для забезпечення потенціалу перенесення рідини капілярами повинні виконуватися наступні умови:

– в стані термодинамічної рівноваги потенціал перенесення вологи у всіх точках тіла і при контакті тіл з різною вологістю повинен бути однаковим;

– перенесення вологи відбувається в напрямку від більшого потенціалу до меншого.

2.3. I - d -діаграма вологого повітря

Складні теплофізичні явища, що мають місце при сушінні сільськогосподарських рослинних матеріалів, не дають можливості застосовувати точні аналітичні методи розв'язку поставлених задач. Так як дана система, в якій приймає участь цілий ряд підсистем, змінна в часі, тому всі розрахунки, пов'язані із атмосферним повітрям і паливними газами, при проектуванні сушильної техніки найкраще проводити із використанням I - d -діаграми, яку розробив у 1918 році проф. Рамзін Л.К. і якою користуються дослідники донині.

Діаграма побудована в координатних осях тепловміст (ентальпія) I – вологовміст d . На діаграму нанесені лінії постійної ентальпії $I = \text{const}$, постійного вологовмісту $d = \text{const}$, постійної температури $t = \text{const}$, постійної відносної вологості повітря $\varphi = \text{const}$, лінії парціальної пари $P_n = f(d)$, лінії зміни параметрів повітря при адіабатичному випаровуванні води $\Theta = \text{const}$.

Під вологовмістом d г/(кг сп) розуміють масу водяної пари в грамах, що знаходиться у сушильному агенті, віднесеної до 1 кг абсолютно сухого повітря (сп).

Ентальпія (тепловміст) I кДж/(кг сп) є теплофізичною характеристикою стану газу і дорівнює сумі внутрішньої енергії і добутку тиску на об'єм. Для процесів сушіння, які відбуваються при сталому тиску, приріст ентальпії дорівнює кількості теплоти, що надається системі.

Між параметрами t , φ , d та I існує зв'язок, який графічно зображений на I - d – діаграмі (рис. 2.3).

Діаграма будується для 1 кг сухого повітря або для $(1+0,01 \cdot d)$ кг вологого при барометричному тиску, рівному 99,3 кПа. По горизонталі відкладається вологовміст $d = \text{const}$, по осі ординат – ентальпія $I = \text{const}$, а віссю абсцис служить лінія, розміщена під кутом 135° до осі ординат в бік осі d .

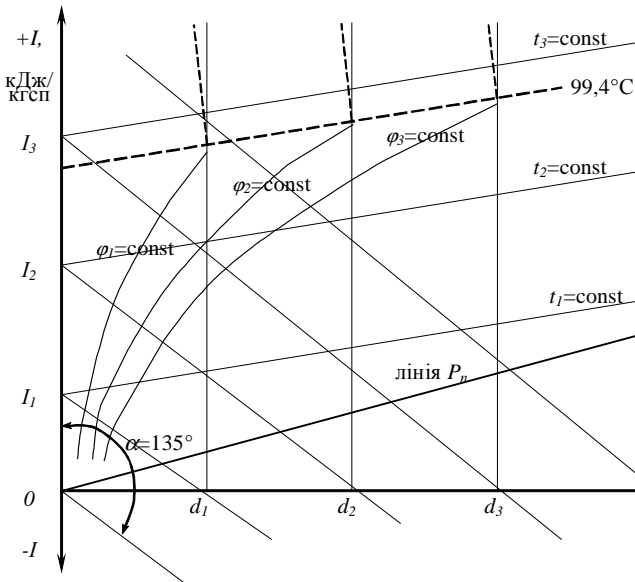


Рис. 2.3. Основні графічні залежності на I - d -діаграмі

Отже, діаграма відображає залежності I від d при різних температурах t і вологовмісті φ .

Ізотерми $t = \text{const}$ будують за рівнянням:

$$I = a + b \cdot d, \quad (2.1)$$

де a і b – постійні величини.

Так як рівняння (2.1) є рівнянням прямої, то кожну ізотерму будують по двох точках.

Криві $\varphi = \text{const}$ будують за рівняннями після нанесення на діаграму ізотерм.

$$d = 622 \frac{P_n}{P_0 - P_n}, \quad (2.2)$$

$$\varphi = \frac{P_n}{P_{nmax}} \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

де P_n – парціальний тиск (табличне значення).

Лінія, при якій $\varphi = \text{const}$, характеризує сушильний агент і має криволінійний вид. При зростанні температури вище $t = 99,4^\circ\text{C}$, $\varphi = \text{const}$ зображаються прямими лініями, які є майже паралельними осі ординат. При цьому перехід від кривих до прямих знаходиться на одній лінії, яка відповідає значенню $t = 99,4^\circ\text{C}$ і $\varphi = \text{const}$. Дане явище викликано тим, що при такій температурі $P_{nmax} = P_\phi$.

Крива $\varphi = 100\%$ характеризує насичений стан повітря. Нижче даної кривої у складі повітря, крім сухої насиченої пари, будуть знаходитись найдрібніші частинки води.

Лінію парціального тиску пари з достатньою точністю на I - d -діаграмі можна побудувати за рівнянням $P_n = P_\phi \frac{d}{622 + d}$. Її наносять у нижній частині діаграми.

Якщо із чотирьох параметрів t , φ , d , I відомі два, то два інших знаходяться за діаграмою. Таким чином, використання I - d -діаграми значно спрощує розв'язок задач по встановленню параметрів сушильного агента в процесі його підготовки та використання під час сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів.

2.4. Нагрівання та охолодження сушильного агента

Сушильний агент утворюється у теплообмінному пристрої шляхом контакту із нагрітими поверхнями або змішування паливних газів із атмосферним повітрям.

У даній пристрій поступає атмосферне повітря з параметрами t_0 , φ_0 , d_0 , I_0 , а на виході внаслідок теплообміну отримуємо сушильний агент з параметрами t_1 , φ_1 , d_1 , I_1 (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Схема до розрахунку параметрів сушильного агента

Якщо процес зміни параметрів t , φ , d , I відбувається у теплообмінному пристрої внаслідок контакту із нагрітою поверхнею, то вологовміст атмосферного повітря на вході та сушильного агента на виході буде однаковий. Такий процес на I - d -діаграмі буде відображатись вертикальним відрізком AB (рис. 2.5).

Відрізок AB відображає нагрівання атмосферного повітря при його постійному вологовмісті до деякої температури t_1 , а BA – падіння температури сушильного агента до початкового значення t_n . Відповідно зменшується (збільшується) його вологовміст і зростає (зменшується) тепловміст I .

Якщо сушильний агент охолоджувати при $d_n = \text{const}$ до повного насичення водяною парою до $\varphi = 100\%$, то отримаємо точку C – точку роси при t_1 . Подальше його охолодження буде супроводжуватись конденсацією водяної пари, появою туману і зниженням вологовмісту (крива CD).

Стале значення $d = \text{const}$ вологовмісту можливе при використанні електрокалориферів. Якщо сушильний агент готується у паливному блоці, то в процесі згорання палива його вологовміст зростає до деякого значення d_2 (рис. 2.6).

Відповідно зростає температура від t_n до t_2 , але зміна параметрів t , φ , d , I сушильного агента буде відбуватись по похилій прямій AB' . Тому потенціал підготовленого сушильного агента тепловентиляційною установкою у порівнянні із нагріванням атмосферного повітря контактним методом буде у деякій мірі менший, що відповідає вологовмісту $d_n < d_2$, вологості $\varphi_2 > \varphi_3$ і температури $t_2 < t_3$. Зміна вказаних параметрів

пояснюється згоранням водню і виділенням вологи, що міститься в паливі.

У будь-якому випадку при спалюванні палива кількість виділеної теплоти у тепловентиляційній установці буде визначатись за наступною формулою:

$$Q = m_n \cdot q_n \cdot \eta_{my}, \quad (2.4)$$

де m_n – маса палива, яке згорить у тепловентиляційній установці, кг/год;

q_n – теплота, яка виділяється при спалюванні палива, кДж/кг;

η_{my} – ККД тепловентиляційної установки ($\eta_{my}=0,85\dots0,95$).

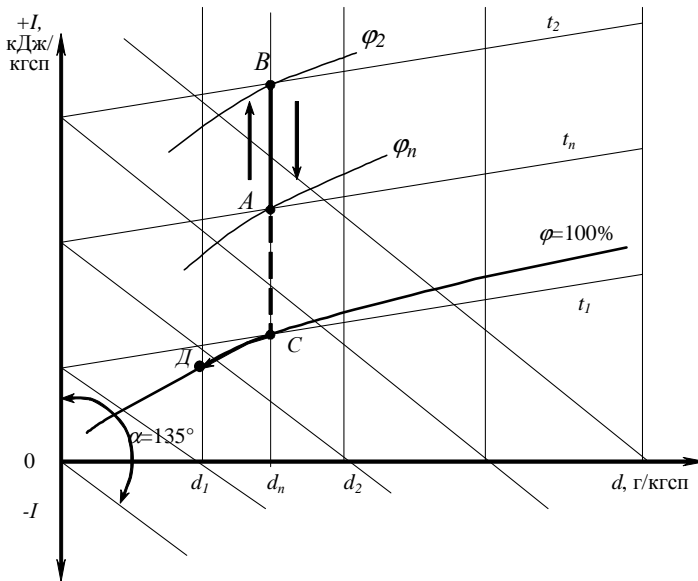


Рис. 2.5. Процес зміни параметрів сушильного агента при постійному вологовмісті

Відомо, що для процесів сушіння приріст ентальпії дорівнює кількості теплоти, яка надана системі, тому можна записати:

$$Q = L(I_1 - I_0), \quad (2.5)$$

де L – маса сухого сушильного агента, який подається за одиницю часу, кг/год;

I_0 – тепловмісти повітря до нагрівання, кДж/кг;

I_1 – тепловмісти повітря після нагрівання, кДж/кг.

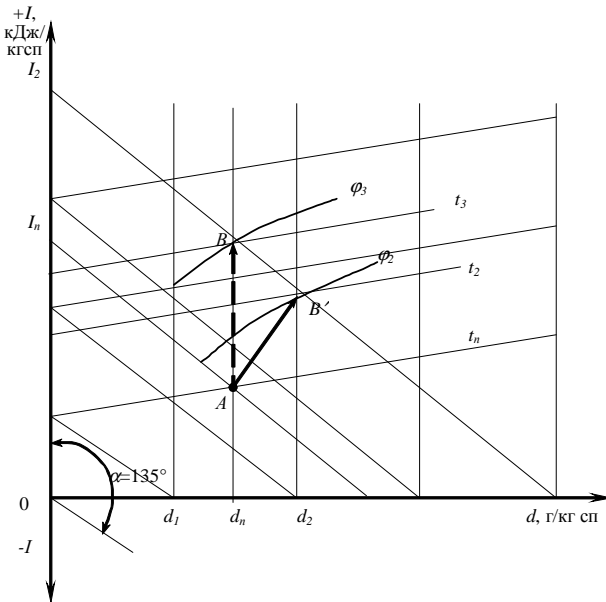


Рис. 2.6. Процес підготовки сушильного агента при згоранні палива

При розрахунках процесу сушіння приймається ряд параметрів сушильного агента, які необхідно отримати при подачі його у сушильну камеру. Але визначальним є витрата сухого сушильного агента (маса сушильного агента, що подається в одиницю часу). Тому із (2.5) та з врахуванням (2.4) отримаємо:

$$L = \frac{m_n \cdot q_n \cdot \eta_{my}}{(I_1 - I_0)}. \quad (2.6)$$

Тривалість процесу сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів і ефективність механізмів для виконання даного процесу залежить від потенціалу сушильного агента. Потенціалом сушильного агента називається різниця вологовмісту, температури, парціального тиску при початкових умовах із повним його насиченням. Найпростіший метод визначення потенціалу сушильного агента, також за допомогою $I-d$ -діаграми (рис. 2.7). Для цього необхідно нанести на вказану діаграму початкові параметри сушильного агента (точка A), що дорівнюють максимальній ефективності, та параметри, які визначають його використання до повного насичення вологою (точка B). Тоді потенціал сушильного агента буде визначатись різницею відповідних його параметрів.

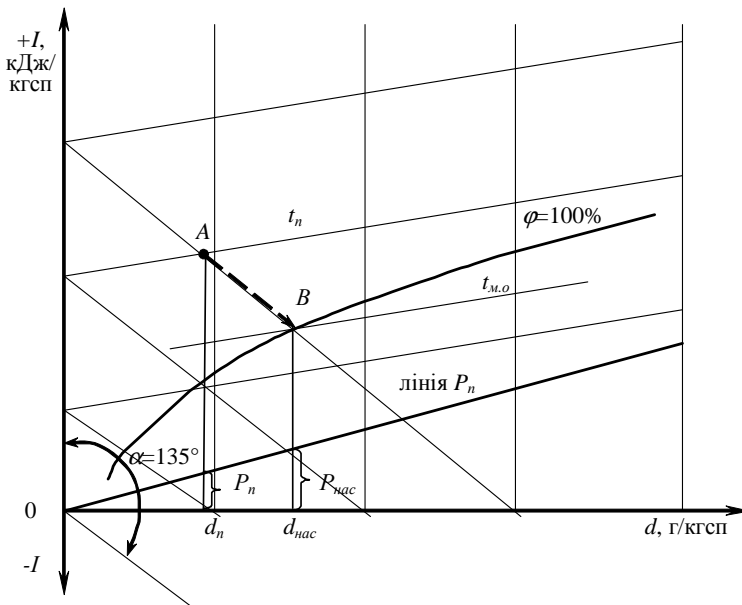


Рис. 2.7. Визначення потенціалу сушильного агента за допомогою $I-d$ -діаграми: $t_{m.o}$ – температура межі охолодження; P_{nac} – парціальний тиск насичених парів на поверхні матеріалів; P_n – парціальний тиск пари при початкових умовах

Відповідно формули для визначення потенціалу:

$$\begin{aligned}\Delta d &= d_{\text{нас}} - d_n ; \\ \Delta t &= t_n - t_{\text{м.о.}} ; \\ \Delta P &= P_{\text{нас}} - P_n .\end{aligned}\tag{2.7}$$

Експериментальні дослідження визначення максимально можливої висоти різних сільськогосподарських рослинних матеріалів під час сушіння у нерухомому шарі показують, що при недостатньому потенціалі сушильного агента можливе зволоження верхніх шарів, поява конденсату. Таке явище дає підставу стверджувати, що ефективне використання потенціалу сушильного агента можливе при сушінні сільськогосподарських матеріалів у нерухомому товстому шарі із використанням елементів методу протитечії.

2.5. Розрахунок конвективного сушіння рослинних матеріалів

Усі сушарки конвективної дії можна поділити на два типи: періодичної і безперервної дії. У сушарках періодичної дії завантаження і вивантаження матеріалу відбувається періодично, тому зміна вологості матеріалу з часом веде до зміни параметрів сушильного агента на виході із шару.

У сушарках безперервної дії завантаження і вивантаження відбувається одночасно і безперервно. Тому зміна параметрів матеріалу і сушильного агента відбувається по напрямку руху матеріалу.

При встановленому режимі сушіння у будь-якій точці сушильної камери параметри матеріалу і сушильного агента будуть постійними із деяким відхиленням. У будь-якому випадку через сушильну камеру (рис. 2.8) пройде матеріал з початковими параметрами: масою m_1 (кг/год), відносною вологістю W_1 (%) і температурою θ_1 (°C). Після взаємодії сушильного агента з початковими параметрами: температурою t_1 , вологовмістом d_1 , вологістю φ_1 , тепловмістом I_1 із сушильної камери вийде матеріал масою m_2 , вологістю W_2 , температурою

θ_2 . Відповідно параметри сушильного агента зміняться до значень t_2, φ_2, d_2, I_2 . При розрахунках відомими вважаються всі вхідні параметри матеріалу і сушильного агента, а також задається вихідна вологість матеріалу W_2 , температура t_2 або вологість φ_2 сушильного агента. Всі інші параметри можна визначити:

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= (m_1 - m_c) \cdot 100 / m_1 \\ W_2 &= (m_2 - m_c) \cdot 100 / m_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

де m_c – маса абсолютно сухого матеріалу, що проходить через сушильну камеру за одиницю часу (кг/год.).

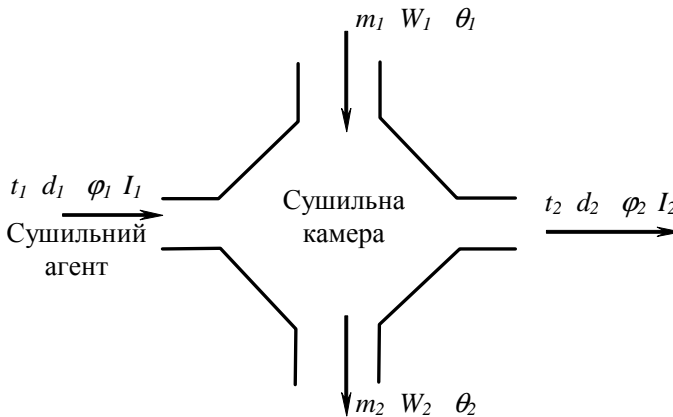


Рис. 2.8. Схема до розрахунку конвективного сушіння матеріалів

З формул (2.8) можна визначити ряд параметрів, які характеризують вологість матеріалу до початку процесу сушіння W_1 і після його закінчення W_2 :

$$m_c = m_1 \frac{(100 - W_1)}{100} = m_2 \frac{(100 - W_2)}{100}. \quad (2.9)$$

Відповідно,

$$m_2 = m_1 \frac{(100 - W_1)}{(100 - W_2)}. \quad (2.10)$$

Маса вологи m_e , що випаровується за одиницю часу буде дорівнювати:

$$m_e = m_1 - m_2 = m_1 \frac{(W_1 - W_2) \cdot 100}{(100 - W_2)}. \quad (2.11)$$

Зменшення маси матеріалу у відсотках становить:

$$Z_m = \frac{m_e}{m_1} \cdot 100 = \frac{(W_1 - W_2) \cdot 100}{100 - W_2}. \quad (2.12)$$

Для визначення витрати сушильного агента при сушінні сільськогосподарських рослинних матеріалів необхідно скласти рівняння балансу вологи:

$$m_{m_1}^e + m_{a_1}^e = m_{m_2}^e + m_{a_2}^e, \quad (2.13)$$

де $m_{m_1}^e + m_{a_1}^e$ – маса вологи, що поступає в камеру із матеріалом і сушильним агентом, кг/год.;

$m_{m_2}^e + m_{a_2}^e$ – маса вологи, що виходить із сушильної камери із матеріалом і сушильним агентом, кг/год.

Кількість вологи, яка поступає в сушильну камеру із матеріалом, визначається:

$$m_{m_1}^e = m_1 - m_c = \frac{m_1 \cdot W_1}{100}. \quad (2.14)$$

Відповідно на виході із сушильної камери:

$$m_{m_2}^e = m_2 - m_c = \frac{m_2 \cdot W_2}{100}. \quad (2.15)$$

Кількість вологи, яка поступає в сушильну камеру із сушильним агентом і виноситься із сушильної камери:

$$m_{a_1}^e = \frac{m_{ca} \cdot d_1}{1000}, \quad (2.16)$$

$$m_{a_2}^e = \frac{m_{ca} \cdot d_2}{1000}, \quad (2.17)$$

де m_{ca} – маса сухого сушильного агента, яка проходить крізь сушильну камеру, кг/год.

Отже, підставивши значення в (2.13), отримаємо:

$$\frac{m_1 \cdot W_1}{100} + \frac{m_{ca} \cdot d_1}{1000} = \frac{m_2 \cdot W_2}{100} + \frac{m_{ca} \cdot d_2}{1000}. \quad (2.18)$$

Звідки

$$m_{ca} = \frac{m_1 (W_1 - W_2) \cdot 1000}{(100 - W_2) \cdot (d_2 - d_1)} = m_e \cdot 1000 \cdot (d_2 - d_1). \quad (2.19)$$

При подальших розрахунках необхідно розглянути процеси, які відбуваються у теоретичній сушарці (рис. 2.9). Теоретичною вважається сушарка, у якій немає втрат теплоти $\theta_1 = \theta_2 = 0$ і процес згідно теорії сушіння протікає при сталому тепловмісті, тобто по лінії BC , $I_1 = I_2 = I = \text{const}$. Для визначення інших параметрів необхідно знати ще один параметр і, як вже було сказано вище, це температура t_2 або вологість φ_2 .

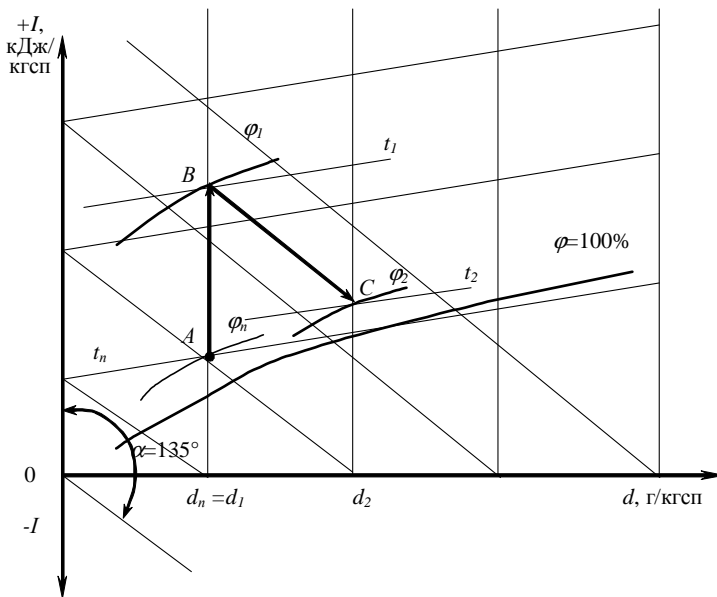


Рис. 2.9. Побудова процесу сушіння в теоретичній сушарці

За початковими значеннями температури атмосферного повітря t_n та його вологості φ_n знаходять точку A . Із точки A проводимо вертикаль при $d = \text{const}$ до точки B . Точка B характеризує параметри t_1 і φ_1 сушильного агента на вході у сушильну камеру. Насичення сушильного агента вологою в результаті теплообміну призводить до падіння температури t_2 і збільшення вологості φ_2 , вологовмісту d_2 . Отже, значення параметрів сушильного агента на виході із шару матеріалу буде характеризувати точка C .

Якщо б підготовка сушильного агента проводилась при умові спалювання палива ($d_n \neq d_1$), тоді б пряма AB будувалась згідно рис.3.8. У подальшому аналізі процесу сушіння зробимо допущення, що при підготовці сушильного агента $d = \text{const}$.

Пряма BC характеризує зміну параметрів сушильного агента в теоретичній сушарці в процесі сушіння вологих матеріалів.

Але в реальних умовах, у дійсній сушарці, є втрати теплоти з відпрацьованим сушильним агентом на нагрівання матеріалу, транспортуючих механізмів і навколишнього середовища. Крім цього, в сушильну камеру надходить теплота разом із матеріалом, який піддається сушінню у зв'язку з тим, що $\theta_1 > 0$. Дана теплова енергія враховується добутком $m_e \Delta$, де Δ – сума теплоти, що додатково підводиться і втрачається у процесі сушіння в кДж/кг, віднесена до 1 кг видаленої вологи. Параметр Δ може бути більшим нуля, коли втрати теплоти незначні, і меншим нуля, коли втрати теплоти значні. Відповідно до положення теорії сушіння ентальпія буде визначатись як:

$$I_2 = I_1 \pm \frac{m_e \cdot \Delta}{m_{ca}}, \quad (2.20)$$

або

$$I_2 - I_1 = \frac{\Delta \cdot (d_2 - d_1)}{1000}. \quad (2.21)$$

Так як в правій частині рівняння (2.21) невідоме d_2 , то неможливо встановити ентальпію I_2 і, відповідно, побудувати

відрізок прямої, який характеризує реальний процес сушіння. Тому спочатку встановлюється напрям прямої BC (рис. 2.10).

При додатному значенні $\Delta > 0$ вона буде розташована вище лінії $I_l = \text{const}$; при від'ємному значенні $\Delta < 0$ – вниз від лінії $I_l = \text{const}$. Якщо на даній прямій взяти будь-яку точку E з координатами I_E та d_E , то можна записати:

$$I_E - I_l = \frac{\Delta \cdot (d_E - d_l)}{1000}. \quad (2.22)$$

Проведемо через точку E вертикаль до перетину з лінією $I_l = \text{const}$, в результаті чого отримаємо точку e , а з точки e проводимо горизонталь до перетину з прямою $d_l = \text{const}$ і отримаємо точку f .

Таким чином, для точки E відрізок fe у певному масштабі буде відповідати $d_E - d_l$, а відрізок $Ee - I_E - I_l$. Тому можемо записати і визначити величину відрізка Ee (мм):

$$Ee = \Delta \frac{(fe)}{1000}. \quad (2.23)$$

Після встановлення масштабу на лінії $I_l = \text{const}$ відкладаємо відрізок Ee (при $\Delta > 0$ вверх і при $\Delta < 0$ вниз) і знаходимо точку E .

Так як для встановлення параметрів відпрацьованого сушильного агента необхідна його температура t_2 , то прямою, яка відображає процес сушіння буде пряма BC при $\Delta > 0$ або BC_l при $\Delta < 0$. Шукані точки C і C_l будуть лежати на лініях,

віддалених на величину $+\frac{m_e \cdot \Delta}{m_{ca}}$ і $-\frac{m_e \cdot \Delta}{m_{ca}}$, по яких можна

встановити параметри φ і d . Даний метод доцільно використовувати, якщо невідоме значення m_{ca} . Якщо це

значення відоме, то за формулою $\frac{m_e \cdot \Delta}{m_{ca}}$ встановлюємо величину

відрізка і відкладаємо його із точки B вверх або вниз. З отриманих точок проводимо паралельні лінії $I_l = \text{const}$ до перетину з ізотермою $t_2 = \text{const}$, що характеризує кінець процесу сушіння. Таким чином також отримаємо точки C і C_l .

знаком плюс. При $d_3 - d_0 = 0$ $m_6 = 0$, так як $W_2 = W_3$. У цьому випадку подача повітря буде необхідна лише для охолодження матеріалу.

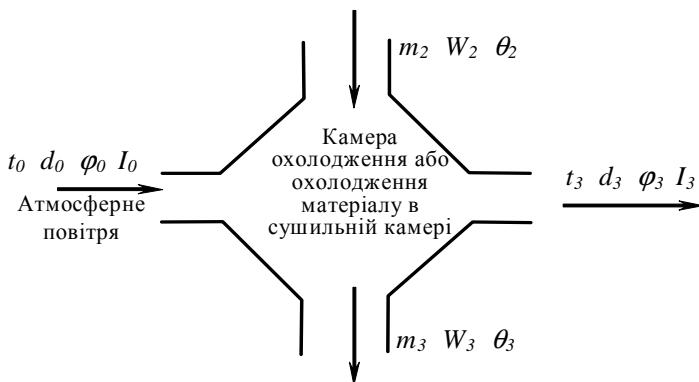


Рис. 2.11. Схема до розрахунку процесу охолодження матеріалу

Процес зміни стану атмосферного повітря в камері охолодження у значній мірі відповідає процесам, які відбуваються в камері сушіння. Джерелом нагрівання служить теплота, накопичена матеріалом і механізмами, які знаходяться у сушильній камері. Розрахунок параметра Δ показує, що він також додатний. При цьому необхідно знати кінцеву температуру матеріалу θ_3 .

Побудова прямої CD і розрахунок параметрів та аналіз процесу охолодження за допомогою $I-d$ -діаграми відбувається аналогічно процесу сушіння, представленого вище (рис. 2.12).

Спочатку визначаємо нахил прямої, що зображає процес охолодження та положення точки E на прямій DC . Розрахунок відрізка Ee виконується згідно (3.23), після цього знаходиться уточнене положення точки E і проводиться лінія DEC до перетину з ізотермою $t_3 = \text{const}$. Отримана точка C характеризує кінцеві параметри атмосферного повітря, яке пройшло крізь сушильну камеру. Вона лежить на лінії $I_3 = \text{const}$ і віддалена від

2.6. Розрахунок сушарок з елементами протитечії

Технологічний процес протитечійних сушарок або сушарок з елементами протитечії характерний тим, що в певний момент часу (аналогічно протитечійним сушаркам) напрям руху матеріалу і рух сушильного агента протилежні одне одному (рис. 2.13). Інтенсивне видалення вологи у таких сушарках відбувається у зоні контакту сушильного агента і матеріалу, і, як показують експериментальні дослідження, залежить від висоти шару матеріалу, який видаляється. Мінімальне значення висоти залежить від конструктивних особливостей вивантажувального механізму, властивостей матеріалу та рівномірності його розміщення як у вертикальних, так і горизонтальних січеннях сушильної камери.

Для розрахунку параметрів такої сушарки необхідно по розрахунковій або експериментальній кривій встановити вологість матеріалу на висоті рівній висоті вивантажувального пристрою, знайти зміну початкового параметру W_n^{n-1} . Для інженерних розрахунків з певним допущенням можна вважати, що у шарі матеріалу, який видаляється за межі сушильної камери:

$$W_h^{cp} = \frac{W_h + W_{кон}}{2}, \quad (2.27)$$

де $W_{кон}$ – кондиційна вологість, %;

W_h – вологість матеріалу на висоті h_k , %.

Кінцева вологість матеріалу при встановленому режимі роботи сушарки з елементами методу протитечії визначається як:

$$W_h^{cp} = \frac{W_h + W_c}{2} = W_2, \quad (2.28)$$

де W_c – вологість матеріалу у зоні його контакту із сушильним агентом, яка відрізняється від $W_{кон}$ на деяке значення $\pm \Delta W$.

При низькотемпературному сушінні основний вентилятор сушарки встановлюється безпосередньо перед сушильною камерою, що дозволяє усунути втрати сушильного агента в

процесі його підготовки. Якщо допустити, що підсос повітря у сушильній камері відсутній, тоді матимемо:

$$L_0 = L_1 = L_{n-1} = L, \text{ кг сп/год.}, \quad (2.29)$$

де n – кількість умовних шарів, які знаходяться у сушильній камері висотою h , що дорівнює висоті шару матеріалу, який видаляється із сушильної камери за цикл.

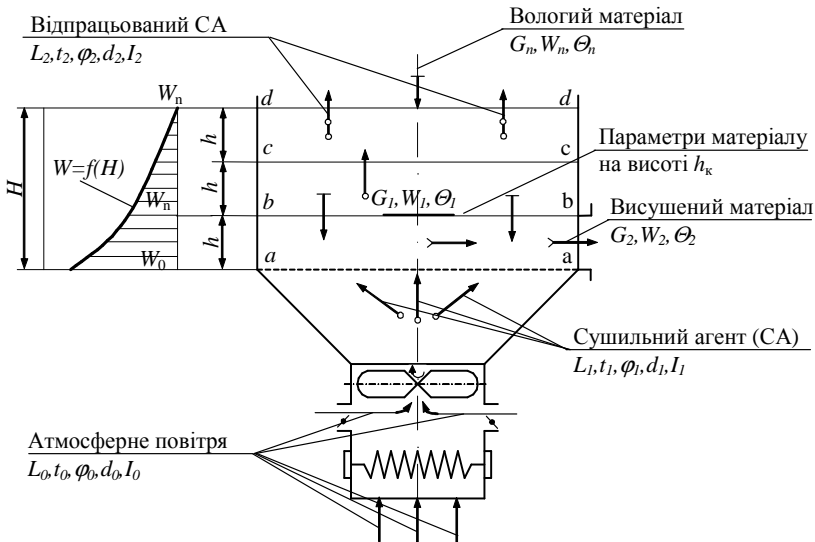


Рис. 2.13. Розрахункова схема сушарки з елементами принципу протитечії

Так як приріст вологовмісту повітря в сушарці відбувається за рахунок води, що випаровується із матеріалу, то годинна кількість води M_2 , яка випаровується із матеріалу, буде визначатись різницею:

$$M_2 = L \left(\frac{d_2 - d_1}{1000} \right), \text{ кг/год.} \quad (2.30)$$

Відповідно, кількість сухого повітря, необхідного для випаровування 1кг води:

$$L = \frac{1000 \cdot M_2}{d_2 - d_1}, \text{ кг сп/год.} \quad (2.31)$$

Об'єм повітря, який необхідно подати в сушильну камеру, м³/год.:

$$V_1 = L \cdot V_{\text{прив.}}, \quad (2.32)$$

де $V_{\text{прив.}}$ – приведений об'єм сушильного агента на вході у шар матеріалу при t_1, φ_1, d_1, I_1 .

Отже, перед початком розрахунків необхідно провести значну кількість експериментальних досліджень, отримати ряд кінетичних параметрів, за емпіричними залежностями отримати цілий ряд показників і тільки тоді можна провести наближені розрахунки теоретичної і реальної сушарок. Реалізація машини можлива при проведенні в великій кількості різних випробувань із врахуванням стандартних і спеціальних методів.

Тепло, яке поступає у сушарку із установки для підготовки сушильного агента Q_{ca} та від попередньо нагрітих поверхонь $Q_{нов}$ у кДж/год., витрачається на випаровування вологи Q_1 із матеріалу:

$$Q_1 = W_2 \cdot (i_n - 4,19 \cdot \theta_1), \quad (2.33)$$

де W_2 – годинна кількість вологи випареної в сушарці, кг/год.;

i_n – тепловміст пари у відпрацьованому сушильному агенті, кДж/кг пари;

4,19 – теплоємність води, кДж/(кг·°C);

θ_1 – температура матеріалу на вході у сушильну камеру, °C;

Втрати тепла Q_2 із сушильним агентом, який виходить із сушарки:

$$Q_2 = L \cdot (1,0 + 0,00197 \cdot d_0) \cdot (t_2 - t_0), \quad (2.34)$$

де L – годинна кількість сухого повітря, яке виходить з сушарки, кг сп/год.;

$1,0 + 0,00197 \cdot d_0$ – приведена теплоємність оточуючого повітря, кДж/(кг·°C);

t_0, t_2 – відповідно температура атмосферного повітря та відпрацьованого сушильного агента, °C;

Витрати тепла Q_3 із матеріалом в процесі вивантаження :

$$Q_3 = G_2 \cdot C_2 \cdot (\theta_2 - \theta_1), \quad (2.35)$$

де G_2 – годинна продуктивність сушарки, кг/год.;

C_2 – теплоємність висушеного матеріалу, кДж/(кг·°C);

θ_1 і θ_2 – відповідно температура матеріалу на вході і виході, °C;

Втрата тепла Q_4 із транспортуючими механізмами, які періодично знаходяться у сушильній камері, кДж/год.;

$$Q_4 = G_m \cdot C_m \cdot (t_3 - t_e), \quad (2.36)$$

де G_m – маса транспортуючих механізмів, віднесена до одиниці часу роботи сушарки, кг/год.;

C_m – теплоємність матеріалу, із якого виготовлений транспортуючий механізм, кДж/(кг·°C), (для сталі $C_m=0,503$ кДж/(кг·°C));

t_e , t_3 – температура ланок транспортуючого механізму відповідно, коли вони знаходяться у сушильній камері та зовні, °C;

Втрата тепла Q_5 в навколишнє середовище через огороження сушарки:

$$Q_5 = 3,6 \cdot A \cdot \left\{ \sum [K \cdot F (t_{en} - t_0)] + Q_n \right\}, \quad (2.37)$$

де A – коефіцієнт, який враховує підвищену теплопровідність матеріалу, з якого виготовлене огороження, при передачі тепла від вологого середовища у сушарці до оточуючого повітря;

K – коефіцієнт теплопередачі огороження, Вт/(м²·°C);

F – площа поверхонь огороження, м²;

t_{en} – температура сушильного агента у зоні контакту із внутрішньої сторони огороження, °C;

Q_n – втрата теплоти через основу сушарки, Вт.

Отже, рівняння балансу теплоти в сушарці буде мати наступний вид:

$$Q_{ca} + Q_{нов} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \quad (2.38)$$

При встановленні затрат тепла на 1 кг випареної вологи, необхідно кожен член правої частини розділити на W_2 .

Крім цього, в процесі експлуатації сушарки можуть виникати і інші втрати. Як правило, їх беруть в межах 130...15% від загальних затрат тепла.

2.7. Теоретичні передумови процесу конвективного сушіння рослинних матеріалів

Конвективне сушіння рослинних матеріалів – складний процес одночасного переносу теплоти і маси. Для проведення розрахунку даного процесу можна застосовувати метод [1], в основу якого покладено спрощений механізм тепло- і масообміну (волога в насінині знаходиться в рідкому стані, тепло- і масообмін відбувається лише між сушильним агентом і насінням, температурний градієнт у середині окремих насінин дуже малий, теплообмін між сушильним агентом і насінням здійснюється конвекцією), який описується диференціальними рівняннями (2.39) – (2.42):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_{ca} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = - \frac{\gamma_m \cdot c_m}{\gamma_{ca} \cdot c_{ca}} \cdot \frac{\partial \theta}{\psi \cdot \partial \tau} - \frac{\gamma_m \cdot r'}{\gamma_{ca} \cdot c_{ca} \cdot \psi} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{100}, \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = - \frac{\gamma_{ca} \cdot \psi}{10 \cdot \gamma_m} \left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_{ca} \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \right), \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_{ca} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = - \frac{\alpha_g \cdot \gamma_m}{\gamma_{ca} \cdot c_{ca} \cdot \psi} \cdot (t - \theta), \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K \cdot (W - W_p), \quad (2.42)$$

де t – температура сушильного агента, °С;

v_{ca} – швидкість сушильного агента, м/с;

x – просторова координата, м;

γ_m, γ_{ca} – об'ємна маса матеріалу і сушильного агента, кг/м³;

c_m, c_{ca} – теплоємність матеріалу і сушильного агента,

кДж/(кг·К);

ψ – шпаруватість насіннєвого шару;

r' – теплота пароутворення води, кДж/кг;

d – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря;

α_g – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К).

Перше рівняння відображає закон збереження енергії в процесі сушіння, друге – закон збереження речовини, останні два – закон тепло- і масообміну між матеріалом і сушильним агентом.

Ступінчатий метод розрахунку процесу сушіння насіння трав базується на послідовному (в часі й просторі) розрахунку процесу сушіння тонкого шару, зміною вологості й температури якого за висотою можна знехтувати. Процес сушіння тонкого насінневого шару протягом часу $\Delta\tau$, за який швидкість сушіння не змінюється, описується алгебраїчними рівняннями (2.43) – (2.46):

$$\Delta t = -\frac{c_m \cdot \gamma_m \cdot \delta}{3600 \cdot v_{ca} \cdot \gamma_{ca} \cdot c_{ca}} \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta\tau} - \frac{\gamma_m \cdot \delta}{3600 \cdot v_{ca} \cdot \gamma_{ca} \cdot c_{ca}} \cdot \frac{r'}{100} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta\tau}, \quad (2.43)$$

$$\Delta d = -\frac{10 \cdot \gamma_m \cdot \delta}{3600 \cdot v_{ca} \cdot \gamma_{ca}} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta\tau}, \quad (2.44)$$

$$\Delta t = -\alpha_g \cdot \frac{\gamma_m \cdot \delta}{3600 \cdot v_{ca} \cdot \gamma_{ca} \cdot c_{ca}} \cdot (\theta - t), \quad (2.45)$$

$$\Delta W = -K \cdot (W - W_p) \cdot \Delta\tau, \quad (2.46)$$

де δ – товщина тонкого шару, м.

Ця система при $\Delta\tau \rightarrow 0$ переходить у систему диференціальних рівнянь (2.39) – (2.42). Таким чином послідовний у просторі (для всіх тонких шарів, які в сумі складають товстий) і часі (починаючи з першого періоду $\Delta\tau$ до закінчення сушіння τ) розв'язок системи (2.43) – (2.46) дає чисельний розв'язок системи (2.39) – (2.42). За товщину тонкого шару доцільно прийняти шар товщиною в одну насінину.

Для тонкого шару матеріалу його температура і температура сушильного агента пов'язані співвідношенням:

$$\theta = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}, \quad (2.47)$$

де t_{i-1}, t_i – температура сушильного агента на вході в i -ий шар і виході з нього, °С.

Рівняння (2.47) дозволяє зняти із розгляду рівняння (2.45) і розраховувати теплообмін в процесі сушіння тонкого шару насінневого матеріалу за рівнянням теплового балансу (2.43) без

врахування коефіцієнту теплообміну і температурного напору, визначення яких – доволі складний процес.

Таким чином для i -го тонкого шару в інтервалі часу $(j-1)\Delta\tau - j\Delta\tau$ розв'язок системи (2.43) – (2.46) з врахуванням кінетичних коефіцієнтів та вказаних обмежень, початкових у момент часу $(j-1)\Delta\tau$ параметрів матеріалу ($W_{i,j-1}$ і $\theta_{i,j-1}$) і сушильного агенту на вході в шар ($t_{j,i-1}$ і $d_{j,i-1}$), а також рівняння (2.47) визначають параметри сушильного агенту на виході із шару

$$t_{i,j} = (1 - A)t_{i-1,j} + A \cdot \theta_{i-1,j} - B \cdot K \cdot (W_{i-1,j} - W_p) \cdot \Delta\tau, \quad (2.48)$$

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} + \frac{K}{10,2} \cdot (W_{i,j-1} - W_p), \quad (2.49)$$

і матеріалу в момент $j\Delta\tau$

$$W_{i,j} = W_{i,j-1} - K(W_{i,j-1} - W_p)\Delta\tau, \quad (2.50)$$

$$\theta_{i,j} = \frac{t_{i-1,j} + t_{i,j}}{2}, \quad (2.51)$$

де
$$A = \frac{c_m}{102\Delta\tau c_{ca} + 0,5c_m}, \quad (2.52)$$

$$B = \frac{0,01r'}{102\tau c_{ca} + 0,5c_m}. \quad (2.53)$$

Також відома математична модель процесу сушіння сипкого матеріалу в шахтних сушарках [2], що описується диференціальними рівняннями (2.54) – (2.57):

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_m \cdot \frac{\partial W}{\partial x} = -\beta \cdot m' \cdot \frac{76}{\gamma_m \cdot v' \cdot b} \cdot (P_n - P_n), \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_m \cdot \frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{\gamma_{ca} \cdot \psi}{10 \cdot \gamma_m} \cdot \left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_{ca} \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \right), \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_{ca} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\alpha_g \cdot \gamma_m}{\gamma_{ca} \cdot \psi \cdot c_{ca}} \cdot (t - \theta), \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_{ca} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\gamma_m \cdot c_m}{\gamma_{ca} \cdot \psi \cdot c_{ca}} \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_m \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\gamma_m \cdot r'}{100 \cdot \gamma_{ca} \cdot \psi \cdot c_{ca}} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \tau} + 3600 \cdot v_m \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \right), \quad (2.57)$$

де v_m – швидкість матеріалу, м/с;

b – барометричний тиск сушильного агента, мм.рт.ст.;

β – коефіцієнт випаровування води з вільної поверхні, г/(год·м²·мм.рт.ст.);

m' – частка геометричної зовнішньої поверхні насінини, з якої відбувається випаровування за законом Дальтона;

v' – відношення об'єму насінневої маси до зовнішньої поверхні насіння;

P_n – тиск насиченої пари, мм.рт.ст.;

P_n – парціальний тиск пари в сушильному агенті, мм.рт.ст.

В багатьох країнах проводяться роботи з метою зменшення витрат енергії на сушіння зерна та інших сільськогосподарських продуктів. Основна увага приділялась економії теплової енергії, що складає 90% від усіх енергетичних затрат на сушіння [3, 4].

З вище викладеного випливає, що проведені глибокі дослідження процесу сушіння зернових, льону та інших культур дали можливість внести ясність у багато питань, які стосуються механізації процесу сушіння. У той же час процес сушіння вороху насіння трав досліджений недостатньо.

2.8. Дослідження процесу сушіння шару матеріалу з елементами методу протитечії

Дослідження процесу конвективного сушіння вороху насіння трав проведено на лабораторній установці, яка складається з вентилятора 1, калорифера 2, гнучкого з'єднання 3, сушильної камери 4, де встановлено вісім касет з перфорованим днищем 5. Для регулювання температури сушильного агента, який подається в сушильне відділення, нагрівальні елементи калорифера обладнані вимикачами. Для регулювання витрати і швидкості подачі сушильного агента

встановлена заслінка 6 на вхідному отворі калорифера та заслінка 7 на вході вентилятора (рис. 2.14, рис. 2.15).

Дослідна установка працює так: вологе атмосферне повітря вентилятором подається до калорифера, де нагрівається до заданої температури, і повітропроводом подається у сушильну камеру. В сушильній камері сушильний агент проходить крізь касети, які наповнені ворохом насіння трав. Відпрацьований сушильний агент виводиться із сушильної камери.

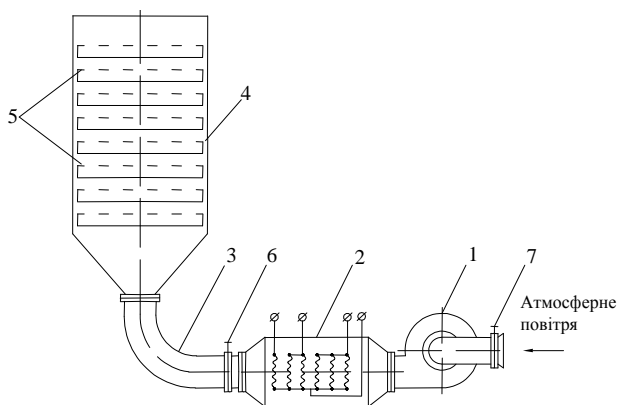


Рис. 2.14. Схема лабораторної установки для дослідження процесу сушіння вороху насіння трав: 1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – гнучке з'єднання; 4 – сушильна камера; 5 – касети з перфорованим днищем; 6, 7 – заслінки

Експериментальне дослідження процесу сушіння вороху насіння трав проводились після пуску установки, встановлення потрібних теплових та аеродинамічних характеристик теплоносія, підготовки партії матеріалу і визначення режиму підводу теплоносія.

Дослідження проводились за наступною методикою При ввімкненому вентиляторі за допомогою заслінки, що встановлена на всмоктувальному отворі вентилятора і вимикачів калорифера встановлювали необхідний температурний режим та

швидкість подачі сушильного агента. При цьому, певний час (10 – 15 хв), установка працювала в холостому режимі. Після чого відключали вентилятор.



Рис. 2.15. Лабораторна установка для дослідження процесу конвективного сушіння вороху насіння трав

Перед проведенням дослідів матеріал і касети зважили. Заповнені та пронумеровані касети вставляли в сушильну камеру вертикально одна на одну і розпочинали процес сушіння. Зважування касет разом із ворохом насінням трав здійснювали через кожні 10 хвилин протягом часу сушіння. Після чого касету з ворохом знову встановлювали у лабораторну установку та продовжували сушіння. Підраховуючи різницю між масою касети із матеріалом та порожньої касети визначали масу вороху. Шляхом проведення розрахунків встановлено зміну відносної вологості матеріалу за формулою:

$$W_i = 100 - \frac{m_0}{m_i} (100 - W_0) \quad (2.62)$$

де W_0 та W_i – початкова відносна вологість матеріалу та після i -го заміру, %;

m_0 та m_i – маса матеріалу початкова та після i -го заміру, кг.

Сушіння вороху насіння трав здійснювалось за трьома варіантами. За першим варіантом матеріал вентилювався тільки сушильним агентом з температурою $50 \div 55^\circ\text{C}$ протягом усього

часу сушіння, який становив для всіх варіантів 60 хв. В другому варіанті у сушильну камеру подавали атмосферне повітря, температура якого $19 \div 23^{\circ}\text{C}$. У третьому варіанті сушіння відбувалося при поперемінній подачі сушильного агента і атмосферного повітря. При цьому періоди подачі сушильного агента та атмосферного повітря були рівними між собою $\tau_n = \tau_o = 10$ хв.

Проведена обробка дослідних даних дала змогу отримати криві сушіння матеріалу та встановити зміну вологості вороху насіння трави протягом періоду сушіння (рис. 2.16 – 2.21).

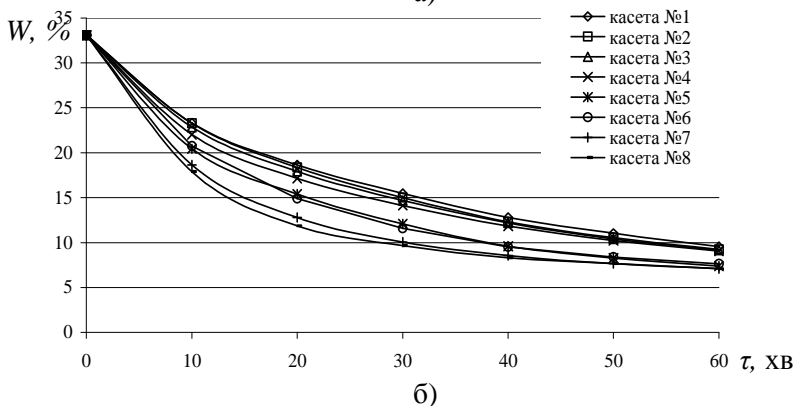
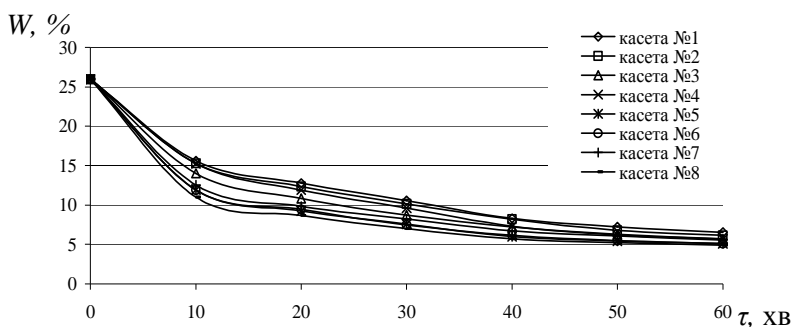


Рис. 2.16. Зміна вологості вороху насіння вівсяниці лучної з часом при вентиляванні сушильним агентом температурою $t_{ca} = 50 \div 55^{\circ}\text{C}$: а – $W_n = 25,98\%$; б – $W_n = 33,08\%$

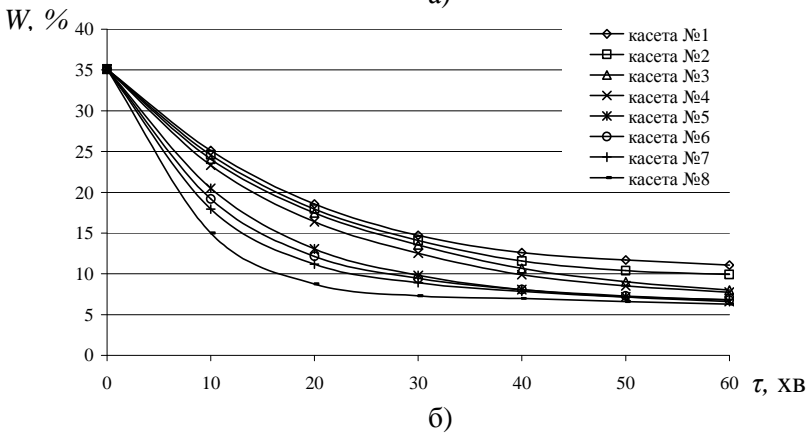
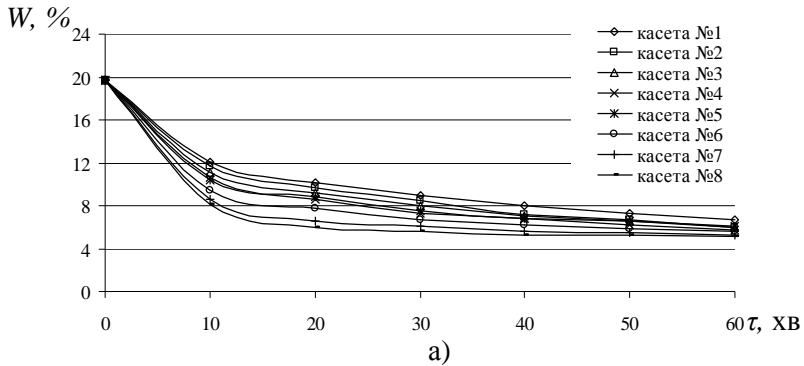
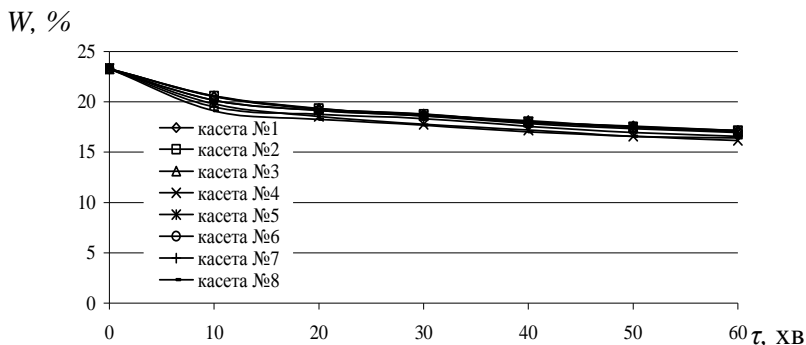
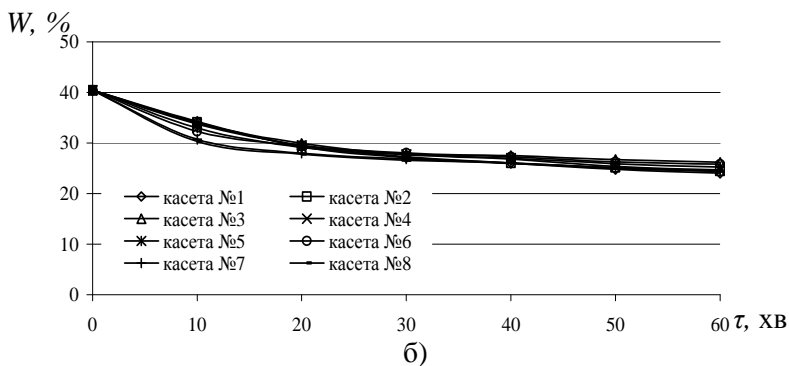


Рис. 2.17. Зміна вологості вороху суміші насіння вівсяниці лучної та райграса пасовищного з часом при вентильованні сушильним агентом температурою $t_{ca} = 50 \div 55^\circ\text{C}$: а – $W_n = 19,75\%$; б – $W_n = 35,12\%$

Аналіз отриманих експериментальних результатів показує, що підвищення температури сушильного агента (рис. 2.16, рис. 2.17) інтенсифікує процес сушіння, в результаті чого скорочується тривалість термічної обробки насіння у 1,4 рази. З цією метою в подальшому необхідно уточнити час та гранично допустиму температуру сушильного агента, що контактує із насіннєвим матеріалом.



а)



б)

Рис. 2.18. Зміна вологості вороху насіння вівсяниці лучної з часом при вентилюванні атмосферним повітрям температурою $t_{an} = 19 \div 26^\circ\text{C}$: а – $W_n = 24,16\%$; б – $W_n = 40,44\%$

Протягом періоду дії на насінневий матеріал атмосферного повітря спостерігається перерозподіл та вирівнювання вологи за об'ємом шару матеріалу, що відображається на графіку (рис. 2.18, рис. 2.19) горизонтальними лініями. Сушіння вороху насіння трав із використанням коливного температурного режиму (рис. 2.20, рис. 2.21) дозволяє забезпечити часткове вирівнювання вологості між шарами матеріалу під час періодів “охолодження”. Відтак вдається досягти рівномірнішого просушування вороху насіння трав.

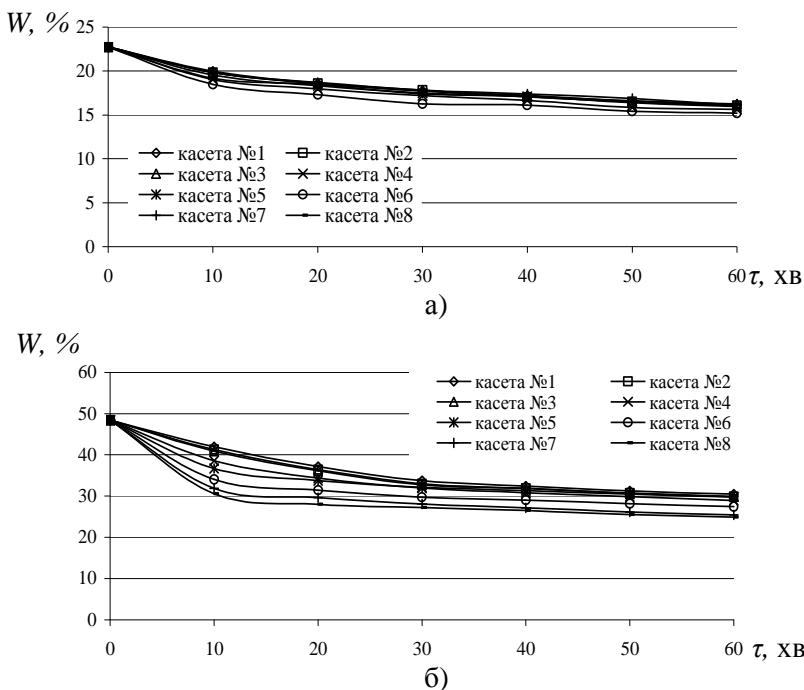


Рис. 2.19. Зміна вологості вороху суміші насіння вівсяниці лучної та райграса пасовищного з часом при вентиляванні атмосферним повітрям температурою $t_{an} = 19 \div 26^\circ\text{C}$: а – $W_n = 22,73 \%$; б – $W_n = 48,36 \%$

Тривалість періодів “нагрівання” та “охолодження” має бути достатньою, щоб забезпечити прогрів матеріалу та недопустити його переохолодження, адже на наступне “нагрівання” матеріалу та обладнання буде витрачатися додаткова енергія.

Застосування коливних температурних режимів призводить до збільшення загального часу сушіння, однак дає можливість значно знизити витрати на підготовку сушильного агента.

Порівняльний аналіз експериментальних кривих свідчить про доцільність дослідження і застосування коливних температурних режимів сушіння з метою розробки енергозберігаючих засобів сушіння бороху насіння трав.

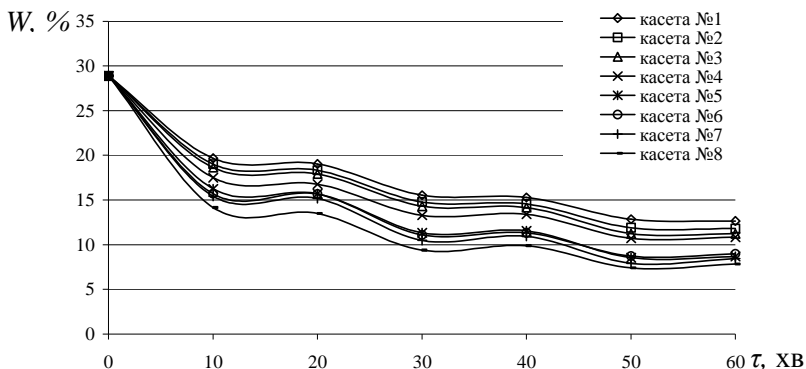


Рис. 2.20. Зміна вологості бороху насіння вівсяниці лучної з часом при поперемінній подачі сушильного агента температурою $t_{ca} = 50 \div 55^\circ\text{C}$ та атмосферним повітрям температурою $t_{an} = 19 \div 26^\circ\text{C}$ ($W_n = 28,88\%$)

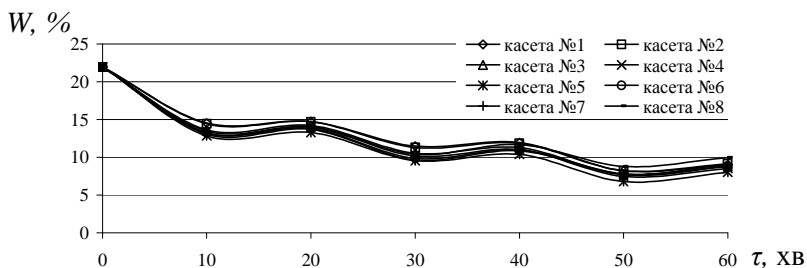


Рис. 2.21. Зміна вологості бороху суміші насіння вівсяниці лучної та райграса пасовищного з часом при поперемінній подачі сушильного агента температурою $t_{ca} = 50 \div 55^\circ\text{C}$ та атмосферним повітрям температурою $t_{an} = 19 \div 26^\circ\text{C}$ ($W_n = 21,96\%$)

2.9. Математичне моделювання коливного температурного процесу при сушінні матеріалів

Сушіння насіннєвих сільськогосподарських матеріалів вимагає “м’яких” температурних режимів, які досягаються у сушарках з нерухомим шаром, або коли в процесі вивантаження у технологічній схемі сушарки використовуються елементи протитечії.

У таких сушарках температура сушильного агента не перевищує 100°C, зростає як час нагрівання так і експозиція сушіння загалом.

Підвищення ефективності використання таких сушарок залежить від вдосконалення режимів сушіння. Воно полягає у використанні коливного температурного процесу з метою інтенсифікації вологовіддачі у всіх періодах сушіння і нагрівання, постійної та падаючої швидкості сушіння.

Сушіння матеріалу в кінцевому варіанті являє собою масообмін вологи між матеріалом і навколишнім середовищем. При цьому обов’язковим являється також перенесення вологи із середини матеріалу до його поверхні. Активізація вказаних процесів у період постійної швидкості сушіння можлива при збільшенні рухаючих сил, якими є градієнти перенесення вологи. Особливу увагу необхідно звернути на градієнт температур, як рухаючу силу в процесах при передачі тепла.

Для максимального використання потенціалу сушильного агента пропонується застосувати коливний температурний процес, що передбачає почергове підведення сушильного агента та атмосферного повітря [5].

Для конвективного теплообміну швидкість сушіння в період постійної швидкості для капілярно-пористих колоїдних тіл можна визначити по формулі Ньютона:

$$\alpha \cdot (t_{ca} - t_n) = \frac{N \cdot \rho_0 \cdot R_v}{100}, \quad (2.63)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·°C);

t_{ca} – температура сушильного агента, °C;

t_n – температура поверхні матеріалу, °C;

ρ_0 – густина сухого матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

R_v – відношення об'єму тіла до його поверхні, $\text{м}^3/\text{м}^2$.

Коливний температурний процес сушіння сільськогосподарських матеріалів, який досягається шляхом почергового їх нагрівання і охолодження, дозволяє забезпечити умови інтенсивного переміщення вологи із внутрішніх шарів до поверхні.

Аналіз досліджень показує, що для створення моделі такого процесу достатньо зробити допущення, що період нагрівання (охолодження) підкоряються лінійному закону, схема якого зображена на рис. 2.22.

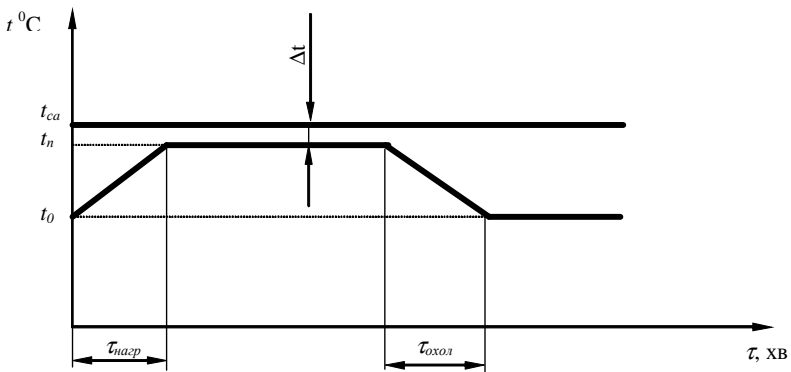


Рис. 2.22. Характер зміни температури при коливному процесі

На схемі позначено:

t_0 – температура навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$;

t_{ca} – температура сушильного агента, $^{\circ}\text{C}$;

Δt – різниця температур сушильного агента і поверхні матеріалу при режимі нагріву, що встановився, $^{\circ}\text{C}$;

t_n – температура поверхні матеріалу при постійній швидкості сушіння, $^{\circ}\text{C}$;

$\tau_{нагр}$ – час прогріву матеріалу, с;

$\tau_{охол}$ – час охолодження матеріалу, с.

У процесі сушіння матеріалу при поперемінному його нагріванні і охолодженні температура поверхні матеріалу визначатиметься як:

$$\text{при } \tau \leq \tau_{нагр} \quad t_n(\tau) = t_0 + \frac{\tau \cdot (t_{ca} - \Delta t - t_0)}{\tau_{нагр}}, \quad (2.64)$$

$$\text{при } \tau \leq \tau_{охол} \quad t_n(\tau) = t_0 + \frac{\tau \cdot (t_{ca} - t_0)}{\tau_{охол}}. \quad (2.65)$$

Інтегруючи рівняння для визначення швидкості сушіння матеріалу Ликова А.В., отримаємо:

$$W = W_{\kappa} + (W_n - W_{\kappa}) \cdot e^{-K\tau} = W_{\kappa} + (W_n - W_{\kappa}) \cdot e^{-\chi N\tau}, \quad (2.66)$$

де W_n і W_{κ} – відповідно, значення початкової і кондиційної вологості;

K – коефіцієнт сушіння;

χ – відносний коефіцієнт сушіння.

З рівняння (2.63) швидкість сушіння визначатиметься як:

$$N = \frac{100 \cdot \alpha \cdot (t_{ca} - t_n)}{\rho_0 \cdot R_v}. \quad (2.67)$$

З врахуванням того, що відносний коефіцієнт сушіння $\chi = 1,8/W_n$, отримаємо:

$$W = W_{\kappa} + (W_n - W_{\kappa}) \cdot e^{-\frac{180 \cdot \alpha \cdot (t_{ca} - t_n)}{W_n \cdot \rho_0 \cdot R_v}}, \quad (2.68)$$

де $t_n(\tau)$ – визначається згідно (2.64) та (2.65).

2.10. Енергетична оцінка сушіння рослинних матеріалів

Ворох насіння трав, як і врожай більшості культур, у зв'язку з несприятливими природно-кліматичними умовами після збирання може мати вологість більшу від кондиційної. Надмірна вологість негативно впливає на якість матеріалу при його зберіганні і, як наслідок, призводить до значних втрат. Постає проблема ефективного якісного зниження вологості. Результату можна досягти засобами штучного сушіння. Найбільш доцільним є застосування методу протитечії

сушильного агенту з перемішуванням матеріалу в процесі сушіння.

Використання методу протитечії або його елементів у порівнянні із сушінням сільськогосподарських рослинних матеріалів у нерухомому шарі з точки зору збереження енергії вигідно з наступних причин:

– збереження якості матеріалу у нижніх шарах зі сторони подачі сушильного агента, особливо насінневих, шляхом механічного видалення його із сушильної камери при досягненні кондиційної (кінцевої) вологості, крім цього, даний метод дозволяє виключити витрати енергії, яка йде на пересушування матеріалу;

– збільшення загальної висоти шару в процесі виконання технологічного процесу сушіння, особливо стеблових матеріалів, сформованих у рулони з горизонтальною віссю обертання, можливе лише при використанні даного методу.

Але у будь-якому випадку ефективності використання відповідного методу можна досягти лише за умови забезпечення його необхідними засобами механізації. Тому дану проблему необхідно розглядати комплексно.

У загальному випадку питомі ресурсовитрати для отримання продукції у сільськогосподарському виробництві можуть бути виражені коефіцієнтом K .

Запропонована нижче формула дозволяє визначитись із першочерговими задачами, вирішення яких дозволяє знизити собівартість продукції при її виробництві.

Як приклад, з врахуванням специфічних особливостей технологічного процесу виробництва насіння трав, питомі ресурсовитрати будуть визначатись за наступною залежністю:

$$K = \frac{P}{3} = \frac{P_l + P_m f \left[(M - \Delta M); (K - \Delta K); (H - \Delta H) \right]}{B_l - (B_n - \Delta B_n) - (T_c - \Delta T_c)} + \frac{P_e f \left[(E_c - \Delta E_c) + (E_m - \Delta E_m) \right] + P_c + P_n}{B_l - (B_n - \Delta B_n) - (T_c - \Delta T_c)}, \quad (2.58)$$

де P – загальні ресурсовитрати, які необхідні для виробництва продукції;

Z – загальна маса насіння трав у стані, придатному для реалізації;

P_l, P_c, P_n – ресурсозатрати, які необхідні для вирощування культури та післязбирального обробітку вороху насіння трав;

B_l – агрономічна врожайність;

B_n, T_c – втрати, відповідно, насіння;

P_m – ресурсозатрати, пов'язані з виготовленням та експлуатацією комплексу машин для післязбирального обробітку насіння трав, які функціонально залежать від металомісткості машини (M), її конструктивної складності (K), а також коефіцієнту надійності (H), який визначається відношенням часу ефективної роботи до часу простоїв при виникненні відмов;

P_e – ресурсозатрати, пов'язані з енергоносіями.

Безумовно, зниження металомісткості (ΔM) окремих вузлів комплексу машин, спрощення конструкції окремих вузлів (ΔK) приводів і рамних конструкцій без зниження якості виконання технологічного процесу післязбирального обробітку, позитивно впливає на показник питомих ресурсовитрат (K). Відповідно, підвищення коефіцієнту надійності (ΔH) агрегатів машин зменшить час їх простоїв на відновлення і ремонт та сприятиме зниженню собівартості продукції.

Особливу увагу при зниженні ресурсозатрат у технологічному процесі післязбирального обробітку продукції льонарства необхідно звертати на ресурсозатрати, які пов'язані із енергоносіями. Їх умовно можна розділити на дві групи:

(E_{ca}) – енерговитрати, які пов'язані із підготовкою сушильного агента;

(E_m) – енерговитрати, які йдуть на забезпечення виконання технологічного процесу засобами механізації.

Зрозуміло, що ефективність енерговитрат, пов'язаних із підготовкою сушильного агента (E_{ca}) залежить від максимально можливого використання його потенціалу, а також методу конвективного способу сушіння. Для сушіння продукції льонарства використовують два методи: у нерухомому товстому шарі і у нерухомому товстому шарі з елементами протитечії,

який дозволяє виключити витрати енергії, які йдуть на пересушування матеріалу у зоні контакту із сушильним агентом.

Згідно рівняння теплового балансу, кількість теплоти, яку необхідно затратити на висушування матеріалу від початкового значення U_n до кінцевого (кондиційного) U_κ визначається як:

$$Q_\kappa = q_n \cdot \rho_c (U_n - U_\kappa), \quad (2.59)$$

де q_n – теплота пароутворення, кДж/кг;

ρ_c – щільність абсолютно сухого матеріалу, кг/м³.

Відповідно, при зниженні вологовмісту від кінцевого U_κ до рівноважного U_p , витрати теплоти будуть визначатись із аналогічної залежності:

$$Q_p = q_n \cdot \rho_c (U_\kappa - U_p). \quad (2.60)$$

Якщо сумарні затрати теплоти, яка необхідна для висушування матеріалу від початкового U_n до рівноважного значення прийняти за 100%, то ефективність використання методу протитечії буде характеризуватись показником E_n , який визначається як:

$$E_n = \frac{Q_p}{Q_\kappa + Q_p} \cdot 100 = \frac{U_\kappa - U_p}{U_n + U_p} \cdot 100. \quad (2.61)$$

Проведенні розрахунки за формулою (2.61) та побудова кривої $E=f(U_n)$ з наступним накладенням пучка типових кривих зниження вологовмісту матеріалів у товстому нерухомому шарі і їх аналіз свідчать про ефективність методу протитечії, який характеризується зростанням показника E_n із зниженням початкового вологовмісту матеріалу. Розрахунки показують, що загальні витрати при цьому зменшуються від 10 до 25 %.

Інтенсифікувати процес сушіння методом протитечії можна шляхом зменшення висоти шару матеріалу, який видаляється із сушильної камери. Тоді кожен наступний шар, який попадає у зону контакту із сушильним агентом буде мати вологовміст $U_n^{n-1} \ll U_n$, а показник E_n , згідно рис. 2.23 буде зростати, якщо початковий вологовміст матеріалу коливається в межах $U_n = 0,23 \dots 0,54$ кг/кг.

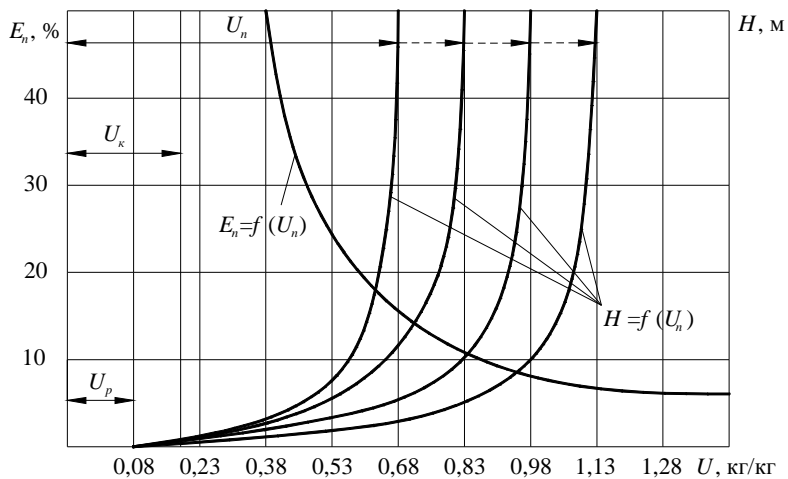


Рис. 2.23. Ефективність сушіння матеріалу методом протічії в залежності від початкової вологості

РОЗДІЛ 3. ЗАСОБИ МЕХАНІЗАЦІЇ СУШІННЯ СИПКИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Вибір способу і методу сушіння

Існує три основних напрямки (рис. 3.1) видалення вологи із матеріалів: фізико-хімічний, механічний і тепловий.

Фізико-хімічний – побудований на поглинанні вологи гігроскопічними речовинами, які мають значну сорбційну здатність. Такими речовинами є вапно, хлористий кальцій і ряд інших. Даний спосіб використовують у деяких випадках при видаленні вологи із газів і рідин.



Рис. 3.1. Класифікація основних способів сушіння рослинних сільськогосподарських матеріалів

Механічний – призначений для видалення вологи із матеріалів, які мають високу початкову вологість. Для цього використовують пресування, фільтрацію та центрифугування.

Тепловий – пов’язаний із зміною агрегатного стану води.

Аналіз вказаних напрямків показує, що для сільськогосподарських рослинних матеріалів найбільш доцільно застосувати тепловий спосіб.

Серед великої кількості способів у господарствах при вирощуванні сільськогосподарських культур знайшли широке застосування лише два способи сушіння: радіаційний та конвективний.

Радіаційний – характеризується тим, що теплота підводиться до матеріалу у вигляді променів сонячної енергії. Це природне зниження вологості.

Конвективний – спосіб, при якому тепло передається конвекцією від сушильного агента до матеріалу. Під сушильним агентом розуміють нагріте атмосферне повітря або ж суміш паливних газів з повітрям.

На сьогоднішній день для сушіння сільськогосподарських матеріалів найбільш ефективним являється конвективний спосіб теплопередачі. При цьому, в залежності від конструкції сушарки, в ній може бути використаний певний метод, який характеризує стан матеріалу в процесі сушіння.

В залежності від взаємного руху сушильного агента і матеріалу розрізняють наступні методи (рис. 3.2) сушіння: у нерухомому шарі, у рухомому шарі, у псевдорідкому і завислому.

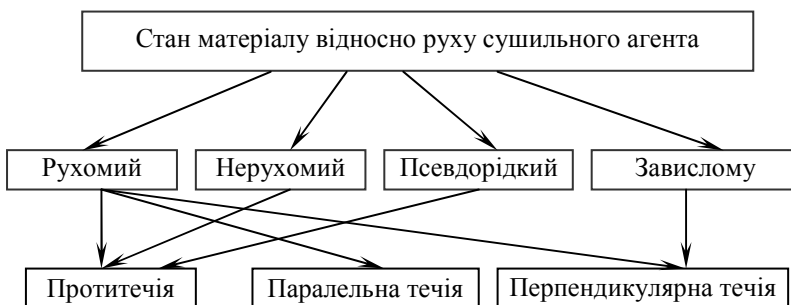


Рис. 3.2. Методи сушіння сільськогосподарських матеріалів

По відношенню до рухомого шару матеріалу характерні наступні переміщення сушильного агента:

- протитечія;
- паралельна течія;
- перпендикулярна течія.

Вище перераховані методи конвективного способу, покладені в основу конструкцій шахтних, барабанних і різного типу напільних сушарок. Для багатьох сільськогосподарських рослинних матеріалів, особливо малосипких або зв'язних, оптимальними виявились сушарки напільного типу, які дають “м'які” режими роботи при максимальній механізації та високу ступінь використання потенціалу сушильного агента за рахунок застосування елементів методу протитечії.

3.2. Конструкції сушарок рослинних матеріалів

Конструкції конвективних сушарок надзвичайно різноманітні, вони відрізняються за принципом роботи, за особливостями підведення сушильного агента, за повторністю його використання та за конструкційним виконанням. Аналізуючи відомі конструкції сушарок, можна запропонувати наступну їх класифікацію (рис. 3.3.).

В останні роки в господарствах України для сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів в основному застосовуються барабанні (СЗСБ-8; СЗПБ-2,5; СЗСБ-4,0; СБ-0,5; СБ-1,7; СБ-2,5; СБ-1,4-4), напільні (СТ-50) та карусельні сушарки (СКМ-1; СКС-100). Окремі господарства використовують і інші типи сушарок, такі як, наприклад, конвективні (СКУ-2,5; СКУ-5; СКУ-10; СКУ-15; УСК-8), лоткові, платформові, жалюзі (СЗЖ-10), бункери активного вентилявання (СБВС-5), шахтні (СЗШР-16, СЗШР-8, М-819, Т-662), колонкові (СЗ-6, СК-5, СоСС-2). Для комплектування сушарок промисловість випускає топочні блоки і теплогенератори (ТБ; ТАУ-0,75; ТАУ-1,5; ТГ-1; ТГ-2,5; ТГ-150 і інші).

Барабанна сушарка СЗСБ-8 (рис. 3.5) складається з топки 1, завантажувальної камери 2, сушильної камери 3 з приводним механізмом, розвантажувальної камери 4, охолоджувальної колонки 5 та електрообладнання.

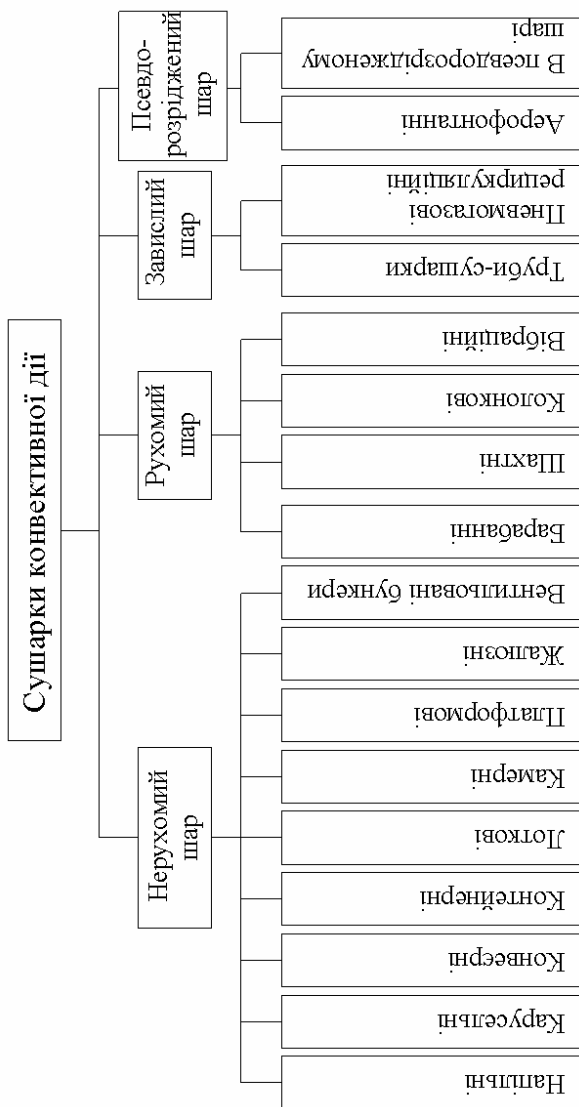


Рис. 3.3. Класифікація сушарок конвективної дії

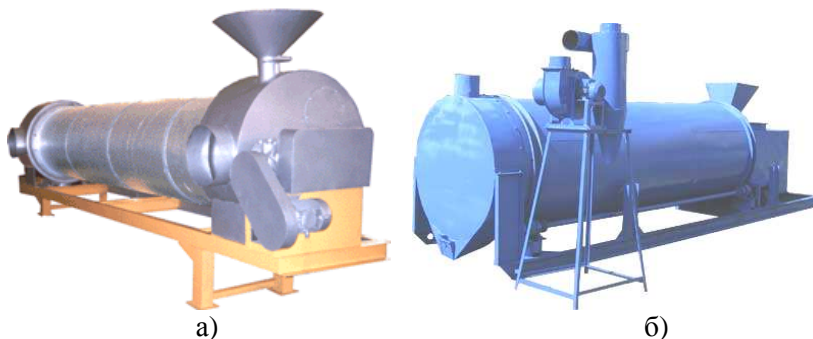


Рис. 3.4. Загальний вигляд барабанних сушарок: а – СБ-2;
б – СБ-1,4

Основним елементом барабанних сушарок є сушильна камера у вигляді горизонтального або похилого циліндричного барабана, що обертається навколо осі з частотою $2...6 \text{ хв}^{-1}$, і всередині якого вздовж пересувається та сушиться матеріал. Нахил барабана відносно горизонтальної осі – $2...15^\circ$. Залежно від продукту, що сушиться, всередині барабана встановлюють різного типу насадки з лопатями і полицками. Насадки перемішують матеріал в процесі сушіння і рівномірно розподіляють його перерізом барабана. Перед роботою сушарку прогрівають $10...15 \text{ хв}$ без насіння, потім включають привід і подають в завантажувальну камеру насіння та встановлюють подачу теплоносія за рахунок розрідження, створюваного вентилятором.

Термін перебування насіння у сушильному барабані – $10...15 \text{ хв}$, при цьому вологість насіння знижується на $3...5 \%$, відтак необхідно повторювати процес сушіння на даній сушарці 2-3 рази або встановлювати лінію з декількох машин. Це є одним із основних недоліків барабанних сушарок.

Особливості роботи сушарок барабанного типу передбачають використання перспективних і ефективних методів, що базуються на досягненнях сучасних технологій та наукових розробок у галузі сільського господарства. Недоліками існуючих барабанних сушарок є низька ефективність роботи внаслідок недостатнього перемішування матеріалу напрямними

пластинами, неповного використання потенціалу сушильного агенту, великої довжини барабанного робочого органу, малої площі контакту сушильного агента і матеріалу, втрат швидкості сушильного агента при його вході та виході з барабанного робочого органу, в результаті різких змін перерізів об'ємів, малий ступінь перемішування матеріалу у зовнішньому циліндричному барабані внаслідок відсутності підйомно-лопатевої насадки, висока складність конструкції порівняно з можливою зміною часу обробки матеріалу.

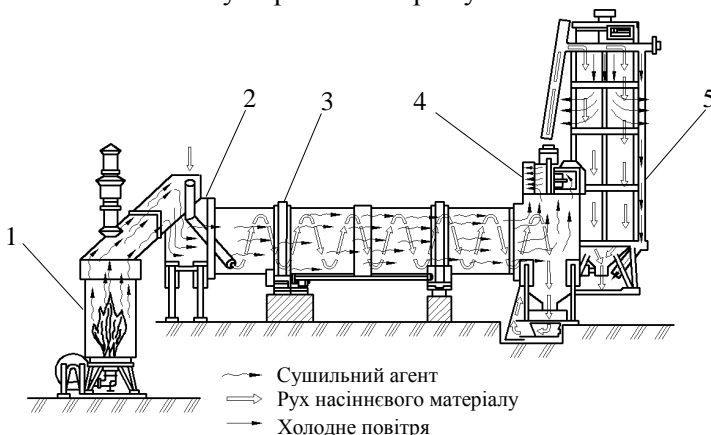


Рис. 3.5. Схема технологічного процесу барабанної сушарки СЗСБ-8: 1 – топка; 2 – завантажувальна камера; 3 – сушильний барабан; 4 – розвантажувальна камера; 5 – охолоджувальна колона

У барабанних сушарках є й переваги, які дозволяють працювати з засміченим, малосипким матеріалом будь-якої вологості. Але великий вміст соломистих домішок збільшує ризик пожежі при експлуатації даних сушарок.

Конструкція напівної сушарки СТ-50 (рис. 3.6) складається з паливного агрегату 1 і сушильної камери 2. Завантаження насіння в сушильну камеру проводять за допомогою самоскидів або навантажувачів. Висоту шару насіння встановлюють залежно від вологості.

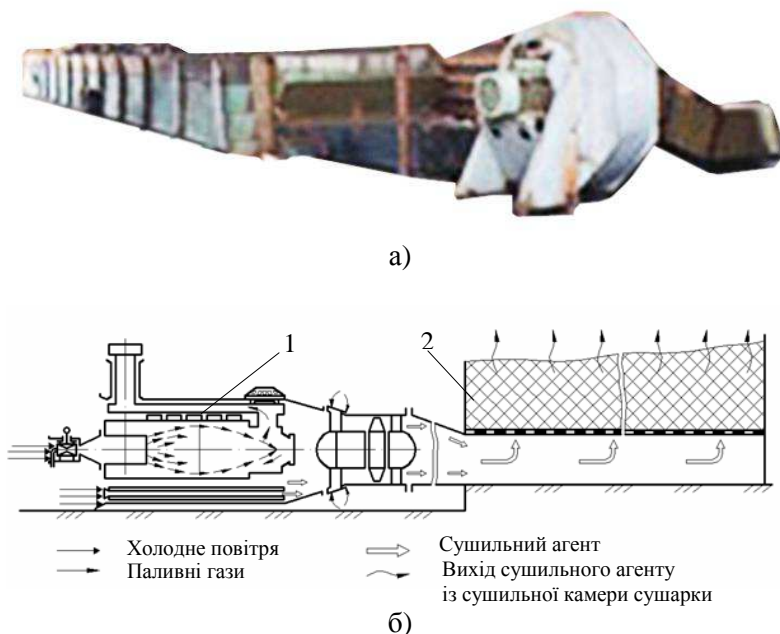


Рис. 3.6. Загальний вигляд (а) та схема технологічного процесу сушіння (б) напільної сушарки СТ-50: 1 – паливний агрегат; 2 – сушильна камера

При вологості вороху насіння у 20 % висота шару не більше 2,0 м, при 30 % – 1,2 м. Час сушіння, залежно від вологості вороху насіння, – від 10 до 36 годин. Вентилюють ворох підігрітим (на 2...3°C) атмосферним повітрям [1]. Процес сушіння припиняють, коли вологість верхнього шару насіння досягає 17...18 %. Висушений матеріал вивантажують із сушильної камери за допомогою вивантажувача або вручну.

Перевагою сушарок напільного типу, якщо порівнювати з барабанними, варто вважати той факт, що температура нагріву насіння на вході в сушарку через деякий час дорівнює температурі сушильного агента, в результаті чого не відбувається перегрів, а, значить, зберігаються посівні якості насіння. Крім цього, умови роботи сушарки дозволяють контролювати температуру нагріву насіння.

Однак напільні сушарки мають і недоліки: низький рівень механізації завантаження і вивантаження насіння, а також нерівномірність сушіння за висотою і площею сушильної камери. Сушіння насіння в напільних сушарках відбувається при “м’яких” теплових режимах, що сприятливо впливає на його посівні якості.

Карусельна сушарка відрізняється від інших сушарок тим, що працює за методом протитечії, при якому вологий матеріал рухається назустріч сушильному агенту. При досягненні у нижньому шарі заданої вологості, матеріал відводиться вивантажувальним пристроєм, що унеможливує пересушування матеріалу. А тому насіння зберігає високі посівні якості. При цьому вологий матеріал одночасно подається на платформу зверху. Сушильний агент, пронизуючи шар матеріалу, який за висотою значно більший, ніж у інших сушарках із нерухомим шаром вороху насіння, повністю використовує свій потенціал, що дозволяє економити теплову енергію у процесі сушіння.

Карусельна протитечійна сушарка СКМ-1 (рис. 3.7) складається з кільцевої сушильної камери 1, яка утворена перфорованою платформою, що обертається, і з’єднаними з нею внутрішньою і зовнішньою огорожею. Нижня частина зовнішньої огорожі нерухома. Вона має вікно для введення робочого органу вивантажувального пристрою 2 і ролики для переміщення верхньої рухомої частини зовнішньої огорожі. Остання обертається внаслідок сил тертя в матеріал при максимально заповненій сушильній камері. Така конструкція забезпечує легке обертання каруселі і відсутність втрат повітря вздовж стінок камери. Відцентровий вентилятор 3, роботу котрого забезпечує електродвигун, подає в карусельний пристрій повітря, підігріте паливним блоком 4. Завантажувальний пристрій 5 – це система стрічкових, гребінчастих та скребкових транспортерів. Основним завданням даного пристрою є забезпечення рівномірної подачі матеріалу у сушильну камеру. Як показує практика, такий пристрій не завжди задовольняє висунуті вимоги, особливо при підвищеній вологості компонентів, які входять до складу вороху насіння трав.

Відповідно, після висушування ворох необхідно також пошарово вивести із сушильної камери зі сторони подачі сушильного агенту. Тому для забезпечення виконання вказаних функцій необхідний вивантажувальний пристрій 2, який має високу металоємність і енергоємність.

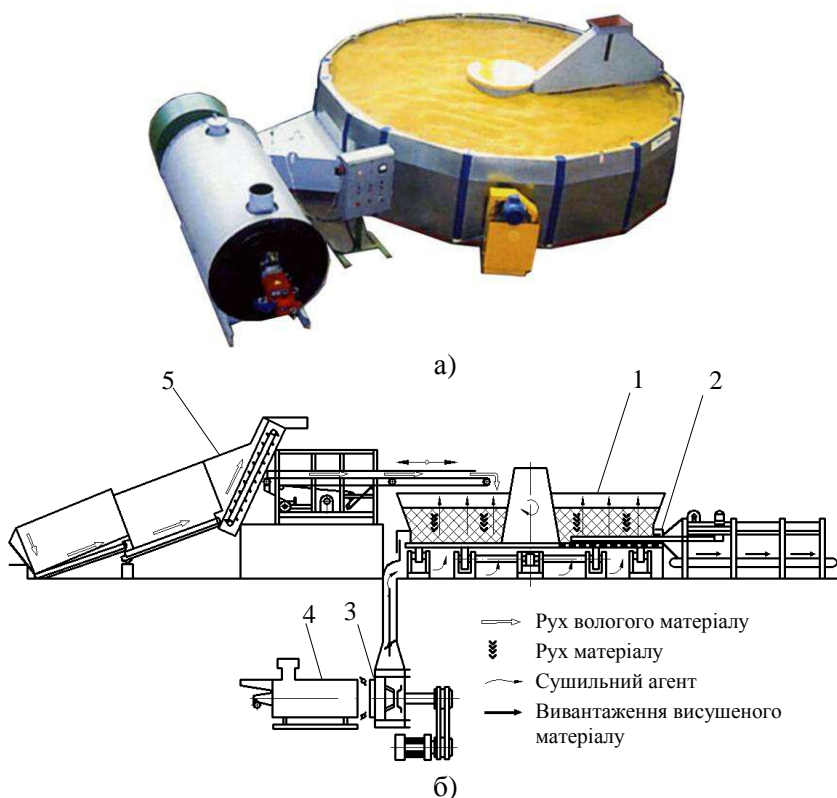


Рис. 3.7. Загальний вигляд (а) та схема технологічного процесу (б) сушіння карусельної сушарки СКМ-1: 1 – сушильна камера; 2 – вивантажувальний пристрій; 3 – вентилятор; 4 – паливний блок; 5 – завантажувальний пристрій

Недоліком вивантажувального пристрою сушарки є безпосередній контакт рухомої частини робочого органу з

матеріалом, що вивантажується, та провисання ланцюга між ведучою та веденою зірочками. Потрапляючи між ланками ланцюга, матеріал, що вивантажується, контактує зі змащеними технічними маслами ланками ланцюга, через що погіршується якість матеріалу. Це негативно впливає на ефективність роботи пристрою.

Платформові та лоткові сушари конструктивно близькі до вентиляційних установок напільного типу, прості у будові і використовуються як в Україні, так і за кордоном для сушіння невеликих партій насіння трав.

Платформові сушарки широко використовуються для сушіння зерна і насіння кормових трав у мішках. Вони складаються із платформи 1, під якою розміщені повітропроводи, і металічних решіток 2, на які кладуть мішки з насінням, а також вентилятора 3 і теплогенератора (калорифера) 4 (рис. 3.8).

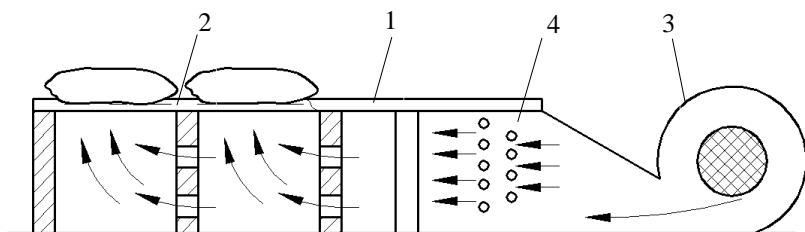


Рис. 3.8. Схема платформової сушарки: 1 – платформа ; 2 – металічна решітка; 3 – вентилятор; 4 – калорифер

Лоткові сушарки ЛС-2 (рис. 3.9), 2ЛСТ-400 і інші складаються з однієї або декількох лотків (камер), на які насилають ворох насіння трав. Сушильний агент подається вентилятором повітропроводом під лотки, проходить крізь шар насіння, просушуючи його, і потрапляє назовні.

Переваги лоткових і платформових сушарок полягають у тому, що насіння не перегрівається під час сушіння. Недоліком є низький рівень механізації завантаження і вивантаження; насіння потрібно періодично перемішувати, а мішки

перекладати. Наслідки – велика енергоємність процесу та низька продуктивність.



Рис. 3.9. Лоткова сушарки ЛС-2

За технологічним процесом конвеєрні сушарки (рис. 3.10) аналогічні напільним. Вони універсальні за призначенням, для них не існує особливих обмежень щодо вологості, чистоті та сипучості вихідного матеріалу. На відміну від напільних сушарок, у конвеєрних процес завантаження і вивантаження насіння є механізованим.

Конвеєрна сушарка складається із завантажувального бункера, сушильної і охолоджувальної камер, вентиляторів теплоносія і охолоджувача, теплогенератора і пульта управління з контрольно-вимірними пристроями. Матеріал завантажується на верхню перфоровану основу сушильної камери, де ланцюговий транспортер переміщує його через регулятор шару. Сформований шар матеріалу заданої висоти рухається верхньою і нижньою перфорованими основами, переміщується і сушиться в процесі руху. Підігрітий в теплогенераторі теплоносієм вентилятором направляється під нижню перфоровану основу сушильної камери, послідовно пронизує два шари матеріалу і видаляється із сушильної камери. Висушений матеріал перевантажується в охолоджувальну камеру.



Рис. 3.10. Загальний вигляд конвеєрної сушарки

В деяких господарствах для сушіння сипких матеріалів застосовують жалюзіні сушарки СЗЖ-10 (рис. 3.11). Сушарка складається із надсушильного бункера, сушильної камери з двох колонок, вентилятора сушіння, інверторів, охолоджувальної камери, в яку вентилятором нагнітається холодне атмосферне повітря, паливного блоку, повітропроводу, вивантажувального пристрою та пульта управління. Стінки колонки зроблені у формі жалюзі, тому до них добре проникає сушильний агент. Входячи через одну стінку жалюзі, сушильний агент проходить через стовп сипучої маси шириною 7...20 см і виходить через другу стінку.



Рис. 3.11. Загальний вигляд жалюзіної сушарки СЗЖ-10

Застосування бункерів активного вентиляювання (рис. 3.12) у якості механізмів для сушіння вороху насіння трав у деякій мірі вирішує питання зниження вологості вороху. Бункери активного вентиляювання характеризуються повною механізацією завантаження і вивантаження, що дозволяє забезпечити високу економічну ефективність.

Однак поряд із перевагами бункери активного вентиляювання мають суттєві недоліки. У першу чергу – це довготривале сушіння, адже калорифери здатні підвищити температури атмосферного повітря лише на 5...6°C [2]. Тому існують обмеження за вихідною вологістю насіння при його обробці на бункерах активного вентиляювання.

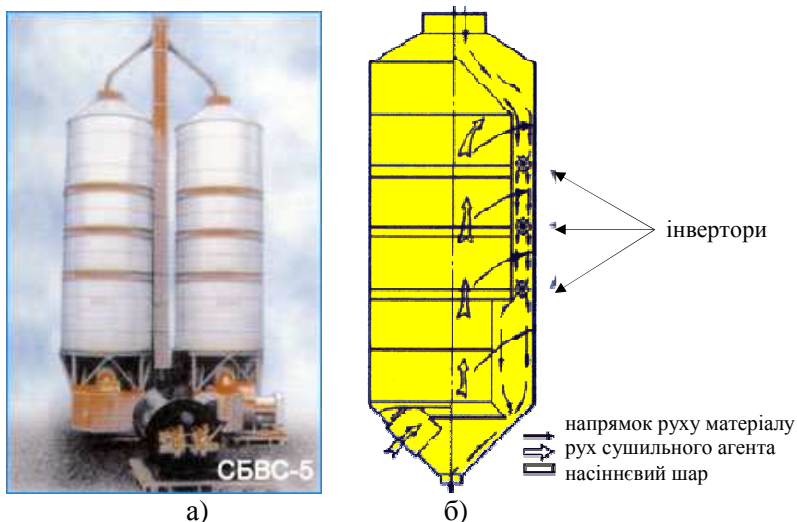


Рис. 3.12. Загальний вигляд (а) та схема технологічного процесу роботи (б) бункера активного вентиляювання СБВС-5

В шахтних і колонкових сушарках (рис. 3.13) сушать насіння різних культур у рухомому шарі з одночасним його завантаженням у шахти, частковим перемішуванням в процесі руху шахтами і випуском. Сушарка СЗШ-16 складається з двох паралельно розташованих шахт, встановлених на загальній

станині, двох винесених охолоджувальних камер, вентиляторів сушильних шахт, дифузорів. Подачу сирого зерна у сушильні і охолоджувальні шахти здійснюють чотири норії. Сушильна шахта має дві однакові секції, встановлені одна на одну. В шахті розміщено 14 рядів повітророзподільних коробів. Вісім у кожному ряду.



Рис. 3.13. Загальний вигляд сушарок: а – СЗШ-8; б – СЗ-6

Колонкові сушарки (СЗ-6, СЗ-10, СЗ-16), на відміну від шахтних (СЗШ-16, М-819), не мають внутрішніх перегородок, що унеможливає утворення застійних зон, де відбувається загоряння матеріалу.

Переваги шахтних і колонкових сушарок полягають у простоті конструкції та обслуговуванні, надійності експлуатації. Недолік – неможливість висушити малі партії сипкого матеріалу, а також матеріал високої вологості за один пропуск, непристосованість для сушіння засміченого, малосипучого матеріалу.

Для сушіння насіння використовують сушарки, в яких воно перебуває у киплячому (псевдорозрідженому) шарі. Переваги таких сушарок полягають у забезпеченні порівняно

високої рівномірності нагріву і сушіння, значній інтенсифікації процесу. Це дозволяє суттєво зменшити габарити і металомісткість сушарок та підвищити техніко-економічні показники.

Всесоюзний інститут механізації (ВІМ) запропонував сушарку для сушіння дрібного насіння у киплячому шарі (рис. 3.14).

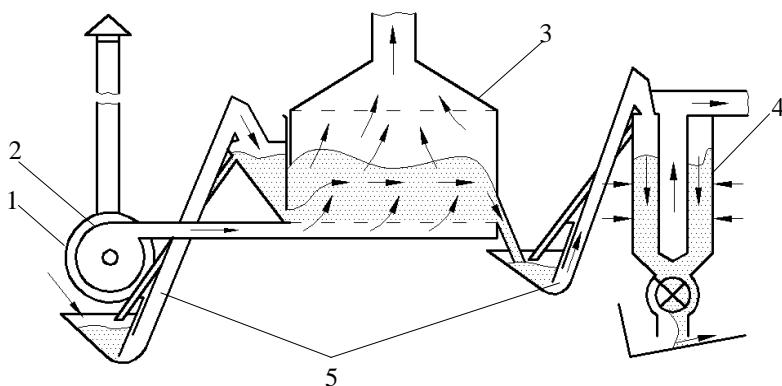


Рис. 3.14. Схема сушарки конструкції ВІМ: 1 – теплогенератор; 2 – вентилятор; 3 – сушильна камера; 4 – охолоджувальна камера; 5 – піднімальні пристрої

Сушарка складається із сушильної камери 3 з завантажувальним бункером, теплогенератора ТГ-75 1 з вентилятором 2, двох підіймальних пристроїв 3 та охолоджувальної колонки 4.

Поряд із перевагами сушарка має і недоліки. Основні – великі енергозатрати та неможливість сушіння насіння, що має низький аеродинамічний опір киплячого шару.

У світі для сушіння зерна у фермерських господарствах широко використовують мобільні сушарки. Протягом останніх років інтерес до них з'явився і в Україні, і не лише з боку невеликих господарств, а й мобільних механізованих загонів. Використання відносно недорогих пересувних сушарок, здатних працювати в будь-якому місці за різних погодних умов, – це

реальний шлях підвищення ефективності виробництва зернових, бобових і олійних культур.

Мобільні зерносушарки мають низку переваг перед стаціонарними: потребують мало місця, не вимагають будівельних, монтажних і налагоджувальних робіт. За потреби вони легко переміщуються в інше місце, введення їх в експлуатацію після переїзду займає часто лише 2–3 години. У разі зміни напрямку діяльності продати мобільну сушарку значно легше, бо вони не потребують демонтажу, мають попит і великий термін використання. Також їх можна застосовувати як тепловий модуль для інших цілей: опалення теплиць, складів, виробничих приміщень тощо. Нині ринок пропонує велику кількість моделей мобільних сушарок різних фірм (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Загальний вигляд мобільних сушарок: а – Agrex PRT 250 ME; б – MECMAR серії STR

Однією із перспективних моделей в сушильній техніці є модульна сушарка, що випускається фірмою GSI (Grain Sistem International, США) (рис. 3.16). При необхідності розширення виробництва легко здійснюється монтаж двох додаткових

модулів, що дозволяє збільшити продуктивність сушарки (рис. 3.16).

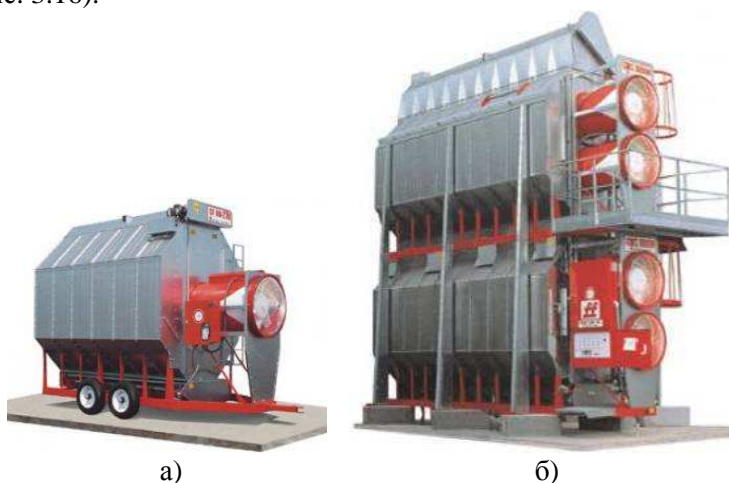


Рис. 3.16. Загальний вигляд сушарок: а –; б – CF/AB-270E

Інші типи промислових сушарок, а також експериментальні установки для сушіння вороху насіння трав не знайшли широкого застосування. З вищевказаного можна зробити висновок, що жодна з наведених сушарок не забезпечує повною мірою ефективного процесу сушіння вороху насіння трав. Всі сушарки мають недоліки.

Ці недоліки можна ліквідувати, якщо для сушіння вороху насіння трав на основі аналізу існуючих методів і засобів сушіння розробити спеціалізовану високомеханізовану сушарку, яка б забезпечувала повне зберігання та поліпшення якості матеріалу, а отже, рівномірне нагрівання та сушіння його; одночасне сушіння насіння різної вологості; висушування матеріалу будь-якої початкової вологості до кінцевої вологості за одне проходження; сушіння насіння без попереднього очищення; неперервне приймання матеріалу, тобто сушіння в потоці надходження; виключення виносу та механічного пошкодження насіння; порівняно низькі витрати палива, електроенергії; капітальні вкладення.

3.3. Аналіз інтенсивності сушіння та вентилявання в барабаних сушарках

Особливості роботи сушарок сільськогосподарських матеріалів передбачають використання перспективних і ефективних методів, що базуються на досягненнях сучасних технологій і наукових розробок. Недоліками існуючих сушарок, які використовуються в сільськогосподарському виробництві, є низька ефективність роботи внаслідок:

- малої площі контакту сушильного агента з матеріалом, що обробляється;
- недостатнього перемішування матеріалу;
- малого ступеня заповнення матеріалом сушильної камери (барабанні сушарки);
- неповного використання потенціалу сушильного агента;
- надмірної маси і металоємкості.

Для аналізу взаємного переміщення матеріалу та сушильного агента розглянуто імітаційну модель барабанної сушарки (рис. 3.17).

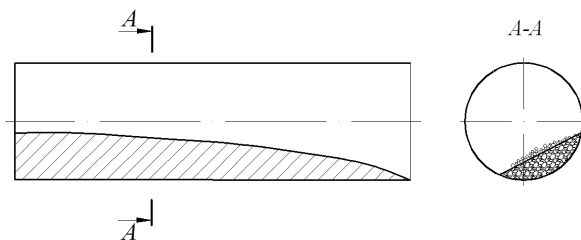


Рис. 3.17. Шар матеріалу в барабанній сушарці

Матеріал лежить у вигляді витягнутого в довжину масиву, що має порівняно невелику поверхню, з якою контактує сушильний агент. Окремі частинки продукту при перемішуванні під час обертання барабана здійснюють різний рух залежно від їх первинного положення в завалі. При обертанні сила тяжіння і відцентрова сила притискують матеріал до стінки барабанної сушарки, внаслідок чого матеріал переміщується вгору. Якщо сила

тертя між матеріалом і стінкою порівняно мала, то, досягнувши певної висоти, весь матеріал скочується назад, після чого знову піднімається вгору. Але, якщо сила тертя утримуватиме матеріал на стінці, частинки в шарі матеріалу будуть скочуватися і ковзати поверхнею завалу вниз, потім, завдяки силі тертя, знову підніматимуться вгору. В ході цього процесу частинки масиву переміщуються з центру завалу до відкосу. Інтенсивність перемішування матеріалу мала, а тому тепло- і вологообмін у завалі проходить повільно.

Більшість барабаних сушарок обладнано внутрішніми насадками (рис. 3.18), які значно інтенсифікують процес сушіння сипкого матеріалу [3, 4]. Тип насадок вибирають, зважаючи на властивості матеріалу.

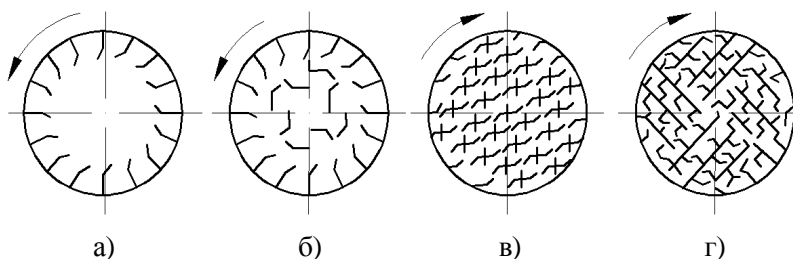


Рис. 3.18. Насадки барабаних сушарок: а – підйомно-лопатева; б – секторна; в і г – розподільні

Насадки, піднімаючи завал матеріалу, сприяють більш активному його перемішуванню відкосами завалу. Тепло- і вологообмін підсилюється у тих частинок, які падають з лопатей, а також у верхньому шарі матеріалу, що знаходиться у нижній частині барабана (рис. 3.19). Максимальний тепло- і вологообмін забезпечують ті насадки, які найбільш ефективно підвищують шпаруватість шару матеріалу, що обробляється, і, тим самим, збільшують площу контакту з потоком сушильного агента.

Ступінь заповнення барабана матеріалом в існуючих сушарках не перевищує 25%, що знижує ефективність сушарки. Це зумовлено необхідністю забезпечення інтенсивного тепло- і вологообміну, що здійснюється при пересипанні матеріалу

лопатями. При заповненні сушарки на 50% і більше в центрі сушильної камери утворюється застійна зона матеріалу.

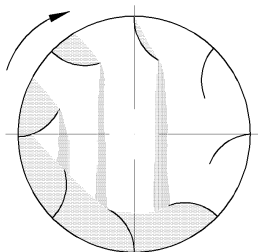


Рис. 3.19. Схема руху матеріалу в барабанній сушарці з підйомно-лопатевою насадкою

Сушіння матеріалу в конвективних сушарках без активних робочих органів має свої недоліки, дослідження та врахування яких дозволяє значно зменшити енерговитрати на цей процес. Головним недоліком є нерівномірне сушіння матеріалу.

На інтенсивність вентиляювання впливають структура шарів та фізико-механічні властивості матеріалу: щільність, шпаруватість, вологість. Під зміною інтенсивності вентиляювання розуміємо зміну швидкості повітряного потоку за висотою шару. Шари матеріалу, маючи різну щільність та шпаруватість, чинять різний опір повітряному потоку. При розгляді способу підведення повітряного потоку на інтенсивність вентиляювання шарів матеріалу за висотою, слід враховувати, що матеріал розміщений у герметичній сушильній камері, тобто повітряний потік повним об'ємом проходить через нього.

У більшості сушарок повітряний потік (сушильний агент) і матеріал, що піддається сушінню, рухаються в сушильній камері в одному напрямку – паралельна течія (рис. 3.20, а). Таке підведення забезпечує його контакт лише з верхніми шарами матеріалу в нижній частині сушильної камери та з матеріалом, який піднімається і пересипається лопатями. Таким чином одностороннє підведення не забезпечує достатньої площі контакту повітряного потоку з матеріалом, а, отже і рівномірного сушіння.

Підведення повітряного потоку під шар матеріалу (метод протитечії) зумовлює сушіння частини матеріалу, який знаходиться найближче до сторони підведення повітряного потоку (рис. 3.20, б). Це призводить до зміни параметрів повітряного потоку та падіння його швидкості внаслідок аеродинамічного опору матеріалу. В даному випадку, зволожується та частина шару, яка у наступному такті буде особливо інтенсивно вентилуватися та сушитися. Відбувається розподіл вологи за висотою шару, що забезпечує рівномірне сушіння матеріалу та раціональне використання потенціалу сушильного агента.

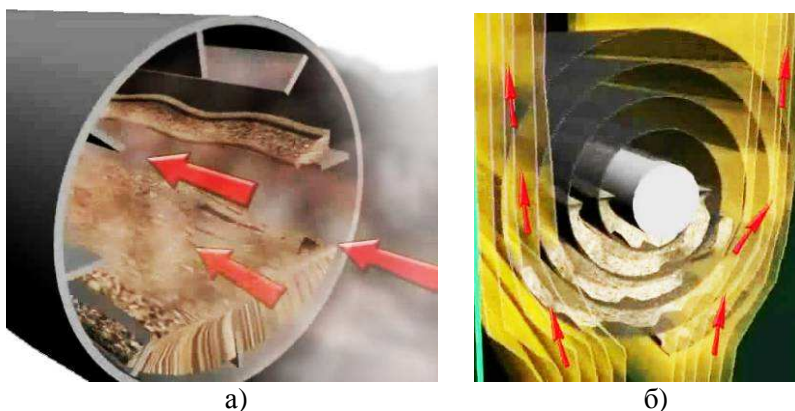


Рис. 3.20. Переміщення матеріалу в сушильній камері: а) паралельна течія; б) протитечії

З проведеного аналізу можна зробити висновок, що доцільно застосовувати метод протитечії у поєднанні із перемішуванням шару матеріалу, який дозволяє підвищити рівномірність сушіння за висотою шару та ефективність використання сушильного агента.

РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ПРОТИТЕЧІЇ В БАРАБАННИХ СУШАРКАХ

Сушіння насіннєвого матеріалу є енергоємним процесом, що в умовах постійного подорожчання енергоресурсів призводить до відмови від нього в господарствах. Як наслідок, неможливість збирання та переробки врожаю за несприятливих погодних умов та значні його втрати. Знизити витрати на процес можна ефективніше використовуючи сушильний агент та збільшуючи продуктивність сушарок. Досягнути поставлену мету можна за рахунок удосконалення існуючих та розробки нових зразків сушильної техніки, обґрунтовуючи їх раціональні конструктивні та технологічні параметри.

Аналіз існуючих конструкцій сушарок, що використовуються для сушіння сипких сільськогосподарських матеріалів, показав, що основним недоліком відомих конструкцій засобів сушіння є неповне використання об'єму сушильної камери, що спричиняє зниження продуктивності, та нераціональне використання сушильного агента. До недоліків слід також віднести і те, що способи сушіння, які реалізовані в відомих конструкціях засобів сушіння, є енергоємними, оскільки не забезпечують оптимальних температурних режимів сушіння. Таким чином, виникає необхідність в розробці нових засобів сушіння, які б усували зазначені недоліки. Нові розробки сушарок сипких матеріалів потребують додаткових досліджень з визначення раціональних конструктивних та технологічних параметрів машини.

Враховуючи результати аналізу засобів сушіння, теоретичних та експериментальних досліджень процесу сушіння вороху насіння трав, запропоновано наступні конструкції сушарок.

Сушарка (варіант I) містить сушильну камеру, дифузор 1, вентилятор 2 та електрокалорифер 3 (рис. 4.1, рис. 4.2) [1, 2]. Сушильна камера утворена кожухом 4, який закріплений на рамі 5. У верхній частині кожуха 4 передбачена перфорована вставка б для відведення сушильного агента, а в нижній частині – виван-

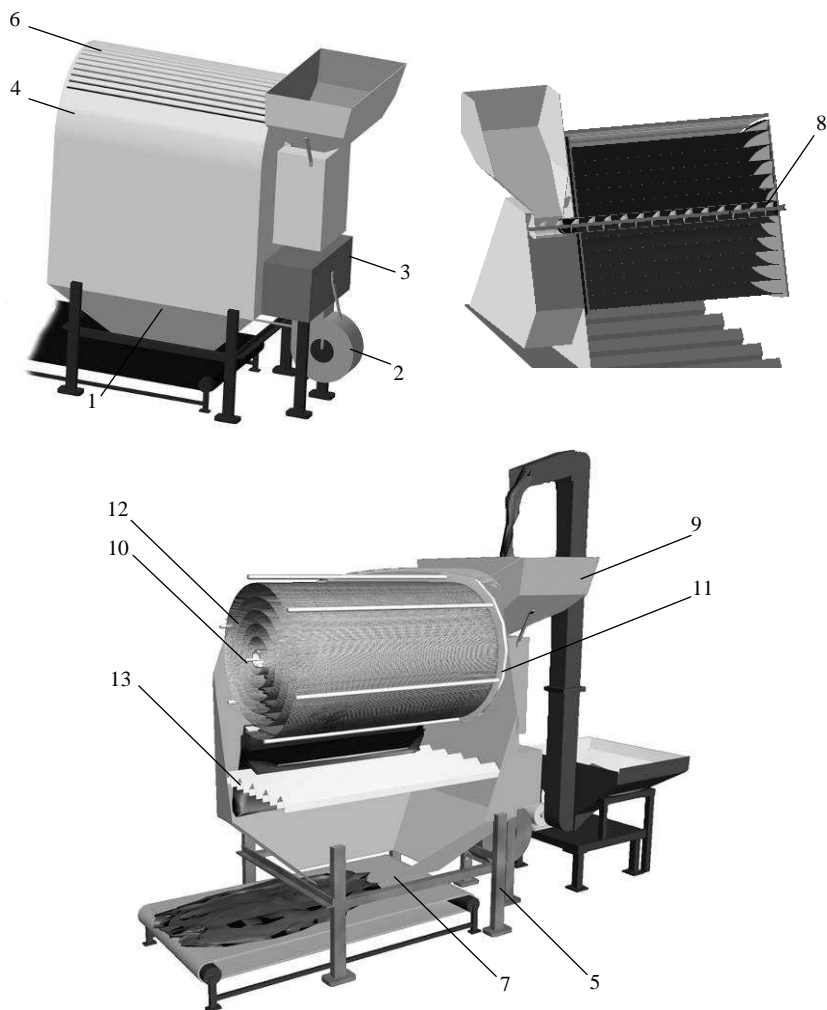


Рис. 4.1. Схема сушарки вороху насіння трав: 1 – дифузор; 2 – вентилятор; 3 – електрокалорифер; 4 – кожух; 5 – рама; 6 – перфорована вставка; 7 – вивантажувальне вікно; 8 – завантажувальний шнек; 9 – приймальний бункер; 10 – приводний вал; 11 – диск; 12 – спіралеподібна перфорована поверхня; 13 – повітрепідвідні коробки

тажувальне вікно 7. У торці кожуха 4 передбачено отвір для завантажувального шнека 8, який розміщений співвісно всередині сушильної камери та одним кінцем виходить із кожуха 4 назовні. До шнека прикріплений приймальний бункер 9. В іншому торці кожуха 4 передбачено отвір для приводного вала 10, на якому всередині кожуха закріплено диск 11. До диска 11 приєднано перфоровану поверхню 12, скручену спіраллю зі змінним кроком, зменшенням якого від центра до периферії забезпечено заповнення матеріалом простору між усіма витками перфорованої поверхні 12 до горизонтальної осі сушильної камери. Ширина перфорованої поверхні 12 відповідає ширині сушильної камери. У конструкції останньої передбачені ущільнення, які унеможливають проходження сушильного агента поза матеріалом. Вентилятор 2 через дифузор 1 приєднано до нижньої частини кожуха 4. Під спіралеподібною поверхнею розміщені повітрепідвідні короби 13.

Сипкий матеріал завантажується в приймальний бункер, далі шнеком подається в сушильну камеру на виток перфорованої спіралеподібної поверхні. Внаслідок обертання сушильної камери сипкий матеріал переміщується, ковзаючи вниз відносно витків перфорованої поверхні з ярусу на ярус. Досягнувши нижнього ярусу, сипкий матеріал доведений до кондиційної вологості просипається між коробами і вивантажується через вивантажувальне вікно на транспортер.

Під час обертання спіралеподібної поверхні сушильний агент нагнітається в сушильну камеру вентилятором від електрокалорифера, проходить через шари сипкого матеріалу на всіх ярусах перфорованої поверхні та підсушує його.

За допомогою сушарки можна досягти рівномірного сушіння матеріалу з контрольованою тривалістю перебування матеріалу в зоні дії сушильного агента і інтенсивного перемішування в процесі сушіння. В результаті це дасть можливість зменшити енерговитрат і підвищити якість висушеного матеріалу. Конструктивне виконання сушарки забезпечує її компактність, а також високий ступінь механізації процесу.



Рис. 4.2. Сушарка вороху насіння трав

За рахунок повітрепідвідних коробів, які розміщені в нижній частині сушильної камери, сушильний агент подається на матеріал знизу вгору, матеріал переміщується вниз назустріч сушильному агенту. При цьому спрацьовує метод протитечії, який є найбільш ефективним, порівняно з іншими методами подачі сушильного агента відносно сушильного матеріалу.

Запропонована конструкція сушарки усуває основні недоліки барабанних сушарок – неконтрольований час перебування матеріалу в зоні сушіння та низький коефіцієнт заповнення матеріалом сушильної камери. Адже наявність спіралеподібної перфорованої основи дає можливість чітко контролювати час перебування матеріалу в зоні сушіння шляхом підбору частоти обертання спіралі. Застосування запропонованої конструкції сушарки дозволяє збільшити площу контакту матеріалу із сушильним агентом, через який він проходить, що підвищує ефективність використання його енергетичного потенціалу, а постійне пересипання та перемішування матеріалу інтенсифікує процес сушіння.

Сушарка (варіант II) сипких матеріалів, що пропонується на рис. 4.3, містить сушильну камеру, яка утворена корпусом з порожниною. Внутрішня поверхня корпусу виконана перфорованою. У верхній частині корпус обладнано

завантажувальним вікном з бункером. Всередині корпусу коаксіально розміщені перфоровані циліндричні обичайки різного діаметра. Всередині обичайки з найменшим діаметром також коаксіально розміщена циліндрична вставка з порожниною. Зовнішня поверхня вставки виконана перфорованою. У свою чергу, всередині вставки коаксіально розміщений вивантажувальний шнек. Простір між обичайками, а також ними і корпусом та вставкою утворює багатосекційну сушильну камеру (сушильні секції в перерізі мають форму кільця). Вставка та обичайки у верхній частині обладнані перевантажувальними вікнами. В межах кожної секції передбачені лопаті, які приєднані до диска, що обертається. З обох торців до корпусу кріпляться кришки.

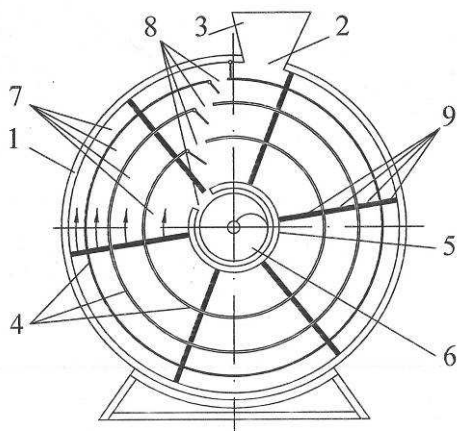


Рис. 4.3. Схема сушарки сипких матеріалів: 1 – корпус; 2 – завантажувальне вікно; 3 – бункер; 4 – перфоровані циліндричні обичайки; 5 – циліндрична вставка; 6 – вивантажувальний шнек; 7 – сушильні секції; 8 – перевантажувальні вікна; 9 – лопаті

Сушарка працює наступним чином. Сипкий матеріал з бункера через завантажувальне вікно надходить в периферійну (зовнішню) секцію сушильної камери. У цій секції між сусідніми лопатями формується порція сипкого матеріалу, яка переміщується ними секцією до перевантажувального вікна в

наступну секцію. Далі процес повторюється в усіх наступних секціях. Досягнувши перевантажувального вікна в вставці (тобто пройшовши останню секцію), матеріал надходить до шнека, яким вивантажується з сушарки.

Під час переміщення сипкого матеріалу сушильною камерою відбувається його сушіння. Конструкція сушарки дозволяє реалізувати сушіння сипкого матеріалу в два способи: з елементами принципу протитечії та з елементами принципу прямогоку. У випадку протитечії сушильний агент підводиться через патрубок в порожнину вставки, звідки надходить до матеріалу в сушильній камері. Сушильний агент, проходячи через матеріал всіх секцій від центру до периферії в радіальному напрямку, підсушує його та відводиться в порожнину корпусу звідки через патрубок назовні.

У випадку прямогоку рух сушильного агента забезпечується від периферії до центру сушильної камери таким чином. Сушильний агент через патрубок надходить в порожнину корпусу, звідки підводиться до матеріалу. Проходячи всі секції сушильної камери від периферії до центру в радіальному напрямку, сушильний агент підсушує матеріал та відводиться в порожнину циліндричної вставки, звідки через патрубок виводиться назовні.

Одним з способів більш ефективного використання енергетичного потенціалу сушильного агента, а, відповідно, зниження енергоємності процесу сушіння, є збільшення висоти шару матеріалу через який він проходить до оптимального значення. Для досягнення поставленої мети запропоновано удосконалену конструкцію барабанної сушарки (рис. 4.4). Сушарка містить сушильний барабан, утворений циліндричним кожухом зі співвісно розташованим у ньому перфорованим конусом. Простір між циліндричним кожухом та перфорованим конусом розділений перегородками на секції. З обох торців сушильний барабан обладнано нерухомими кришками, в одній з яких передбачено вікна завантаження матеріалу та підведення сушильного агента, а в іншій – вікна вивантаження матеріалу та відведення сушильного агента. На внутрішній поверхні перфорованого корпусу передбачено полицки. До вікна

підведення сушильного агента приєднано нагнітаючий вентилятор з паливним блоком, а до вікна відведення сушильного агента – приєднано відсмоктувальний вентилятор. Форма і розміщення вікна підведення сушильного агента забезпечує його підведення виключно в секції (у нижній частині сушильного барабана), що співпадають з ним під час обертання сушильного барабана. Форма і розміщення вікна відведення сушильного агента забезпечує його відведення виключно через секції (у верхній частині сушильного барабана), що співпадають з ним під час обертання сушильного барабана.

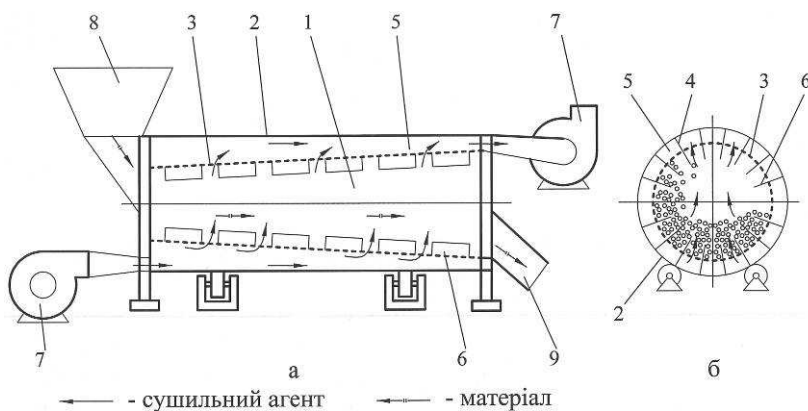


Рис. 4.4. Барабанна сушарка: 1 – сушильний барабан; 2 – циліндричний кожух; 3 – перфорований конус; 4 – перегородка; 5 – секція; 6 – полочка; 7 – вентилятор; 8 – завантажувальний бункер; 9 – вивантажувальний патрубок

Сушарка працює наступним чином. Матеріал з завантажувального бункера через вікно у верхній частині нерухомої кришки надходить у сушильний барабан. Під час обертання барабана матеріал переміщується вздовж його осі внутрішньою поверхнею перфорованого конуса. У процесі переміщення матеріалу відбувається сушіння шляхом проходження через його шар сушильного агента. Сушильний агент вентилятором через повітропровід підводиться до вікна

підведення сушильного агента, з якого надходить у секції, що співпадають з ним у даний момент обертання сушильного барабана. Таким чином, утворюється “повітряний канал” вздовж сушильного барабана, яким рухається сушильний агент. Причому секції, в які подається сушильний агент, розташовані під шаром матеріалу, тому сушильний агент з них через перфорований конус підводиться до матеріалу. Пройшовши шар матеріалу, сушильний агент відводиться через секції у верхній частині сушильного барабана та вікно відведення сушильного агента за допомогою вентилятора. Відведення сушильного агента відбувається лише через секції, що у даний момент обертання сушильного барабана розташовані у верхньому положенні і співпадають з вікном відведення сушильного агента. Доведений до кондиційної вологості матеріал вивантажується з сушильного барабана. Запропонована конструкція забезпечує більш ефективне використання сушильного агента за рахунок проходження його через шар матеріал.

РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОРОХУ НАСІННЯ ТРАВ В БАРАБАННИХ СУШАРКАХ

5.1. Моделювання процесу сушіння вороху насіння трав

Існує достатньо велика кількість досліджень в області моделювання процесу сушіння [1...10]. Однак небагато робіт стосуються сушильних установок насіння трав конвективного типу. Пов'язано це з тим фактом, що сушіння в сушарці – процес досить складний, котрий передбачає не тільки явище сушіння, але також і перемішування, пересипання, переміщення сипкого матеріалу під час сушіння. Результатом досліджень став висновок: загальна модель сушарки складається з двох допоміжних моделей, одна з яких є докладним описом поведінки матеріалу, а друга описує параметри сушильної камери.

Перша модель містить характеристики матеріалу, наприклад, кінетика сушіння. Друга модель, у свою чергу, є описом устаткування і визначає переміщення та розподілу матеріалу. При комбінуванні обох моделей отримуємо математичну модель, вирішення якої дає уявлення про сушіння матеріалу в сушарці вцілому.

Загальна модель, що включає параметри як матеріалу, так і сушильної камери, зазвичай складається з декількох диференціальних рівнянь, що описують передачу маси і тепла між газоподібною і твердою фазами. Така модель є динамічною і достатньо складною для вирішення. Подібні моделі спрощують або вирішують чисельно. Проте, завжди виникає запитання щодо адекватності спрощеної моделі процесу сушіння. Ця проблема призводить до необхідності вдосконалення уже існуючих.

Чинники, що впливають на моделювання процесу сушіння сільськогосподарських матеріалів, можуть бути наступні: фізико-механічні властивості сипкого матеріалу (розмір і форма частинок, вологість, шпаруватість тощо); конструктивні параметри сушильної камери; умови, за яких відбувається процес сушіння (швидкість переміщення матеріалу і сушильного агента, температура сушильного агента, можливість перемішування матеріалу).

Зазначені вище чинники впливають на процеси тепло- і вологообміну та відіграють важливу роль у тому, скільки часу матеріал буде знаходитись у зоні дії сушильного агента. Неправильно вибраний час перебування насінневого матеріалу в зоні дії сушильного агента призведе до того, що не буде забезпечена бажана вологість матеріалу, отже виникне необхідність повторного сушіння, а, значить, і зросте витрата енергії. Тепловий коефіцієнт корисної дії в існуючих барабанних сушарках залежить від способу сушіння і варіюється в широкому діапазоні від 25% до 85%.

В результаті аналізу існуючих математичних моделей (2.39) – (2.42) та (2.43) – (2.46), що описують процес сушіння сипких матеріалів, запропоновано модель процесу сушіння рухомого шару матеріалу у вигляді диференціальних рівнянь (4.1) – (4.4).

$$v_m \cdot \frac{\partial W}{\partial x} = v_{ca} \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \cdot \frac{\gamma_{ca} \cdot \psi}{10 \cdot \gamma_m}, \quad (5.1)$$

$$3600 \cdot v_{ca} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = -\alpha_g \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_{ca} \cdot \psi \cdot c_{ca}} \cdot (t - \theta), \quad (5.2)$$

$$v_{ca} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = -v_m \cdot \frac{\gamma_m \cdot c_m}{\gamma_{ca} \cdot \psi \cdot c_{ca}} \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{r'}{100 \cdot c_m} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \right), \quad (5.3)$$

$$v_m \cdot \frac{\partial W}{\partial x} = -K \cdot (W - W_p). \quad (5.4)$$

При розрахунку рівноважну вологість насінневого матеріалу, що залежить від вологості і температури матеріалу, визначали за рівнянням [11]:

$$W_p = 3,7520 + 0,1387 \cdot W - 0,04438 \cdot \theta. \quad (5.5)$$

Питома теплоємність матеріалу залежить від його вологості. Для насінневого матеріалу приймали залежність [12]:

$$c_m = 1,2447 + 3,3076 \cdot W. \quad (5.6)$$

Коефіцієнт тепловіддачі визначали за залежністю [13]:

$$\alpha_g = 0,097 + 0,0015 \cdot W. \quad (5.7)$$

Середня швидкість переміщення матеріалу приймалась, виходячи з тривалості перебування матеріалу в зоні дії сушильного агента, залежно від висоти шару матеріалу і тривалості сушіння: $v_M = h / \tau$.

Запропонована математична модель отримана з врахуванням наступних умов: волога з матеріалу виділяється за законом випаровування з вільної поверхні; волога з матеріалу випарується і видаляється одночасно; між шарами матеріалу, а також між шарами сушильного агента волого- і теплообмін не спостерігається, він відбувається лише між матеріалом і сушильним агентом; теплообмін з навколишнім середовищем не враховується; стаціонарні поля температур і вологості приймаємо одновимірними, тобто такими, що змінюються лише вздовж координати x , яка відрховується в напрямку руху матеріалу. Схематично, процес сушіння для запропонованої моделі представлений на рис. 5.1.

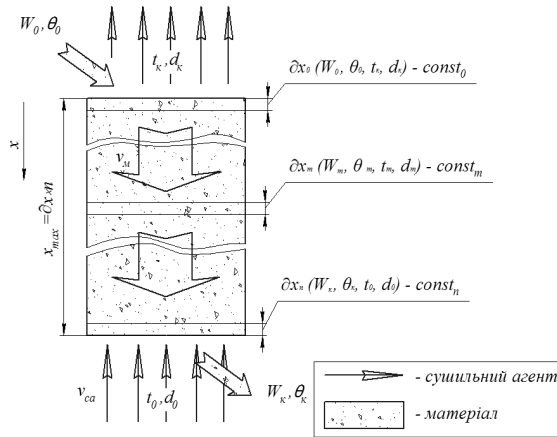


Рис. 5.1. Схема процесу сушіння, що описується запропонованою моделлю

Тривалість сушіння визначається швидкістю переміщення шару матеріалу в зоні дії сушильного агента. Матеріал і сушильний агент, переміщаючись в процесі сушіння, змінюють

свої параметри в просторі і часі, при цьому параметри сушіння (вологість матеріалу W_m , вологовміст сушильного агента d_m , температура матеріалу θ_m і сушильного агента t_m), прив'язані до заданої координати x_m шару матеріалу висотою $h = x_{max}$, є усталеними і незмінними з часом, на відміну від процесу сушіння в нерухомому шарі.

В результаті розрахунку для заданих параметрів матеріалу і сушильного агента одержано графіки (рис. 5.2), що відображають залежності вологості матеріалу W , температури матеріалу θ , температури сушильного агента t і вологовмісту сушильного агента d від просторової координати x в результаті сушіння за принципом протитечії, при переміщенні матеріалу в напрямку цієї координати.

5.2. Моделювання процесу вентиляювання шару матеріалу в сушарці зі спіралеподібною поверхнею

Для дослідження процесу вентиляювання шару матеріалу в сушарці розглянуто процес проходження повітряного потоку через матеріалу нескінченно малої ширини dx загальною висотою H вздовж вертикальної осі y знизу вверху. Загальна висота шару матеріалу складається з суми висот шарів, що розміщені на витках спіралеподібної перфорованої поверхні вздовж осі y , тобто:

$$H = h_1 + h_2 + \dots + h_n, \quad (5.8)$$

де h_1, h_2, \dots, h_n – висоти n -го шару матеріалу (рис. 5.3) вздовж вертикальної осі y .

Для подальшого дослідження приймаємо наступні припущення: сушильний агент рухається через шар матеріалу знизу вверху вздовж осі y ; розглядається усталений процес сушіння; матеріал повністю заповнює простір між витками спіралеподібної перфорованої поверхні вздовж осі y ; в межах висоти кожного n -го шару матеріал рівномірно розподілений та має однакові властивості, параметри та склад; втратами напору сушильного

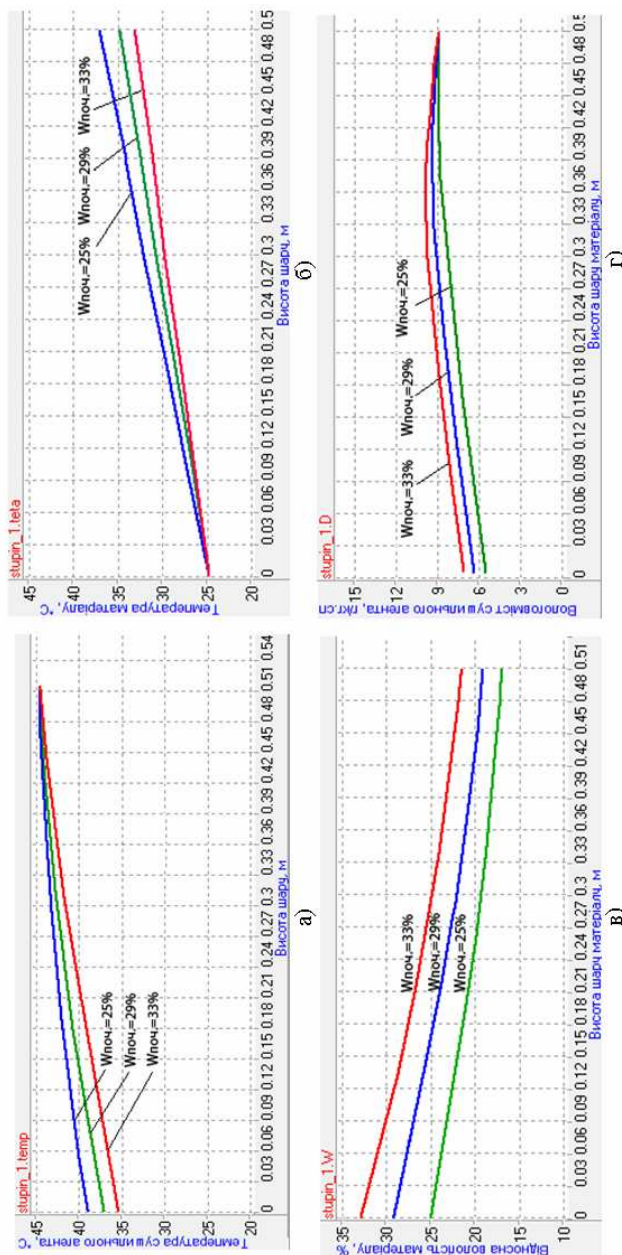


Рис. 5.2. Результати моделювання при початковій вологості матеріалу 25%, 29% і 33% та температурі сушильного агента на вході 45°C: а) зміна температури сушильного агента t за висотою шару матеріалу z ; б) зміна температури матеріалу ϑ за висотою шару матеріалу z ; в) зміна відносної вологості матеріалу W за висотою шару матеріалу z ; г) зміна вологовмісту сушильного агента ω за висотою шару матеріалу

агента підчас проходження через спіралеподібну перфоровану поверхню нехтуємо.

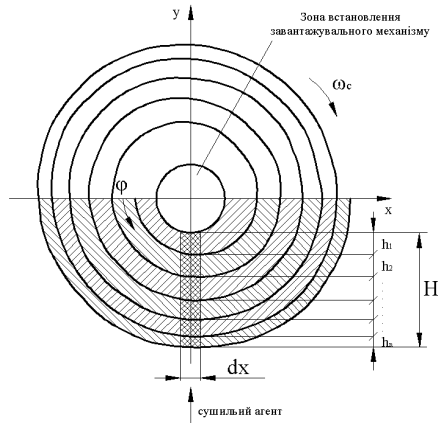


Рис. 5.3. Розрахункова схема моделювання вентилявання шару матеріалу

Кутова швидкість обертання спіралеподібної перфорованої поверхні ω залежить від тривалості сушіння матеріалу τ_c , початкових параметрів матеріалу та сушильного агента, а також загальної висоти шару H . Встановивши загальний час сушіння матеріалу τ_c та обґрунтувавши конструктивно найбільший кут спіралі φ_k , кутову швидкість обертання спіралеподібної перфорованої поверхні можна визначити наступним чином:

$$\omega = \frac{\varphi_k}{\tau_c}, \quad (5.9)$$

де τ_c – загальний час сушіння, с;

φ_k – найбільший кут спіралі, рад.

Кількість шарів матеріалу n , з яких складається шар матеріалу висотою H , визначається кількістю повних витків спіралі, тобто:

$$n_c = \frac{\varphi_k}{2\pi}. \quad (5.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_1 = W_0(\tau); \\ W_2 = W(\tau + \frac{2\pi}{\omega}); \\ W_3 = W(\tau + \frac{4\pi}{\omega}); \\ \dots\dots\dots \\ W_n = W(\tau + \frac{2\pi(n-1)}{\omega}). \end{array} \right. \quad (5.14)$$

Аналогічно до системи (5.12) час для системи (5.14) змінюється в межах $\frac{2\pi}{\omega} \leq \tau \leq \frac{4\pi}{\omega}$.

Зміна швидкості повітряного потоку за висотою шару матеріалу згідно [14]:

$$\omega_n = \omega_{n_0} e^{-\frac{\xi \mu h}{2d_{ек}}}, \quad (5.15)$$

де ω_{n_0} – початкова швидкість повітряного потоку, м/с;

ξ – коефіцієнт аеродинамічного опору шару;

μ – структурний фактор;

h – висота шару матеріалу, на якій визначається швидкість сушильного агента, м;

$d_{ек}$ – еквівалентний діаметр шару матеріалу, м.

Коефіцієнт аеродинамічного опору шару матеріалу [15]:

$$\xi = \frac{9}{Re} + \frac{1}{Re^{0,15}}, \quad (5.16)$$

де Re – критерій Рейнольдса.

Значення критерію Рейнольдса визначається наступним чином [16]:

$$Re = \omega_{n_0} d_{ек} / \nu, \quad (5.17)$$

де ν – кінематична в'язкість сушильного агента, м²/с.

Структурний фактор за О. Крішером [16]:

$$\mu = \mu_F \mu_n, \quad (5.18)$$

де μ_F – коефіцієнт, що є відношенням площі поверхні пор до площі поверхні поперечного перерізу цих пор, приймаємо згідно [83] $\mu_F = 1/\psi$;

μ_h – коефіцієнт покрученості шару матеріалу, що є відношенням довжини шляху проходження сушильного агента через шар матеріалу до висоти шару.

Еквівалентний діаметр шару матеріалу [16]:

$$d_{ек} = \frac{4V_{пор}}{S_{пор}}, \quad (5.19)$$

де $V_{пор}$ – об'єм пор у шарі матеріалу, м³;

$S_{пор}$ – площа поверхні пор у шарі матеріалу, м².

Так як $V_{пор} = \psi V_{ш}$ (де $V_{ш}$ – об'єм шару матеріалу), тоді, розглядаючи одиницю об'єму шару матеріалу (1м³), формулу (5.19) можна записати:

$$d_{ек} = \frac{4\psi}{S'_{пор}}, \quad (5.20)$$

де $S'_{пор}$ – площа поверхні пор в одиниці об'єму шару матеріалу (1м³), м².

Величина S'_n визначається шляхом розрахунку за результатами експериментальних досліджень таким чином:

– визначається гранулометричний склад матеріалу (кількісний розподіл частинок матеріалу за величиною);

– визначається об'єм матеріалу в шарі, утвореному з частинок однієї фракції (однакового розміру), для цього формується шар матеріалу з частинок однієї фракції, заповнюється толуолом, після чого шляхом віднімання від загального об'єму шару фракції об'єму толуолу, визначається об'єм матеріалу (аналогічно проводиться визначення об'єму матеріалу всіх фракцій);

– здійснюється перехід від реального шару до моделі шару матеріалу, що сформована з кульок різного діаметру; для цього для кожної з фракцій визначається кількість кульок моделі радіусом, що рівний радіусу отвору через який частинки фракції

не пройшли, таким чином: визначається об'єм кульки моделі $V_k = \frac{4}{3}\pi R^3$ (де R – радіус кульки (отвору)); визначається кількість кульок в моделі фракції m_n шляхом ділення об'єму частинок в шарі певної фракції на об'єм V_k ;

– оскільки площа поверхні кульки (насінини) $S = 4\pi R^2$, тоді площу поверхні пор S'_{nop} можна виразити так:

$$S'_{nop} = 4\pi \sum_{i=1}^z m_i R_i^2, \quad (5.21)$$

де m_i – кількість кульок у моделі радіусом R_i (в 1м^3 шару матеріалу);

z – кількість фракцій, на які розділяється матеріал під час визначення гранулометричного складу, шт.;

R_i – радіус, що рівний радіусу отвору сита, через яке не пройшли частинки матеріалу під час гранулометричного аналізу шару, м.

Позначимо через $K_s = \sum_{i=1}^z m_i R_i^2$ і назвемо коефіцієнтом площі поверхні частинок в шарі матеріалу з розмірністю м^2 (визначається експериментально за методикою, описаною в п. 3.3.4).

Після підстановки коефіцієнта K_s в формулу (5.20) отримаємо:

$$d_{ек} = \frac{\psi}{\pi K_s}. \quad (5.22)$$

Підставляючи (5.22) та значення μ_F в залежність (5.15), отримаємо:

$$\omega_n = \omega_{n_0} \cdot e^{-\frac{\xi \mu_h K_s h}{2\psi^2}}. \quad (5.23)$$

Використовуючи рівняння (5.23), побудовано графічну залежність зміни швидкості повітряного потоку за загальної висотою шару насіння вороху трав H (рис. 5.4).

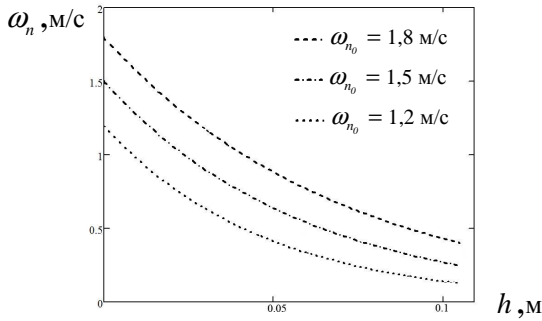


Рис. 5.4. Залежність зміни швидкості потоку сушильного агента ω_n від висоти шару h матеріалу при: $\psi = 0,69$; $\nu = 18,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\omega_{n_0} = 1,8 \text{ м/с}$; $K_s = 47,86$.

Підставляючи в залежність (5.23) значення висоти окремих шарів матеріалу з системи (5.12), можна визначити зміну швидкості потоку повітряного потоку як за висотою окремого шару так і за загальною висотою шару матеріалу H .

Таким чином, об'єднуючи системи (5.12), (5.14) та враховуючи залежність (5.23), отримаємо математичну модель, що дозволяє встановити зміну швидкості потоку повітряного потоку за висотою шару матеріалу в запропонованій сушарці:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_n = r(\omega\tau + 2\pi(n-1)) - r(\omega\tau + 2\pi(n-2)); \\ W_n = W \left(\tau + \frac{2\pi(n-1)}{\omega} \right); \\ \omega_n = \omega_{n+1} \cdot e^{\frac{\xi\pi\mu_n K_s h_n}{2\psi^2}}; \\ H = \sum_{n=1}^{n_c} [r(\omega\tau + 2\pi(n-1)) - r(\omega\tau + 2\pi(n-2))]; \\ r(\varphi) = r_0(1 - K_k e^{k_c \varphi}) + k_t \varphi; \\ \frac{2\pi}{\omega} \leq \tau \leq \frac{4\pi}{\omega}; n = 1, 2, \dots, n_c. \end{array} \right. \quad (5.24)$$

В системі (5.24) значення шпаруватості ψ визначається експериментально. Крім того під час виведення рівнянь у

системі (5.24) для спрощення зроблено припущення, що усушка частинок матеріалу незначна, відповідно значення об'ємної пористості для всіх шарів однакове.

Використовуючи отриману математичну модель (5.24), побудовано графік зміни швидкості потоку сушильного агента за висотою шару матеріалу в сушарці зі спіралеподібною перфорованою поверхнею (рис. 5.5).

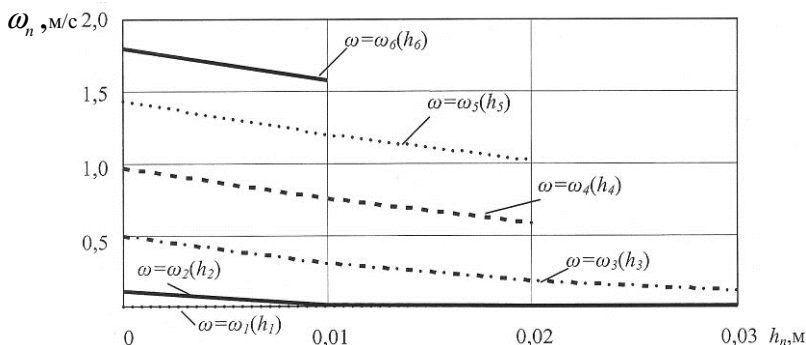


Рис. 5.5. Залежність зміни швидкості потоку сушильного агента ω_n від висоти шару матеріалу h_n в сушарці ($n=6$; $\omega_{n_0}=1,8$ м/с; $K_s=47,86$; $W=18\dots25\%$; $\psi=0,69\dots0,72$)

5.3. Дослідження впливу аеродинамічних параметрів шару матеріалу на процес його вентилявання

Під час збирання значення вологості вороху насіння травможе перевищувати 35%, тому необхідно його сушити до вологості 14%. Так як насіння з вологістю понад 14% самозігрівається, внаслідок чого погіршуються його якісні показники та воно стає непридатним для зберігання. Сушіння рослинних матеріалів є енергоємним процесом. Знизити витрати на процес можна застосовуючи енергоощадні способи сушіння, які, зокрема, передбачають оптимізацію висоти шару матеріалу через який проходить сушильний агент, що забезпечує більш ефективне використання його енергетичного потенціалу.

Важливим також для ефективного перебігу процесу сушіння є обґрунтування раціональних параметрів сушильного агента, одним з яких є зміна його швидкості за висотою шару матеріалу.

Для дослідження впливу аеродинамічних параметрів шару насіння трав на процес його вентиляції зробимо наступні допущення. З метою спрощення досліджень шар насіння замінимо моделлю. Модель шару матеріалу утворена з кульок однакового діаметру d , що мають кубічне вкладання. З огляду на запропоновану модель та приймаючи умову, що величина звільненого динамічного тиску рівна втратам тиску за висотою шару матеріалу, тобто повністю витрачається на подолання опору шару, а статичний тиск при цьому залишається постійний, отримаємо:

$$P_{до} - P_{ок} = \Delta P_{\zeta}, \quad (5.25)$$

або позначивши $P_{до} - P_{ок} = \Delta P_{\delta}$, матимемо

$$\Delta P_{\delta} = \Delta P_{\zeta}, \quad (5.26)$$

де $P_{до}$ – динамічний тиск на початку шару матеріалу, Па; $P_{ок}$ – динамічний тиск у кінці шару матеріалу, Па; ΔP_{ζ} – втрати тиску за висотою шару, Па.

За рівнянням Дарсі-Вейсбаха втрати тиску:

$$\Delta P_{\zeta} = \zeta \frac{l}{d_{ек}} \cdot \frac{\gamma_{нов} \omega^2}{2g}, \quad (5.27)$$

де ζ – коефіцієнт аеродинамічного опору; l – висота шару матеріалу, м; $d_{ек}$ – еквівалентний діаметр шару матеріалу, м; $\gamma_{нов}$ – питома вага повітря, Н/м³; ω – швидкість сушильного агента, м/с; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Крішером О. [16] запропоновано враховувати особливості будови пористого тіла структурним фактором:

$$\mu = \mu_F \mu_l. \quad (5.28)$$

Тоді, підставляючи (5.28) в (5.27), отримаємо:

$$\Delta P_{\delta} = \zeta \frac{\mu l}{d_{ек}} \cdot \frac{\gamma_{нов} \omega^2}{2g}. \quad (5.29)$$

Еквівалентний діаметр можна визначити згідно [4]:

$$d_{ек} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Pi_s}{1 - \Pi_s} d, \quad (5.30)$$

де Π_s – поверхнева пористість (просвіт).

Коефіцієнт μ_F являє собою відношення площі поверхні пор до площі поперечного перерізу цих пор. З достатньою точністю для досліджень можна прийняти [16]:

$$\mu_F = 1 / \Pi_v. \quad (5.31)$$

Покрученість шару матеріалу характеризується коефіцієнтом покрученості шару μ_l , що визначається як відношення довжини шляху проходження сушильного агента через шар матеріалу до висоти шару. Для даного способу вкладання кульок у шарі $\mu_l = 1,79$ [17].

Значення критерію Рейнольдса визначається наступним чином [16]:

$$Re = \omega_0 d / \nu, \quad (5.32)$$

де ν – кінематична в'язкість повітря, м²/с; ω_0 – початкова швидкість сушильного агента віднесена до всього перерізу шару матеріалу, м/с;

Коефіцієнт аеродинамічного опору шару матеріалу [15]:

$$\zeta = \frac{9}{Re} + \frac{1}{Re^{0,15}}. \quad (5.33)$$

Оскільки динамічний тиск повітря $P_0 = \gamma_{пов} \omega^2 / (2g)$, тоді з (5.29) дістанемо:

$$\Delta P_0 = \zeta \frac{\mu l}{d_{ек}} \cdot P_0. \quad (5.34)$$

Якщо врахувати, що на висоті шару матеріалу dl падіння динамічного тиску складе dP_0 , отримаємо (знак мінус вказує на падіння тиску):

$$\zeta \frac{\mu l}{d_{ек}} \cdot dl = -\frac{dP_0}{P_0}. \quad (5.35)$$

Інтегруючи (5.35) за початкових умов $l=0$, $P_0 = P_{00}$ та враховуючи (5.30), (5.31), отримаємо:

$$P_o = P_{o0} e^{-\frac{3 \zeta \mu_l (1 - \Pi_s) l}{4 \Pi_s^2 d}} \quad (5.36)$$

Перейшовши від динамічного тиску до швидкості повітряного потоку за висотою шару матеріалу матимемо:

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{3 \zeta \mu_l (1 - \Pi_s) l}{4 \Pi_s^2 d n}}, \quad (5.37)$$

де n – поправочний коефіцієнт.

Графік зміни швидкості повітряного потоку за висотою шару гірчиці представлені на рис. 5.6. Отримана залежність (5.37) дозволяє визначити зміну швидкості сушильного агента за висотою шару гірчиці.

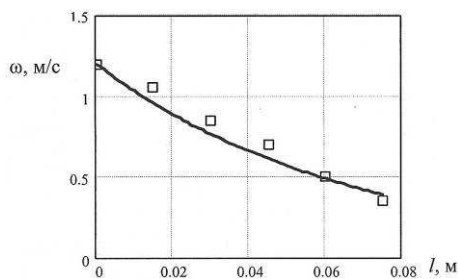


Рис. 5.6. Графік зміни швидкості сушильного агента за висотою шару матеріалу (теоретична крива та експериментальні точки) при $d = 0,002$ м; $\mu_l = 1,79$; $\Pi_s = 0,48$; $\nu = 17,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\omega_0 = 1,2$ м/с; $n = 55$

Теоретичним шляхом отримано залежність (5.37) для визначення зміни швидкості сушильного агента при вентилюванні шару гірчиці з врахуванням його аеродинамічних параметрів. Залежність (5.37) може бути використана і для інших сипких матеріалів кулястої форми. Запропоновано вдосконалену конструкцію барабанної сушарки, що забезпечує більш ефективне використання енергетичного потенціалу сушильного агента.

Внаслідок малої кутової швидкості обертання барабанної сушарки, шар матеріалу в ній протягом нескінченно малого

проміжку часу $d\tau$ можна розглядати як нерухомий. Враховуючи також, що діаметр сушильної камери значно більший за розміри частинок матеріалу, шар матеріалу в поперечному перерізі сушильної камери можна розглядати, як утворений елементарними шарами висотою в одну частинку матеріалу dh , що послідовно омиваються сушильним агентом, який рухається через низ знизу вгору у площині, перпендикулярній осі сушильної камери (рис. 5.7).

Позначивши поверхню окремої частинки матеріалу в елементарному шарі dS_h , складаємо рівняння енергетичного балансу нерухомого елементарного шару для періоду постійної швидкості [16]:

$$\alpha(t_h - t_m)dS_h = F\omega c_p \gamma dt_h \quad (5.38)$$

$$\text{або} \quad \frac{dt_h}{t_h - t_m} = \frac{\alpha}{F\omega c_p \gamma} dS_h, \quad (5.39)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С);

t_h – температура сушильного агента, °С;

t_m – температура матеріалу, °С;

F – площа пор у поперечному перерізі, м²;

ω – швидкість сушильного агента у шарі матеріалу, м/с;

c_p – теплоємність сушильного агента при сталому тиску,

Дж/(кг·°С);

γ – питома маса сушильного агента, кг/м³.

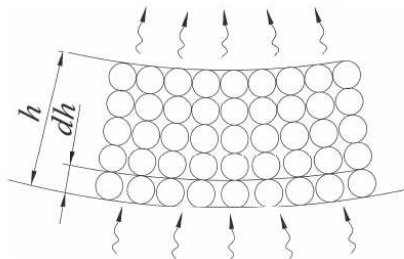


Рис. 5.7. Шар матеріалу в поперечному перерізі сушильної камери

Оскільки висота шару, через який проходить сушильний агент, є невеликою, його параметри можна прийняти сталими за висотою шару та про інтегрувати вираз (5.39):

$$\int_{t_m}^{t_{hk}} \frac{dt_h}{t_h - t_m} = \int_0^{S_h} \frac{\alpha}{F \omega c_p \gamma}, \quad (5.40)$$

де t_{hk} – температура сушильного агента на виході з шару матеріалу, °С;

t_h – температура сушильного агента на вході з шару матеріалу, °С;

S_h – площа поверхні частинок у шарі висотою h , м².

З (3) отримаємо

$$t_{hm} - t_m = (t_{hk} - t_m) e^{-\frac{\alpha S_h}{F \omega c_p \gamma}}. \quad (5.41)$$

Замінімо частинку кулькою, площа поверхні якої рівна площі поверхні частинки, а діаметр рівний висоті елементарного шару матеріалу. Тоді, прийнявши, що площа поверхні всіх частинок однакова, висоту шару матеріалу можна визначити наступним чином:

$$h = -\frac{S_h}{S_{he}} \cdot d_k, \quad (5.42)$$

де S_{he} – площа поверхні частинок в елементарному шарі, м².

Визначивши з рівняння (5.41) величину S_h та підставивши її в рівняння (5.42), отримаємо:

$$h = -\frac{d_k F \omega c_p \gamma}{\alpha} \cdot \ln \left[\frac{t_{hm} - t_m}{t_{hk} - t_m} \right], \quad (5.43)$$

де d_k – діаметр кульки, м.

Середня інтенсивність видалення вологи з шару матеріалу висотою h згідно [18]:

$$q_h = -\frac{q_0 F \omega c_p \gamma}{\alpha} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\alpha S_h}{F \omega c_p \gamma}} \right], \quad (5.44)$$

де q_0 – інтенсивність сушіння початкового елементарного шару матеріалу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Припустимо, що при перемішуванні розглядуваного шару матеріалу вздовж сушильної камери за час τ_h на відстань l сушильної камери проходить через шар матеріалу шлях h . Тоді маса вологи, яка буде видалена з розглядуваного шару поверхнею S_h при переміщенні його на відстань l , складе:

$$m_B = \frac{q_h h}{\omega}. \quad (5.45)$$

У запропонованій конструкції сушарки сушильний агент підводиться до шару матеріалу вздовж камер із однаковими початковими параметрами. Приймаючи, що вологовіддача матеріалу теж однакова, тоді раціональну довжину камери можна визначити наступним чином:

$$L = \frac{m_{B3}}{m_B}. \quad (5.46)$$

Загальна маса вологи, яку необхідно видалити з шару матеріалу:

$$m_{B3} = m_n \cdot \frac{(W_n - W_k)}{(100 - W_k)}. \quad (5.47)$$

Після підстановки в залежність (5.46) рівнянь (5.43), (5.44), (5.45), (5.47) та провівши необхідні перетворення, отримаємо:

$$L = \frac{m_n \alpha^2 S_{he} (W_n - W_k)}{q_0 d_k \omega F^2 c_p^2 \gamma^2 (100 - W_k) \left[1 - e^{-\frac{\alpha S_h}{F \omega c_p \gamma}} \right] \ln \left[\frac{t_{hm} - t_m}{t_{hk} - t_m} \right]}. \quad (5.48)$$

Необхідна швидкість переміщення матеріалу вздовж сушильної камери, $\text{м}/\text{с}$:

$$V_M = \frac{L}{\tau_h} = \frac{L \omega}{h} = \frac{m_n \alpha^3 S_{he}^2 (W_n - W_k)}{q_0 d_k^2 \omega F^3 c_p^3 \gamma^3 (100 - W_k) \left[1 - e^{-\frac{\alpha S_h}{F \omega c_p \gamma}} \right] \ln^2 \left[\frac{t_{hm} - t_m}{t_{hk} - t_m} \right]}. \quad (5.49)$$

5.4. Моделювання переміщення матеріалу у сушарці зі спіралеподібною поверхнею

Описавши рух частинки спіралеподібною поверхнею, можна розрахувати геометричні параметри та частоту обертання сушильної камери, що забезпечать мінімально необхідний час перебування матеріалу в зоні дії сушильного агента, і в результаті отримати раціональні режими роботи.

Плюска крива, розміщена у вертикальній площині Oxy і задана її графіком $r = r(\varphi)$ $\left(\frac{dr}{d\varphi} \geq 0 \right)$ у полярній системі координат $Or\varphi$, обертається у своїй площині за годинниковою стрілкою зі сталою кутовою швидкістю ω . У початковий момент часу $t=0$ у деякому місці кривої розташовано матеріальну точку масою m , що перебуває в спокої відносно абсолютної інерційної системи координат. Коефіцієнт тертя ковзання між матеріальною точкою і кривою дорівнює f . Необхідно знайти рівняння руху матеріальної точки.

Приймається допущення, що матеріальна точка не відривається від кривої, і тому розглядатимемо її рух в неінерційній системі координат, незмінно пов'язаній із заданою кривою. Центр системи відліку – у нерухомій точці O . Оскільки траєкторія точки, відповідно до умови задачі задана в полярній системі координат, то введемо у розгляд систему одиничних ортогональних векторів e_r та e_φ , спрямованих вздовж радіуса-вектора точки (частинки) та перпендикулярно до нього у напрямі відліку полярного кута φ (рис. 5.8). Відповідно до [19], $\frac{de_r}{d\varphi} = e_\varphi$, $\frac{de_\varphi}{d\varphi} = -e_r$. Додатково введемо орти натуральної системи координат: нормаль n , спрямовану у напрямі найбільшої увігнутості траєкторії, та дотичну τ . Ці вектори пов'язані із векторами e_r та e_φ залежностями:

$$\tau = (r_\varphi(\varphi)e_r + r(\varphi)e_\varphi) / J(\varphi), \quad (5.60)$$

$$n = (-r(\varphi)e_r + r'_\varphi(\varphi)e_\varphi) / J(\varphi), \quad (5.61)$$

де $J(\varphi) = \sqrt{[r(\varphi)]^2 + [r'_\varphi(\varphi)]^2}$ – якобіан.

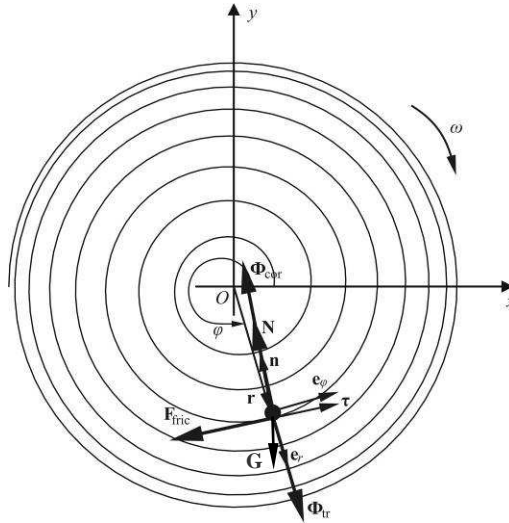


Рис. 5.8. Розрахункова схема до визначення часу перебування матеріалу в зоні дії сушильного агента

Переносне (транспортне) прискорення (тобто прискорення, зумовлене обертанням системи координат разом із кривою) для матеріальної точки дорівнює

$$a_{tr} = -\omega^2 r(\varphi)e_r, \quad (5.64)$$

і спрямоване до центра O обертання, оскільки кутове прискорення системи координат, незмінно пов'язаної з кривою, відповідно до умови задачі дорівнює нулю ($\omega = const$, $\varepsilon = \dot{\omega} = 0$).

Коріолісове прискорення матеріальної точки обчислимо з урахуванням того, що вектор переносної кутової швидкості дорівнює $\omega_r = \omega[n \times \tau]$. Тобто коріолісове прискорення точки, відповідно до означення [20] дорівнює

$$\begin{aligned} a_{cor} &= 2[\omega_{tr} \times v_{rel}] = 2\omega J(\varphi)\dot{\varphi}[[n \times \tau] \times \tau] = \\ &= -2\omega J(\varphi)\dot{\varphi}[\tau \times [n \times \tau]] = -2\omega J(\varphi)\dot{\varphi}n. \end{aligned} \quad (5.65)$$

Тут символом « \times » позначено операцію векторного добутку.

Отже, відповідно до (5.64) і (5.65) та принципу Даламбера [20] переносна та коріолісова сили інерції дорівнюють:

$$\Phi_{tr} = -ma_{tr} = m\omega^2 r(\varphi)e_r, \quad (5.66)$$

$$\Phi_{cor} = -ma_{cor} = 2m\omega J(\varphi)\dot{\varphi}n. \quad (5.67)$$

Окрім сил інерції (5.66) і (5.67) на матеріальну точку діють:

– нормальна реакція в'язі (кривої)

$$N_g = Nn; \quad (5.68)$$

– сила тертя ковзання, що відповідно до закону Кулона [20] вважається рівною

$$F_{fric} = -fN\text{sign}(v_{rel} \cdot \tau) = -fN\text{sign}(\dot{\varphi})\tau; \quad (5.69)$$

– сила ваги матеріальної точки, вектор якої у вибраній неінерційній системі координат має вигляд

$$G = mg[\sin(\omega t - \varphi)e_r - \cos(\omega t - \varphi)e_\varphi]. \quad (5.70)$$

Відповідно до другого закону Ньютона [20], записаного для неінерційної системи відліку, відносно прискорення матеріальної точки пропорційне до векторної суми активних сил, реакцій в'язей та сил інерції, що діють на неї, тобто

$$ma_{rel} = F_{fric} + G + N_g + \Phi_{tr} + \Phi_{cor}. \quad (5.71)$$

Запишемо векторну рівність (5.71) у проекціях на осі натуральної системи координат, означеної векторами (n, τ) . Для цього скалярну рівність (5.71) спочатку помножимо на τ , а потім на n із урахуванням наступних залежностей:

$$n \cdot n = 1, \tau \cdot \tau = 1, n \cdot \tau = 0, e_r \cdot e_r = 1, e_\varphi \cdot e_\varphi = 1, e_r \cdot e_\varphi = 0,$$

$$n \cdot e_r = (-r(\varphi)e_r + r'_\varphi(\varphi)e_\varphi) / J(\varphi) \cdot e_r = -r(\varphi) / J(\varphi);$$

$$n \cdot e_\varphi = (-r(\varphi)e_r + r'_\varphi(\varphi)e_\varphi) / J(\varphi) \cdot e_\varphi = r'_\varphi(\varphi) / J(\varphi);$$

$$\tau \cdot e_r = (r'_\varphi(\varphi)e_r + r(\varphi)e_\varphi) / J(\varphi) \cdot e_r = r'_\varphi(\varphi) / J(\varphi);$$

$$\tau \cdot e_\varphi = (r'_\varphi(\varphi)e_r + r(\varphi)e_\varphi) / J(\varphi) \cdot e_\varphi = r(\varphi) / J(\varphi). \quad (5.72)$$

У такий спосіб отримаємо рівняння відносного руху матеріальної точки уздовж кривої $r = r(\varphi)$:

$$\ddot{\varphi}J(\varphi) + (\dot{\varphi})^2 \alpha(\varphi) = -f\tilde{N} \operatorname{sign}(\dot{\varphi}) + \frac{g}{J(\varphi)} [r'_\varphi(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) - r(\varphi) \cos(\omega t - \varphi)] + \frac{\omega^2 r(\varphi) r'_\varphi(\varphi)}{J(\varphi)}, \quad (5.73)$$

$$\text{де} \quad \tilde{N} = \frac{N}{m} = \frac{(\dot{\varphi}J(\varphi))^2}{\rho(\varphi)} + \frac{[\omega r(\varphi)]^2}{J(\varphi)}$$

$$-2\omega J(\varphi)\dot{\varphi} + \frac{g}{J(\varphi)} [r(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) + r'_\varphi(\varphi) \cos(\omega t - \varphi)]. \quad (5.74)$$

Якщо матеріальну точку розмістити на кривій без початкової швидкості в абсолютній системі координат, то початкові умови задачі, з урахуванням вибраних напрямів відліку кута φ та кутової швидкості ω обертання системи відліку, мають вигляд

$$\varphi(0) = \varphi_0; v_{rel}(0) \cdot e_\varphi(\varphi_0) = \omega r(\varphi_0) \Rightarrow \dot{\varphi}(0) = \omega. \quad (5.75)$$

Рівняння (5.73) необхідно розв'язувати з урахуванням умови $\tilde{N} \geq 0$, тобто того, що матеріальна точка не відривається від поверхні кривої.

Диференціальне рівняння (5.73) є нелінійним диференціальним рівнянням зі змінними коефіцієнтами, тому для його розв'язування використовуються числові методи. Оскільки в (5.73) присутня розривна функція sign , то для забезпечення стійкості розв'язку необхідно вибирати числову схему зі сталим кроком. Отже, оптимальним є розв'язування задачі методом Рунге-Куты 4 порядку.

Розроблена математична модель дозволяє візуально відобразити траєкторію руху матеріалу спіралеподібною поверхнею (рис. 5.9).

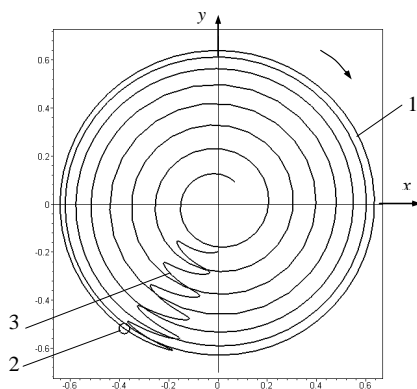


Рис. 5.9. Схема руху матеріальної частинки спіралеподібною поверхнею: 1 – плоска крива; 2 – матеріальна точка; 3 – траєкторія руху матеріальної точки

Провівши числовий експеримент із застосування запропонованої математичної моделі, отримано теоретичну графічну залежність часу перебування насінневого матеріалу в зоні дії сушильного агента залежно від частоти обертання сушильної камери та коефіцієнта тертя вороху спіралеподібною поверхнею (рис. 5.10).

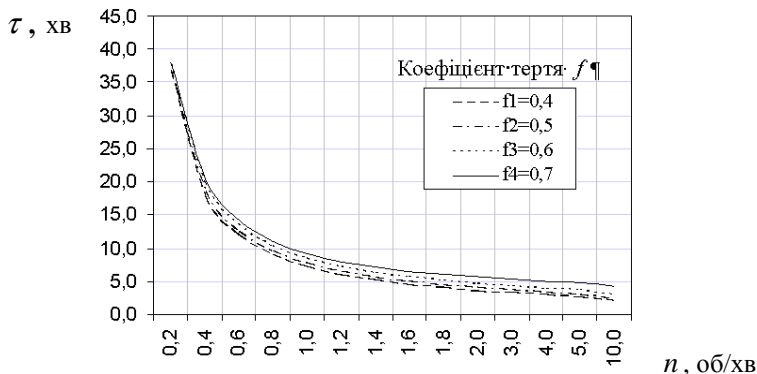


Рис. 5.10. Графічна залежність часу перебування матеріалу в зоні дії сушильного агента від частоти обертання сушильної камери при різних значеннях коефіцієнта тертя

5.5. Моделювання переміщення матеріалу у сушарці з лопатями

Переміщення сипкого матеріалу з секції в секцію відбувається шляхом пересипання через перевантажувальні вікна. Для забезпечення пересипання матеріалу в повному об'ємі необхідно визначити мінімально необхідний розмір перевантажувального вікна. Розглянемо процес переміщення найбільш віддаленої від центра обертання O_1 частинки матеріалу лопаттю (рис. 5.11). Частинку матеріалу розглядаємо

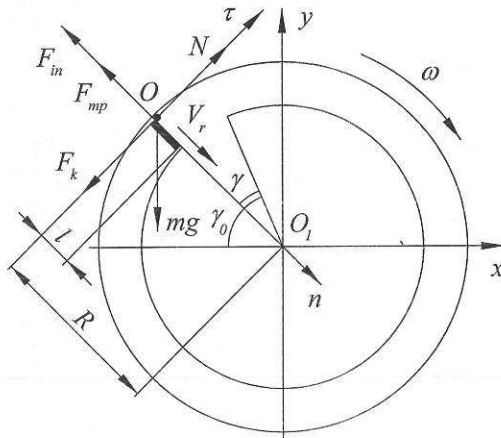


Рис. 5.11. Розрахункова схема

як матеріальну точку. Таким чином, частинка матеріалу здійснює відносний рух лопаттю починаючи з точки O , що знаходиться на відстані R від центра обертання O_1 . Шлях, який має пройти частинка матеріалу лопаттю, рівний довжині лопаті l . Уздовж лопаті спрямуємо руху ось On , перпендикулярно лопаті – вісь $O\tau$. На частинку діє сила ваги mg , сила тертя F_{mp} та нормальна реакція поверхні лопаті N . Оскільки переносним є обертальний рух лопаті в площині xO_1y навколо центра O_1 з постійною кутовою швидкістю ω , то на частинку також будуть

діяти відцентрова сила інерції F_{in} та коріолісова сила інерції F_k . Знехтуємо впливом сили повітряного потоку на частинку, оскільки швидкість сушильного агента є незначною. Спроекувавши всі сили на осі On та $O\tau$, одержимо:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 n}{dt^2} = mg \sin(\gamma_0 + \gamma) - F_{mp} - F_{in}; \\ m \frac{d^2 \tau}{dt^2} = N - F_k - mg \cos(\gamma_0 + \gamma), \end{cases} \quad (5.76)$$

де m – маса частинки сипкого матеріалу, кг;

n – шлях, що проходить частинка сипкого матеріалу вздовж осі On , м;

τ – шлях, що проходить частинка сипкого матеріалу вздовж осі $O\tau$, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

t – час, с;

γ_0 – кут між горизонталлю та радіусом проведеним до початку перевантажувального вікна, град.;

γ – кут повороту лопаті за який матеріал сходить з неї, град.;

N – нормальна реакція поверхні лопаті, Н;

Сила інерції переносного руху:

$$F_{in} = m(R - n)\omega^2 = mR\omega^2 - m\omega^2 n, \quad (5.77)$$

де R – відстань від центру обертання O_l до зовнішнього краю лопаті секції, що розглядається, м;

ω – кутова швидкість обертання лопаті, рад./с;

Коріолісова сила інерції:

$$F_k = 2m\omega V_r \sin(\bar{\omega}, \widehat{V}_r) = 2m\omega \frac{dn}{dt}, \quad (5.78)$$

де V_r – відносна швидкість руху частинки матеріалу вздовж лопаті, м/с;

Сила тертя:

$$F_{mp} = fN. \quad (5.79)$$

Оскільки частинка рухається вздовж лопаті, то $\frac{d^2\tau}{dt^2} = 0$. З другого рівняння системи (5.76) визначимо нормальну реакцію поверхні лопаті:

$$N = 2m\omega \frac{dn}{dt} + mg \cos(\gamma_0 + \gamma). \quad (5.80)$$

Кут повороту лопаті γ можна записати наступним чином:

$$\gamma = \omega t. \quad (5.81)$$

Підставляючи в перше рівняння системи (5.76) значення сил тертя F_{mp} та інерції переносного руху F_{in} , а також зробивши заміну $\gamma = \omega t$, після перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{d^2n}{dt^2} = g(\sin \gamma_0 - f \cos \gamma_0) \cos(\omega t) + g(\cos \gamma_0 + f \sin \gamma_0) \sin(\omega t) - \\ - 2f\omega \frac{dn}{dt} + \omega^2 n - R\omega^2. \end{aligned} \quad (5.82)$$

Далі позначимо:

$$A = g(\sin \gamma_0 - f \cos \gamma_0), \quad B = g(\cos \gamma_0 + f \sin \gamma_0), \quad D = -R\omega^2. \quad (5.83)$$

Тоді рівняння (5.82) матиме вигляд:

$$\frac{d^2n}{dt^2} + 2f\omega \frac{dn}{dt} - \omega^2 n = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) + D. \quad (5.84)$$

Розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (9) шукатимемо в вигляді:

$$n = n1 + n2, \quad (5.85)$$

де $n1$ – загальний розв'язок однорідного диференціального рівняння;

$n2$ – частковий розв'язок неоднорідного диференціального рівняння;

Знайдемо загальний розв'язок однорідного диференціального рівняння:

$$\frac{d^2n}{dt^2} + 2f\omega \frac{dn}{dt} - \omega^2 n = 0. \quad (5.86)$$

Складемо характеристичне рівняння для рівняння (5.86):

$$k^2 + 2f\omega k - \omega^2 = 0. \quad (5.87)$$

Корені характеристичного рівняння (5.87) k_1 та k_2 :

$$k_{1,2} = \omega(-f \pm \sqrt{f^2 + 1}). \quad (5.88)$$

Розв'язок однорідного диференціального рівняння:

$$n1 = c_1 e^{k_1 t} + c_2 e^{k_2 t}. \quad (5.89)$$

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння шукатимемо в вигляді:

$$n2 = n21 + n22, \quad (5.90)$$

де $n21$, $n22$ – часткові розв'язки неоднорідного диференціального рівняння;

Частковий розв'язок $n21$:

$$n21 = K \cos(\omega t) + M \sin(\omega t). \quad (5.91)$$

Двічі диференціюючи (5.91) та підставивши отримані значення в рівняння (5.84), визначимо значення сталих N та M :

$$K = -\frac{A + Bf}{2\omega^2(1 + f^2)}, \quad M = \frac{Af - B}{2\omega^2(1 + f^2)}. \quad (5.92)$$

Підставляючи K та M в рівняння (5.91), отримаємо:

$$n21 = -\frac{A + Bf}{2\omega^2(1 + f^2)} \cos(\omega t) + \frac{Af - B}{2\omega^2(1 + f^2)} \sin(\omega t). \quad (5.93)$$

Частковий розв'язок $n22$:

$$n22 = L. \quad (5.94)$$

Двічі диференціюючи рівняння (5.94) та підставляючи отримані значення в (5.84), знайдемо L :

$$L = -\frac{D}{\omega^2}. \quad (5.95)$$

Після підстановки виразів (5.93) та (5.94) в вираз (5.90), частковий розв'язок неоднорідного рівняння матиме вигляд:

$$n2 = -\frac{A + Bf}{2\omega^2(1 + f^2)} \cos(\omega t) + \frac{Af - B}{2\omega^2(1 + f^2)} \sin(\omega t) - \frac{D}{\omega^2}. \quad (5.96)$$

Таким чином, загальний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (5.84) матиме вигляд:

$$n = c_1 e^{(\sqrt{f^2 + 1} - f)\omega t} + c_2 e^{-(\sqrt{f^2 + 1} + f)\omega t} -$$

$$-\frac{A+Bf}{2\omega^2(1+f^2)}\cos(\omega t) + \frac{Af-B}{2\omega^2(1+f^2)}\sin(\omega t) - \frac{D}{\omega^2}. \quad (5.97)$$

Для визначення сталих c_1 та c_2 продиференціюємо рівняння (5.97):

$$\frac{dn}{dt} = c_1 \left(\sqrt{f^2+1} - f \right) \omega e^{(\sqrt{f^2+1}-f)\omega t} - c_2 \left(\sqrt{f^2+1} + f \right) \omega e^{-(\sqrt{f^2+1}+f)\omega t} + \frac{A+Bf}{2\omega(1+f^2)}\sin(\omega t) + \frac{Af-B}{2\omega(1+f^2)}\cos(\omega t). \quad (5.98)$$

Враховуючи початкові умови $t=0$, $n = \frac{dn}{dt} = 0$, з рівнянь (5.97) та (5.98) знайдемо сталі c_1 та c_2 :

$$c_1 = \frac{1}{\omega^2} \left[\frac{g \sin \gamma_0}{2} - R\omega^2 - \frac{1}{2\sqrt{f^2+1}} \left(\left(\frac{g \sin \gamma_0}{2} - R\omega^2 \right) \times \left(\sqrt{f^2+1} - f \right) - \frac{g \cos \gamma_0}{2} \right) \right], \quad (5.99)$$

$$c_2 = \frac{1}{2\omega^2\sqrt{f^2+1}} \left[\left(\frac{g \sin \gamma_0}{2} - R\omega^2 \right) \left(\sqrt{f^2+1} - f \right) - \frac{g \cos \gamma_0}{2} \right]. \quad (5.100)$$

Враховуючи (5.83), загальний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (5.97) матиме вигляд:

$$n = c_1 e^{(\sqrt{f^2+1}-f)\omega t} + c_2 e^{-(\sqrt{f^2+1}+f)\omega t} - \frac{g}{2\omega^2} (\sin \gamma_0 \cos(\omega t) + \cos \gamma_0 \sin(\omega t)) + R. \quad (5.101)$$

Задаючи значення шляху n , який проходить частинка матеріалу, що в даному випадку є довжиною лопаті l (шириною секції), можна визначити час руху t . Після цього з (5.81) знайти мінімально необхідне значення кута γ , яке забезпечувало б повне перевантаження матеріалу з однієї секції в наступну. Оскільки аналітичний розв'язок рівняння (5.101) є складним, доцільно побудувати графічну залежність $n(t)$ (рис. 5.12) з якої

за відомим значенням довжини лопаті n можна визначити час t .

Отримана аналітичним шляхом залежність (5.101) дозволяє визначити конструктивні параметри сушарки. Запропонована конструкція сушарки сипких матеріалів дозволяє підвищити продуктивність її роботи за рахунок повного використання об'єму сушильної камери та реалізувати енергоощадні способи сушіння.

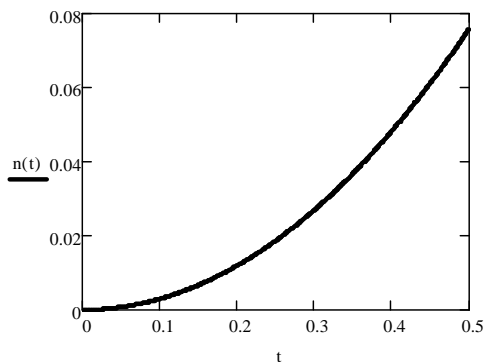


Рис. 5.12. Графічна залежність шляху n , що проходить частинка матеріалу, від часу t якщо: $R = 0,4$ м; $f = 0,04$; $\omega = 0,01$ рад/с; $\gamma_0 = 25$ град

5.6. Обґрунтування конструктивних параметрів сушарки

У запропонованій конструкції сушарки (рис. 4.1.) переміщення матеріалу у сушильній камері відбувається поверхнею, яка скручена спіралеподібно. Для раціонального розміщення матеріалу в сушильній камері, необхідно обґрунтувати закономірність, за якою скручена поверхня, оскільки розміщення матеріалу визначає ефективність сушіння та використання сушильного агента.

На рис. 5.13 представлені поверхні скручені за логарифмічною спіраллю (рис. 5.13, а) та за спіраллю Архімеда (рис. 5.13, б). Рівняння логарифмічної спіралі [21]:

$$r_1(\varphi) = r_0 e^{k \cdot \varphi}, \quad (5.102)$$

де $r_1(\varphi)$ – відстань від центра спіралі до витка спіралі з кутом φ ;

r_0 – початкове значення найменшого радіуса витка спіралі при $\varphi = 0$, м;

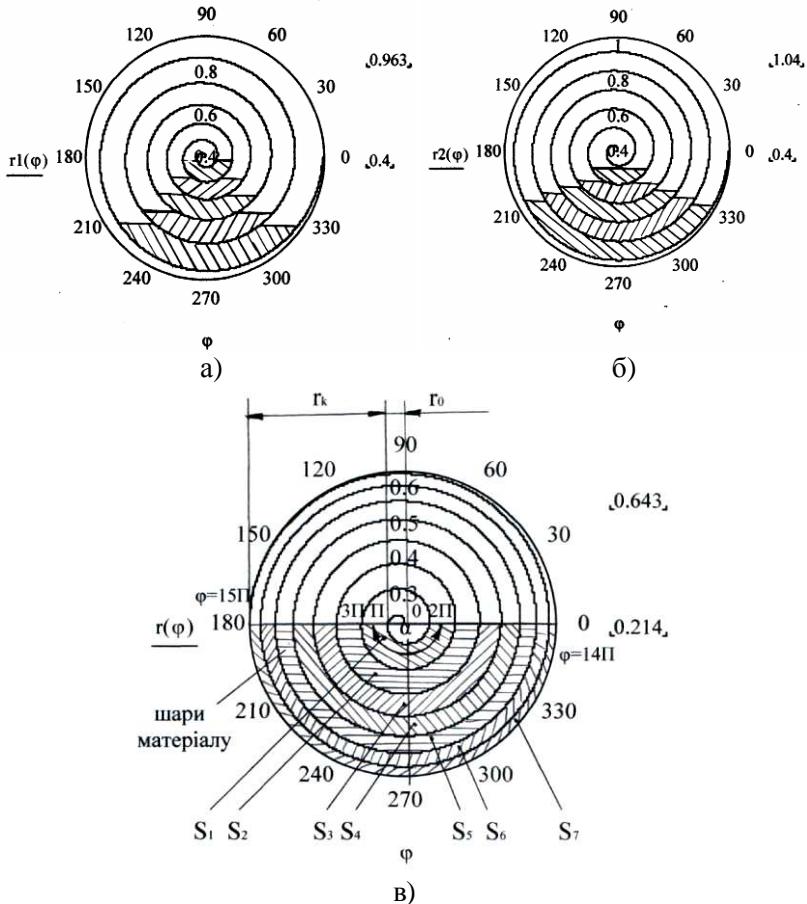


Рис. 5.13. Розміщення матеріалу на спіралеподібній поверхні, яка скручена за рівнянням логарифмічної спіралі (а), спіралі Архімеда (б) та запропонована спіраль (в)

k_c – коефіцієнт.

Коефіцієнт k_c визначається наступним чином:

$$k_c = \frac{I}{\varphi_k} \ln \left(\frac{r_k}{r_0} \right), \quad (5.102)$$

де r_k , φ_k – найбільший радіус спіралі та відповідний йому кут спіралі.

Рівняння спіралі Архімеда [112]:

$$r_2(\varphi) = r_0 + k_t \varphi, \quad (5.103)$$

де k_t – коефіцієнт.

Коефіцієнт k_t визначається наступним чином:

$$k_t = \frac{r_k - r_0}{\varphi_k}. \quad (5.104)$$

Аналіз розміщення матеріалу в сушильній камері з поверхнею, побудованою за рівнянням логарифмічної спіралі, та з поверхнею, побудованою за рівнянням спіралі Архімеда, показує, що в цих випадках сушильний агент не буде проходити через весь об'єм матеріалу, а рухатиметься через шари матеріалу з меншою загальною висотою, тобто з меншим опором потоку сушильного агента. Таке розміщення матеріалу пов'язане з тим, що для логарифмічної спіралі відстань між сусідніми витками спіралі (крок спіралі), збільшується зі зростанням кута φ . Для спіралі Архімеда величина кроку залишається постійною.

Для усунення зазначених недоліків, тобто для збільшення висоти шарів з боків сушильної камери, необхідно, щоб кут α (рис. 5.13, в), який характеризує розміщення матеріалу між витками, для всіх шарів наближався до 180° . Тобто під час переміщення шару (порції) матеріалу спіралеподібною поверхнею, необхідно, щоб кут α для нього залишався постійним ($\alpha = 180^\circ$). Таке розміщення матеріалу можна забезпечити у випадку, якщо крок спіралі, за якою скручена поверхня, буде зменшуватися зі зростанням φ . Рівняння такої спіралі можна представити в наступному вигляді:

$$r(\varphi) = r_2(\varphi) - K_k r_1(\varphi) = r_0(1 - K_k e^{k_c \varphi}) + k_t \varphi, \quad (5.106)$$

де K_k – конструктивний коефіцієнт.

З конструктивних міркувань приймаємо: найбільший кут спіралі $\varphi_k = 15\pi$; кількість повних витків спіралі $n = 7$; початкове наближення найменшого радіуса спіралі $r_0 = 0,4$ м та найбільшого радіуса спіралі $r_k = 1,2$ м.

Для досягнення потрібного розміщення матеріалу ($\alpha = 180^\circ$) необхідно, щоб площі S_1, S_2, \dots, S_n (рис. 2.14, в) між витками спіралі були рівними, тобто $S_1 = S_2 = \dots = S_n = S$. Це можливо при певному значенні конструктивного коефіцієнта, який можна встановити, визначивши площі S_i та S_7 .

Площа сегмента спіралі визначається наступним чином:

$$S_{\text{сез.}} = \frac{1}{2} \int_{\varphi}^{\varphi+\pi} r^2(\varphi) d\varphi = \frac{1}{2} \int_{\varphi}^{\varphi+\pi} ((r_0 + k_t \varphi) - K_k r_0 e^{k_c \varphi})^2 d\varphi =$$

$$= \int_{\varphi}^{\varphi+\pi} (r_0^2 + 2r_0 k_t \varphi + k_t^2 \varphi^2 - 2K_k r_0^2 e^{k_c \varphi} - 2K_k k_t r_0 \varphi e^{k_c \varphi} + K_k^2 r_0^2 e^{2k_c \varphi}) d\varphi. \quad (5.107)$$

Після інтегрування отримаємо:

$$S_{\text{сез.}} = \frac{1}{2} \left[\varphi \left(r_0^2 + r_0 k_t \varphi + \frac{k_t^2}{3} \varphi^2 \right) - \right. \\ \left. - \frac{2K_k r_0}{k_c} e^{k_c \varphi} \left(r_0 + k_t \left(\varphi - \frac{1}{k_c} \right) \right) + \frac{K_k^2 r_0^2}{2k_c} e^{2k_c \varphi} \right] \Big|_{\varphi}^{\varphi+\pi} \quad (5.108)$$

Площа між двома сусідніми витками спіралі (при $\alpha = 180^\circ$) у загальному вигляді:

$$S(y) = S_3(\varphi) - S_6(\varphi), \quad (5.109)$$

де $S_3(\varphi)$ – площа сегмента, обмеженого зовнішнім витком спіралі;

$S_6(\varphi)$ – площа сегмента, обмеженого внутрішнім витком спіралі.

Визначимо $S_6(\varphi)$ та $S_3(\varphi)$ за формулою (5.108):

$$\begin{aligned}
 S_6(\varphi) = S_{\text{сез.}}(\varphi) \Big|_{\varphi}^{\varphi+\pi} = K_k^2 \left[\frac{r_0^2}{4k_c} (e^{2k_c(\varphi+\pi)} - e^{2k_c\varphi}) \right] + \\
 + K_k \left[\frac{r_0}{k_c} \left(e^{k_c\varphi} \left(r_0 + k_t \left(\varphi - \frac{1}{k_c} \right) \right) - e^{k_c(\varphi+\pi)} \left(r_0 + k_t \left((\varphi + \pi) - \frac{1}{k_c} \right) \right) \right) \right] + \\
 + \frac{1}{2} \left[(\varphi + \pi) \left(r_0^2 + r_0 k_t (\varphi + \pi) + \frac{k_t^2}{3} (\varphi + \pi)^2 \right) - \varphi \left(r_0^2 + r_0 k_t \varphi + \frac{k_t^2}{3} \varphi^2 \right) \right]
 \end{aligned} \tag{5.110}$$

Для спрощення запису введемо позначення в залежності (5.110):

$$S_6(\varphi) = K^2 A(\varphi) + KB(\varphi) + C(\varphi). \tag{5.111}$$

$$\begin{aligned}
 S_3(\varphi) = S_{\text{сез.}}(\varphi) \Big|_{\varphi+2\pi}^{\varphi+3\pi} = K_k^2 \left[\frac{r_0^2}{4k_c} (e^{2k_c(\varphi+3\pi)} - e^{2k_c(\varphi+2\pi)}) \right] + \\
 + K_k \left[\frac{r_0}{k_c} \left(e^{k_c(\varphi+2\pi)} \left(r_0 + k_t \left((\varphi + 2\pi) - \frac{1}{k_c} \right) \right) - e^{k_c(\varphi+3\pi)} \left(r_0 + k_t \left((\varphi + 3\pi) - \frac{1}{k_c} \right) \right) \right) \right] + \\
 + \frac{1}{2} \left[(\varphi + 3\pi) \left(r_0^2 + r_0 k_t (\varphi + 3\pi) + \frac{k_t^2}{2} (\varphi + 3\pi)^2 \right) - \right. \\
 \left. - (\varphi + 2\pi) \left(r_0^2 + r_0 k_t (\varphi + 2\pi) + \frac{k_t^2}{3} (\varphi + 2\pi)^2 \right) \right].
 \end{aligned} \tag{5.112}$$

Для спрощення запису введемо позначення в залежності (5.112):

$$S_3(\varphi) = K_k^2 D(\varphi) + K_k E(\varphi) + F(\varphi). \tag{5.113}$$

Підставляючи вирази (5.111) та (5.113) в (5.109), отримаємо:

$$S(\varphi) = K_k^2 (D(\varphi) - A(\varphi)) + K_k (E(\varphi) - B(\varphi)) + (F(\varphi) - C(\varphi)). \tag{5.114}$$

Визначимо площі S_l та S_7 за залежністю (5.114) при значенні кутів відповідно $\varphi = 0$ та $\varphi = \varphi_k - 3\pi = 12\pi$:

$$S_l(0) = K_k^2(D(0) - A(0)) + K_k(E(0) - B(0)) + (F(0) - C(0)), \quad (5.115)$$

$$S_7(12\pi) = K_k^2(D(12\pi) - A(12\pi)) + K_k(E(12\pi) - B(12\pi)) + (F(12\pi) - C(12\pi)). \quad (5.116)$$

Привівнявши рівняння (5.115) та (5.116), отримаємо:

$$K_k^2(D(0) - A(0) - D(12\pi) + A(12\pi)) + K_k(E(0) - B(0) - E(12\pi) + B(12\pi)) + (F(0) - C(0) - F(12\pi) + C(12\pi)) = 0. \quad (5.117)$$

Для спрощення запису введемо позначення в залежності (5.117):

$$aK_k^2 + bK_k + c = 0. \quad (5.118)$$

Розв'язок рівняння (5.118) буде:

$$K_{k_{1,2}} = -\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (5.119)$$

З двох значень конструктивного коефіцієнта K_k вибирають те, що задовільняє умову:

$$0 < K_k < 1. \quad (5.120)$$

Розв'язок рівняння (5.118) при прийнятих значеннях r_0 , r_k , φ_k за допомогою пакету комп'ютерної математики MathCAD дозволив отримати значення конструктивного коефіцієнта $K_k = 0,464$. Розраховані за цим значенням найменший та найбільший радіус витка склали відповідно $r_0 = 0,214$ м; $r_k = 0,643$ м; площа $S_l = 0,065$ м².

За отриманими значеннями побудовані графічні залежності площі $S(\varphi)$, кроку спіралі $h(\varphi)$ та радіуса витка $r(\varphi)$ від кута φ (рис. 5.14).

Порівняльний аналіз графічних залежностей площі між витками спіралі від кута φ для логарифмічної спіралі $SL(\varphi)$, спіралі Архімеда $SA(\varphi)$ та запропонованої спіралі $S(\varphi)$ дозволяє зробити висновок, що запропонована спіраль забезпечує найменше

відхилення значень площ між витками спіралі, а, відповідно, досягається найбільш раціональне розміщення матеріалу в сушильній камері.

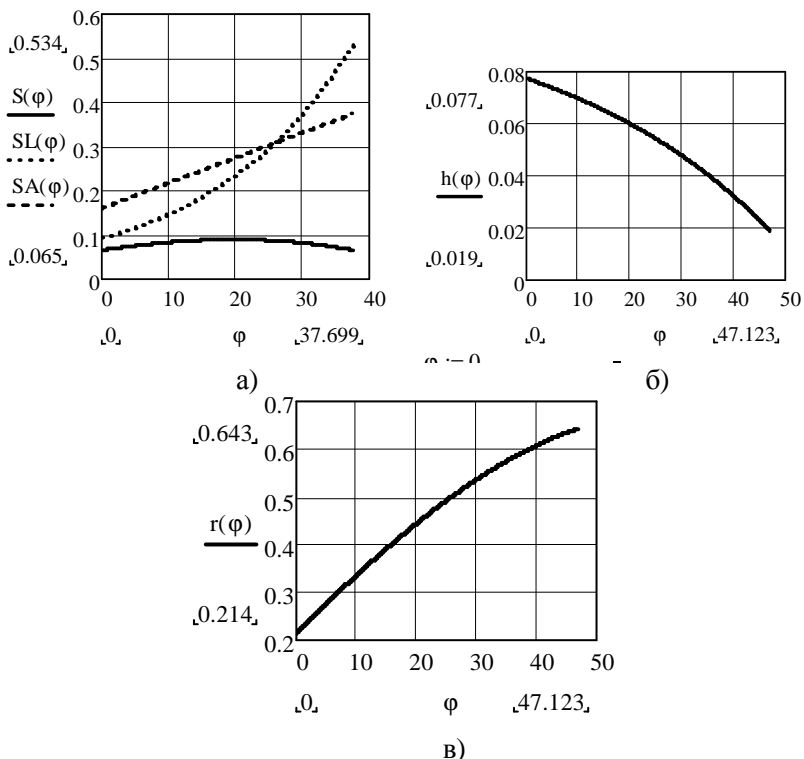


Рис. 5.14. Графічні залежності : а – площі між витками спіралі від кута φ для логарифмічної спіралі $SL(\varphi)$, спіралі Архімеда $SA(\varphi)$ та запропонованої спіралі $S(\varphi)$; б – кроку спіралі h від кута φ ; в) радіусу спіралі r від кута φ .

Масу матеріалу, яку необхідно завантажувати в сушарку для її раціонального заповнення та ефективного використання сушильного агента (рис. 5.15), можна визначити за залежністю:

$$m_m = \rho S l, \quad (5.121)$$

де ρ – щільність матеріалу, кг/м³;

l – ширина спіралеподібної поверхні сушарки, м

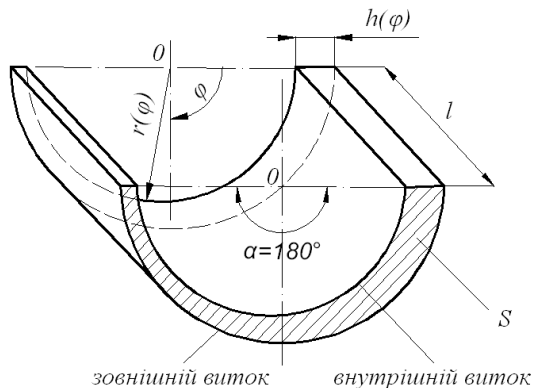


Рис. 5.15. Розрахункова схема до визначення маси порції матеріалу для завантаження в сушарку

5.7. Дослідження процесу вивантаження матеріалу з сушарки

Сушильне обладнання, що використовується в переробних виробництвах продукції рослинництва, конструктивно та технологічно різноманітне. Як результат, в сушарках реалізовано різні способи переміщення матеріалу під час сушіння. У запропонованій конструкції сушарки процес вивантаження матеріалу з сушильної камери має свої особливості, що вимагає додаткових досліджень в цьому напрямку.

Вивантаження матеріалу з барабанної сушарки (рис. 5.16) [22], що має спіралеподібну поверхню, без втрат сушильного агента забезпечується особливостями конструкції. Спіралеподібна поверхня розміщується в нерухомій циліндричній обичайці в нижній частині якої передбачено вікно для вивантаження матеріалу з витків спіралеподібної поверхні та проходження сушильного агента, а в верхній частині –

перфорація для відведення з сушильної камери відпрацьованого сушильного агента. Циліндрична обичайка розміщена в кожусі, який обладнано в нижній та верхній частинах перфорацією для циркуляції сушильного агента, а також вивантажувальним отвором. У просторі між обичайкою та кожухом передбачено полички, що здійснюють обертальний рух.

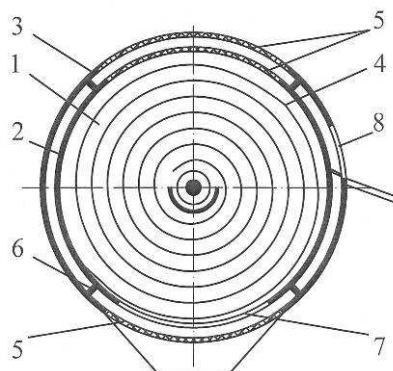


Рис. 5.16. Сушарка з спіралеподібною поверхнею: 1 – сушильна камера; 2 – циліндрична обичайка; 3 – кожух; 4 – спіралеподібна поверхня; 5 – перфоровані вставки; 6 – поличка; 7 – вікно для вивантаження матеріалу; 8 – вивантажувальний отвір

Процес вивантаження матеріалу з сушарки відбувається таким чином: матеріал з останнього витка спіралеподібної поверхні надходить в простір між обичайкою та кожухом, де захоплюється поличками та транспортується до вивантажувального отвору в кожусі.

Розглянемо процес вивантаження матеріалу з сушарки. Нехай частинка матеріалу A масою m рухається з поличкою зовнішньою поверхнею обичайки з положення A_0 (рис. 5.17). Поличка здійснює обертальний рух з кутовою швидкістю ω . Визначимо значення кута θ повороту полички, за якого частинка A буде продовжувати рух разом з поличкою, тобто залишатися в стані відносного спокою, тобто не буде ковзати

вниз. Це можливо за умови, що всі сили, які діють на частинку під час обертання з поличкою, взаємно врівноважені. На частинку діють: сила ваги частинки mg , спрямована вертикально вниз; сила реакції N поверхні обичайки, спрямована вздовж радіуса $OA = r$; сила тертя $F_{mp} = fN$, спрямована вздовж дотичної до поверхні обичайки; відцентрова сила інерції переносного руху $P_{in} = m\omega^2 r$; силою дії потоку відпрацьованого сушильного агента нехтуємо, внаслідок незначної його швидкості.

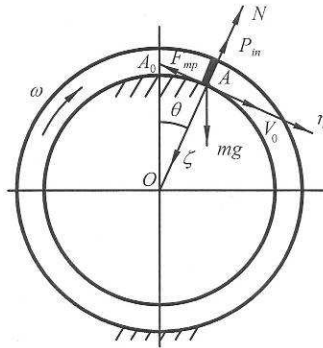


Рис. 5.17. Розрахункова схема до визначення кута θ_0

Початком рухомих координат $\zeta A\eta$ вважаємо точку A та спрямовуємо вісь $A\zeta$ вздовж радіуса OA , а вісь $A\eta$ – перпендикулярно до радіуса. Для того, щоб частинка перебувала в рівновазі, сума проекцій сил на осі $A\zeta$ та $A\eta$ має дорівнювати нулю, тобто:

$$\begin{cases} A\zeta : mg \cos \theta - N - P_{in} = 0; \\ A\eta : mg \sin \theta - F_{mp} = 0. \end{cases} \quad (5.122)$$

З першого рівняння системи (5.122) визначимо силу реакції поверхні обичайки:

$$N = mg \cos \theta - P_{in}. \quad (5.123)$$

Підставивши значення сил P_{in} та F_{mp} , а також N в друге рівняння системи (5.122), отримаємо:

$$g \sin \theta - fg \cos \theta = -f \omega^2 r. \quad (5.124)$$

Коефіцієнт тертя f можна записати через кут тертя φ :

$$f = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}. \quad (5.125)$$

Підставивши значення f в рівняння (5.124) та провівши перетворення, отримаємо:

$$\sin \theta \cos \varphi - \cos \theta \sin \varphi = -\frac{\omega^2 r \sin \varphi}{g}, \quad (5.126)$$

або

$$\sin(\theta - \varphi) = -\frac{\omega^2 r \sin \varphi}{g}. \quad (5.127)$$

З рівняння (5.127) визначимо значення кут θ_0 до якого частинка буде рухатися разом з полицкою:

$$\theta_0 = \varphi + \operatorname{arcsin} \left[-\frac{\omega^2 r \sin \varphi}{g} \right]. \quad (5.128)$$

Після досягнення полицкою значення кута θ_0 , частинка відірветься від полицки та почне ковзати поверхнею обичайки.

Визначимо значення кута за якого частинка відірветься від поверхні обичайки та її швидкість в цей момент. Для спрощення, зробимо припущення, що частинка рухається гладкою циліндричною поверхнею обичайки. Тоді на частинку діють сили (рис. 5.18): сила ваги частинки mg та нормальна реакція поверхні N . Спроектуємо сили на осі рухомої системи координат $nA_1\tau$ (вісь A_1n спрямуємо вздовж радіуса OA , а вісь $A_1\tau$ – перпендикулярно радіусу):

$$\begin{cases} A_1\tau : m \frac{dV}{dt} = mg \sin(\theta_0 + \alpha); \\ A_1n : m \frac{V^2}{r} = mg \cos(\theta_0 + \alpha) - N. \end{cases} \quad (5.129)$$

Позначимо в системі (5.129) кут $\theta_0 + \alpha$ через β , а також можна записати:

$$dt = \frac{dl}{V} = \frac{rd\beta}{V}, \quad (5.130)$$

де dl – елементарний шлях частинки за проміжок часу dt ; V – швидкість частинки.

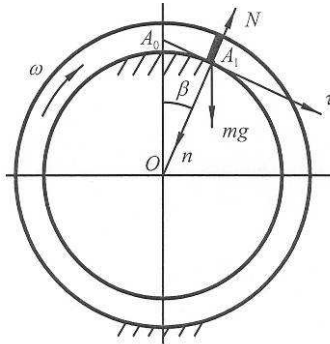


Рис. 5.18. Розрахункова схема до визначення V_B та β_B

Запишемо перше рівняння системи (5.129) після перетворень у вигляді:

$$VdV = gr \sin \beta d\beta. \quad (5.131)$$

Інтегруючи ліву частину рівняння (5.131) в межах від V_0 до V , а праву – від θ_0 до β , отримаємо:

$$\int_{V_0}^V VdV = gr \int_{\theta_0}^{\beta} \sin \beta d\beta, \quad (5.132)$$

$$V^2 = V_0^2 + 2gr(\cos \theta_0 - \cos \beta), \quad (5.133)$$

де $V_0 = \omega r$ – швидкість частинки в момент відриву від полицки.

В момент відриву частинки від поверхні обичайки $N = 0$, тому друге рівняння системи (5.129) матиме вигляд:

$$V_B^2 = gr \cos \beta_B, \quad (5.134)$$

де V_B – швидкість частинки в момент відриву від обичайки; β_B – значення кута за якого частинка відривається від обичайки.

Визначивши з рівняння (5.134) значення $\cos \beta_B$ та підставивши його в рівняння (5.133), отримаємо:

$$V_B = \sqrt{\frac{r}{3}(\omega^2 r + 2g \cos \theta_0)}. \quad (5.135)$$

Підставивши V_B в рівняння (5.134), визначимо значення кута β_B :

$$\beta_B = \arccos \left[\frac{1}{3} \left(\frac{\omega^2 r}{g} + 2 \cos \theta_0 \right) \right]. \quad (5.136)$$

Після відриву від обичайки частинка матеріалу здійснює вільне падіння (рис. 5.19).

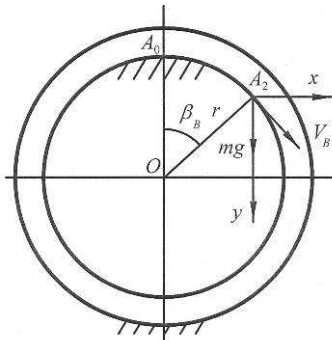


Рис. 5.19. Розрахункова схема до визначення траєкторії руху частинки матеріалу під час вивантаження

Під час падіння на частинку діє сила ваги mg . Складемо рівняння руху частинки, спроектувавши силу ваги на осі нерухомої системи координат $x_{A_2}y$ (вісь A_2x спрямована вздовж горизонталі, а вісь A_2y – вздовж вертикалі; A_2 – точка відриву частинки від обичайки):

$$\begin{cases} A_2x : m \frac{d^2 x}{dt^2} = 0; \\ A_2y : m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg. \end{cases} \quad (5.137)$$

Інтегруючи двічі рівняння системи (5.137) за початкових умов $t = 0$, $\frac{dx}{dt} = V_B \cos \beta_B$, $\frac{dy}{dt} = V_B \sin \beta_B$, $x = 0$, $y = 0$,

отримаємо:

$$\begin{cases} x = V_B t \cos \beta_B; \\ y = \frac{gt^2}{2} + V_B t \sin \beta_B. \end{cases} \quad (5.138)$$

Отримані залежності (17) дозволяють побудувати траєкторію руху частинки матеріалу під час вивантаження (рис. 5.20) та обґрунтувати параметри вивантажувального отвору сушарки.

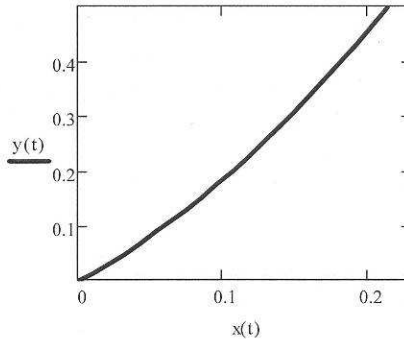


Рис. 5.20. Траєкторія руху частинки матеріалу під час вивантаження з сушарки: $\omega = 0,01$ рад/с; $r = 0,6$ м; $\varphi = 30^\circ$; $t = 0 \dots 0,2$ с

РОЗДІЛ 6. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК СУШАРКИ

При роботі сушарки зі спіралеподібною поверхнею сушильної камери (рис. 4.1) споживається енергія: на привод сушильної камери і завантажувального шнека; на нагнітання атмосферного повітря до калорифера з подальшою подачею сформованого сушильного агента в сушильну камеру і проходження його крізь весь об'єм матеріалу із заданою швидкістю; на нагрівання атмосферного повітря до заданої температури сушіння – формування сушильного агенту; на роботу типових завантажувальних і вивантажувальних пристроїв із необхідною пропускною здатністю, тип яких може змінюватися залежно від схеми організації технологічного процесу. Зазначені пристрої також використовуються в технологічних лініях існуючих сушарок, тому при порівняльній характеристиці затрати енергії на їх роботу враховувати недоцільно.

Для кількісної оцінки ефективності запропонованої конструкції сушарки необхідно встановити такі показники, як продуктивність сушарки і питомі затрати енергії.

Виходячи з необхідної тривалості перебування матеріалу в сушильній камері і відомої кількості витків спіралеподібною перфорованою поверхні, частота обертання сушильної камери визначається за формулою:

$$n_{об} = \frac{n}{\tau_c}, \quad (6.1)$$

де n - кількість витків спіралеподібною перфорованою поверхні;

τ_c - час сушіння, хв.

Тоді продуктивність сушарки при безперервній подачі матеріалу визначається за формулою, т/год:

$$P = 60 \cdot m_m \cdot n_{об}, \quad (6.2)$$

де m_m - маса матеріалу, яку необхідно завантажувати в сушарку для її раціонального заповнення та ефективного використання сушильного агента, т.

6.1. Розрахунок приводу сушильної камери та завантажувального шнека

Потужність, необхідна на привод сушильної камери, наближено визначається за формулою, кВт [1]:

$$N_{\delta} = 1,025 \cdot \frac{g \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{6 \cdot \pi} \cdot \gamma_m \cdot V_{\delta} \cdot \sqrt{D_{\delta}} \cdot S_3, \quad (6.3)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

γ_m – питома маса матеріалу, т/м³;

V_{δ} – об'єм сушильної камери, м³;

D_{δ} – діаметр сушильної камери, м;

S_3 – коефіцієнт, що враховує заповнення сушильної камери матеріалом.

При роботі сушарки енергія також затрачається також на транспортування матеріалу в центральну частину сушильної камери за допомогою завантажувального шнека.

Потужність, необхідна на привод завантажувального шнека визначається за формулою, кВт [2]:

$$N_{ш} = \frac{n_3 \cdot P}{367} \cdot L_{ш} \cdot \omega_0, \quad (6.4)$$

де $n_3 = 1,2$ – коефіцієнт запасу;

$L_{ш}$ – довжина шнека, м;

$\omega_0 = 1,2$ – коефіцієнт опору середовищу для легких неабразивних матеріалів.

Необхідна потужність електродвигуна визначається як загальна потужність на привод сушильної камери і шнека з врахуванням ККД передач приводу, кВт:

$$N_c = \frac{N_{\delta} + N_{ш}}{\eta_{np}}, \quad (6.5)$$

де η_{np} – ККД приводу.

Підставляючи (6.3) та (6.4) в (6.5) отримаємо:

$$N_c = \frac{1,856 \cdot \gamma_m \cdot D_0^{2,5} \cdot L_0 \cdot S_3 + 0,002725 \cdot n_3 \cdot P \cdot L_{ш} \cdot \omega_0}{\eta_{np}}. \quad (6.6)$$

6.2. Розрахунок витрат електроенергії на формування сушильного агента

Маса висушеного за 1 годину матеріалу визначається за формулою [3]:

$$P' = P \cdot \frac{100 - W_1}{100 - W_2}, \quad (6.7)$$

де W_1 – початкова відносна вологість, %;

W_2 – кінцева відносна вологість, %.

Кількість води, що випаровується, за 1 годину, кг:

$$W = P - P'. \quad (6.8)$$

Тепловміст атмосферного повітря I_1 і сушильного агента I_2 через температуру і вологовміст можна визначити за формулою, ккал/г с.п. [3]:

$$I_{1,2} = 0,24t + \frac{d}{1000} (595 + 0,47t_{1,2}), \quad (6.9)$$

де t – температура, °С;

d – вологовміст, г/кг с.п.

Витрата тепла на нагрівання матеріалу, ккал/кг:

$$g_{np} = \frac{P'}{W} \cdot c_m \cdot (t_2 - t_1), \quad (6.10)$$

де c_m – питома теплоємність матеріалу, ккал/ кг°С;

t_1 – температура повітря, °С;

t_2 – температура сушильного агента, °С.

Питома витрата сухого повітря визначається з залежності:

$$t_2 = \frac{I_1 - \frac{g_{np} - t_0}{n} - 595 \left(\frac{1}{l} + \frac{d_0}{1000} \right)}{0,24 + 0,47 \left(\frac{1}{l} + \frac{d_0}{1000} \right)}, \quad (6.11)$$

де l – питома витрата сухого повітря на 1 кг вологи, що випаровується, кг с.п./кг в.м.

Годинна витрата електроенергії для нагрівання повітря за заданими параметрами сушіння вороху насіння трав визначається за формулою, кВт:

$$N_e = \frac{(I_1 - I_0) \cdot L}{859,845 \cdot \eta_e}, \quad (6.12)$$

де η_e – ККД калорифера.

Годинна витрата повітря, кг с.п./год:

$$L = l \cdot W. \quad (6.13)$$

У випадку застосування рідкого палива для нагрівання повітря годинна витрата палива розраховується за формулою, кг/год, [3]:

$$B = \frac{(I_2 - I_1) \cdot L}{H \cdot \eta_m}, \quad (6.14)$$

де H – теплотворна здатність палива, кДж/кг;

η_m – ККД топкового агрегату.

Тоді питома витрата палива, кг/т:

$$b = \frac{B}{P}. \quad (6.15)$$

6.3. Розрахунок витрат повітря

Площу поперечного перерізу повітропроводу приймається рівною площі поперечного перерізу внутрішньої сторони усіх коробів (рис. 6.1), м²;

$$F_{нов.} = n_k \cdot F_k = n_k \cdot b_k \cdot \left(h_k - \frac{a_k}{2} \right), \quad (6.16)$$

де n_k – кількість повітрепідвідних коробів;

F_k – площа поперечного перерізу короба, м²;

b_k – ширина короба, м;

h_k – висота короба, м;

a_k – висота вершини короба, м.

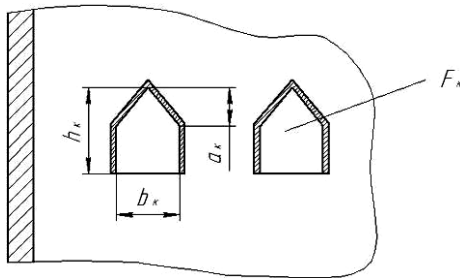


Рис. 6.1. До визначення площі поперечного перерізу коробів

Швидкість повітряного потоку (сушильного агента) на вході у спрямовувачі повітропроводу визначається за загальною витратою сушильного агента, м/с:

$$\bar{\omega}_0 = \frac{V_{нов.}}{3600 \cdot F_{нов.}} \quad (6.17)$$

Об'ємна витрата повітря:

$$V_{нов.} = \frac{L}{\rho_{нов.}}, \quad (6.18)$$

де $\rho_{нов.}$ – густина повітря, кг/м³.

Втрати тиску в системі визначаються за формулою:

$$P_c = \frac{\rho_{нов.} \cdot \bar{\omega}_0^2}{2g} \xi_k, \quad (6.19)$$

де ξ_k – коефіцієнт місцевого опору [4].

Динамічний тиск у повітропроводі:

$$P_d = \frac{\rho_{нов.} \cdot \bar{\omega}_0^2}{2g}. \quad (6.20)$$

Повний тиск вентилятора:

$$P_n = P_c + P_d. \quad (6.21)$$

Потужність N_e електродвигуна вентилятора, кВт:

$$N_e = \frac{Q_e \cdot P'_n}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_e \cdot \eta_n \cdot \eta_k}, \quad (6.22)$$

де Q_e – прогнозована кількість сушильного агента, що подається вентилятором, м³/год;

$\eta_e = 0,7$ – ККД вентилятора;

$\eta_n = 1$ – ККД пасової передачі;

$\eta_k = 0,9$ – ККД, яким враховують втрату в підшипниках.

Загальне споживання електроенергії сушаркою:

$$N = N_c + N_e. \quad (6.23)$$

Питома витрата електроенергії на 1 т висушеного матеріалу:

$$N_n = \frac{N}{P}. \quad (6.24)$$

У таблиці 6.1 наведені значення раціональних параметрів сушарки (рис. 4.1) вороху насіння трав і її технічні характеристики.

Таблиця 6.1

Параметри сушарки

Параметри сушарки		Позначення	Величина
Зовнішній діаметр сушильної камери		$D_{ск}$	1,3 м
Довжина завантажувального шнека		$D_{ш}$	2 м
Довжина сушильної камери		$L_{ск}$	1,2 м
Кількість витків спіралеподібної поверхні		n	7
Радіус витка: – найменший – найбільший		r_o r_k	0,214 м 0,643 м
Кількість коробів		n_k	5
Площа поперечного перерізу витка		S_n	0,065
Площа поперечного перерізу отвору короба		S_k	0,012 м ²
Питома витрата	рідкого палива на нагрівання повітря	b	7,83 кг/т с.м
	електроенергії на нагрівання повітря	N_e	86,53 кВт/ т с.м
Питома витрата електроенергії (на роботу електродвигунів)		b_e	0,92 кВт
Питоме споживання електроенергії на привод вентилятора і сушильної камери		N_n	2,17 кВт/т с.м

РОЗДІЛ 7. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУШАРКИ

Розрахунок економічної ефективності сушарки (рис. 4.1) зі спіралеподібною поверхнею сушильної камери у порівнянні з напільною сушаркою проводили відповідно до рекомендацій [1] за такими показниками: повна собівартість робіт, виконаних на базовій і новій сушарках; експлуатаційні витрати на утримання базової та нової сушарок; питомі капіталовкладення у сфері експлуатації базової і нової машин; питома матеріаломісткість базової і нової сушарок; річна економія грошових засобів на експлуатаційних витратах при використанні нової сушарки.

Виходячи з експлуатаційних показників роботи базового і нового варіанту сушарки, нормативно-довідкових даних, цін на сільськогосподарську техніку, паливно-мастильні матеріали та інше, формувалася таблиця 7.1 вихідних даних.

Таблиця 7.1

Дані для розрахунку економічної ефективності

Показник	Одиниця виміру	Машина	
		Базова	Нова
1	2	3	4
Продуктивність сушарки	кг/год.	350	425
Тривалість роботи сушарки протягом року	днів	150	150
Чисельність обслуговуючого персоналу	людей	1	1
Маса сушарки в зборі	кг	750	610
Чиста маса сушарки без покупних частин	кг	670	560
Відпускна ціна сушарки	грн.	13190	-
Собівартість сушарки	грн.	10990	-
Вартість матеріалів у собівартості сушарки	грн.	4300	-
Потужність на привод сушарки	кВт	-	0,63
Потужність на привод вентилятора	кВт	-	0,37
Потужність на привод калорифера	кВт	50,0	36,9

Продовження табл. 7.1

1	2	3	4
Вартість електроенергії	грн./((кВ т-год.)	0,84	0,84
Коефіцієнт відрахувань на додаткову заробітну плату	%	20	20
Коефіцієнт відрахувань на соціальні потреби	%	37,8	37,84
Вартість придбаних покупних виробів нової сушарки	грн.	-	6300
Коефіцієнт конструктивної складності	-	-	1,2
Коефіцієнт зміни (залежно від обсягу випуску)	-	-	1,1
Коефіцієнт транспортно-заготівельних витрат	-	-	1,1
Кількість вентиляторів	шт.	1	1
Кількість калориферів	шт.	1	1
Норматив витрат праці на підготовку сушарки до зберігання	люд.- год.	5	5
Годинна тарифна ставка слюсаря	грн.-год.	3,26	3,26
Годинна тарифна ставка працівника	грн.-год.	12,0	12,0
Витрати на матеріали, котрі використовують в процесі експлуатації сушарки	грн.	15,52	13,31
Норматив галузевої рентабельності	%	25	25
Податок на додану вартість	%	20	20
Торгівельна націнка посередницької організації	%	20	20
Нормативний коефіцієнт відрахувань на реновацію	%	14,2	14,2
Норматив відрахувань на капітальний, поточний ремонт та техогляд сушарки	%	14	14

Отримані результати розрахунку (табл. 7.2) вказують на доцільність використання запропонованої сушарки, яка дає річну економію грошових засобів на експлуатаційних витратах 10046 грн.

Таблиця 7.2

Показники економічної ефективності

Показник	Одиниця виміру	Машина		Різниця (±)
		Базова	Нова	
Продуктивність сушарки	кг/год.	350	425	+75
Річний обсяг робіт	т/рік	1260	1530	+270
Чисельність обслуговуючого персоналу	чол.	1	1	-
Затрати праці на сушіння	люд.-год./кг	$2,857 \times 10^{-3}$	$2,353 \times 10^{-3}$	$-0,504 \times 10^{-3}$
Річна економія затрат праці при застосуванні нової сушарки	люд.-год.	-	91	-
Собівартість сушіння	грн./кг	0,161	0,124	-0,037
Експлуатаційні витрати на сушарку	грн./кг	0,159	0,122	-0,037
Річна економія грошових засобів на експлуатаційних витратах при застосуванні нової сушарки	грн.	-	10046	-
Питомі капіталовкладення в сфері експлуатації сушарки	грн./кг	0,014	0,015	-0,001
Питома металомісткість технологічного процесу сушіння	кг/кг	$5,95 \times 10^{-4}$	$3,99 \times 10^{-4}$	$-1,96 \times 10^{-4}$
Термін окупності	роки	-	1,99	-

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

До розділу 1: “Властивості вороху насіння трав, одержаного у результаті збирання”.

1. Кршеминський В. С. Сушка семян трав / В. С. Кршеминський, Н. Я. Попов. – М.: Колос, 1984. – 103 с.
2. Рагулин М.С. Очистка, сушка и хранение семян трав / М.С. Рагулин. – М.: Россельхозиздат, 1980. – 160 с.
3. Механизация уборки и послеуборочной обработки семян трав / [В.Г. Антипин, Н.М. Митрофанов, Е.И. Иванов и др.]. – Л.: Лениздат, 1979. – 112 с.
4. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови: ДСТУ 2240-93. – [Чинний від 1993-09-09]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 74 с.
5. Птицин С.Д. Физические основы влагопереноса в семенах сельскохозяйственных культур / С.Д. Птицин // Труды ВИМ. – 1978. – Вып. 35. – С. 12–14.
6. Птицына Л.В. Сушка семян трав / Л.В. Птицына // Доклады ВАСХНИЛ. – 1949.
7. Попов Н.Я. Исследования процесса предварительного нагрева и сушки семян многолетних трав в кипящем слое / Н.Я. Попов // Труды ВНИИЗ. – 1977. – Вып. 86.
8. Котов Б.И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: дис. ... доктора техн. наук: 05.20.01 / Борис Иванович Котов. – Глеваха, 1994. – 440 с.
9. Дідух В.Ф. Науково-технологічні основи механізованого сушіння неоднорідних матеріалів: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.11 / Володимир Федорович Дідух. – Луцьк, 2003. – 274 с.
10. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: монографія / В.Ф. Дідух . – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с.
11. Дударев І.М. Обґрунтування технологічного процесу та параметрів сушарки льоносировини в рулонах: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Ігор Миколайович Дударев. – Луцьк, 2007. – 208 с.

12. Лісецький В.О. Підвищення ефективності сушіння зерна в сушарках періодичної дії: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.11 / Віталій Олександрович Лісецький. – Глеваха, 2003. – С. 18.
13. Калініченко Р.А. Енергозберігаючі режими сушіння і активного вентилявання зерна при зберіганні в умовах господарств: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.09.16 / Роман Андрійович Калініченко. – Глеваха, 2005. – 20 с.
14. Егоров П.Е. Исследование процесса сушки семян трав в плотном слое: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. “Технологии и средства механизации сельского хозяйства” / Петр Егорович Егоров. – Москва, 1975. – 24 с.
15. Копьев И.П. Сопротивление льняного вороха воздушному потоку: сборник трудов аспирантов и молодых научных сотрудников ВНИИЛ / И.П. Копьев. – М.: Московский рабочий, 1966. – С. 58–60.
16. Peters F. Massnahmen zur Verbesserung des Saatgutertrages und der Saatgutqualität der Rübensamenvermohrung / F. Peters. – 1970. – Lg. 11.
17. Woodforde I. Drying cereal grain and beds six inches deep / I. Woodforde, P. Lawton // Agricultural Engineering Research, 1975. – №2. – p. 146–217.
18. Лыков А.В. Теория сушки / Алексей Васильевич Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
19. Кришер О. Научные основы техники сушки / Кришер О; пер. с нем. к.т.н. Д.М. Левина; под ред. проф., д.т.н. А.С. Гинзбурга. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1961. – 535 с.
20. Лурье М.Ю. Сушильное дело / М.Ю. Лурье. – М.: Госэнегроиздат, 1948. – 711 с.
21. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
22. Красников В.В. Кондуктивная сушка / Валерий Владимирович Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.

23. Станкевич Г.М. Сушіння зерна: підручник / Г.М. Станкевич, Т.В. Страхова, В.І. Анатазевич. – К.: Либідь, 1997. – 352 с.
24. Зеленко В.И. Конвективная сушка сельскохозяйственных материалов в плотном слое: основы теории / В.И. Зеленко. – Тверь: Обл. кн.-журн. изд-во, 1998. – 96 с.
25. Окунь Г.С. К расчету продолжительности сушки зерна в слое / Г.С. Окунь // Труды ВИМ. – 1964. – Т. 34. – С. 29–39.
26. Попов Н.Я. Физико-механические свойства семян многолетних трав / Н.Я. Попов, С.А. Лупенко // Труды ВНИИЗ. – 1974. – Вып. 79.
27. Физико-механические свойства растений, грунтов и удобрений: методы испытаний, приборы, характеристики. – М.: Колос, 1970. – 424 с.

До розділу 2: “Теоретичні основи процесу сушіння рослинних матеріалів”.

1. Демин А.В. Методические рекомендации по математическому моделированию процесса сушки и охлаждения зерна в установках плотного слоя / Демин А.В. // ВИССХ. – М., 1977. – 42 с.
2. Краусп В.Р. Автоматизация послеуборочной обработки зерна / В.Р. Краусп. – М.: Машиностроение, 1975. – 277 с.
3. High temperature grain drying. Fisheries and Food Booklet: Great Britain Ministry of Agriculture, 1982. – V. 24. – P. 1–30.
4. Mühlbauer W. Entwicklungstendenzen bei der Trocknung Kühl Konservierung und Lagerung von Getreide und Mais / W. Mühlbauer // Die Mühle. – 1986. – Bd. 123. – № 5. – S. 57–58.
5. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільсько-господарських матеріалів: монографія / В.Ф. Дідух . – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с.

До розділу 3: “Засоби сушіння рослинних матеріалів”.

1. Кршеминський В. С. Сушка семян трав / В.С. Кршеминський, Н.Я. Попов. – М.: Колос, 1984. – 103 с.

2. Дворников В.И. Повышение эффективности сушки семян в бункерах активного вентилирования / В.И. Дворников // Техника в с/х. – 1987. – № 7. – С. 19.
3. Куцакова В.У. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов / В.У. Куцакова, А.Н. Богатырев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 236 с.
4. Шалугін В.С. Процеси та апарати промислових технологій: навчальний посібник / В.С. Шалугін, В.М. Шмандій. – К.: Центр учбової літератури, 2008. – 392 с.

До розділу 4: “Реалізація методу протитечії в барабанних сушарках”.

1. Пат. № 85766 Україна, МПК (2009) F26 B11/00. Барабанна сушарка / Дударев І.М., Кірчук Р. В., Кокалюк Л.Ю.; заявник і власник патенту Луцький державний технічний університет. – № а200706074; заявл. 01.06.2007р.; опубл. 25.02.2009, Бюл. №4.
2. Пат. №36392 Україна, МПК (2006) F26B 17/00. Барабанна сушарка / Кокалюк Л.Ю., Дударев І.М., Кірчук Р.В.; заявник і власник патенту Луцький державний технічний університет. – № u200806203; заявл. 12.05.2008р.; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20.

До розділу 5: “Обґрунтування процесу сушіння вороху насіння трав в барабанних сушарках”.

1. Анискин В.И. Моделирование процесса низкотемпературной сушки зерна в слое с помощью ЭВМ / В.И. Анискин, Г.С.Окунь, И.И. Верцман // Проблемы механизации с/х производства: тезисы докладов. – М.: ВИМ, 1985. – Ч. 2. – С. 78–79.
2. Васильев А.Н. Анализ моделей зерна электроактивированным воздухом / А.Н.Васильев, Н.Н. Грачева // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве: сб. науч. трудов по материалам научно-практической конференции электроэнергетического факультета / отв. ред. И.В. Атанов. – Ставрополь: ФГОУ ВПО СГАУ, 2009. – С. 31-37.

3. Yliniemi L. Fuzzy Control of a Rotary Dryer / L. Yliniemi, J. Koskinen // Proceedings of TOOLMET 96. – Tool Environments and Development Methods for Intelligent Systems, University of Oulu, 1996. – No 4. – P. 43–48.
4. Balchen Jens G. Process control: Structures and Applications / Balchen Jens G., Mumme Kenneth I. – New York: Van Nostrand Reinhold company, 1988. – 540 p.
5. Anilkumar S. Drying of Solids: Principles, Classification, and Selection of Dryers / Anilkumar S., Menon and Arun S., Mujumdar // Drying 94: proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS '94), Gold Coast, Australia, 1994. – P. 24–29.
6. John J. Rotary Drying / J. John, J. Kelly // Drying 94: proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS '94), Gold Coast Australia, 1994. – P. 152 – 156.
7. Brambilla A. Dynamic model of rotary dryer / A. Brambilla, G. Nardini, Z. Stabert // 2nd symposium on the use of computers in chemical engineering, Usti Nad Labem, Tsekkoslovakia, 1973. – Vol. II. – P.218–231.
8. Deich V.G. Optimum control of drying process in a rotary drum drier / V.G. Deich, V.V. Stalskii // Theoretical foundation of chemical engineering, 1975. – No 9(1). – P. 85–90.
9. Najim K. Modelization and simulation of a phosphate drying furnace / K. Najim, M. Najim, B. Koehret, T. Ouazzani // Proc. 7th Annual Conference on Modelling and simulation, Pittsburg, 1976. – P.690–697.
10. Yliniemi L. Advanced Control of a Rotary Dryer / L. Yliniemi // Oulun Yliopisto, Oulu, 1999. – 100 p.
11. Егоров П.Е. Исследование процесса сушки семян трав в плотном слое: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. “Технологии и средства механизации сельского хозяйства” / Петр Егорович Егоров. – Москва, 1975. – 24 с.
12. Rao V.G. Physical properties related to drying twenty food grains / V.G. Rao, H.B. Pfof // American Society of Agricultural Engineers. – Michigan, 1980. – No.80. – P. 35–39.
13. Mujumdar M.S. Handbook of Industrial Drying . Third Edition / Edited by Arun S. Mujumdar // CRC Press, 2007.

14. Дударев І.М. Дослідження впливу аеродинамічних параметрів шару гірчиці на процес його вентиляції / І.М. Дударев, С.Є. Голячук, Т.М. Лук'янчук // Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. – Луцьк: Ред.- вид. відділ ЛНТУ, 2008. – Вип. 17. – С. 40–45.
15. Сушка пищевых растительных материалов: учеб. пособие для технолог. специальностей вузов пищевой пром-сти / Г.К. Филоненко, М.А. Гришин, Я.М. Гольденберг, В.К. Коссек. – М.: Пищевая пром-сть, 1971 – 440 с.
16. Кришер О. Научные основы техники сушки / Кришер О; пер. с нем. к.т.н. Д.М. Левина; под ред. проф., д.т.н. А.С. Гинзбурга. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1961. – 535 с.
17. Лыков А.В. Тепломассообмен: (Справочник), 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
18. Федосеев П.Н. Использование атмосферного воздуха для сушки урожая зерновых и кормовых культур / П.Н.Федосеев // Мех. и электр. сел. хоз. – 1983. – №11. – С. 33–35
19. Смирнов В. И. Курс высшей математики / В. И. Смирнов. – М.: ГИФМЛ, 1962. – Т. 1. - 478 с.
20. Маркеев А. П. Теоретическая механика: учебник для университетов / А. П. Маркеев. – М.: ЧеРо, 1999. – 572 с.
21. Пономарев С.Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С.Д. Пономарев, Л.Е. Андреева. – М.: Машиностроение, 1980. – 326 с.
22. Патент на винахід №85766 С2 Україна, МПК F26B11/00, F26B9/08. Барабанна сушарка / Дударев І.М., Кірчук Р.В., Кокалюк Л.Ю.; Заявлено 01.06.2007; Опубл. 25.02.2009; Бюл. № 4.

До розділу 6: “Енергетичний розрахунок сушарки”.

1. Новый справочник химика и технолога: процессы и аппараты химических технологий. – С.-Пб.: АНО НПО Профессионал, 2004. – Ч. 1. – 848 с.
2. Иванченко Ф.К. Расчет грузоподъемных и транспортирующих машин / Ф.К. Иванченко, В.С. Бондарев, Н.К. Колесник, В.Я. Баранов– К.: Вища школа, 1978. – 576 с.

3. Карташевич С.М. Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян (теория, расчет, результаты проектирования и испытаний технологических комплексов) / С. М. Карташевич. – Минск, 2001. – 288 с.
4. Иванов О.П., Мамченко В.О. Аэродинамика и вентиляторы: Учеб. для вузов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 280 с.

До розділу 7: “Економічне обґрунтування ефективності сушарки”.

1. Заборський Н.И. Инструкция по посчету экономии от внедрения изобретений и рационализаторских предложений в сельском хозяйстве/ Н.И. Заборский . – М.: Колос, 1970. – 47 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
РОЗДІЛ 1. ВЛАСТИВОСТІ ВОРОХУ НАСІННЯ ТРАВ, ОДЕРЖАНОГО У РЕЗУЛЬТАТІ ЗБИРАННЯ.....	5
1.1. Морфологічні та біологічні особливості насіння трав	5
1.2. Властивості насіння трав як об'єкта післязбирального обробітку.....	8
1.3. Властивості насіння трав як об'єкта сушіння.....	13
1.4. Фізико-механічні та технологічні властивості вороху насіння трав.....	20
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ.....	30
2.1. Форми зв'язку вологи з матеріалами і їх класифікація..	30
2.2. Тепловий спосіб видалення вологи.....	33
2.3. $I-d$ -діаграма вологого повітря.....	36
2.4. Нагрівання та охолодження сушильного агента.....	38
2.5. Розрахунок конвективного сушіння рослинних матеріалів.....	43
2.6. Розрахунок сушарок з елементами протитечії.....	52
2.7. Теоретичні передумови процесу конвективного сушіння рослинних матеріалів.....	56
2.8. Дослідження процесу сушіння шару матеріалу з елементами методу протитечії	59
2.9. Математичне моделювання коливного температурного процесу при сушінні матеріалів.....	67
2.10. Енергетична оцінка сушіння рослинних матеріалів.....	69
РОЗДІЛ 3. ЗАСОБИ СУШІННЯ РОСЛИННИХ МАТЕРІАЛІВ.....	74
3.1. Вибір способу і методу сушіння.....	74
3.2. Конструкції сушарок рослинних матеріалів	76
3.3. Аналіз інтенсивності сушіння та вентилявання в барабанних сушарках	91

РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ ПРОТИТЕЧІЇ В БАРАБАННИХ СУШАРКАХ	95
РОЗДІЛ 5. ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОРОХУ НАСІННЯ ТРАВ В БАРАБАННИХ СУШАРКАХ.....	103
5.1. Моделювання процесу сушіння вороху насіння трав....	103
5.2. Моделювання процесу вентилявання шару матеріалу в сушарці зі спіралеподібною поверхнею.....	106
5.3. Дослідження впливу аеродинамічних параметрів шару матеріалу на процес його вентилявання	114
5.4. Моделювання переміщення матеріалу у сушарці зі спіралеподібною поверхнею	121
5.5. Моделювання переміщення матеріалу у сушарці з лопатями	126
5.6. Обґрунтування конструктивних параметрів сушарки....	131
5.7. Дослідження процесу вивантаження матеріалу з сушарки.....	138
РОЗДІЛ 6. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК СУШАРКИ..	145
6.1. Розрахунок приводу сушильної камери та завантажувального шнека.....	146
6.2. Розрахунок витрат електроенергії на формування сушильного агента.....	147
6.3. Розрахунок витрат повітря.....	148
РОЗДІЛ 7. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУШАРКИ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	154

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Луцький національний технічний університет

**Забродоцька Людмила Юрївна
Кірчук Руслан Васильович**

Наукове видання
**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ
ВОРОХУ НАСІННЯ ТРАВ**

Монографія

Редакційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.

Редактор: О.С. Гордіюк.
Комп'ютерний набір та верстка: Л.Ю. Забродоцька.

Підписано до друку 28.02.2013 р.
Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 10,25. Обл.-вид. арк. 10,0.
Наклад 300 прим. Зам. № 66.

Друк – РВВ ЛНТУ, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.

Забродоцька Л.Ю.

312 Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння трав: Монографія /
Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2013. – 164 с.

ISBN 978-617-672-021-8

У монографії представлені відомості про фізико-механічні властивості вороху насіння трав як об'єкта сушіння. Проаналізовано способи та засоби механізації сушіння сипких сільськогосподарських матеріалів. Представлено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, яка полягає у забезпеченні інтенсифікації технологічного процесу сушіння вороху насіння трав шляхом перемішування шару матеріалу з врахуванням його структурних характеристик у запропонованій сушарці.

Рекомендується науковцям, аспірантам, студентам та інженерним працівникам, які займаються питаннями механізації сушіння сипких матеріалів.

**УДК 631.563.2 (066)
ББК: 41.47в6**