

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет механізації сільського господарства

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідуючий кафедри ПОПХВ,
д.т.н., доц.
В.П.Янович
“ _____ ” _____ 2018 р.

**НА ТЕМУ: «ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЯБЛУК В ГЕЛІОСУШАРЦІ».**

Робота на здобуття освітньо ступеня магістр
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Виконав: студент групи 61МП маг

Квасневський Олександр Юрійович

Науковий керівник:

к.т.н. проф. Бандура В.М.

2018

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ ФРУКТІВ

1.1 Аналіз існуючих методів і засобів сушіння

Під час переробки фруктів та іншої сільськогосподарської сировини застосовують природний і примусовий конвективний способи сушіння сільськогосподарської продукції [5, 13, 30, 34, 55, 56, 57, 61, 62], що зумовлено методами передачі теплоти, особливостями матеріалів, видами зв'язку вологи з матеріалом, енерговитратами.

Природне сушіння – найбільш простий і розповсюджений конвективний спосіб зневоднення фруктової сировини в особистих селянських господарствах. Під час природного сушіння зневоднення сировини відбувається на відкритому повітрі в умовах природного освітлення, без впливу людини на чинники, що інтенсифікують процес (температури продукту і сушильного агента – повітря, вологість тощо).

Недоліками природного сушіння порівняно зі штучним є велика тривалість процесу, що залежить від географічного розташування, стану неба, години, пори року й стану зовнішнього навколишнього середовища. Під час природного конвективного сушіння матеріал висушується до рівноважної вологості. Висушена продукція має низький вміст поживних речовин, вітамінів, сильне забруднення [13, 30, 34, 55, 56]. Незважаючи на простоту й дешевизну, природне сушіння обмежене дрібними обсягами переробки фруктової сировини.

У разі штучного примусово камерного способі сушіння фруктової сировини необхідно вибирати правильно метод сушіння й конструкцію сушильного апарата згідно з технічними умовами на процес.

Залежно від способу підведення теплової енергії до фруктової сировини застосовують такі методи сушіння: конвективне, кондуктивне,

терморадіаційне, сушіння при нагріванні струмами високої частоти (СВЧ), сублімаційне, комбіноване [34, 42, 55].

Штучний спосіб сушіння рослинних матеріалів здійснюється у спеціальних апаратах (сушильних установках або камерах), що за конструктивним виконанням бувають: камерні, стрічкові, конвеєрні, шахтні, лоткові, вальцеві, стелажні, коридорні, контактено-вальцеві (СВЧ) (див. графіч. Частина арк.2.).

За конвективного способу сушіння тепло передається від джерела теплової енергії до поверхні матеріалу, що піддається сушінню, за допомогою теплоносія. Як теплоносій використовують повітря, водяну пару, димові гази. Цей метод є найпоширенішим, на ньому заснована робота переважної більшості камерних і шахтних сушильних установок.

Однак, такому методу сушіння притаманна також низка недоліків:

- великі енергетичні витрати (для видалення одного кілограма вологи з фруктової сировини та перетворення її на пару необхідно затратити від 1,6 до 2,5 кВт·год електроенергії);
- труднощі контролю процесу сушіння у газовому і псевдо зрідженому шарі, позаяк неможливий відбір проб і візуальний огляд у процесі сушіння;
- при зазначеному температурному режимі сушіння невелике відхилення (підвищення) температури зумовлює карамелізацію цукру у фруктовій сировині.

Кондуктивний метод сушіння ґрунтується на передачі теплоти висушуваному матеріалу внаслідок контакту з нагрітою поверхнею [84].

У разі кондуктивного сушіння термодифузія і дифузія за рахунок різниці концентрації вологи є однаково спрямованими, що сприяє інтенсифікації процесу в першому періоді сушіння, а в другому періоді знижується інтенсивність сушіння за рахунок різниці температур.

Високу якість кінцевого продукту досягти не вдається внаслідок нерівномірного вологовмісту в матеріалі; продукт, що контактує з нагрітою

поверхнею, пересушується, що призводить до деформації й розтріскування матеріалу. Вальцеві й лоткові сушильні установки, засновані на цьому способі сушіння, є металомісткими, мають великі витрати електроенергії (від 1,5 до 1,7 кВт·год на 1 кг видаленої вологи) [20, 32, 34].

За терморадіаційного методу сушіння фрукти отримують теплоту від інфрачервоних променів. Сушіння інфрачервоними променями супроводжується сильним нагріванням поверхні матеріалу, у результаті чого створюється значний температурний градієнт, який перешкоджає переміщенню вологи зі середини матеріалу на поверхню. Необхідне тут переривчасте опромінення, при якому в період опромінення поверхня матеріалу швидко нагрівається і зневоднюється, а в період видалення вологи від внутрішніх шарів матеріалу переміщується до зовнішніх [5, 8, 20, 34, 61,62].

Незважаючи на низку переваг (простота конструкції конвеєрних і коридорних сушильних установок, гнучкість управління процесом тощо), сушіння інфрачервоними променями в чистому вигляді не набуло достатнього поширення внаслідок нерівномірного нагрівання матеріалу, низького ККД генераторів інфрачервоного випромінювання і значної витрати електричної енергії – від 1,1 до 1,9 кВт·год на 1 кг видаленої вологи [34,62].

Сублімаційний метод сушіння (молекулярний спосіб сушіння) є одним із найбільш ефективних у процесі сушіння фруктів. Його можна розділити на дві стадії: у першій за допомогою глибокого вакууму волога виморожується і виходить на поверхню, у другій – за рахунок інтенсивного підведення тепла здійснюється випаровування вологи (лід, минаючи рідкий стан, перетворюється на пару). Великого поширення ця технологія не отримала через складність конструкції тунельних сушильних установок, низьку продуктивність, високі капіталовкладення, витрати на виробництво, витрати електричної енергії (від 3 до 3,9 кВт·год на 1 кг видаленої вологи) [20, 26].

Діелектричний метод сушіння, заснований на діелектричних властивостях води і сухої речовини (вологий матеріал значно більше

схильний до нагрівання, ніж сухий). У процесі сушіння більш вологий матеріал нагрівається сильніше, ніж сухіший. Нагрівання засноване на явищі поляризації (розташування в певному напрямі) молекул фруктів. Під час сушіння фрукти поміщають між електродами нагрівального конденсатора, причому ці електроди мають різнойменні заряди. Під дією електричного поля високої напруженості відбувається регульоване нагрівання матеріалу. Випаровування вологи відбувається з усього об'єму матеріалу і всередині частинки виникає градієнт тиску, що прискорює перенесення вологи. Для видалення випарованої вологи необхідно безперервно продувати повітря через шар фруктової сировини. Охолодження просушеної сировини здійснюється в охолоджувачах. Переваги сушіння струмами високої частоти порівняно з конвективним і контактним сушінням полягають у можливості регулювання й підтримки певної температури, а також характеризується значною інтенсифікацією процесу сушіння. Усе це вимагає великої кількості електроенергії (від 2,5 до 5 кВт·год на 1 кг видаленої вологи). Недоліками сушильних установок СВЧ є складність обладнання, металомісткість, екологічна небезпека внаслідок шкідливості впливу мікрохвильового випромінювання на людину. Ці установки вимагають для обслуговування спеціалізованого персоналу і постійного контролю фону СВЧ випромінювання, а також використання високої напруги, що небезпечно для обслуговуючого персоналу [8, 20, 25, 32, 34].

Тому, впровадження нових методів і прогресивних технологій у процес сушіння фруктів є найважливішим завданням підвищення ефективності роботи сушильних установок [20, 62]. До нього ставлять жорсткі вимоги щодо: якості висушених фруктів (збереження лабільних компонентів, поживних речовин, вітамінів, ароматичних та смакових якостей продукту) [13, 14]; можливості сушіння фруктової сировини з різним діапазоном вологості; використання сушильного обладнання для сушіння різноманітної фруктової сировини; високих техніко-економічних та техніко-технологічних параметрів порівняно з аналогами; мінімальної маси, габаритних розмірів і

високої міцності мобільних сушарок; простоти, високої надійності і безпеки сушильного обладнання; можливості автоматизованого контролю за процесом сушіння; зменшення споживання енергії. Перелічені характеристики є невід'ємною вимогою для вдосконалення або розробки нової конструкції сушильного обладнання.

Отже, для особистих селянських і малих фермерських господарств залишається актуальним питання розробки енерго- і матеріалоощадних сушарок, які за збереження якості продукту використовували б доступні альтернативні джерела теплової енергії, наприклад сонячної.

1.2 Сонячні сушарки і технології сушіння фруктів

Аналіз існуючих засобів і способів сушіння фруктів у п. 1.1 показав, що найбільшого поширення в особистих селянських і фермерських господарствах набули сушильні апарати камерного типу з конвективним способом підведення теплоти. На основі аналізу встановлено, що сушильні апарати не забезпечують відповідних норм витрат енергії; характеризуються низьким термічним ККД і підвищеною питомою матеріаломікістю. Тому сушіння невеликих об'ємів фруктів доцільно проводити в геліосушарках (сонячних сушарках), які забезпечують рівномірність нагріву фруктів і енергоощадний режим сушіння, що не спричинює деформації і розтріскування матеріалу. Використання геліосушарок особливо раціональне для умов особистих селянських і фермерських господарств, де необхідно сушити невеликі партії фруктів [7, 32, 46].

Вибір геліосушарки визначається масштабом виробництва, кліматичними особливостями місцевості, видом висушуваного матеріалу і вартістю додаткової енергії. Підведення теплоти до матеріалу може здійснюватися від сушильного агента конвективним способом або сонячно-радіаційним випромінюванням. Тому, геліосушарки поділяють на конвективні та радіаційні.

Зокрема, Х. Ю. Ойнес [29, 46] наводить конвективну напівтепличного типу геліосушарку, що має рамну конструкцію, у бокових стінках якої є повітряні щілини. Над матеріалом, що сушиться, встановлені прозорі плівки, які утворюють вентиляційний повітряний простір (див. графіч. частина арк.3). Під самим об'єктом сушіння знаходиться повітропровід, через який з допомогою вентилятора подається повітря (вентилятор працює в режимі нагнітання або всмоктування). Прозорі плівки в сонячну погоду можуть бути згорненими в рулон.

Недоліками конвективної напівтепличного типу геліосушарки є прямий вплив сонячних променів на висушуваний матеріал і небезпека його нагрівання до температури, що перевищує допустимі межі.

Зокрема, автори [29, 46] наводить кондуктивно-радіаційну геліосушарку, яка має сушильну камеру, споряджену електричним джерелом теплової енергії, повітряним каналом, один кінець якого з'єднаний з повітряним патрубком, а інший через повітропровід з вентилятором і витяжним каналом. Геліонагрівач виконаний у вигляді параболоциліндра з покриттям робочої поверхні (поверхня виконана з матеріалу, що має високу відбивну здатність в інфрачервоній області спектра сонячного випромінювання з великим коефіцієнтом пропускання у видимій області спектра), має систему слідування за Сонцем, що шарнірно закріплена у верхній частині камери з можливістю подальшої зміни її кута нахилу. Для переміщення об'єкта сушіння від завантажувального до розвантажувального каналу використовується транспортер (див. граф. част. арк 3.).

Недоліками кондуктивно-радіаційної геліосушарки є складність конструкції, труднощі контролю процесу сушіння, позаяк є неможливим відбір проб і візуальний огляд у процесі сушіння.

Дослідники [29, 46, 48] для сушіння різних матеріалів (фруктів, овочів, грибів, лікарських рослин тощо) пропонують радіаційну геліосушарку, до складу якої входять повітронагрівач і встановлена на основі сушильна камера із сітчастим піддоном для об'єкта сушіння. У свою чергу повітронагрівач має

вигляд металевого каркаса (див.граф.част. арк.3), з'єданого рухомо, через вузли підвішування, який обтягнутий прозорою лицьовою і відбиваючими тильною та боковими плівками.

Усередині самого каркаса є вертикально розташований поглинач, що нерухомо з'єднаний з рамою. Основа сушильної камери виконана в площині азимутального орієнтування, що дозволяє повертатися камері з повітронагрівачем. Акумулятор-поглинач виконаний з листа неметалевого нагрівального елемента, поміщеного в термостійкий, вологонепроникний і теплоізоляційний матеріал.

Недоліками радіаційної геліосушарки є прямий вплив сонячних променів на висушуваний матеріал, нерівномірність нагрівання фруктової маси. Висока швидкість сушіння призводить до пересушування, деформації і розтріскування матеріалу.

Автори [7, 29, 46, 48], для сушіння сільськогосподарських продуктів та інших матеріалів рекомендують конвективну геліосушарку, в якій пластини поглинача виконані, як одне ціле, з перфорованими полицями для передачі тепла за рахунок теплопровідності. Самі пластини встановлені таким чином, що утворюють напрямні щілини. Для попереднього нагрівання повітря від сонячного випромінювання, використовується канал між прозорою панеллю і додатковою пластиною (див. граф.част.арк.3).

З метою забезпечення рівномірності висихання на всіх поглиначах подача повітря регулюється за рахунок зміни ширини щілини внаслідок горизонтального переміщення полиць.

Недоліком конвективної геліосушарки є значна витрата тепла на нагрівання конструктивних елементів сушильної камери.

Отже, розглянуті варіанти конструктивних рішень геліосушарок не передбачають засобів керування змінним потоком вхідної сонячної енергії з метою зменшення перепадів температури сушіння впродовж доби. Відповідно, геліосушарка повинна складатися з похилого повітряного колектора з вентилятором змінної продуктивності, поворотного пристрою

або плоского дзеркального концентратора для посилення ранкового та вечірнього сонячних потоків і теплового акумулятора для резервування надлишкової теплопродуктивності у сонячний полудень.

Під час переробки фруктової сировини в особистих селянських і фермерських господарствах використовують різноманітні технологічні основи сушіння окремих видів фруктів: яблук, груш (рис. 1.1).

Яблука. Залежно від способу підготовки до сушіння розрізняють такі види сушених яблук культурних сортів: очищені від шкірочки з вилученою насінною камерою та оброблені розчином сірчистої кислоти або обкурені сіркою; не очищені від шкірочки з вилученою насінною камерою та оброблені сірчистою кислотою чи обкурені сіркою; неочищені й неопрацьовані.



Рисунок 1.1 – Технологічна схема підготовки фруктової сировини до сушіння

Під час сортування за розмірами яблука миють, інспектують, після чого очищають від шкірочки і видаляють серцевину (рис. 1.1). Потім яблука ріжуть кружечками товщиною 5 ÷ 6 мм і сульфітують, занурюючи в розчин сірчистої кислоти 0,15 % -ної концентрації на 1 ÷ 2 хв. Після набрякання зайвого розчину яблука подають на сушіння. При сушінні в конвективній сушарці на 1 м² сушильної поверхні завантажують 3 ÷ 5 кг підготовлених яблук, температура повітря на початку сушіння – 60 ÷ 65 °С, а наприкінці – не вище 40 °С. Тривалість процесу – 5 ÷ 6 год.

Під час сушіння у геліосушарці плоди після очищення ріжуть на шматочки завтовшки $6 \div 7$ мм, сульфітують, витримуючи $2 \div 3$ год у сушильній камері, обкурюванням, за допомогою сірки. [7, 13, 20].

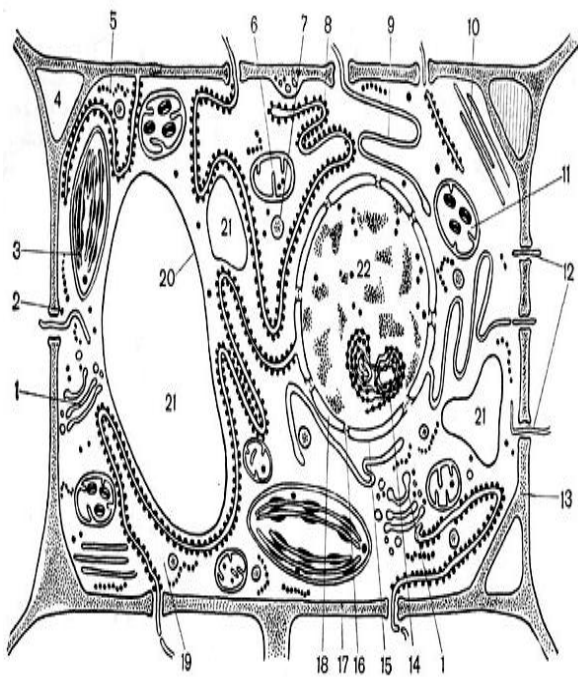
Хімічний склад сушених яблук залежить від сорту і місця вирощування плодів. У середньому в них міститься $35 \div 45$ % цукрів, кислот (у перерахунку на яблучну) $1,5 \div 4,0$ %. Вміст вологи — не більше 20 % [7, 13, 14, 20].

1.3 Характеристика об'єктів дослідження

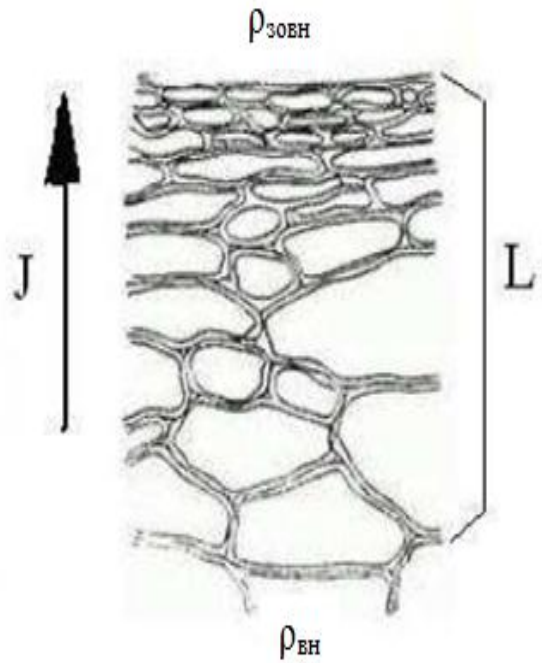
Будова і хіміко-технологічні властивості фруктів роблять вирішальний вплив на міцність зв'язку вологи з матеріалом, перенесення тепла і вологи усередині матеріалу в процесі сушіння [30; 31]. Рослинні клітки по своїй будові представляють анізотропне колоїдне капілярно-пористе тіло. Містять велику кількість мікропор, мікро- і макрокапілярів, по яких волога циркулює з внутрішніх частин до поверхні і навпаки.

Рослинні клітки мають складну будову (рис. 1.2 а). Основною активною частиною клітки є протоплазма (або протопласт), що складається з цитоплазми і ядра. Протоплазма має загальну зовнішню клітинну оболонку, а ядро і цитоплазма оточені мембранами. Зовнішня клітинна оболонка складається з двох шарів: первинного і вторинного, що включають волокнину (нитки) целюлози (клітковина), зцементованої пектатамі кальцію і магнію.

У фруктах кількість вільної вологи не значна, вона завжди пов'язана з компонентами, або знаходиться у відсіках клітки, оточених мембранами (рис. 1.2 б). Внутрішня структура капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих матеріалів відрізняється великою складністю, що обумовлене різноманітністю форм, розмірів і взаємного розташування пір, капілярів і елементів твердої фази об'єктів сушіння.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Узагальнена схема будови рослинної клітки, складена за даними електронно-мікроскопічного дослідження різних рослинних кліток: а) 1 – апарат Гольджі; 2 – вільно розташовані рибосоми; 3 – хлоропласти; 4 – міжклітинні простори; 5 – полірибосоми (декілька зв'язаних між собою рибосом); 6 – мітохондрії; 7 – лізосоми; 8 – гранульована ендоплазматична мережа; 9 – гладка ендоплазматична мережа; 10 – мікротрубочки; 11 – пластиди; 12 – плазмодесми, що проходять крізь оболонку; 13 – клітинна оболонка; 14 – ядерце; 15, 18 – оболонка ядра; 16 – пори в ядерній оболонці; 17 – плазмалема; 19 – гіалоплазма; 20 – тонопласт; 21 – вакуолі; 22 – ядро [34].

б) J – потік вологи; L – товщина нарізки плодів; $(\rho_{\text{зовн}} - \rho_{\text{вн}})$ – різниця концентрацій (густин) розчину по обидва боки мембрани

При сушінні йде процес зневоднення і нагрівання продукту. Нагрівання продукту по-різному впливає вміст органічних речовин. У фруктах найбільш термолабільними компонентами є: аскорбінова кислота, пігменти і фенольні з'єднання. Максимально допустима температура теплоносія в основному визначається термостійкістю цих показників хімічного складу. Зіставлення

показників хімічного складу [13] з аналогічними показниками якості в висушених продуктах дозволить оцінити ступінь їх перетворень і суму втрат при переробці.

Середній хімічний склад яблук у відсотках до загальної маси: вода – 83,3; загальна кількість вуглеводів – 15,8; білок – 0,4; мінеральні речовини – 0,5. До складу вуглеводів входять у відсотках до загальної маси: фруктоза – 8,1; глюкоза – 3,8; сахароза – 3,0; крохмаль – 0,24; пектинові речовини – 1,1; клітковина – 0,6. У яблуках міститься 0,9 % органічних кислот, активна кислотність їх $\text{pH} = 3,4$. Мінеральні речовини в мг %: калій – 38; кальцій – 19; фосфор – 13; магній – 10; залізо – 2,5 і ін. Середній вміст вітамінів в мг %: аскорбінова кислота – 7; каротин – 0,1; тіамін – 0,04; рибофлавін – 0,03, ніацин – 0,2 [13].

Об'єктами досліджень вибрані фрукти, зокрема: зерняткові плоди – яблука (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Фруктова сировина: яблука Семирічка.

Найважливішими характеристиками фруктів, як об'єктів сушіння є їх теплофізичні характеристики (ТФХ), а саме: вологість W , густина фруктів $\rho_{\text{фр}}$, коефіцієнти температуропровідності α , теплопровідності λ , питомої теплоємності $c_{\text{ф}}$, тертя f , що наведено у табл. 1.1 [15, 23].

Таблиця 1.1 – Теплофізичні властивості фруктів [15, 23]

Фрукти	$W, \%$	$\rho_{\text{пр}}, \text{кг/м}^3$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{°C)}$	$\alpha \cdot 10^{-8}, \text{м}^2/\text{с}$	$c_{\text{ф}}, \text{Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$	f
Яблука зелені Семирічка	80÷95	790÷1200	0,1÷0,6	0,2÷1,8	3780÷3804	0,05÷0,13

Таким чином, знання ТФХ вологих матеріалів необхідне для обґрунтування і вибору методу сушіння, розрахунку кінетики процесу сушіння, визначення оптимальних режимів нагрівання, сушіння, розрахунку і проектування сушильних апаратів.

1.4 Кінетика конвективного сушіння фруктів

Сушіння – це фізико-хімічний процес, спрямований на видалення вологи з продукту. Швидкість випаровування пропорційна площі вільної поверхні рідини і залежить від концентрації її пари у повітрі. Процеси переходу молекул з рідини у повітря і навпаки зрівноважуються, коли парціальний тиск пари досягає рівноважного (стану насичення). Під кінетикою сушіння переважно розуміють часову залежність середнього вологовмісту і температури висушеної маси, за якою можна розрахувати кількість видаленої вологи і витрату теплової енергії.

Вимоги до технології сушіння фруктів обмежуються не тільки вологістю до нормативних значень, а й максимальним збереженням поживних речовин, вітамінів, ароматичних та смакових якостей, а також товарним виглядом висушеного продукту. Ці додаткові вимоги накладають певні обмеження на перебіг тепло- і масообмінних процесів сушіння, параметри яких задаються особливостями зв'язку вологи з органічним матеріалом фруктів.

У загальному випадку зв'язок вологи з матеріалом відбувається за трьома механізмами: фізико-механічним, фізико-хімічним і хімічним.

Усередині клітин фруктів волога зв'язана осмотично завдяки напівпроникним стінкам (мембранам), які вільно пропускають воду і

затримують розчинені речовини. Тому, під час їх сушіння енергія спочатку витрачається на подолання опору осмотичного тиску при перенесенні молекул води на зовнішню поверхню клітин. Надалі вода, будучи тільки механічно зв'язаною із зовнішньою поверхнею мембрани, видаляється звичайним механізмом випаровування. Прискорення сушіння додатковим підведенням тепла обмежене небезпекою локальних перегрівів і деструкції органічних тканин, що погіршує споживчу якість сухофруктів. Відтак, різні за фізичною природою сили зв'язку вимагають і різні механізми волого видалення, доцільність яких визначають за відповідними рушійними силами.

речовини між фазами в стані динамічної рівноваги. Але сушіння – процес не рівноважний, тому на практиці його параметри характеризують кінетичними кривими – часовими залежностями зменшення вологості фруктів за сталих температур і швидкостей потоку повітря [22, 25, 31, 36, 50]. Міцність зв'язку води з висушуваним матеріалом характеризують тиском насиченої пари, який найбільший над поверхнею вільної рідини, а найменший – для хімічно зв'язаної. Під час, сушінні волога видаляється з гігроскопічного матеріалу тільки до зрівняння з тиском насиченої пари.

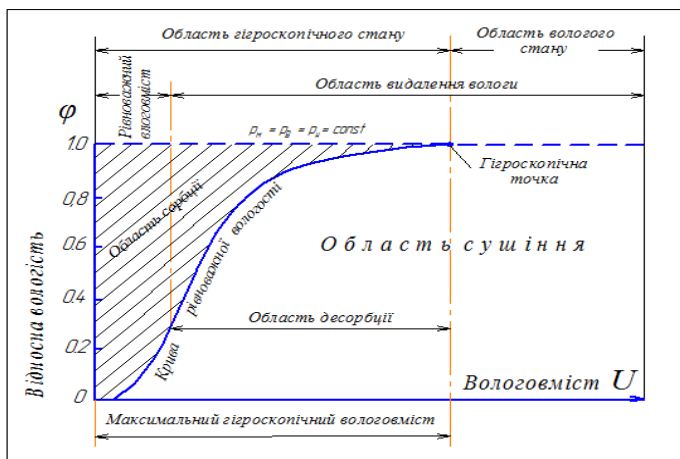


Рисунок 1.4 – Діаграма рівноваги вологи гігроскопічного матеріалу

Таким чином, стан висушеного матеріалу можна оцінювати за його розташуванням відносно кривої рівноваги між вологовмістом U і тиском насичення ϕ , загальний вигляд якої наведено на рис. 1.4 [16,17, 18, 36,

50]. Метод сушіння повинен відповідати стану вологи у матеріалі (табл. 1.2) [20, 50].

Таблиця 1.2 – Схема та механізми переносу вологи з капілярно пористих речовин

Форма зв'язку вологи	Механізм волого-видалення	Процес	Рушійна сила процесу	Характеристика швидкості процесу
Поверхнева	Механічний	Центрифугування	Різниця тисків	Швидкість потоку вологи
		Фільтрування		
	Термічний	Випаровування	Різниця температур	Коефіцієнт тепловіддачі
	Дифузійний	Конвективна дифузія	Різниця парціальних тисків	Коефіцієнт масовіддачі
Капілярна	Механічний	Гідродинамічний	Різниця тисків	Швидкість потоку вологи
	Термічний	Випаровування	Різниця температур	Коефіцієнт тепловіддачі
	Дифузійний	Дифузія в умовах просторового обмеження	Різниця парціальних тисків	Коефіцієнт масовіддачі
Абсорбційна	Дифузійний	Десорбція вологи	Різниця тисків	Коефіцієнт масовіддачі

У випадку конвективного сушіння вологий матеріал прогрівається з поверхні всередину з протилежними за напрямом градієнтами вологості ∂W_p і температури ∂T . Напрямок потоку вологи q_m стає залежним від співвідношення величин ∂W_p і ∂T , а також сил вологопровідності й термовологопровідності [18, 22, 36, 50]:

$$q_m = -a_m \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{\partial W_p}{\partial n} \pm \delta \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \right), \quad (1.1)$$

де a_m – коефіцієнт дифузії вологи, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_0 – маса абсолютно сухого матеріалу в одиниці об'єму вологого матеріалу, кг ; δ – відносний коефіцієнт термодифузії вологого матеріалу; $\frac{\partial W_p}{\partial n}$ і $\frac{\partial T}{\partial n}$ – скалярні значення градієнтів вологості й температури.

У процесі сушіння вологих матеріалів здійснюється зовнішній і

внутрішній тепломасообмін із сушильним агентом [22, 37]. Зовнішній масообмін відбувається між нагрітим повітрям і поверхневим шаром матеріалу. На нього вирішальний вплив справляє потенціал сушіння, рівний різниці температур сухого t^c і мокрого t^m термометрів:

$$E = t^c - t^m = \frac{r}{c_{\text{вол.н}}} \cdot \frac{d_n - d}{1000}, \quad (1.2)$$

де r – прихована теплота пароутворення, кДж/кг; $c_{\text{вол.н}}$ – теплоємність вологого повітря, кДж/(кг·°C); d_n і d – вологовміст відповідно насиченого і поточного повітря, г/кг сух. повітря. На початку сушіння вологість поверхневого матеріалу швидко наближається до рівноважної, а у глибинних шарах практично не зменшується. У періоди охолодження перерозподіл вологи відбувається у протилежному напрямку.

В усталеному режимі роботи конвективних сушарок температура вологої поверхні $t_{\text{вол}}$ може знаходитись в інтервалі температур мокрого і сухого термометрів ($t^c < t_{\text{вол}} < t^c$) або рівною температурі сухого ($t_{\text{вол}} \approx t^c$). В обох випадках вологовміст і ентальпія потоку повітря зростають. За сталої температури вхідного повітря різниця температур сухого і мокрого термометрів залежить від швидкості потоку. Підвищення вологовмісту потоку повітря до стану близького насиченню не допускається з метою запобігання зворотного процесу – конденсації водяної пари на поверхні вологого матеріалу та холодніших ділянках сушильної камери. На практиці режими роботи сушарок традиційно зводять до вибору двох параметрів – температури агента сушіння та швидкості повітрообміну у сушильній камері [22, 36].

Швидкість сушіння лімітують особливості внутрішнього тепломасообміну, які залежні від структури матеріалу, його фізико-хімічних властивостей, зв'язаної з ним вологи, її фазового стану та кінетики міграції об'ємом. В результаті зовнішнього тепломасообміну порушується рівновага і всередині матеріалу, де виникають градієнти вологовмісту ∇U , температури ∇T і тиску ∇P . Потік вологи, мігруючої усередині матеріалу, розраховується за

рівнянням О. В. Ликова [36, 50]:

$$\bar{J} = -(a_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla U + a_m^T \cdot \rho_0 \cdot \nabla T + a_p \cdot \nabla P), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (1.3)$$

де \bar{J} – вектор щільності потоку вологи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; a_m , a_m^T , a_p – відповідно коефіцієнти дифузії вологи, термодифузії та перенесення пари, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_0 – густина абсолютно сухого матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$; знак „-” вказує, що рух вологи відбувається в бік зменшення вологості.

У загальному випадку перенесення вологи й теплоти всередині вологих матеріалів під час сушіння описують диференціальні рівняння, отримані О. В. Ликовим [36, 50, 55], тобто

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a_m \cdot \nabla^2 U + a_m^T \cdot \nabla^2 \bar{t} + a_p \cdot \nabla^2 P; \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial \bar{t}}{\partial \tau} = \left(a_m \cdot \frac{\varepsilon \cdot r}{c} \right) \cdot \nabla^2 U + \left(a + \frac{\varepsilon \cdot r}{c} a_m \cdot \delta \right) \nabla^2 \bar{t} + \left(a_m \cdot \frac{\varepsilon \cdot r}{c} C_p \right) \cdot \nabla^2 P; \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \left(-\frac{a_m \cdot \varepsilon}{C_p} \right) \cdot \nabla^2 U - \left(\frac{a_m \cdot \varepsilon}{C_p} \cdot \delta_p \right) \cdot \nabla^2 \bar{t} + \left(a_p - \frac{a_m \cdot \varepsilon}{C_p} \cdot \delta_p \right) \cdot \nabla^2 P. \quad (1.6)$$

де U – вологовміст матеріалу, $\text{кг}/\text{кг}$ сух. речовини; \bar{t} – середня температура матеріалу, $^\circ\text{C}$; τ – тривалість сушіння, с ; ε – критерій фазового стану, рівний відношенню кількості випаруваної вологи до вологовмісту в певному об’ємі (при $\varepsilon = 1$ вода переміщується у вигляді пари, при $\varepsilon = 0$ – у вигляді рідини); r – питома теплота пароутворення, $\text{кДж}/\text{кг}$; δ_p – відносний коефіцієнт фільтраційного потоку вологи; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial \chi^2} + \frac{\partial(k-1)}{\chi \partial \chi}$ – оператор Лапласа (k – число кінцевих вимірювань; χ – безрозмірна координата); $c = c_{\text{сух}}/U$ – приведена теплоємність сухої частини матеріалу, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $c_{\text{сух}}$ – теплоємність сухої частини матеріалу.

Під час конвективного сушіння, потік повітря із сталою вхідною температурою і вологістю, вологовмістом продукту зменшується за нелінійною залежністю. При малих швидкостях сушіння на відповідних часових залежностях виділяють три ділянки, які відповідають трьом стадіям

процесу: підігріву (I), сталої (II) та спадної (III) швидкості [36, 50] (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Розрахункова схема параметрів сушіння: 1 – температура матеріалу; 2 – вологовміст матеріалу; 3 – швидкість сушіння

Модель три стадійного процесу сушіння відповідає кінетиці масопереносу в структурованих біологічних тканинах і зручна для планування параметрів сушарки. Зокрема, для інженерних розрахунків важливо мати наближені співвідношення між середнім вологовмістом W і тривалістю сушіння τ , а також прості формули для розрахунку теплового балансу і витрати теплоносія. Стадія сталої швидкості сушіння ($N = \text{const}$) продовжується до стану критичної вологості W_k :

$$N = \frac{dW}{d\tau} = \frac{W_0 - W_k}{\tau}, \%/\text{с}, \quad (1.7)$$

Процес сушіння фруктів у геліосушарці характеризується зміною вологості висушуваного матеріалу в часі. Про швидкість сушіння можна судити за кількістю вологи, випаруваної з висушуваного матеріалу за період часу (%/с).

Натомість стадію падаючої швидкості сушіння прийнято описувати таким диференціальним рівнянням:

$$-\frac{dW}{d\tau} = K \cdot (W - W_p), \quad (1.8)$$

де K – коефіцієнт пропорційності (сушіння), який визначають графічним методом з експериментальної кривої сушіння, побудованої у напівлогарифмічних координатах. Типовим розв’язком цього рівняння є експоненційна залежність. Тому, загальну тривалість сушіння прийнято оцінювати сумою двох часових інтервалів сталої та спадаючої швидкості [22, 36, 47, 50].

$$\tau = \frac{W_0 - W_p}{N} - \frac{1}{\alpha N} \cdot [1 + \ln \alpha \cdot (W - W_p)]. \quad (1.9)$$

де $\alpha \approx 1,8/W_p$ відносний коефіцієнт сушіння. Відтак, для оцінки загальної тривалості сушіння потрібно попередньо задати такі три параметри: W_0 , W_p – початковий і кінцевий (рівноважний) вологовміст, та швидкість волого виділення N . Останній параметр визначають експериментально при заданих параметрах потоку агента сушіння та висушуваного матеріалу, але з великою суб’єктивною похибкою. Тому, на практиці параметри сушіння оцінюють за результатами дослідження стандартизованих (модельних) матеріалів при заданих температурах і швидкостях потоку повітря.

За результатами обробки численних експериментальних кривих сушіння встановлено, що добуток $N \cdot \tau$ при даній вологості матеріалу є постійною величиною [36]. Тому, за наявності однієї кривої сушіння можливо розрахувати криву для будь-якого іншого режиму: наприклад розрахунок параметрів сушіння можна провести за результатами досліджень, наведених у спеціалізованій літературі [22, 25, 36, 47, 50] з іншою метою.

На поверхні фруктової сировини вільна волога, як залишок після миття, існує тільки на стадії прогрівання. Решту часу рідка фаза є багатокомпонентним розчином органічних та мінеральних речовин, а не вільною рідиною, як у класичних дисперсних матеріалах неорганічного походження. Тому, при сушінні фруктів межу між другою і третьою стадіями сушіння часто провести практично неможливо. Відтак результати дослідження кінетики сушіння фруктів формально описують дифузійним волого перенесенням через структурні елементи – мембрани та капіляри.

Такий, узагальнений підхід ґрунтується на законі Фіка для потоку вологи через мембрану [8, 22, 36, 50, 56]:

$$J = \frac{D \cdot K}{L} \cdot (\rho_{\text{зовн}} - \rho_{\text{вн}}), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (1.10)$$

де J – потік вологи, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; K – коефіцієнт розподілу, що враховує співвідношення концентрації вологи всередині та зовні мембрани; L – товщина нарізки плодів, м ; $(\rho_{\text{зовн}} - \rho_{\text{вн}})$ – різниця концентрацій (густин) розчину по обидва боки мембрани. До того ж при сталій температурі і швидкості вхідного потоку повітря вологість тонких пластинок фруктів ($L = 5 \dots 11$ мм) з часом зменшується за законом, близьким до експоненційного, що уподібнює кінетику масообміну до дифузійного процесу [44]. А результати досліджень найчастіше апроксимують таким виразом для ефективної дифузії $D_{\text{еф}}$

[44]:

$$MR = \frac{M}{M_0} = \frac{U - U_p}{U_0 - U_p} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{еф}}}{4L^2} \cdot \tau\right), \quad (1.11)$$

або

$$U = U_p + (U_0 - U_p) \cdot \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{еф}}}{4L^2} \cdot \tau\right).$$

де L – товщина нарізаних плодів, м ; U_0 , U і U_p – початковий поточний і рівноважний вологовміст відповідно, $\text{кг}/\text{кг}$ сух. речовини.

Значення $D_{\text{еф}}$ приймають рівним кутовому коефіцієнту експериментальної логарифмічної залежності (1.12) відносно часу:

$$k = \ln \frac{U - U_p}{U_0 - U_p} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{еф}}}{4L^2} \cdot \tau, \quad (1.12)$$

Дифузійний процес описують експоненційним рівнянням Арреніуса

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T} \cdot \tau\right), \text{ м}^2/\text{с}, \quad (1.13)$$

де D_0 – перед експоненційний множник, $\text{м}^2/\text{с}$, чисельно рівний значенню дифузії в початковий момент часу: для молекул води у повітрі $D_0 = 2,16 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ при нормальних умовах (температура 273 К і тиск 760 мм. рт. ст.);

$R = 8,31$ кДж/(кмоль·°C) – універсальна газова стала; T – абсолютна температура, °C; E_a – енергія активації, кДж/моль.

Фізичний зміст енергії активації E_a – додаткова енергія, яку отримує молекула для стрибкоподібного переміщення. Тому, енергія активації E_a зменшується з температурою, як і теплота пароутворення. На практиці енергію активації для кожної температури сушіння, визначають за кутовим коефіцієнтом часової залежності логарифма, коефіцієнта дифузії:

$$\ln \frac{D_{ef}}{D_0} = -\frac{E_a}{R \cdot T} \cdot \tau, \quad (1.14)$$

За даними [44], при дифузійній моделі вологоперенесення енергії активації E_a процесу сушіння близька для більшості овочів і фруктів і її середнє значення для яблук становить 35 кДж/моль (1944 кДж/кг), що значно більше за енергію активації самодифузії води (близько 19 кДж/моль). За різними джерелами [44] її оцінюють у межах від 22 до 66 кДж/моль (від 1222 до 3666 кДж/кг), тоді як прихована теплота пароутворення при 50 °C рівна 2382 кДж/кг [44].

За відомими значеннями коефіцієнта дифузії та її енергії активації зменшення вологовмісту з часом прийнято розрахувати за таким співвідношенням:

$$\frac{d(U - U_p)}{d\tau} = -2(U_0 - U_p) \cdot \frac{D}{L^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D}{4L^2} \tau\right), \quad (1.15)$$

Якщо прийняти до уваги, що процес сушіння продовжується принаймі 2 доби (48 годин), то зменшення вологовмісту за короткий проміжок часу, наприклад $\Delta\tau = 1$ год, у довільний момент τ можна оцінити виразом для приросту:

$$\Delta U \approx dU = -2(U_0 - U_p) \cdot \frac{D}{L^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D}{4L^2} \tau\right) \cdot \Delta\tau, \quad (1.16)$$

Параметри сушіння зручно розраховувати за попередньо відомим коефіцієнтом дифузії.

Дифузійні процеси у конвективних сушарках можна прискорити, як зростанням швидкості потоку повітря так і його температури. Наприклад, за результатами експериментального дослідження сушіння фруктів, наведених у публікації [44], запропоновано таке двопараметричне рівняння для коефіцієнта дифузії:

$$D = (0,204 \cdot T - 1,48 \cdot V - 3,9) \cdot 10^{-10}, \text{ м}^2/\text{с}, \quad (1.17)$$

Відносний ступінь впливу кожного параметру на перебіг дифузійного процесу отримаємо порівнянням частинних диференцілів останнього виразу:

$$\partial D_T = 0,204 \cdot 10^{-10} \partial T \text{ і } \partial D_V = -1,48 \cdot 10^{-10} \partial V \quad (1.18)$$

Обидва параметри протилежно діють на перебіг дифузійних процесів, однак необхідно зважати, що через складну взаємозалежність їх вплив не можна розглядати окремо. Натомість при малих відхиленнях одного з параметрів відповідний приріст іншого для стабілізації процесу можна оцінити прирівнюючи повний диференціал (1.17) до нуля з наступним скороченням сталих множників і заміною частинних диференцілів їх приростами:

$$\begin{aligned} & 0,204 \cdot \Delta T - 1,48 \cdot \Delta V = 0, \\ \text{або} & \Delta V = \frac{0,204}{1,48} \cdot \Delta T = 0,14 \cdot \Delta T. \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} & 0,204 \cdot \Delta T - 1,48 \cdot \Delta V = 0, \\ & \Delta V = \frac{0,204}{1,48} \cdot \Delta T = 0,14 \cdot \Delta T. \end{aligned}} \right\} \quad (1.19)$$

Виходячи з близьких параметрів кінетики сушіння фруктів [44], можна сподіватися, що співвідношення (1.19) виконується і для інших фруктів з близькою структурою м'якоті. Зважаючи на те, що нагрівання повітря і його вентилявання відбувається за рахунок різних джерел енергії, вибір способу інтенсифікації сушіння диктується їх доступністю, економічними чинниками, конструктивними вимогами тощо.

При сталій температурі сушіння швидкість вологовиділення з часом спадає, що рівнозначно зростанню енергії активації при зменшенні вологовмісту. Подібну залежність має інша енергетична величина – енергія сорбційного зв'язку води з матеріалом $q_{ze}(U)$ [44]. Однак у літературі [22,

25, 36, 44, 50] не наведено співвідношень, які б кількісно пов'язували між собою ці два параметри сушіння – кінетичний та енергетичний.

Отже, знання механізмів перенесення тепло- і масообмінних процесів (енергетики конвективного сушіння фруктів) є основою для обґрунтування оптимальних режимів сушіння і параметрів сушильного агента в камері. Опис характеру впливу теплотехнічних параметрів навколишнього середовища на енергетичні показники процесу необхідний для вибору, розрахунку, розробки, вдосконалення камерних сушильних апаратів.

1.5 Енергетика конвективного сушіння фруктів

В ізольованій системі вода-повітря з часом встановлюється динамічна рівновага між протилежними потоками молекул з вільної поверхні у повітря і навпаки. У такій системі температура обох середовищ однакова, а повітря має максимальну вологість, яку називають насиченою. Натомість у відкритій системі температура води θ завжди менша за температуру навколишнього середовища t завдяки самочинному процесу переходу активованих молекул в атмосферу. Різниця температур регламентується швидкістю дифузійних процесів та компенсаційному тепловому потоку від навколишнього повітря до поверхні води. Тоді, як концентрація пари поступово спадає від близької до насичення у приповерхневому шарі до рівня поточної вологості повітря. За нерухомого повітря перехід молекул з приповерхневого шару в об'єм відбувається механізмом стаціонарного дифузійного перемішування [9, 16, 30, 31, 34].

У реальних умовах природного сушіння на відкритому повітрі волога поверхня завжди обдувається повітряним потоком, який інтенсивно розсіює молекули насиченої пари приповерхневого шару повітря, що рівнозначно прискоренню дифузійних процесів за рахунок конвективної складової дифузійного масопереносу. При цьому температура поверхні води додатково зменшується, а вологовиділення прискорюється. Відтак низькотемпературне

сушіння відбувається навіть тоді, коли температура потоку повітря рівна температурі зовнішнього середовища. Конвективні сушарки, у яких агентом сушіння є зовнішнє повітря, незалежно від його температури, називають атмосферними.

У наближенні конвективної теоретичної сушарки відбувається ізобарно-адіабатичний (без доступу стороннього тепла) тепломасообмін, при якому вологий матеріал обдувається повітрям сталої температури t . У такому процесі зміна теплової енергії dQ потоку повітря рівна приросту його внутрішньої енергії du та роботі розширення пари $d(pV)$ [22, 34, 50]:

$$dQ = d(u + p \cdot V) = dI, \quad (1.20)$$

де $I = u + pV$ – ентальпія вологого повітря, значення якої розраховують відносно точки замерзання $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ як суму ентальпій пари I_n та сухого газу I_2 (повітря):

$$I = I_2 + I_n \cdot X, \quad (1.21)$$

або
$$I = c_2 \cdot t + (r_o + c_n \cdot t) \cdot X. \quad (1.22)$$

де $c_2 = 1,004$ і $c_n = 1,842$ кДж/(кг \cdot °C) – питома теплоємність повітря і пари відповідно; $r_o = 2500$ кДж/кг – прихована теплота випаровування води; X – вологовміст повітря, кг/кг. Оскільки ентальпія за своїм фізичним змістом – це енергія, віднесена до одиниці маси, то при енергетичних розрахунках вологовміст чисельно рівний масі води в 1 кг вологого повітря;

У теоретичній сушарці приріст ентальпії потоку повітря dI відбувається за рахунок зменшення теплоти вологої маси ($-c_g \cdot \theta \cdot dm_g$), де c_g – питома теплоємність води; θ – рівноважна температура вологої маси; $dm_g = dX$ – втрачена тілом маса, рівна набутому потоком вологовмісту dX [22, 30, 34]:

$$dQ = d(u + pV) - I_g \cdot dW = dI - c_g \cdot \theta \cdot dX = 0, \quad (1.23)$$

Звідки питома ентальпія вологого повітря на одиницю маси видаленої вологи в теоретичній сушарці визначається за формулою:

$$dI/dX = c_g \cdot \theta, \quad (1.24)$$

Після інтегрування (1.24) у межах від стану 1 до стану 2 отримаємо вираз, характерний для рівняння прямої:

$$\frac{I_2 - I_1}{X_2 - X_1} = \frac{\Delta I}{\Delta X} = c_e \cdot \theta, \quad (1.25)$$

У теоретичній сушарці ентальпія вихідного потоку максимальна (її називають рівноважною і позначають I_p), бо відносна вологість близька до насичення. Питому теплоємність води у процесі сушіння прийнято вважати сталою величиною і рівною такій, як при температурі мокрого термометра, тому ентальпія води $I_e = c_e \cdot \theta = c_e \cdot t_{mm} = \text{const}$ [22, 34, 50]. Таким чином, у теоретичній сушарці процес відбувається за сталої сумарної ентальпії, бо видалена пара вносить у повітря рівно стільки тепла, скільки було його взято з вологої маси на випаровування. Теоретичний процес сушіння можна реалізувати за будь-якої температури, якщо виконується умова сталості ентальпії потоку:

$$I_1 = I_2 = I = \text{const}, \quad (1.26)$$

Ентальпію вологого повітря у довільній точці лінії адіабатичного насичення відносно фіксованого стану I_1 та X_1 можна розрахувати за формулою

$$I_2 = I_1 - c_e \cdot \theta \cdot (X_1 - X_2), \quad (1.27)$$

У цьому процесі кількість тепла, витраченого на видалення води пропорційне температурі повітря, яку називають рівноважною температурою або лінією сталої температури мокрого термометра.

В теоретичній сушарці відсутні:

- втрати тепла у навколишнє середовище;
- втрати тепла з висушеним матеріалом;
- втрати тепла з транспортними засобами;
- немає підводу тепла у сушильну камеру

У реальній сушарці, інтенсивність сушіння традиційно прискорюють підвищенням температури вхідного потоку повітря. Це означає, що праву частину виразу (1.25) потрібно доповнити доданком на супутні втрати тепла: q_∂ – на додатковий підігрів води до поточної температури; q_m – на

нагрівання матеріалу і внутрішнього обладнання $q_{об}$, а також q_{me} – на компенсацію тепловтрат з потоком сухого повітря, як носія пари [22, 34]:

$$\Delta I/\Delta X = (c_g \cdot \theta + q_d) - (q_m + q_{об} + q_{me}) = \Delta, \quad (1.28)$$

У залежності від співвідношення між потоками вхідного і витраченого тепла, процес реального сушіння може відбуватися зі збільшенням питомої ентальпії $\Delta I/\Delta X = \Delta > 0$, або її зменшенням $\Delta I/\Delta X = \Delta < 0$. Випадок $\Delta = 0$ відповідає теоретичній сушарці.

У першому періоді сталої швидкості сушіння – за умови наявності вільної поверхні води – витрата тепла на десорбцію 1 кг вологи рівна прихованій теплоті пароутворення r_θ при температурі процесу θ . Значення r_θ можна розрахувати за рівнянням [22]:

$$r_\theta = r_0 + c_n \cdot \theta - c_g \cdot \theta, \quad (1.29)$$

Натомість у другому періоді падаючої швидкості сушіння, процес пароутворення починається ще всередині структурних елементів у зоні так званої зв'язаної вологи, а на поверхні матеріалу замість вільної вологи знаходиться адсорбовані молекули пари. Тому, теплоту десорбції у періоді падаючої швидкості приймають рівною сумі прихованої теплоти пароутворення і енергії зв'язку вологи з матеріалом $q_{зв}$ [22, 30, 34]:

$$q_d = r_\theta + q_{зв}, \quad (1.30)$$

У праву частину рівняння (1.25) потрібно ввести інший доданок:

$$\Delta I_p / \Delta X = c_g \cdot \theta - q_{зв}. \quad (1.31)$$

Наведене співвідношення описує баланс енергій у випадку рівноважного процесу, який реалізується при малій швидкості потоку. Тоді уся підведена теплота передається висушуваній масі, температури вихідного потоку і вологи рівні, а його стан близький до насичення.

Реальний процес відбувається за неповного насичення вихідного потоку, і відповідно неповного використання підведеного тепла, тому приріст ентальпії менший від рівноважного на величину надлишкового теплового потоку [50]:

$$dI = dI_p - dQ_{\text{надл}}/L,$$

$$\text{і} \quad dQ_{\text{надл}} = (c_{cm} + c_e \cdot U) \cdot m_c \cdot d\theta \pm \sum q \cdot dU,$$

де I_p – ентальпія потоку за рівноважного процесу; L – масова витрата повітря, кг/с; c_{cm} і c_e – питома теплоємність сухої маси m_{cm} і води відповідно, кДж/кг·°C; $\sum q$ – сума додаткових надходжень (–) або втрат (+) тепла.

Погодинний баланс енергії конвективної сушарки можна записати таким виразом [22, 30, 34, 36, 50]:

$$\Delta I = [c_e + q_{ze} \cdot (U)] \cdot \Delta X - \frac{1}{L} [(c_{cm} + c_e \cdot U) \cdot m_c \cdot d\theta \pm \sum q_{ze} \cdot dU],$$

У результаті інтегрування отримуємо балансовий вираз впродовж усього циклу сушіння:

$$\frac{I_{\kappa} - I_0}{X_{\kappa} - X_0} = \frac{\Delta I}{\Delta X} = c_e \cdot \theta_0 - q_m - \frac{1}{\Delta X} \int_{X_0}^{X_{\kappa}} q_{ze} \cdot dX \pm \sum q,$$

$$\text{або} \quad I_{\kappa} - I_0 = c_e \cdot \theta_0 \cdot \Delta X - \frac{1}{\sigma} \cdot (c_{cm} + c_e \cdot U_{\kappa}) \cdot (\theta_{\kappa} - \theta_0) - \int_{X_0}^{X_{\kappa}} q_{ze} \cdot dX \pm \sum q \cdot \Delta X,$$

де I_0, I_{κ} – початкова та кінцева ентальпія вологого повітря, кДж/кг; θ_0 і θ_{κ} – початкова і кінцева температури висушуваного матеріалу; U_{κ} – кінцевий вологовміст, кг/кг; q_m – питомі затрати тепла на нагрівання матеріалу до температури адіабатного випаровування; q_{ze} – питома теплота зв'язку вологи з матеріалом; c_e , і c_{cm} – питома теплоємність води і сухого матеріалу; $\sum q$ – додаткова теплота: (+) надходження, а (–) втрати; $\sigma = L/m_{cm}$ – питома витрата теплової енергії на десорбцію з розрахунку на 1 кг сухої маси, яку можна представити таким рівнянням [22, 36, 50]:

$$\sigma = \frac{G}{m_{cm}} = \frac{(c_{cm} + c_e) \cdot \Delta\theta + (I_{n,\kappa} - c_e \cdot t + \bar{q}_{ze} \pm \sum \bar{q}) \cdot \Delta U}{I_0 - c \cdot t_{\kappa} - I_{n,\kappa} \cdot X_0}, \quad (1.32)$$

де L – масова витрата повітря, кг/с; m_{cm} – маса сухого матеріалу, кг; $\Delta\theta$ – зміна температури матеріалу від початку до кінця процесу; $I_{n,\kappa}$ – ентальпія пари у кінці процесу; \bar{q}_{ze} – середня теплота зв'язку вологи з матеріалом,

кДж/кг; q_m – додаткове тепло, рівне сумі енергій випаровування та роботи розширення пари; $\sum \bar{q}$ – баланс додаткових надходжень (+) або втрат (–) тепла; останні дві величини приймаються або розраховуються, як середні величини всього процесу, кДж/кг. $\Delta U = U_0 - U_k$ – різниця початкового U_0 і кінцевого U_k вологовмісту матеріалу, кг/кг; ΔX – різниця початкового X_0 і кінцевого X_k вологовмісту повітря, кг/кг.

Останні балансові рівняння дозволяють за відомими: температурою і витратою повітря оцінювати продуктивність сушарки і навпаки у стаціонарному режимі. Але, обидва ці параметри є взаємозалежні і їх теоретичний розрахунок можливий тільки для окремих ідеалізованих умов. Тому, балансові рівняння використовують лише для аналізу ефективності роботи готових сушарок, але не для обґрунтування конструкторських рішень нових.

Геліосушарка переважно працює у циклічному режимі з добовим періодом та випадковою складовою зміни параметрів потоку повітря. Тому, наведені рівняння доцільно використовувати тільки для оцінки роботи сушарки впродовж невеликих (погодинних) інтервалів, коли потік сонячної енергії можна вважати сталим, вірніше він змінюється у межах похибки пересічних вимірювальних приладів. У випадку мінливої хмарності в геліосушарці значну частину циклу сушіння складають перехідні процеси, а при тривалому затіненні та вночі – переходить у режим атмосферної сушарки, близький за кінетикою до теоретичного сушіння.

У капілярно-пористих матеріалах основна частина вологи перебуває у зв'язаному стані, тому питома енергія їх десорбції перевищує приховану теплоту пароутворення. Енергія зв'язку вологи при висушуванні матеріалу $q_{зв}$ зростає за складною нелінійною залежністю, середньоінтегральне значення якої розраховують за формулою [50]:

$$\bar{q}_{зв} = \frac{1}{U_k - U_0} \int_{U_0}^{U_k} q_{зв}(U) \cdot dU, \quad (1.33)$$

В інженерній практиці використовують наближене середнє інтегральне значення енергії десорбції, яке оцінюють за площею під відповідною апроксимаційною прямою. Для більшості органічних матеріалів кутовий коефіцієнт апроксимаційної прямої однаковий і рівний 4200 кДж/кг [50]. Тому, середню енергію зв'язку у процесі з відомими значеннями початкового U_0 та кінцевого U_k вологовмісту розраховують за таким співвідношенням [50]:

$$\overline{q_{зв}} \approx 4200 \cdot \frac{U_0 - U_k}{2}. \quad (1.34)$$

Сумарне значення середньої енергії зв'язку і прихованої теплоти пароутворення використовується, як вхідний параметр для обґрунтування добової теплопродуктивності основного джерела тепла геліосушарки – сонячного повітряного колектора.

Термодинамічну або енергетичну ефективність сушарки, як і теплової машини, прийнято оцінювати через відношення корисної енергії до затраченої. Корисною вважається енергія випаровування вільної та зв'язаної води, а затраченою – енергія нагрівання теплоносія. У стаціонарному режимі роботи відношення енергій можна замінити відношенням відповідних потоків тепла.

$$\eta_E = \frac{q_{кор}}{q_{зат}}, \quad (1.35)$$

У наближенні ізобарного процесу в конвективній сушарці поточні значення затраченого теплового потоку очевидно рівні різниці ентальпій потоку повітря на вході і виході геліоколектора, а затраченого – різниці ентальпій між входом і виходом сушильної камери. Насправді процес сушіння не є повністю оборотним, тому енергетичну ефективність сушарки оцінюють порівняно з ідеальним процесом – шляхом ексергетичного аналізу.

Для практики важливіше оцінювати ефективність сушарки за питомою масою видаленої вологи Δm на одиницю поданої теплової ΔQ – масовою віддачею сушарки. Пропонуємо поточну масовіддачу конвективної геліосушарки визначати за відношенням погодинної зміни маси вологи Δm і використаної теплової енергії, представленій через різницю ентальпій потоку повітря між входом і виходом сонячного колектора:

$$\eta_m = \frac{\Delta m}{\Delta Q} = \frac{\Delta m}{(I_{ГК} - I_{нс}) \cdot G \cdot \Delta\tau} = \frac{m_c \cdot \Delta U}{(I_{ГК} - I_{нс}) \cdot G \cdot \Delta\tau}, \quad (1.36)$$

де m_c – суха маса; G – масова витрата агента сушіння; ΔU – зміна вологовмісту; $\Delta\tau = 1$ год – часовий інтервал між двома вимірюваннями маси. За такого представлення побічні тепловтрати не враховуються, що зручно для порівняння енергетичної ефективності волого видалення сушарками з різними способами генерування і підведення енергії. Зокрема, у конвективній сушарці, яка працює під час роботи у режимі близькому до теоретичної на сушіння витрачається та втрачається тільки енергія зовнішнього середовища. Оскільки при роботі реальної сушарки теоретична складова завжди присутня, то енергозатрати на сушіння можуть бути й меншими за роботу десорбції. Енергозберігаючі технології сушіння повинні обов'язково враховувати цю енергетичну складову волого видалення.

1.6 Параметри сонячної енергії

Інтенсивність поглинання залежить від довжини шляху в атмосфері (оптичної маси) та компонентного складу. Оптичну масу прийнято оцінювати в одиницях товщини атмосфери: стану АМ 1 відповідає ситуація, коли Сонце перебуває у зеніті. Типовою для середніх широт вважається оптична маса АМ 1,5, коли сонячні промені проходять шлях в 1,5 довший від зенітального, що відповідає відхиленню від зеніту на кут $\theta_z = 48,2^\circ$ або кутовій висоті Сонця над горизонтом $h = 41,8^\circ$ [19, 27, 51, 53, 59]. Впродовж

дня завдяки зміні оптичної маси атмосфери змінюється й співвідношення енергетичних внесків коротко- і довгохвильової областей спектра. Тому, у сонячній енергетиці стандартним вважають потік сонячної енергії інтенсивністю 1000 Вт/м^2 , спектр якого відповідає проходженню через шар озону завтовшки 4 мм та водяної пари 20 мм у перерахунку на зріджений стан (рис. 1.6). Паспортні енергетичні характеристики сонячних установок визначають при опроміненні стандартним потоком АМ 1,5 [19, 39, 40, 53].

Приймач на поверхні Землі освітлюється трьома потоками різної інтенсивності: прямим I_b , розсіяним небосхилом I_d та відбитим від хмар, рельєфу і довколишніх об'єктів – I_r . Діаграма розподілу втрат вхідного потоку та співвідношення між потоками опромінення горизонтальної поверхні за ясної погоди наведена на рис. 1.7 [40, 46, 53].

Вважається, що прямий потік надходить безпосередньо із сонячного диска та області небосхилу навколо Сонця, обмеженої колом у 5° . Решта небосхилу є джерелом розсіяної складової загального потоку сонячної енергії. Розсіяне світло ясного неба створює на земній поверхні освітленість, що складає $20 \div 30\%$ від освітлення прямим сонячним випромінюванням. В окремих випадках розсіяне випромінювання складає $50 \div 70\%$ [46].

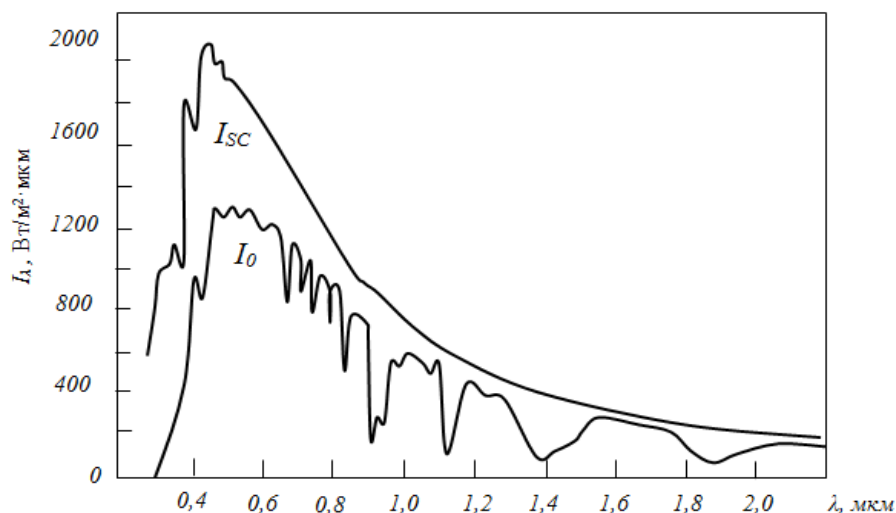


Рисунок 1.6 – Спектри потоку сонячного випромінювання: I_{SC} – на вході в атмосферу; I_0 – стандартного приземного АМ 1,5 [27]

Суму інтенсивностей прямого і дифузного (розсіяного) потоків називають повним (глобальним) сонячним випромінюванням, а процес опромінення поверхні називають інсоляцією.

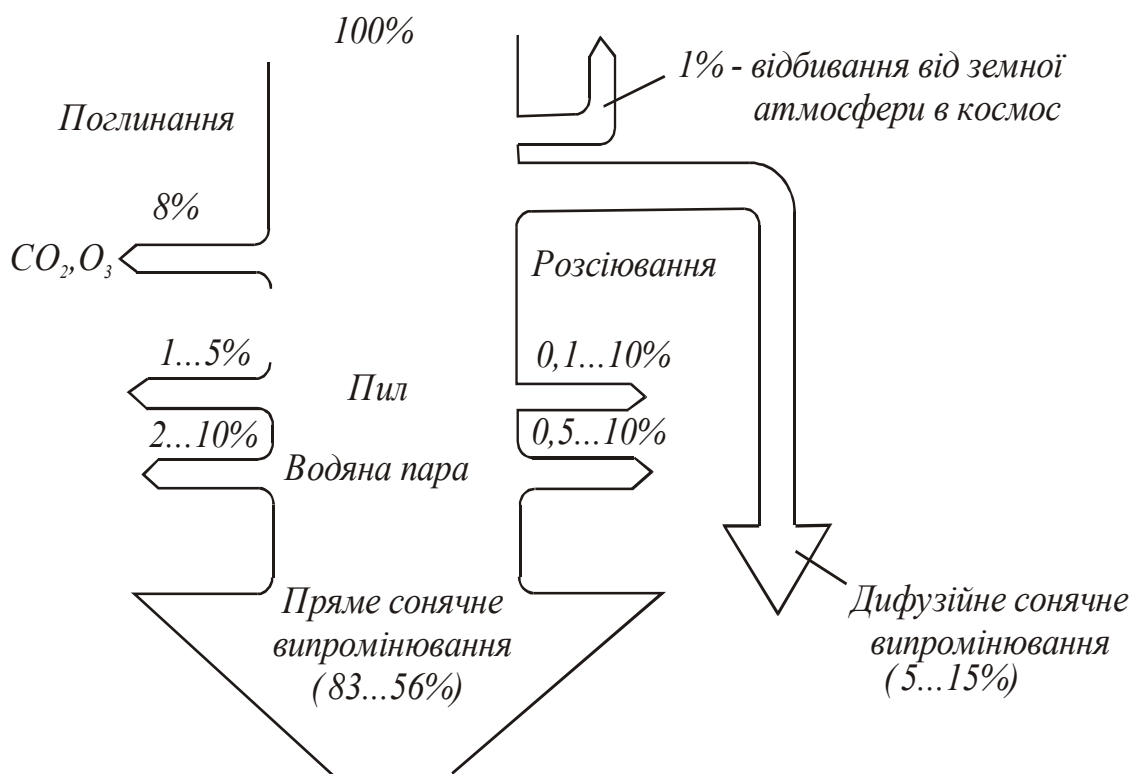


Рисунок 1.7 – Діаграма втрат сонячної енергії на шляху до приймача за умов ясного неба [46]

У середніх широтах за ясного неба плоска поверхня, перпендикулярна до прямих сонячних променів, у період двох годин від сонячного полудня, опромінюється потоком, який у середньому складає 70 % сонячної сталої, тобто $\approx 1,0 \text{ кВт/м}^2$. Енергетичну освітленість поверхні довільної орієнтації прямими сонячними променями розраховують з використанням взаємної орієнтації Сонця і сприймальної поверхні. Для цього користуються шкалою відліку часу відносно сонячного полудня та сферичною системою координат одиничного радіуса ($R=1$) з центром у точці опромінення.

Сонячним полуднем довільного географічного пункту вважається момент переходу центру сонячного диска через меридіан місцевості, тобто, коли напрям на Сонце збігається з південним. Момент сонячного полудня за Київським часом розраховують за такими рівняннями:

$$\tau_0 = 12 \text{ год} + (E - 4 \cdot \Delta\psi) \text{ хв} - \text{взимку}; \quad (1.37)$$

$$\tau_0 = (12 + 1) \text{ год} + (E - 4 \cdot \Delta\psi) \text{ хв} - \text{влітку.} \quad (1.38)$$

де $\Delta\psi = \psi - \psi_2$ – різниця географічної довготи місцевості ψ і Києва ψ_2 ; відхилення на схід вважається додатним ($\Delta\psi > 0$), а на захід – від’ємним ($\Delta\psi < 0$). Величину E називають поправкою на еліптичність земної орбіти, яка впродовж року змінюється, як у додатну, так і у від’ємну сторону не більше ніж на 16 хв.

Поточні значення поправки наведені в загальнодоступній літературі [21]. Сонячний час τ відраховують у годинах відносно сонячного полудня: до полудня він вважається додатним, а після – від’ємним.

Впродовж світлового дня Сонце переміщується небосхилом зі сходу на захід з кутовою швидкістю $\omega_0 = 15$ град/с. Зміщення Сонця відносно меридіонального напрямку називають годинним (ω_s) або азимутальним (γ_s) кутом, який розраховують за співвідношенням:

$$\omega_s = \gamma_s = 15\tau. \quad (1.39)$$

Зміщення на схід вважається додатним, а на захід – від’ємним.

У довільний момент часу азимутальну і зенітальну кутові координати Сонця у градусах розраховують за такими формулами

$$\gamma_s = \arcsin \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega_0 \tau}{\sin \theta_z}, \quad (1.40)$$

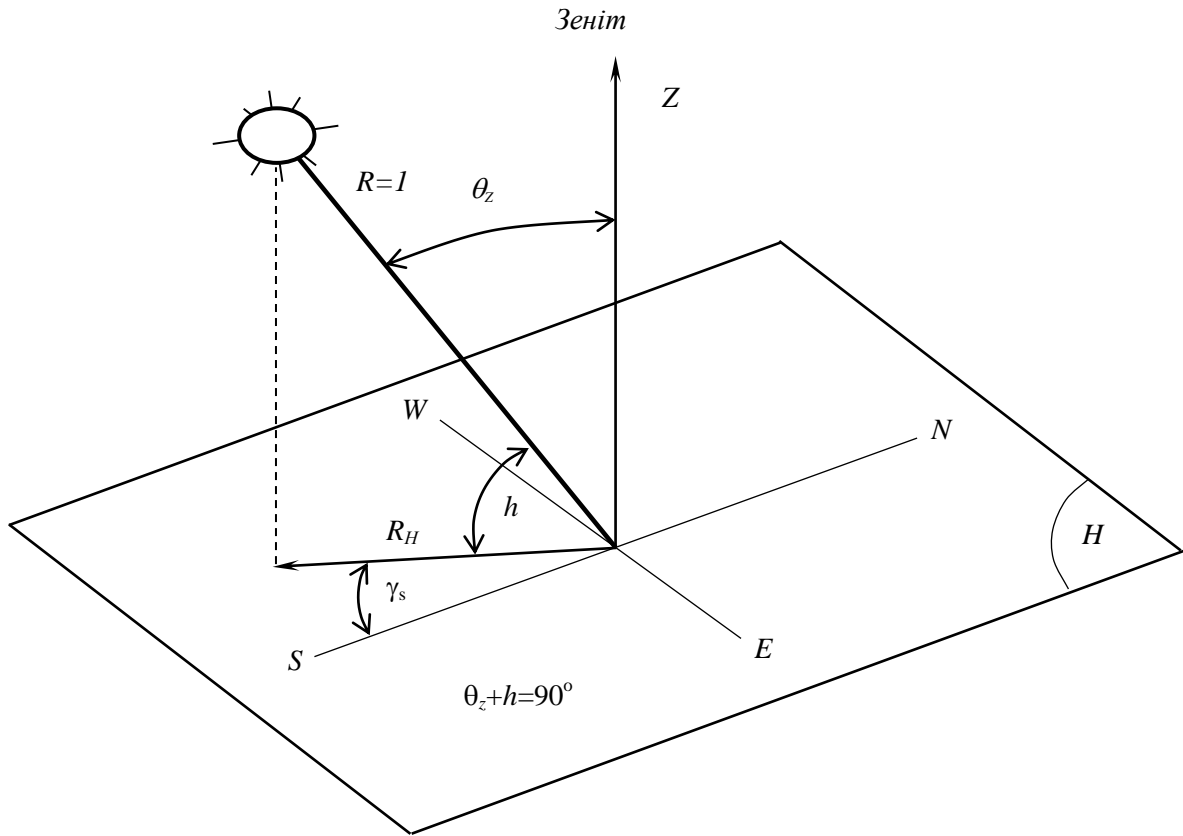
$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_0 \tau + \sin \varphi \cdot \sin \delta, \quad (1.41)$$

де символом δ позначають сонячне схилення – кут між екваторіальною площиною і напрямом на Сонце, який для порядкового дня року m розраховують за формулою

$$\delta = 23,45 \sin \frac{284 + m}{365} 360. \quad (1.42)$$

Положення Сонця на небосхилі визначається кутовими координатами за схемою, наведеною на рис. 1.8.

Сприймальна поверхня сонячної енергетичної установки, як правило, є довільно орієнтованою в просторі площиною, параметри якої задаються кутовими координатами її нормалі n_s (рис. 1.9).



УТ
ОС
ВІТ
ЛЕ
НН
Я
ДО
ВІЛ
ЬН
О
ОРИ
ЄН
ТО

ваної площини прямими сонячними променями в будь-який момент сонячного часу τ розраховують за формулою:

$$\cos\theta = (A - B) \sin\delta + [C \sin \omega_0\tau + (D+E)\cos\omega_0\tau] \cos\delta, \quad (1.43)$$

де сталі величини: $A = \sin\varphi \cos\beta$; $B = \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma$; $C = \sin\beta \sin\gamma$; $D = \cos\varphi \cos\beta$; $E = \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma$; φ – географічна широта місцевості.

Рисунок 1.8 – Координати Сонця на небосхилі: θ_z – зенітний кут; H – висота над горизонтом; γ_s – азимут; R_H – проекція напрямку на Сонце на площину горизонту H ; NS – EW – сторони світу; NS – лінія меридіана [21, 40, 53].

Здебільшого сприймальні поверхні сонячних енергетичних установок скеровані на південь, коли азимутальний кут площини $\gamma = 0$, коефіцієнти набувають нових значень: $C=C_0=0$, $B=B_0=\cos\varphi \cdot \sin\beta$, $E=E_0=\sin\varphi \cdot \sin\beta$ і загальна формула спрощується до вигляду:

$$\cos\theta = (A-B_0) \sin\delta + (D+E_0) \cos A_\tau \cdot \cos\delta. \quad (1.44)$$

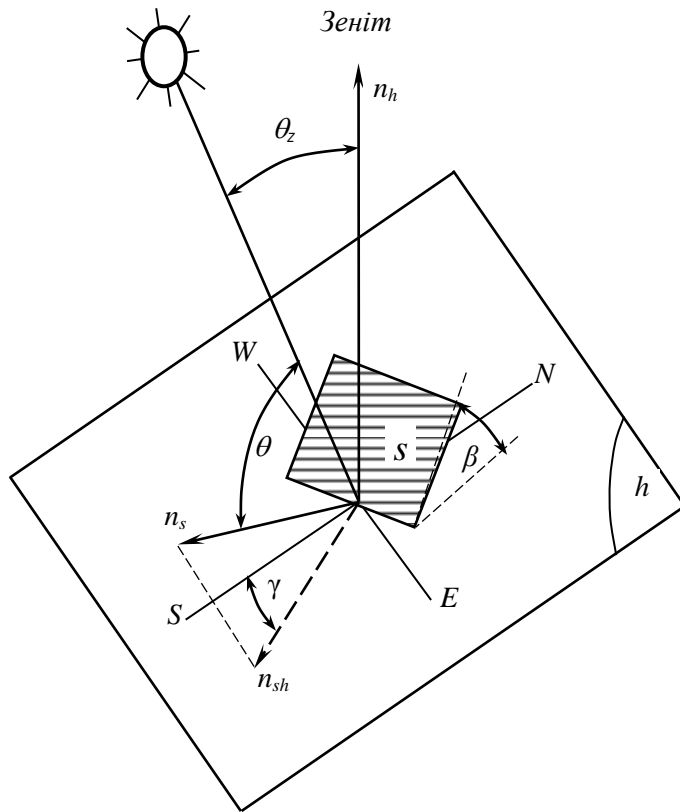


Рисунок 1.9 – Кутові орієнтаційні параметри сприймальної поверхні S : θ_z – зенітний кут; θ – кут освітлення; h – площина горизонту; n_s – нормаль до площини S ; n_{sh} – проекція нормалі n_s на площину горизонту; γ – азимутальний кут (координата) сприймальної поверхні; β – кут нахилу до горизонту; NS – лінія меридіана [21, 40, 53]

Як уже було зазначено, потік сонячного випромінювання, що досягає земної поверхні, залежить від пори року, місцезнаходження і часу доби, а також погоди. Через випадковий характер погодних змін поточний рівень інтенсивності потоку характеризують ймовірнісними величинами. За прийнятою у метеорології методикою, що три години вимірюють інтенсивність потоку сонячної енергії та рівень енергетичної освітленості горизонтальної поверхні Землі. Результати щоденних безпосередніх вимірювань на метеостанціях усереднюють протягом місяця і публікують у довідниковій літературі ([19] – в Україні). Останнім часом доступні матеріали постійного супутникового моніторингу стану атмосфери планети, які узагальнює Національне аерокосмічне агентство США – NASA і регулярно оновлює на своєму сайті [59].

Зокрема, у середніх широтах протягом світлового дня тривалістю τ_c енергетичну освітленість горизонтальної поверхні прямими променями за

стійкої ясної погоди можна, з достатньою для практики точністю [40; 53], представити косинусоїдною залежністю:

$$E(\tau) \approx E^{\max} \cdot \cos \pi \cdot \frac{\tau}{\tau_c}, \quad (1.45)$$

де E^{\max} – максимальне значення направленої енергетичної освітленості прямими променями в сонячний полудень; τ – час відрахований від моменту сонячного полудня, год.

Інтегральною характеристикою потоку сонячного випромінювання є кількість променевої енергії, яка надходить на одиницю площі протягом обумовленого часу. Згідно з вимогами системи СІ кількість променевої енергії називають енергетичною експозицією, позначають літерою H і вимірюють у [Дж] або [Вт·год] [21, 53]. У метеорологічній літературі цю величину називають «надходження сонячної енергії», а у довідниках публікують її середньоденні, середньомісячні та середньорічні значення для горизонтальної поверхні окремо для прямої H_{bh} , дифузійної H_{dh} складових та їх суми H_{th} .

Перерахунок сумарного надходження для випадку сприймаючої поверхні, орієнтованої на південь і нахиленої під довільним кутом β до горизонту H_β , виконують для кожної складової сонячної енергії за наведеними, наприклад у [17, 40], співвідношеннями:

$$H_\beta = R \cdot H_{th}. \quad (1.46)$$

Коефіцієнт перерахунку R попередньо розраховується за формулою

$$R = \left(1 - \frac{H_{dh}}{H_{th}}\right) \cdot R_\beta + \frac{H_{dh}}{H_{th}} \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} + r \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}, \quad (1.47)$$

де середньомісячний допоміжний коефіцієнт R_β ; у свою чергу, розраховують за відомими або табличними [39] значеннями середньомісячних азимутальних кутів заходу Сонця для похилої $A_{2\beta}$ та горизонтальної A_{2h} поверхонь за таким співвідношенням:

$$R_{\beta} = \frac{\cos(\varphi - \beta)\cos\delta\sin A_{2\beta} + \frac{\pi}{180}A_{2\beta}\sin(\varphi - \beta)\sin\delta}{\cos\varphi\cos\delta\sin A_{2h} + \frac{\pi}{180}A_{2h}\sin\varphi\sin\delta}. \quad (1.48)$$

Сьогодні замість громіздких обчислень (1.46)...(1.46) в інженерній практиці використовують готові результати перерахунку для кількох типових кутів нахилу сприймальної поверхні, які наводяться на сайті NASA для будь-якого географічного пункту [59].

Недоліком цього інтернет-ресурсу є відсутність даних термінових спостережень інтенсивності сонячних променів, що не дозволяє проводити розрахунки поточної потужності сонячних колекторів. Необхідні дані наведено у довідниках з метеорології [19], однак вони належать до періоду середини минулого століття, коли ознаки процесів глобального потепління ще не розвинулись.

Висновки до розділу 1

Виконаний аналіз літературних джерел дає підстави для таких висновків:

1. Аналіз існуючих засобів і способів сушіння фруктів показав, що найбільшого поширення в особистих селянських і фермерських господарствах набули сушильні апарати з конвективним способом підведення теплоти – камерного типу. На основі аналізу встановлено, що сушильні апарати мають, зокрема такі недоліки: не забезпечують відповідних норм витрат енергії; характеризуються низьким термічним ККД і підвищеною метеломіскістю.

2. Аналіз існуючих конструкцій геліосушарок та особливостей їхнього використання в технологічному процесі сушіння фруктів показав, що вони працюють за принципом камерних конвективних сушарок. Розглянуті варіанти конструктивних рішень геліосушарок не передбачають систем акумулювання тепла і пристроїв керування потоками, що зводить їх до пасивних приймачів сонячної енергії, які потребують у нічний час резервних систем енергозабезпечення.

3. Оцінка методів та методики розрахунку параметрів сонячної енергії показує, що основним їхнім недоліком є неврахування даних спостережень інтенсивності сонячних променів, а це не дозволяє розраховувати поточну потужність сонячних колекторів.

4. Значна кількість праць, інтелектуальних розробок та приведені аргументи дали змогу визначити основні напрями підвищення технологічної та енергетичної ефективності процесу сушіння на основі сонячної радіації. Відсутність на ринку таких типів сушильних апаратів формулює задачу розробки конструкції геліосушарок з оптимальними параметрами, яка могла б бути використаною в особистих селянських та малих фермерських господарствах. Тому, наведені аргументи зумовили вибір теми дисертації, визначили її мету і завдання дослідження.

5. Класичні співвідношення кінетики сушіння капілярно-пористих і колоїдних капілярно-пористих матеріалів недостатньо враховують особливості фруктової сировини. Тому в останніх зарубіжних дослідженнях віддається перевага кількісному опису вологоперенесення в рамках дифузійної моделі.

На підставі проведеного аналізу висунута наукова гіпотеза про можливість зниження енергетичних витрат на процес сушіння та забезпечення якості продукту завдяки використанню геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕЛІОСУШАРКИ ФРУКТІВ

2.1 Обґрунтування конструктивних параметрів геліосушарки

Основні напрямки підвищення технологічної і енергетичної ефективності процесу сушіння на основі сонячної радіації, а також відсутність на ринку таких типів сушильних апаратів ставить завдання розробки конструкції геліосушарки з оптимальними параметрами: площі сприймальної поверхні повітряного колектора та плоского дзеркального концентратора; маси теплоакумулюючої речовини для теплового акумулятора; внутрішнього об'єму сушильної камери.

При розрахунку нового типорозміру геліосушильного апарата на основі інформації, отриманої на стадії науково-дослідних у п. 1.1 і дослідно-технологічних робіт [5, 11, 21, 22, 27, 43, 46, 48, 52, 53, 57, 59], формулюються вхідні дані, до яких належать:

1. Тип і продуктивність геліосушарки, яка зумовлена обсягами переробки продукції (фруктів).
2. Початкова і кінцева вологість фруктів (на загальну масу), що піддаються сушінню.
3. Характеристики джерел енергетичних потоків.
4. Теплотехнічні параметри агента сушіння і навколишнього середовища.
5. Режим сушіння.
6. Теплофізичні властивості, тепло- і масообмінні характеристики сушильного матеріалу, який подається сушінню.
7. Характеристики джерел енергетичних потоків.

8. Швидкість циркуляції теплоносія.

На рис. 2.1 наведена схема послідовного розрахунку геліосушарки, яка зображена у вигляді орієнтованих графів, вершини яких позначають події і дії, а дуги – послідовність переходів і зворотних зв'язків.

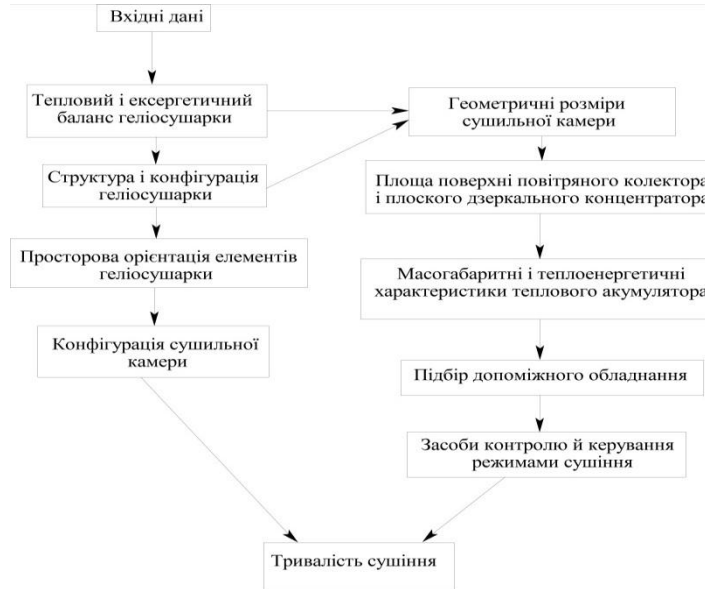


Рисунок 2.1 – Схема розрахунку геліосушарки

На основі аналізу конструкції відомих геліосушильних установок у п. 1.2 обґрунтовано конструктивно-технологічну схему геліосушарки, що наведена на рис. 2.2.

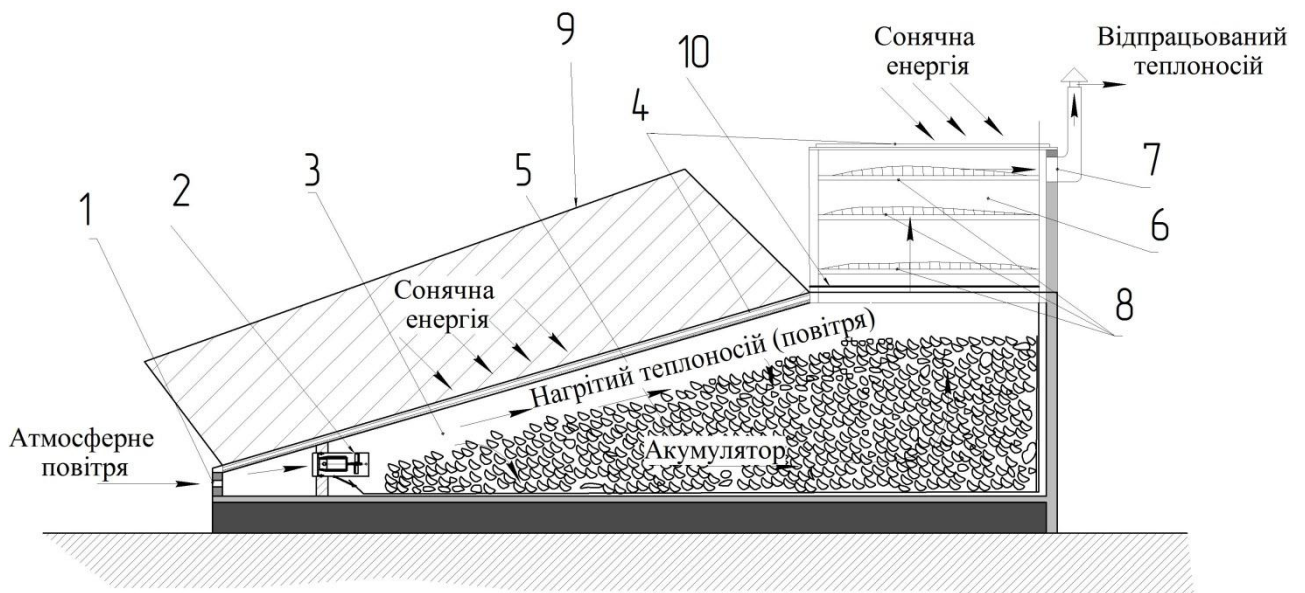


Рисунок 2.2 – Конструктивно-технологічна схема геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором: 1 – вхідний канал; 2 – вентилятор; 3 – повітропровід; 4 – повітряний колектор; 5 – теплоакумулюючий матеріал; 6 – сушильна камера; 7 – витяжний канал; 8 – решета; 9 – плоский дзеркальний концентратор; 10 – заслінка

Геліосушарка працює таким чином. Решета 8 заповнюють нарізаними плодами та закладаються в сушильну камеру. Повітря з зовнішнього середовища надходить у повітропровід, під асорбером, через шар теплоакумулюючого матеріалу, нагрівається та потрапляє в сушильну камеру. Частина тепла акумулюється в тепловому акумуляторі. Відпрацьований теплоносій видаляється природною або вимушеною конвекцією в навколишнє середовище через витяжний канал.

2.1.1 Обґрунтування кута нахилу сприймальної площини повітряного колектора до горизонту

Оптимальний кут нахилу повітряного колектора до горизонту β_{opt} визначається за максимальною сонячною енергією, яка надходить на його поверхню впродовж світлового дня. Замість громіздких розрахунків для кожного місяця сезону сушіння (для нашого випадку з липня до жовтня) доцільно скористатися результатами розрахунків, наведеними на сайті NASA [59], згідно з якими оптимальні кути нахилу і середньоденні надходження сонячної енергії становлять:

$$\begin{aligned} \text{липень} - \beta_{opt} &= 13^\circ; H_\beta = 5,02 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2; \\ \text{серпень} - \beta_{opt} &= 25^\circ; H_\beta = 4,77 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2; \\ \text{вересень} - \beta_{opt} &= 39^\circ; H_\beta = 3,35 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2; \\ \text{жовтень} - \beta_{opt} &= 54^\circ; H_\beta = 2,51 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2. \end{aligned}$$

Відповідні графічні залежності наведено на рис. 2.3.

Для стаціонарного повітряного колектора у два літні місяці максимальна чутливість приросту теплопродуктивності від зміни кута нахилу β_{opt} до горизонту становить 20 %, а у два осінні місяці теплопродуктивність колектора несуттєво залежить від кута нахилу. Тому, оптимальний кут нахилу повітряного колектора до горизонту β_{opt} вибираємо близьким до середньорічного оптимального – $40,4^\circ$. Покажемо, що остання властивість не зумовлена збігом випадкових погодно-кліматичних факторів, а безпосередньо випливає з виразу (1.44) для кута освітлення поверхні довільно орієнтованої на південь.

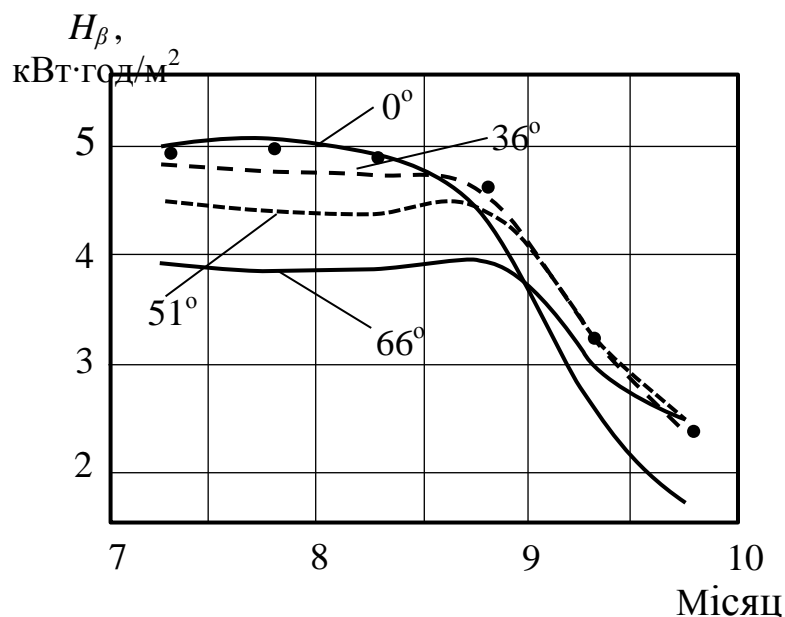


Рисунок 2.3 – Середньоденні за місяць надходження сонячної енергії на похилу поверхню південної орієнтації. Крапками відзначені надходження сонячної енергії при оптимальних кутах нахилу

У період, близький до осіннього рівнодення (21 вересня), сонячне схилення $\delta \rightarrow 0$, $\sin\delta \rightarrow 0$, $\cos\delta \rightarrow 1$; $\omega_0 = 15$ град/год. У цей період вираз (1.44) з урахуванням коефіцієнтів A , B , C , D і E набуває такого вигляду:

$$\cos\theta = (\sin\varphi \cdot \cos\beta - \cos\varphi \cdot \sin\beta) \cdot \sin\delta + (\cos\varphi \cdot \cos\beta + \sin\varphi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma) \cdot \cos 15\tau \cdot \cos\delta,$$

де θ – кут освітлення довільно орієнтованої площини; φ – широта місцевості; δ – схилення (кутове положення Сонця в сонячному опівдні відносно площини екватора); γ – азимутальний кут площини відхилення нормалі до площини місцевого меридіана; ω_0 – часовий кут (відзначимо, що через кожну годину значення ω змінюється на 15° із знаком "+" (від ранку до 12 год.) і "-" (від 12 год. до вечора). Наприклад, об 11 год. $\omega = +150$, а о 13 год. $\omega = -150$); τ – тривалість надходження сонячної енергії, с [48].

Оскільки для південно-орієнтованого повітряного колектора $\cos\gamma=1$, то з використанням простих тригонометричних співвідношень останній вираз спроститься до вигляду:

$$\cos\theta = \cos(\varphi - \beta) \cos 15 \cdot \tau. \quad (2.1)$$

За відомим правилом диференціювання приріст косинуса кута освітлення запишеться так:

$$\Delta \cos\theta \approx \cos 15 \tau \cdot \sin(\varphi - \beta) \Delta\beta. \quad (2.2)$$

Оскільки енергетична освітленість повітряного колектора визначається через інтенсивність потоку косинуса кута освітлення

$$E = I \cdot \cos\theta, \text{ то } \Delta E = I \cdot \Delta(\cos\theta), \quad (2.3)$$

де I – інтенсивність надходження сонячної енергії на похилу поверхню повітряного колектора, Вт/м².

Відносна зміна енергетичної освітленості повітряного колектора може бути оцінена за таким співвідношенням:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{I \Delta(\cos\theta)}{I \cos\theta} = \frac{\Delta(\cos\theta)}{\cos\theta} = \frac{\cos 15 \tau \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \Delta\beta}{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos 15 \cdot \tau} = \operatorname{tg}(\varphi - \beta) \Delta\beta, \quad (2.4)$$

Для випадку $\varphi = 50,6^\circ$ (широта м. Корця) і оптимального кута нахилу з липня до жовтня $\beta \approx 40,4^\circ$ $\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \approx 0,21$. З урахуванням перевідного коефіцієнта для переходу від градусної міри до радіанної, маємо:

$$\frac{\Delta E}{E} \approx 0,21 \cdot \frac{\pi}{180} \Delta\beta = 0,0037 \cdot \Delta\beta. \quad (2.5)$$

Для прикладу, зміна кута нахилу повітряного колектора на 10° змінить його енергетичну освітленість, а отже і годинну теплопродуктивність лише на

$$\frac{\Delta E}{E} \cdot 100\% \approx 0,0037 \cdot 10 \cdot 100\% = 3,7\% .$$

Ця зміна не перевищує похибки розрахунку енергетичної освітленості, тому зміна кута нахилу на 10° є непомітною.

Отже, оптимальний кут нахилу похилої сприймальної площини повітряного колектора до горизонту приймаємо рівним $\beta_{opt} = 40,4^\circ$.

2.1.2 Обґрунтування конструктивних параметрів повітряного колектора

Основою для розрахунку геліосушарки є тепловий баланс – це порівняння корисно застосованої та витраченої теплової енергії в процесі сушіння.

Тепловий баланс геліосушарки за один цикл сушіння, кДж:

у денний час:

$$dQ_{Hcp} + dQ_{кон} = dQ_{наг.р.} + dQ_{ф.} + dQ_{вип.} + dQ_{ак} + dQ_{від.тн.} + \sum dQ_{втр.}, \quad (2.6)$$

у нічний час:

$$dQ_{та} + dQ_{кон} = dQ_{наг.р.} + dQ_{ф.} + dQ_{вип.} + dQ_{від.тн.} + \sum dQ_{втр.}, \quad (2.7)$$

де dQ_{Hcp} – енергія сонячного випромінювання, що поглинається абсорбером, кДж; $dQ_{кон}$ – енергія, яку віддає сушильній камері нагрітий теплоносій, кДж; $dQ_{наг.р.}$ – енергія, витрачена на нагрівання решет, кДж; $dQ_{ф.}$ – енергія, витрачена на нагрівання продукту, кДж; $dQ_{вип.}$ – енергія, витрачена на випаровування вологи, кДж; $dQ_{ак}$ – кількість теплової енергії, що акумулюється за день у тепловому акумуляторі, кДж; $dQ_{та}$ – енергія, що відводиться від теплового акумулятора, кДж; $dQ_{від.тн.}$ – енергія відпрацьованого теплоносія, видаленого в навколишнє середовище, кДж; $\sum dQ_{втр.}$ – втрати теплоти через корпус геліосушарки, кДж.

Енергія сонячного випромінювання, що поглинається абсорбером, визначається за формулою

$$dQ_{Hcp} = K_3 \cdot K_{від.} \cdot \bar{A}_{ногл.} \cdot E \cdot S_{нк} \cdot d\tau, \quad \text{кДж.} \quad (2.8)$$

де K_3 – коефіцієнт забруднення корпусу повітряного колектора, $K_3 = 0,95$; $K_{від.}$ – коефіцієнт багаторазового відбивання сонячної радіації від абсорбера до світлопроникного матеріалу повітряного колектора, $K_{від.} = 0,23$; $\bar{A}_{ногл.}$ – середня поглинальна здатність абсорбера; E – енергетична освітленість, Вт/м², $S_{нк}$ – опромінена поверхня, м²; $d\tau$ – тривалість сушіння, с.

Енергія, яку віддає сушильній камері нагрітий теплоносій, часи dt визначається за формулою:

$$dQ_{\text{кон}} = S_{\text{ск}} \cdot v_{\text{тн}} \cdot \rho_{\text{тн}} \cdot c_{\text{тн}} \cdot (T_{\text{тн}2} - T_{\text{тн}1}) \cdot d\tau, \text{кДж.} \quad (2.9)$$

де $S_{\text{ск}}$ – площа сушильної камери, м²; $v_{\text{тн}}$ – швидкість теплоносія, м/с; $\rho_{\text{тн}}$ – густина теплоносія, кг/м³; $c_{\text{тн}}$ – питома теплоємність теплоносія, кДж/(кг·°С); $T_{\text{тн}1}, T_{\text{тн}2}$ – температура теплоносія, °С.

Енергія, витрачена на нагрівання решет, знаходиться за формулою

$$dQ_{\text{наг.р.}} = h_{\text{шар}} \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot (\sum S_{\text{реш}}) \cdot c_{\text{пр}} \cdot (T_{\text{тн}3} - T_{\text{тн}2}) \cdot d\tau, \text{кДж.} \quad (2.10)$$

де $h_{\text{шар}}$ – висота шару фруктового матеріалу на решетах, мм; $\rho_{\text{пр}}$ – густина продукту, кг/м³; $S_{\text{реш}}$ – площа решет, м²; $c_{\text{пр}}$ – питома теплоємність продукту, кДж/(кг·°С); $T_{\text{тн}2}, T_{\text{тн}3}$ – температура теплоносія, °С.

Енергія, витрачена на нагрівання продукту, розраховується так

$$dQ_{\phi} = \Delta m \cdot c_{\text{пр}} \cdot (T_{\phi 2} - T_{\phi 1}) \cdot d\tau, \text{кДж.} \quad (2.11)$$

де Δm – маса фруктів упродовж сушіння, кг; $T_{\phi 1}, T_{\phi 2}$ – температура фруктів, °С.

Енергія, витрачена на випаровування вологи з фруктового матеріалу обчислюють за виразом

$$dQ_{\text{вип.}} = J_m \cdot ((i_{\text{ПК}} - i_{\text{суш}} - i_{\text{ис}}) + q_{\text{зв}}) \cdot S_{\text{ск}} \cdot d\tau, \text{кДж.} \quad (2.12)$$

де J_m – щільність потоку вологи, кг/(м²·с); $i_{\text{ис}}, i_{\text{ПК}}, i_{\text{суш}}$ – відповідно ентальпії потоку теплоносія на шляху від входу у повітряний колектор до виходу зі сушильної камери, кДж/кг; $q_{\text{зв}}$ – десорбція зв'язаної вологи у фруктах, кДж/кг.

Енергія, що відводиться від теплового акумулятора, визначають за формулою

$$dQ_{\text{та}} = \pm V_{\text{та}} \cdot \rho_{\text{та}} \cdot c_{\text{та}} \cdot (T_{\text{та}2} - T_{\text{та}1}) \cdot d\tau, \text{кДж.} \quad (2.13)$$

де $V_{\text{та}}$ – об'єм теплового акумулятора геліосушарки, м³; $\rho_{\text{та}}$ – густина теплоакумулюючого матеріалу, кг/м³; $c_{\text{та}}$ – питома теплоємність теплоакумулюючого матеріалу, кДж/(кг·°С); $T_{\text{та}1}, T_{\text{та}2}$ – температура на вході до теплового акумулятора і виході з нього, °С.

Енергію відпрацьованого теплоносія, видаленого в навколишнє середовище, розраховують так

$$dQ_{\text{від.тн.}} = (1 - K_{\text{цир}}) \cdot \rho_{\text{тн}} \cdot c_{\text{тн}} \cdot v_{\text{тн}} \cdot S_{\text{ск}} \cdot (T_{\text{тн3}} - T_{\text{нс}}) \cdot d\tau, \text{ кДж.} \quad (2.14)$$

де $K_{\text{цир}}$ – коефіцієнт циркуляції повітря; $v_{\text{тн}}$ – швидкість теплоносія, м/с; $\rho_{\text{тн}}$ – густина теплоносія, кг/м³; $c_{\text{тн}}$ – питома теплоємність теплоносія, кДж/(кг·°C); $S_{\text{ск}}$ – площа сушильної камери, м²; $T_{\text{тн3}}$ – температура теплоносія, °C; $T_{\text{нс}}$ – температура навколишнього середовища, °C.

Втрати теплоти через корпус геліосушарки визначаються за формулою

$$dQ_{\text{втр.1}} = S_{\text{зс}} \cdot K \cdot (T_{\text{СК}} - T_{\text{нс}}) \cdot d\tau, \text{ кДж.} \quad (2.15)$$

де $S_{\text{зс}}$ – площа геліосушарки, м²; K – коефіцієнт теплопередачі через корпус геліосушарки, Вт/(м²·°C); $T_{\text{нс}}$ – температура навколишнього середовища, °C; $T_{\text{СК}}$ – температура теплоносія в сушильній камері за період сушіння, °C.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.16)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від навколишнього середовища до геліосушарки, Вт/(м²·°C); α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від геліосушарки в навколишнє середовище, Вт/(м²·°C); δ_n – товщина повітря між склом і абсорбером, $\delta_n = 17$ мм; λ_n – коефіцієнт теплопровідності; для повітря $T_n = 50$ °C при $\lambda_n = 0,027$ Вт/(м²·°C).

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішнього корпусу геліосушарки в навколишнє середовище визначається за швидкістю вітру над геліосушаркою і дорівнює:

При швидкості сушильного агента в геліосушарці 1,5 м/с, коефіцієнт тепловіддачі становить $\alpha_1 = 17,1$ Вт/(м²·°C);

За середньої швидкості вітру 2,2 м/с коефіцієнт тепловіддачі складає $\alpha_2 = 12,2$ Вт/(м²·°C), що характерно для території м. Вінниця в період сушіння фруктів [59].

Теплопродуктивність повітряного колектора Q визначаємо за формулою

$$Q = S_{нк} \cdot F_R \cdot \left[(k(\tau) \cdot R_{\beta} \cdot E^{max} \cos \pi \frac{\tau}{\tau_c}) \cdot (\alpha \cdot \tau) - U_L \cdot (T_{мн1} - T_{ис}) \right], \text{ кДж/год або кВт}, \quad (2.17)$$

де $S_{нк}$ – площа повітряного колектора, м²; F_R – коефіцієнт випромінювання тепла з повітряного колектора; k – коефіцієнт підсилення потоку сонячної енергії, що визначається експериментально; R_{β} – коефіцієнт середньомісячного надходження сонячного випромінювання; E^{max} – максимальна енергетична освітленість горизонтальної поверхні повітряного колектора, Вт/м²; U_L – коефіцієнт теплових втрат повітряного колектора, Вт/(м²·°C); τ_c – тривалість надходження сонячної енергії, с; α , τ – коефіцієнти поглинання і пропускання сонячного випромінювання; $T_{ис}$, $T_{мн1}$ – температура повітря на вході в колектор і виході з нього, °C.

Коефіцієнт випромінювання тепла з повітряного колектора F_R розраховують за формулою

$$F_R = \frac{G_{нм} \cdot c_{мн}}{S_{нк} \cdot U_L} \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{S_{нк} \cdot U_L \cdot F}{G_{нм} \cdot c_{мн}} \right) \right], \quad (2.18)$$

де F – коефіцієнт ефективності сприймальної панелі повітряного колектора; $G_{нм}$ – питома (на одиницю площі поверхні) витрата теплоносія, кг/м²·с.

Визначаємо витрату теплоносія на квадратний метр геліосушарки за формулою

$$Q_{мн} = S \cdot v_{мн} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.19)$$

де S – площа поперечного перерізу витяжного каналу, м².

З урахуванням формул (2.6 – 2.15), умова для визначення необхідної площі повітряного колектора $S_{нк}$ матиме вигляд

$$S_{нк} \geq \frac{Q_{суш} / 2}{3600 \cdot \eta \cdot H_{\beta}^{\circ}}, \text{ м}^2, \quad (2.20)$$

де $Q_{суш}$ – добова потреба теплової енергії на сушіння фруктів, кДж; η – ККД колектора; H_{β}° – надходження сонячної енергії, кВт·год./м².

Основою конструкції повітропроводу повітряного колектора є прямокутний паралелепіпед (рис. 2.4), об'єм якого визначаємо за формулою

$$V_{np} = A \cdot B \cdot h + \frac{A_1 \cdot B_1 \cdot h_1}{2}, \text{ м}^3, \quad (2.21)$$

де A, A_1 – довжина стінки повітропроводу, м; B, B_1 – ширина стінки повітропроводу, м; h, h_1 – висота стінки повітропроводу, м.

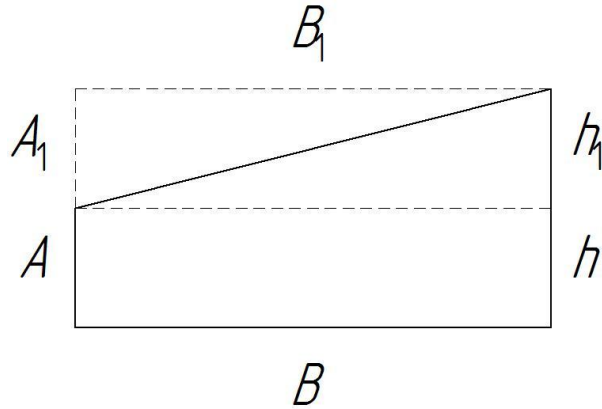


Рисунок 2.4 – Схема повітропроводу геліосушарки

Для переміщення повітря в геліосушарці використовують відцентровий вентилятор.

Для вибору типу вентилятора визначальне значення має потужність вентилятора, яку розраховують за формулою [34]:

$$N = \frac{k \cdot l \cdot \Delta m \cdot \Delta p_n}{3600 \cdot 102 \cdot \gamma \cdot \eta_s \cdot \eta_{np}}, \text{ кВт}, \quad (2.22)$$

де l – витрата повітря на 1 кг випаруваної води, м³/кг; Δm – кількість видаленої води, кг/с; k – коефіцієнт запасу: для вентилятора, зв'язаного з електродвигуном за допомогою жорсткої муфти – 1,2; Δp_n – повний опір геліосушарки, Па; γ – питома вага переміщеного повітря, кг/м³; η_{np}, η_s – ККД приводу і вентилятора.

Повний опір геліосушарки визначаємо за формулою [34]:

$$\Delta p_n = \Delta p_c + v_{mn}^2 \cdot \frac{\gamma}{2}. \quad (2.23)$$

де Δp_c – опір системи геліосушарки, Па.

Кількість електроенергії, яку споживає геліосушарка для приводу вентилятора визначаємо за формулою:

$$W_{el} = N_{вст} \cdot \tau_{розр}, \text{ кВт} \cdot \text{год}. \quad (2.24)$$

де $N_{ест}$ – потужність встановленого вентилятора, кВт; $\tau_{розр}$ – розрахункова тривалість роботи вентилятора впродовж дня, год (вентилятор вмикається щогодини впродовж дня на 20 хвилин для перемішування нагрітого теплоносія з охолодженим, тобто створення спрямованого руху теплоносія. Упродовж дня вентилятор працює всього $20 \cdot 13 = 260$ хвилин $\approx 4,3$ години).

Продуктивність вентилятора для геліосушарки визначаємо з номограми для вибору відцентрового вентилятора серії ВРВ – 146А [34].

Отримані аналітичні рівняння дозволяють розрахувати (2.6) і (2.7) – тепловий баланс геліосушарки, (2.17) – теплопродуктивність повітряного колектора, (2.19) – витрату теплоносія, (2.20) – площу сприймальної поверхні повітряного колектора, (2.21) – об’єм повітропроводу повітряного колектора.

2.1.3 Обґрунтування конструктивних параметрів плоского дзеркального концентратора

Плоскі дзеркальні концентратори використовують для підсилення потоку надходження сонячних променів (сонячної енергії) на сприймальну поверхню повітряного колектора, що дає змогу підвищити ККД геліосушарки. Тому в геліосушарці використовують нескладні малогабаритні плоскі дзеркальні концентратори, основною енергетичною вимогою яких є максимальне посилення надходження потоків сонячних променів за мінімально необхідної площі дзеркала. Це означає, що всі відбиті промені повинні освітлювати лише активну поверхню повітряного колектора.

Плоский дзеркальний концентратор встановлюють упритул до сприймальної поверхні під кутом α , оптимальне значення якого залежить від співвідношення поперечних розмірів (апертур) сприймальної поверхні повітряного колектора ($S_{нк}$) і дзеркала (L).

У випадку слідкування за Сонцем, геометрія посилення потоку сонячної енергії плоским дзеркалом краще відповідає схемі (див. арк.4 графічної частини). За такої схеми дзеркало можна змонтувати з будь-якого боку колектора. Натомість нерухомий колектор практично завжди

освітлюється скісними променями, тому для них плоскі дзеркальні концентратори доцільніше монтувати з обох напрямків – західного (зранку) і східного (ввечері) – для посилення скісних потоків ранкового і вечірнього випромінювання. Оптимізаційною вимогою до них є максимальне покриття відбитими променями сприймальної поверхні колектора за мінімально необхідної площі дзеркала. Причому, на відміну від сонячних модулів, теплові колектори допускають нерівномірну освітленість і неповне покриття відбитими променями.

При перпендикулярному падінні прямих променів та однакової ширині колектора і дзеркала коефіцієнт концентрації не перевищує 1,25. Збільшувати його нарощуванням ширини дзеркала нераціонально через непропорційні витрати. Тому, для випадку скісного освітлення ширину L дзеркального концентратора приймаємо такою, що дорівнює ширині колектора S_{nk} . Відповідну схему ходу променів наведено на рис. 2.5. Для розрахунку ступеня концентрації всі кутові величини виразимо через кут розкриття двогранного фоклина, утвореного площинами колектора і дзеркала α .

За вимоги рівномірного освітлення відбитими променями поверхні колектора відбитий промінь є основою рівнобедреного трикутника. Таким чином, з наведеної на рис. 2.5 побудови випливають, такі очевидні співвідношення:

$$\begin{aligned}
 \beta &= 90^\circ - \frac{\alpha}{2}; \\
 \theta_2 &= 90^\circ - \beta = \frac{\alpha}{2}; \\
 h + \beta &= \alpha \quad \text{або} \quad h = \alpha - \beta = \alpha - 90^\circ + \frac{\alpha}{2} = \frac{3}{2}\alpha - 90^\circ \\
 \theta_1 &= 90^\circ - h = 90^\circ - \frac{3}{2}\alpha + 90^\circ = 180^\circ - \frac{3}{2}\alpha.
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$

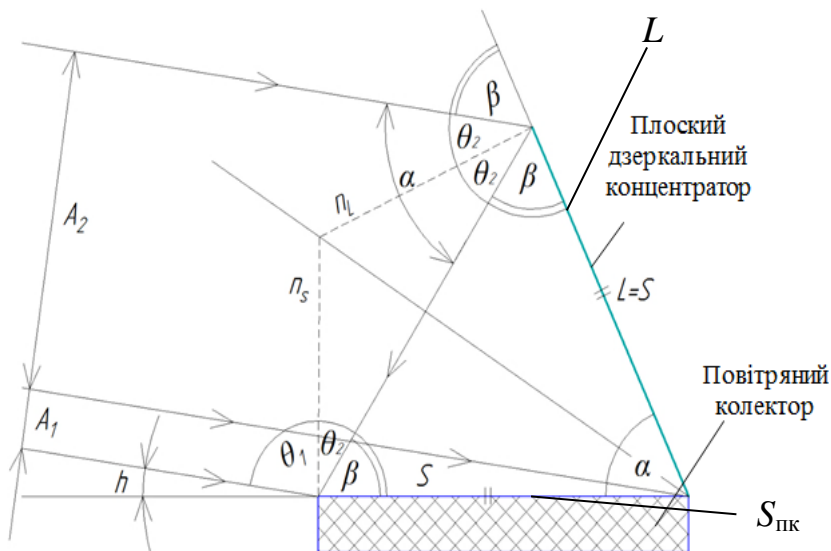


Рисунок 2.5 – Хід променів у концентраторі: L і S – відповідно ширина дзеркала і колектора; α – кут розкриття концентратора; A_1 і A_2 – переріз вхідного прямого і відбитого потоків; n_s і n_L – нормалі до площин S і L ; θ_1 і θ_2 – кути падіння променів на колектор і дзеркало; h і β – кути ковзання і відбивання променів

Кут ковзання змінюється в межах $0 < h < 90^\circ$. Тоді верхня межа кута розкриття визначиться з такої нерівності:

$$h = \frac{3}{2}\alpha - 90^\circ < 90^\circ \text{ або } \alpha < 120^\circ.$$

Натомість нижня межа кута розкриття α рівна 60° , бо інакше відбитий крайній промінь зміститься вправо від краю колектора. Тому ця величина не виходить за межі інтервалу:

$$60^\circ < \alpha < 120^\circ.$$

Коефіцієнт підсилення потоку дорівнює відношенню сумарної енергетичної освітленості колектора $E = E_1 + E_2$ до освітленості тільки прямими променями E_1 . E_1 і E_2 розраховуються через відповідні перерізи вхідного прямого і відбитого потоків сонячних променів A_1 і A_2 :

$$E_1 = A_1 \cos \theta_1; \quad E_2 = \rho A_2 \cos \theta_2,$$

де ρ – коефіцієнт відбивання дзеркала, $\rho = 0,8$ [30].

Звідси
$$k = \frac{A_1 \cos \theta_1 + \rho A_2 \cos \theta_2}{A_1 \cos \theta_1} = 1 + \rho \frac{A_2 \cos \theta_2}{A_1 \cos \theta_1}.$$

Обидва перерізи є функціями кута розкриття концентратора α :

$$A_1 = S \cdot \sin h = L \cdot \sin \left(\frac{3}{2}\alpha - 90^\circ \right) = -L \cdot \sin \left(90^\circ - \frac{3}{2}\alpha \right) = -L \cos \frac{3}{2}\alpha, \quad (2.26)$$

$$A_2 = L \cdot \sin(\alpha - h) = L \cdot \sin \left[\alpha - \left(\frac{3}{2} \alpha - 90^\circ \right) \right] = L \cdot \sin \left(90^\circ - \frac{\alpha}{2} \right) = L \cdot \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (2.27)$$

Після скорочення та елементарних тригонометричних перетворень отримаємо вираз для коефіцієнта концентрації сонячної енергії:

$$k = 1 + \rho \frac{A_2 \cos \frac{\alpha}{2}}{A_1 \cos \left(180^\circ - \frac{3}{2} \alpha \right)} = 1 + \rho \frac{\cos^2 \frac{\alpha}{2}}{\cos^2 \frac{3}{2} \alpha}. \quad (2.28)$$

У випадку горизонтального розміщення колектора кут ковзання рівний кутовій висоті Сонця над горизонтом, який є доповнюючим до зенітного, що розраховується за співвідношенням (1.41). Для колектора, орієнтованого у південному напрямку і нахиленого під кутом до горизонту, кут ковзання відраховується від площини сприймаючої поверхні. Тоді, зручніше орієнтуватися на кут освітлення θ_1 , який можна розрахувати за співвідношенням (2.25). Оскільки кут розкриття однозначно пов'язаний з кутом ковзання h , який, у свою чергу, функціонально залежить від поточного сонячного часу τ , то за потреби можна побудувати й часову залежність коефіцієнта підсилення також $k(\tau)$.

Натомість енергетичну освітленість нахиленого колектора тільки прямими променями можна оцінити через наближене співвідношення (1.45) для горизонтальної поверхні. Відповідний коефіцієнт перерахунку R_β розраховують за співвідношенням (1.48). Вираз для оцінки добової зміни енергетичної освітленості хід освітленості колектора сумою прямого та відбитого потоків розраховуємо за (1.45):

$$E_\beta(\tau) \approx k(\tau) \cdot R_\beta \cdot E^{max} \cos \pi \frac{\tau}{\tau_c}. \quad (2.29)$$

Значення E^{max} і тривалість світлового дня τ_c для похилої поверхні встановлюють експериментально.

Отримані вирази дають змогу розрахувати коефіцієнт підсилення потоку (2.28) і максимальну енергетичну освітленість (2.29).

2.1.4 Обґрунтування конструктивних параметрів теплового акумулятора

Тепловий акумулятор у складі геліосушарки призначений в основному для резервування надлишкової теплопродуктивності колектора з метою повного або часткового заміщення резервного нагрівача при тимчасовому захмаренні, а також вночі. Тому, для забезпечення стабільного процесу сушіння фруктів впродовж доби в геліосушарці нами запропоновано використовувати тепловий акумулятор ємнісного типу з твердим теплоакumuлюючим матеріалом на основі гальки, а саме повітряно-гравійний акумулятор [12, 28].

Основою для розрахунку маси теплоакumuлюючого матеріалу теплового акумулятора є рівняння (2.13) складової теплового балансу геліосушарки – це енергія, що відводиться від теплового акумулятора:

$$dQ_{ma} = V_{ma} \cdot \rho_{ma} \cdot c_{ma} \cdot (T_{ma2} - T_{ma1}),$$

де V_{ma} – об'єм теплового акумулятора, м³; ρ_{ma} – густина теплоакumuлюючого матеріалу, кг/м³; c_{ma} – питома теплоємність акумулятора, кДж/(кг·°C); T_{ma1}, T_{ma2} – температура акумулятора на початку і в кінці процесу зарядки, °C.

Тривалість періоду зарядки акумулятора τ_{hl} залежить від висоти шару теплоакumuлюючого матеріалу h , швидкості теплоносія v_{mn} у вхідному перерізі і описується формулою [28]:

$$\tau_{hl} = \frac{V_{ma} \cdot \rho_{ma} \cdot c_{ma} \cdot (T_{ma2} - T_{ma1})}{S_{ma} \cdot \alpha_v \cdot \Delta T_{ma} + v_{mn} \cdot c_{mn} \cdot \rho_{mn} \cdot h \cdot F_{ma} \cdot (\bar{T}_{mam} - \bar{T}_{mnk})}, \text{ с}, \quad (2.30)$$

де ρ_{ma} – густина теплоакumuлюючого матеріалу, кг/м³; ρ_{mn} – густина теплоносія, кг/м³; c_{ma} – питома теплоємність акумулятора, кДж/(кг·°C); c_{mn} – питома теплоємність теплоносія, кДж/(кг·°C); h – висота шару теплоакumuлюючого матеріалу акумулятора, м; F_{ma} – зовнішня обмінна поверхня стінки акумулятора, м; v_{mn} – швидкість циркуляції теплоносія, м/с; T_{ma1}, T_{ma2} – температура акумулятора на початку і в кінці процесу зарядки, °C; \bar{T}_{mam} – середня температура в об'ємі теплоакumuлюючого матеріалу теплового

аккумулятора, °C; $\bar{T}_{\text{тннк}}$ – середня температура теплоносія в повітряному колекторі, °C; $V_{\text{та}}$ – об’єм теплового аккумулятора, м³.

Тривалість часу розрядки теплового аккумулятора τ_{h2} , с, залежить від температури теплового аккумулятора на початку ($T_{\text{та1}}$) і в кінці ($T_{\text{та2}}$) процесу зарядки, середньої температури в об’ємі теплоакумулюючого матеріалу теплового аккумулятора $\bar{T}_{\text{там}}$, °C, і середньої температури теплоносія в повітряному колекторі $\bar{T}_{\text{тннк}}$, °C, та визначається за формулою [28]:

$$\tau_{h2} = 20,85 \cdot \frac{T_{\text{та2}} - T_{\text{та1}}}{\bar{T}_{\text{там}} - \bar{T}_{\text{тннк}}}, \text{ с}, \quad (2.31)$$

Теплообмін між повітрям і елементами теплоакумулюючого матеріалу відбувається на їх поверхні, площа якої визначається розмірними характеристиками гальки. Тому, під час дослідження теплообміну в теплому аккумуляторі зручно користуватися коефіцієнтом об’ємного теплообміну (теплопередачі), який враховує збільшення поверхні за рахунок дисперсності середовища:

$$\alpha_v = 4,8 \frac{\lambda_n \cdot (1 - \varepsilon)}{\delta} \sqrt{\frac{2 \cdot c}{\pi \cdot \sigma \cdot v}}, \quad (2.32)$$

де α_v – коефіцієнт теплообміну між теплоакумулюючим матеріалом і теплоносієм, Вт/(м²·°C); λ_n – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м²·°C); v – коефіцієнт кінематичної в’язкості повітря, м²/с; $\varepsilon = (\rho_{\text{вл}} - \rho_n) / \rho_{\text{вл}}$ – коефіцієнт порізності засипки аккумулятора, який розраховують через власну ($\rho_{\text{вл}}$) та насипну (ρ_n) густину гальки; δ – середній діаметр елементів насадки (гальки), м; $c = c_0 / \varepsilon$ – ефективна швидкість обтікання елементів насадки порівняно з середньою швидкістю потоку c_0 , м/с.

Швидкість теплоносія при обтіканні елементів теплоакумулюючого матеріалу визначається за формулою:

$$v = \frac{G}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тн}}}, \text{ м/с},$$

де G – питомі витрати повітря, кг/м²·с; ε – пористість шару теплоакумулюючого матеріалу; $\rho_{\text{тн}}$ – густина повітря, кг/м³.

Площу теплопередачі поверхні теплового акумулятора геліосушарки (зовнішня теплообмінна поверхня) визначаємо за формулою

$$S_{ma} = \frac{Q_{кон}}{K \cdot \Theta}, \text{ м}^2, \quad (2.33)$$

де $Q_{кон}$ – енергія (теплота), що віддається сушильній камері нагрітим теплоносієм, Вт; K – коефіцієнт теплопередачі від теплоакумулюючого матеріалу до теплоносія, Вт/(м²·°C) ($K = 43 \div 51$ Вт/(м²·°C)) [54]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{i\delta}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ei}}},$$

де $\alpha_{наг}$ і $\alpha_{кн}$ – відповідно коефіцієнти тепловіддачі теплоносія і теплоакумулюючого матеріалу, Вт/(м²·°C); δ – питома площа контакту теплоакумулюючого матеріалу з теплоносієм у акумуляторі, м²; λ – теплопровідність теплоносія, Вт/(м²·°C); Θ – середня логарифмічна різниця температур, °C:

$$\Theta = \frac{T_{ми.2} - T_{ми.1}}{\ln \frac{T_{ma} - T_{ми.1}}{T_{ma} - T_{ми.2}}}.$$

Об'єм теплового акумулятора визначаємо за формулою:

$$V_{ma} = \frac{Q_{ак} \cdot K_{зе}}{c_{Vma} \cdot \Delta T_{ma}}, \text{ м}^3, \quad (2.34)$$

де $Q_{ак}$ – кількість теплової енергії, що акумулюється за день від 10 до 18 години у тепловому акумуляторі, Вт·с; $K_{зе}$ – коефіцієнт середньоденного акумулювання теплової енергії у акумуляторі, $K_{зе}=0,2 \dots 2,5$; ΔT_{ma} – зміна температури твердих частинок (гальки) при підведенні і відведенні теплоти, $\Delta T_{ma}=(T_{ma2}-T_{ma1})$, °C.

Кількість теплової енергії, що акумулюється в тепловому акумуляторі за одну годину, визначаємо за формулою:

$$dQ_{ак} = K_{зе} \cdot Q_{нов} \cdot S_{ma} \cdot n + m_{ma} \cdot c_{ma} \cdot \Delta T_{ma}, \text{ кДж}, \quad (2.35)$$

де $K_{зе}$ – коефіцієнт, що враховує частку корисної енергії, яка акумулюється в тепловому акумуляторі за годину, $K_{зе} = 0,25 \dots 0,35$; n – число годин, упродовж

яких надходить тепло до теплоакумулюючого матеріалу, с; c_{ma} – питома теплоємність акумулятора, Дж/(кг·°C); m_{ma} – маса теплоакумулюючого матеріалу, кг.

Оскільки сонячна активність впродовж доби змінюється, то й кількість корисної сонячної енергії, вловленої колектором за день, ($Q_{нов}$) визначається як сума відповідних величин Q_i дня кожної години дня:

$$Q_{нов} = \sum_{i=8}^{16} Q_i, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.36)$$

де Q_i – кількість корисної сонячної енергії, отриманої за i год доби, Вт/м².

Нагрівання горизонтальної поверхні повітряного колектора починається з надходженням сонячного випромінювання. Теплові надходження на повітряний колектор від сонячного випромінювання змінюються за сонячним часом, їх можна описати таким виразом:

$$Q_i = E^{max} \cdot \cos \pi \frac{\tau - 12}{\tau_c}, \text{ Вт/м}^2. \quad (2.37)$$

де E^{max} – максимальна енергетична освітленість горизонтальної поверхні повітряного колектора, Вт/м².

Масу акумулятора геліосушарки визначаємо за формулою

$$m_{ma} = V_{ma} \cdot \rho_{ma}, \text{ кг}, \quad (2.38)$$

де ρ_{ma} – густина теплоакумулюючого матеріалу, кг/м³.

Об'ємну теплоємність акумулятора визначають за формулою [12]:

$$c_{Vma} = c_{ma} \cdot \rho_{ma} \cdot (1 - \varepsilon), \text{ Вт} \cdot \text{с/м}^3 \cdot \text{°C}, \quad (2.39)$$

де ε – пористість шару теплоакумулюючого матеріалу.

Для елемента об'єму теплоакумулюючого матеріалу $dV_{ma} = S_{ma} dx$ перерізом S_{ma} товщиною dx (рис. 2.6) можна скласти балансове рівняння теплообміну за таких спрощень: температура теплоакумулюючого матеріалу і теплоносія однакова на всьому перерізі; теплофізичні характеристики з температурою не змінюються; контактний теплообмін між елементами теплоакумулюючого матеріалу практично відсутній.

З урахуванням цих допущень тепловий процес у елементарному об'ємі з масами теплоакумулюючого матеріалу $dm = \rho S_{ma} dx$ і теплоносія $dm = G S_{ma} d\tau$ описується відповідними рівняннями теплообміну:

для теплоакумулюючого матеріалу:

$$c_n \cdot \rho_n \cdot S_{ma} \cdot \partial x \cdot \partial T_n = \alpha_v \cdot S_{ma} \cdot \partial x \cdot (T_{mn} - T_n) \cdot \partial \tau; \quad (2.40)$$

для теплоносія (повітря):

$$c_{mn} \cdot G \cdot S_{ma} \cdot \partial \tau \cdot \partial T_n = \alpha_v \cdot S_{ma} \cdot \partial x \cdot (T_{mn} - T_n) \cdot \partial \tau. \quad (2.41)$$

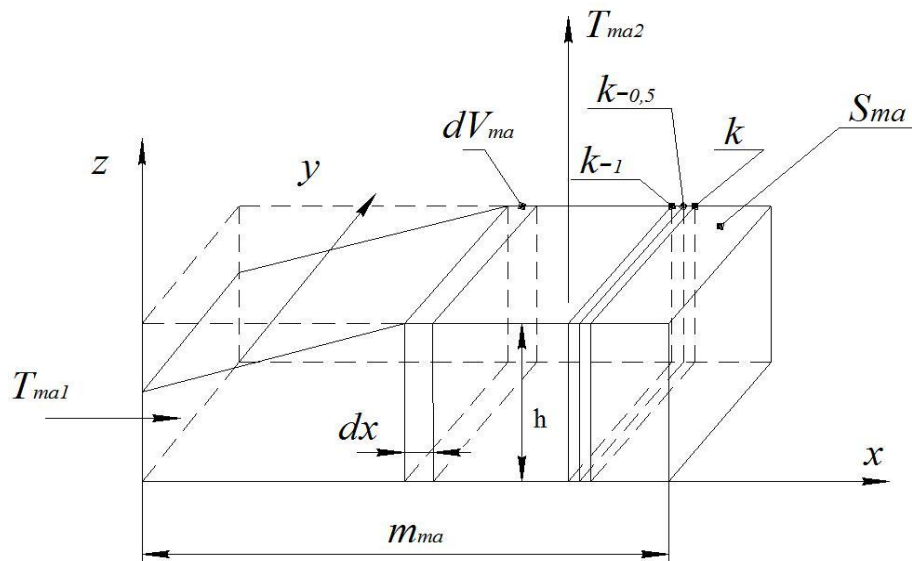


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема теплового акумулятора геліосушарки

Після перетворень отримаємо два диференціальні рівняння:

зміни температури теплоакумулюючого матеріалу з часом

$$\frac{\partial T_n}{\partial \tau} = N_n \cdot (T_{mn} - T_n); \quad (2.42)$$

зміни температури вздовж теплоакумулюючого матеріалу

$$\frac{\partial T_{mn}}{\partial x} = N \cdot (T_n - T_{mn}), \quad (2.43)$$

де $N_n = \frac{\alpha_v}{c_n \cdot \rho_n}$; $N = \frac{\alpha_v}{c_{mn} \cdot G}$; c_n і c_{mn} – питомі теплоємності відповідно теплоакумулюючого матеріалу і теплоносія, Дж/(кг·°C); τ – час нагріву акумулятора, с; G – витрата повітря, кг/м²·с; α_v – коефіцієнт теплообміну між теплоакумулюючим матеріалом і теплоносієм, Вт/(м²·°C); ρ_n – густина теплоакумулюючого матеріалу, кг/м³; G – витрата теплоносія, кг/м²·с.

Початковою умовою для розв'язку рівняння (2.42) є температура теплоносія у повітропроводі $T_{mn}(\tau, x) = T_{mn}(0, 0)$:

$$T_{mn}(\tau, 0) = T_{nc} + T_{ma} \cdot \cos \frac{2\pi}{24} (\tau_3 + \tau - 15). \quad (2.44)$$

Перший доданок означає середню температуру теплоносія у повітропроводі, що продувається з певною швидкістю, передаючи своє надлишкове тепло для зарядки теплоакумуючого матеріалу. Температура теплоакумуючого матеріалу T_{ma} досягає максимального амплітудного значення о 15 годині.

Якщо прийняти, що процес зарядки починається з $\tau_{hl} = 8$ год, а максимальна температура теплоносія в повітропроводі досягається о 15 годині, то вираз спроститься до вигляду:

$$T_{mn}(\tau, 0) = T_{nc} + T_{ma} \cdot \cos[15 \cdot (\tau - 6)]. \quad (2.45)$$

Якщо початкову температуру теплоносія позначити T_{mn0} , а теплоакумуючий матеріал T_{n0} , тоді температура теплоносія вздовж теплоакумуючого матеріалу (координати x , див. рис. 2.6) не спадатиме і початок процесу зарядки опишеться виразом:

$$T(0, x) = T_{n0} + (T_{mn0} - T_{n0}) \exp\left(-\frac{\alpha_v \cdot x}{c_{vma} \cdot G}\right). \quad (2.46)$$

Обидва рівняння (2.42) і (2.43) об'єднуються в одне другого порядку наступним чином. Визначимо з рівняння (2.43) T_n і його частинну похідну за часом $\partial T_n / \partial \tau$:

$$T_n = \frac{1}{N} \frac{\partial T}{\partial x} + T; \quad \frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \frac{1}{N} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial \tau} + \frac{\partial T}{\partial \tau}.$$

Отримані вирази підставимо у рівняння (2.42) і отримаємо:

$$\frac{1}{N} \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial \tau} + \frac{\partial T}{\partial \tau} + N_n \left(T - \frac{1}{N} \frac{\partial T}{\partial x} + T \right) = -\frac{N_n}{N} \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Відтак отримуємо одне рівняння другого порядку:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x \partial \tau} + N \frac{\partial T}{\partial \tau} + N_n \frac{\partial T}{\partial x} = 0.$$

Це рівняння може бути розв'язане чисельно, наприклад наближеним методом кінцевих різниць. Для цього розіб'ємо теплоакумуючий матеріал вздовж осі x на k відрізків з кроком Δx , час зарядки – на часові періоди з кроком $\Delta \tau$ (див. рис. 2.6), а диференціали замінимо відповідними приростами:

$$\frac{\hat{T}_k - \hat{T}_{k-1} - T_k + T_{k-1}}{\Delta x \cdot \Delta \tau} + N \frac{\hat{T}_k - T_k}{\Delta \tau} + N_n \frac{\hat{T}_k - \hat{T}_{k-1}}{\Delta x} = 0.$$

Значком \hat{T} позначено температуру в кінці часового кроку, а нижнім індексом – вхід ($k-1$) і вихід (k) виділеного елемента об'єму dV_{mak} .

Після введення позначень отримаємо:

$$\alpha = 1 + N\Delta x \text{ і } \beta = 1 + N_n\Delta \tau.$$

Отримуємо вираз для поточного розрахунку кінцевої температури \hat{T}_k виходу виділеного об'єму dV_{mak} за відомими трьома температурами на його граничних перерізах – \hat{T}_{k-1} , T_k і T_{k-1} :

$$\hat{T}_k = \frac{\alpha}{\alpha + \beta - 1} \hat{T}_{k-1} + \frac{\beta}{\alpha + \beta - 1} T_k - \frac{1}{\alpha + \beta - 1} T_{k-1}.$$

Розподіл температури теплоносія за довжиною (глибиною) теплоакумуючого матеріалу x розраховують за рівнянням (2.42). У початковий момент зарядки він розраховується за рівнянням крайової умови (2.46).

На початок зарядки ($\tau_{hl}=0$) приймаємо рівномірний розподіл температури в теплоакумуючому матеріалі для всіх перерізів акумулятора і такий, що дорівнює $T_{ma} = 20$ °С.

У кінці першого часового інтервалу температура повітря спочатку в теплоакумуючому матеріалі становить T_{mn} , а її розподіл \hat{T}_k вздовж теплоакумуючого матеріалу також розраховується за рівнянням (2.42). Для його розрахунку використовують значення попередньої за часом температури вхідного перерізу \hat{T}_{k-1} , його наступної температури T_{k-1} і температури протилежного до входу перерізу T_k .

Приріст температури теплоносія і теплоакумулюючого матеріалу між двома послідовними перерізами описується рівнянням (температура нагрівання ТАМ):

$$\Delta \widehat{T}_{n,k-0.5} = \frac{N_u}{N} \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta x} \cdot \frac{|\widehat{T}_k + T_k| - |\widehat{T}_{k-1} + T_{k-1}|}{2}. \quad (2.47)$$

Зміна температури теплоізолюваного об'єму теплоакумулюючого матеріалу відбувається за рахунок тепловтрат через його поверхню. Якщо попередньо розраховано опір теплопередачі R , тоді поточна швидкість нагрівання чи охолодження $dQ/d\tau$ пропорційна різниці температур: теплоакумулюючого матеріалу T_{ma0} і навколишнього середовища T_{nc} , в якому знак “-” відповідає випадку охолодження теплоакумулюючого матеріалу.

Процес охолодження описуємо таким диференціальним рівнянням:

$$\frac{dQ_{ma}}{d\tau_{h2}} = -\frac{S_{ma} \cdot (T_{ma} - T_{nc})}{R}, \quad (2.48)$$

де R – опір теплопередачі, $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Вт}$; T_{ma} і T_{nc} – температура теплоакумулюючого матеріалу і навколишнього середовища, $^\circ C$; τ_{h2} – тривалість охолодження акумулятора, с.

Якщо зміну теплової енергії виразити через приріст температури, отримуємо вираз [9]:

$$dQ_{ma} = \pm V_{ma} \cdot \rho_{ma} \cdot c_{ma} \cdot (T_{ma2} - T_{ma1}),$$

або

$$dQ_{ma} = \pm m_{ma} \cdot c_{ma} \cdot (T_{ma2} - T_{ma1}). \quad (2.49)$$

З порівняння обох рівнянь – (2.50) і (2.51) – процес охолодження (розрядки теплового акумулятора) опишеться диференціальним рівнянням з розділеними змінними:

$$m_{ma} \cdot c_{ma} \cdot (T_{ma2} - T_{ma1}) \cdot d\tau = -\frac{S_{ma} \cdot (T_{ma0} - T_{nc})}{R}. \quad (2.50)$$

Розділимо змінні і проінтегруємо це рівняння у межах від початкової температури теплоакумулюючого матеріалу T_{ma0} до поточної T . Тоді

$$\frac{dT}{T_{ma0} - T_{nc}} = -\frac{S_{ma}}{R \cdot m_{ma} \cdot c_{ma}} \cdot d\tau, \quad (2.51)$$

$$\int_{T_{ma0}}^T \frac{dT}{T_{ma0} - T_{nc}} = -\int_0^\tau \frac{k \cdot S_{ma}}{m_{ma} \cdot c_{Vma}} \cdot d\tau,$$

де k – коефіцієнт, що враховує інтенсивність циркуляції теплоносія в тепловому акумуляторі, може набувати значень $k = 0,5 \dots 0,7$.

Розв'язок має вигляд:

$$\ln(T_{ma0} - T_{nc})_{T_{ma0}}^T = -\frac{S_{ma}}{R \cdot m_{ma} \cdot c_{ma}} \cdot \tau_{h2} \quad \text{або} \quad \frac{T - T_{nc}}{T_{ma0} - T_{nc}} = e^{-\frac{S_{ma}}{R \cdot m_{ma} \cdot c_{ma}} \cdot \tau_{h2}}.$$

Поточна температура теплоакumuлюючого матеріалу зменшується згідно з виразом (темп охолодження ТАМ):

$$T = T_{nc} + (T_{ma0} - T_{nc}) \exp\left(-\frac{S_{ma}}{R \cdot m_{ma} \cdot c_{ma}} \cdot \tau_{h2}\right). \quad (2.52)$$

Отже, отримані рівняння дають змогу розрахувати: (2.30) і (2.31) – час зарядки і розрядки теплового акумулятора, (2.34) – об'єм акумулятора, (2.38) – масу теплоакumuлюючого матеріалу, (2.40, 2.41) – тепловий баланс акумулятора, а (2.47) і (2.52) описують роботу акумулятора в режимі зарядки й розрядки залежно від фізичних параметрів навколишнього середовища.

2.1.5 Обґрунтування геометричних розмірів сушильної камери

Основними геометричними розмірами сушильної камери є площа решета, внутрішні і зовнішні розміри сушильної камери (рис. 2.7).

Матеріальний баланс геліосушарки за один цикл сушіння визначаємо за формулою [34]

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100 - W_1}{100 - W_2}, \quad (2.53)$$

де G_1, G_2 – відповідно продуктивність сушарки за вологим і висушеним матеріалом, кг/с; W_1, W_2 – вологість матеріалу на вході в сушильну камеру і виході з неї, %.

Одноразове завантаження фруктової сировини в сушильну камеру $G_{суш}$ визначаємо за формулою

$$G_{суш} = G_1 \cdot \tau_{суш}, \text{ кг.} \quad (2.54)$$

де $\tau_{суш}$ – тривалість сушіння, с.

Площа одного решета визначається за формулою

$$S_{реш} = b_p^2, \text{ м}^2. \quad (2.55)$$

де b_p – сторона решета, м.

Решета вибираємо стандартні, розміром 785x785x23 мм.

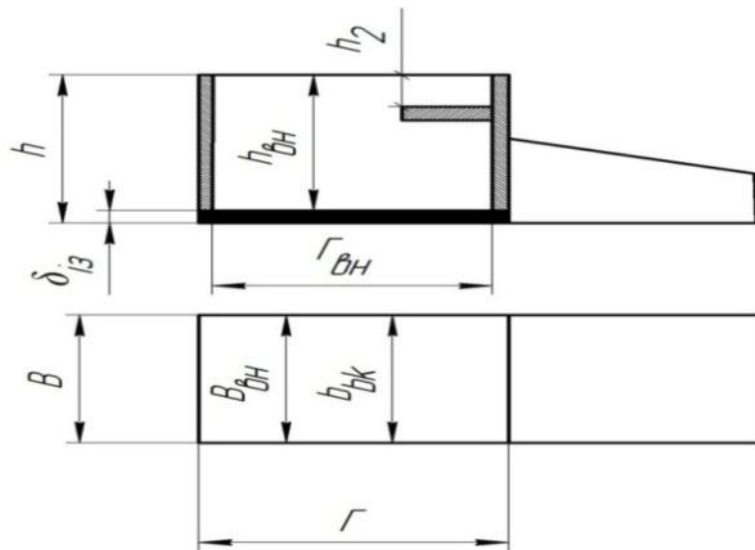


Рисунок 2.7 – Геометричні розміри сушильної камери: $\Gamma_{вн}$ – внутрішня глибина сушильної камери; $B_{вн}$ – внутрішня ширина сушильної камери; $h_{вн}$ – внутрішня висота сушильної камери; h_2 – відстань від верхнього решета до стелі; B – зовнішня ширина сушильної камери; Γ – зовнішня глибина сушильної камери; h – зовнішня висота сушильної камери; $\delta_{із}$ – товщина шару теплоізоляції і зовнішньої обшивки; $b_{бк}$ – ширина теплоакуючого матеріалу.

Кількість решіт в одному вертикальному ряді визначаємо за формулою

$$n_{реш} = \frac{H_p}{\Delta H}, \text{ шт.}, \quad (2.56)$$

де H_p – висота ряду, м; ΔH – відстань між решетами в одному вертикальному ряді, м.

Необхідну кількість встановлюваних решіт у сушильній камері визначаємо за формулою:

$$n_{\text{реш.заг.}} = \frac{G_{\text{суш}}}{q_{\text{реш}} \cdot S_{\text{реш}}}, \text{ шт.}, \quad (2.57)$$

де $q_{\text{реш}}$ – допустиме завантаження одного решета, кг/м².

Кількість вертикальних рядів, які необхідно розмістити в сушильній камері, визначаємо за формулою

$$n_{\text{ряд.заг.}} = \frac{n_{\text{реш.заг.}}}{n_{\text{реш}}}, \text{ шт.}, \quad (2.58)$$

Кількість вертикальних рядів при паралельному розташуванні в сушильній камері визначається за формулою

$$n_{\text{ряд.заг.}} = n_{\text{ряд.ш.}} \cdot n_{\text{ряд.гл.}}, \text{ шт.}$$

де $n_{\text{ряд.ш.}}$ – кількість рядів за шириною сушильної камери, шт.; $n_{\text{ряд.гл.}}$ – кількість рядів в глибину сушильної камери, шт.

Визначаємо внутрішні розміри сушильної камери:

Внутрішня ширина $B_{\text{вн}}$ сушильної камери визначається за формулою

$$B_{\text{вн}} = n_{\text{ряд.ш.}} \cdot b_p + (n_{\text{ряд.ш.}} + 1) \cdot (b_{\text{ст}} + b_{\text{рр}}) + b_{\text{бк}}, \text{ м.} \quad (2.59)$$

де $b_{\text{ст}}$ – ширина стійок, м; $b_{\text{рр}}$ – ширина рамок решіт, м; $b_{\text{бк}}$ – ширина теплоакумулюючого матеріалу, м.

Внутрішня глибина $\Gamma_{\text{вн}}$ сушильної камери визначається за формулою

$$\Gamma_{\text{вн}} = n_{\text{ряд.гл.}} \cdot b_p + (n_{\text{ряд.гл.}} + 1) \cdot (b_{\text{ст}} + b_{\text{рр}}) + b_{\text{бк}}, \text{ м.} \quad (2.60)$$

Внутрішня висота $h_{\text{вн}}$ сушильної камери визначається за формулою

$$h_{\text{вн}} = h_p + h_2, \text{ м.} \quad (2.61)$$

де h_p – висота решета, м; h_2 – відстань від верхнього решета до стелі, м.

Визначаємо зовнішні розміри сушильної камери:

Зовнішня ширина B сушильної камери визначається за формулою

$$B = B_{\text{вн}} + \delta_{\text{із}}, \text{ м.} \quad (2.62)$$

де $\delta_{\text{із}}$ – товщина шару теплоізоляції і зовнішньої обшивки, м.

Зовнішня глибина Γ сушильної камери визначається за формулою

$$\Gamma = \Gamma_{\text{вн}} + \delta_{\text{із}}, \text{ м.} \quad (2.63)$$

Зовнішня висота h сушильної камери визначається за формулою

$$h = h_{\text{вн}} + \delta_{\text{із}}, \text{ м.} \quad (2.64)$$

Поверхня сушильної камери по довжині потоку теплоносія (дві стіни, підлога і стеля):

від задньої стіни до дверей

$$S_{\text{дов}} = 2 \cdot \Gamma \cdot h + 2 \cdot B \cdot \Gamma, \text{ м}^2,$$

від лівої стіни до правої

$$S_{\text{дов}} = 2 \cdot B \cdot h + 2 \cdot B \cdot \Gamma, \text{ м}^2.$$

Поверхня торців сушильної камери (відносно потоку сушильного агента):

$$S_{\text{тн}} = S_{\text{тн}} = B \cdot h, \text{ м}^2.$$

Маса матеріалу решіт:

Нами прийнята конструкція решіт – дерев'яні рами з дротяною сіткою; маса рами $m_{\text{д}}=0,22$ кг, маса сітки $m_{\text{с}}=0,03$ кг.

Загальна маса дерев'яних рам визначається за формулою

$$m_{\text{д.заг.}} = m_{\text{д}} \cdot n_{\text{реш.заг.}}, \text{ кг.} \quad (2.65)$$

Загальна маса сітки визначається за формулою

$$m_{\text{с.заг.}} = m_{\text{с}} \cdot n_{\text{реш.заг.}}, \text{ кг.} \quad (2.66)$$

Об'ємна витрата циркулюючого теплоносія в сушильній камері:

$$V_{\text{ц}} = L \cdot v_{\text{нум}}, \text{ м}^3/\text{с},$$

де $v_{\text{нум}}$ – питомий об'єм циркулюючого теплоносія, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$v_{\text{нум}} = \frac{R_{\text{нов}} \cdot T}{B - \varphi \cdot P_{\text{н}}}$$

$R_{\text{нов}}$ – газова стала; для повітря $R_{\text{нов}}=287$ Дж/(кг·°C); T – абсолютна температура повітря, °C; φ – відносна вологість повітря, %; $P_{\text{н}}$ – тиск насиченої водяної пари при даній температурі повітря, Па; B – барометричний тиск повітря, Па;

L – масова витрата теплоносія, кг/с:

$$L = l \cdot \Delta m;$$

l – питома витрата абсолютно сухого повітря, кг сух.пов./кг випар.вол.:

$$l = \frac{1000}{(d_2 - d_1)};$$

d – вологовміст повітря, г/кг сух.пов.;

Δm – кількість видаленої вологи, кг/с:

$$\Delta m = G_1 - G_2;$$

G_1, G_2 – відповідно продуктивність сушарки за вологим і висушеним матеріалом, кг/с.

Зовнішній об'єм сушильної камери визначаємо за формулою

$$V_{\text{зов.ск}} = B \cdot \Gamma \cdot h, \text{ м}^3. \quad (2.67)$$

де B – зовнішня ширина сушильної камери, м; Γ – зовнішня глибина сушильної камери, м; h – зовнішня висота сушильної камери, м.

Внутрішній об'єм сушильної камери визначаємо за формулою

$$V_{\text{вн.ск}} = B_{\text{вн}} \cdot \Gamma_{\text{вн}} \cdot h_{\text{вн}}, \text{ м}^3. \quad (2.68)$$

де $\Gamma_{\text{вн}}$ – внутрішня глибина сушильної камери, м; $B_{\text{вн}}$ – внутрішня ширина сушильної камери, м; $h_{\text{вн}}$ – внутрішня висота сушильної камери, м.

Отже, отримані рівняння дають змогу розрахувати; (2.53) – матеріальний баланс геліосушарки геометричні розміри сушильної камери, а саме зовнішній (2.67) і внутрішній (2.68) об'єм сушильної камери.

2.1.6 Визначення теплової потужності геліосушарки

Поточна кількість теплової енергії – відношення кількості виробленої теплової енергії повітряним колектором і відведеної від теплового акумулятора до тривалості роботи геліосушарки впродовж усього періоду сушіння [41, 46].

Кількість теплової енергії $W_{\text{м.е.д}}$, яку виробляє геліосушарка:

$$W_{\text{м.е.д}} = \tau_{\text{роб.лк.}} \cdot E^{\text{max}} \cdot S_{\text{лк}} \cdot k \cdot k_{\text{в.лк}}, \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (2.69)$$

Кількість теплової енергії $W_{\text{м.е.н}}$, що відводиться від теплового акумулятора:

$$W_{\text{м.е.н}} = m_{\text{ма}} \cdot c_{\text{ма}} \cdot \Delta T_{\text{ма}}, \text{ Вт} \cdot \text{с}, \quad (2.70)$$

де $W_{т.е.д}$, $W_{т.е.н}$ – кількість теплової енергії відповідно в денний і нічний час, Вт·с; $\tau_{роб.пк}$ – тривалість роботи повітряного колектора, с; E^{max} – енергетична освітленість впродовж доби, Вт/м²; k – коефіцієнт ясності атмосфери; $k_{в.пк}$ – коефіцієнт, що враховує втрати, зумовлені теплообміном повітряного колектора.

Поточна тепла енергії $N_{гс}$, що виробляється геліосушаркою за період сушіння визначається за формулою

$$N_{гс} = W_{т.е.д} + W_{т.е.н} = (\tau_{роб.пк} \cdot E^{max} \cdot S_{пк} \cdot k \cdot k_{в.пк}) + (m_{та} \cdot c_{та} \cdot \Delta T_{та}), \text{ Вт} \cdot \text{с}. \quad (2.71)$$

де $W_{т.е.д}$, $W_{т.е.н}$ – кількість теплової енергії відповідно у денний і нічний час, Вт·с; $\tau_{роб.пк}$ – тривалість роботи повітряного колектора, с; k – коефіцієнт ясності атмосфери; $k_{в.пк}$ – коефіцієнт, що враховує втрати, зумовлені теплообміном повітряного колектора; $m_{та}$ – маса теплоакumuлюючого матеріалу, кг; $c_{та}$ – питома теплоємність теплоакumuлюючого матеріалу, Дж/(кг·°С).

Теплова потужність геліосушарки визначається за формулою

$$N_{гс} = E^{max} \cdot S_{гс} \cdot k \cdot k_{в.пк}, \text{ Вт}. \quad (2.72)$$

де E^{max} – максимальна енергетична освітленість горизонтальної поверхні повітряного колектора, Вт/м²; $S_{гс}$ – площа геліосушарки, м².

Отримані рівняння дають змогу розрахувати теплову потужність геліосушарки.

2.2 Математична модель технологічного процесу сушіння

Для геліосушарки впродовж доби характерна зміна теплотехнічних параметрів у сушильній камері: швидкості теплоносія ($v_{тн}$), температури теплоносія ($T_{СК}$ (τ)), вологості теплоносія (ϕ), а також технологічних показників висушеного матеріалу: температури фруктів (T_{ϕ} (τ)), вологовмісту фруктів (U).

Зміна температури теплоносія і фруктів у сушильній камері відбувається за синусоїдальним законом:

для теплоносія:

$$T_{CK}(\tau) = \left(\frac{T_{mn1} + T_{mn2} + T_{mn3}}{3} \right) \cdot A_{T_{mn}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_{дiб}} \cdot \tau \right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2.73)$$

для фруктів

$$T_{\phi}(\tau) = T_{\phi} \cdot A_{T_{\phi}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_{дiб}} \cdot \tau \right), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.74)$$

де $T_{CK}(\tau)$ – температура теплоносія у сушильній камері, $^\circ\text{C}$; $T_{\phi}(\tau)$ – температура фруктів у сушильній камері, $^\circ\text{C}$; $T_{тн1}$, $T_{тн2}$, $T_{тн3}$ – відповідно температура вхідних і вихідних потоків теплоносія, $^\circ\text{C}$; T_{ϕ} – температура фруктів, $^\circ\text{C}$; $A_{T_{тн}}$, $A_{T_{\phi}}$ – відповідно амплітуда коливання температури теплоносія і фруктів, $^\circ\text{C}$; $\tau_{дiб}$ – тривалість доби, с; τ – тривалість сушіння (у розмірності $\tau_{дiб}$), с.

Вологовміст теплоносія визначаємо за формулою

$$d_{0...n} = 622 \cdot \frac{\varphi_{0...n} \cdot p_{Нис}^o}{P - \frac{\varphi_{0...n}}{100} \cdot p_{нпск}^o}, \text{ г/кг; або } X_{0...n} = 0,622 \cdot \frac{\varphi_{0...n} \cdot p_{Нис}^o}{P - \frac{\varphi_{0...n}}{100} \cdot p_{нпск}^o}, \text{ кг/кг.} \quad (2.75)$$

де $d_{0...n}$ – вологовміст теплоносія, г/кг; $\varphi_{0...n}$ – відносна вологість повітря, %; $p_{Нис}^o$ – тиск насиченої пари у вхідному потоці при даній температурі повітря, Па; $p_{нпск}^o$ – тиск насиченої пари у сушильній камері при даній температурі повітря, Па; $X_{0...n}$ – вологовміст теплоносія, кг/кг.

На основі аналізу існуючих математичних моделей у п. 1.4 згідно із залежностями (1.3 – 1.6) та (1.10 – 1.19) вдосконалено модель конвективного сушіння фруктів у геліосушарці, в основу якої подано спрощений механізм тепло- і масообміну (волога в матеріалі знаходиться у рідкому стані, тепло- і масообмін між теплоносієм і матеріалом здійснюється конвекцією, температурний градієнт матеріалу є малий, рушійною силою перенесення вологи всередині матеріалу є дифузія). Вона описується диференціальними рівняннями тепломасоперенесення у вигляді:

- рівняння перенесення теплоти:

$$c_{\phi} \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{\partial T_{\phi}(\tau)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T_{\phi}(\tau)}{\partial x} \right) + \varepsilon \cdot q_{\text{зв}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \varepsilon \cdot q_{\text{зв}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot \delta_{\text{T}} \cdot \frac{\partial T_{\phi}(\tau)}{\partial x} \right); \quad (2.76)$$

- рівняння перенесення вологи:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \delta_{\text{T}} \cdot \frac{\partial T_{\phi}(\tau)}{\partial x} \right), \quad (2.77)$$

Тут введено позначення: $T_{\phi}(\tau, x)$ – температура фруктів, що є функцією від тривалості сушіння τ ; $U(x)$ – зміна поля вологовмісту висушуваного матеріалу вздовж кординати x ; c_{ϕ} – питома теплоємність фруктів, кДж/(кг·°C); λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м²·°C); $\rho_{\text{пр}}$ – густина фруктів, кг/м³; U – вологовміст фруктів, кг вол./кг с. реч.; ε – критерій фазового переходу, рівний відношенню кількості випаруваної вологи до вологовмісту в певному об'ємі (при $\varepsilon=1$ вода переміщується у вигляді пари, при $\varepsilon=0$ – у вигляді рідини); D – коефіцієнт дифузії, м²/с; x – просторова координата, мм; δ_{T} – термоградієнтний коефіцієнт, 1/°C; $\frac{\partial U}{\partial x}$ і $\frac{\partial T_{\phi}(\tau)}{\partial x}$ – відповідно градієнти вологовмісту й температури матеріалу.

Початкові умови математичної моделі приймемо у вигляді:

$$T_{\phi}(\tau, x; 0) = T_{\phi \text{ поч}}(\tau, x); U(x; 0) = U_{\text{поч}}(x).$$

де $T_{\phi \text{ поч}}(x)$, $U_{\text{поч}}(x)$ – температура та вологовміст фруктів у початковий момент часу сушіння.

Граничні умови можна записати так:

- у центрі висушуваного матеріалу (умова симетрії):

$$\frac{\partial T_{\phi}(\tau)}{\partial x_{x=0}} = 0; \quad \frac{\partial U}{\partial x_{x=0}} = 0; \quad (2.78)$$

- на поверхні висушуваного матеріалу(умова третього роду):

$$\alpha \cdot [T_{\text{СК}}(\tau) - T_{\phi}(\tau)_R] = \lambda \cdot \frac{\partial T_{\phi}(\tau)}{\partial x_{x=R}} - \left| \rho_{\text{пр}} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot q_{\text{зв}} \cdot \beta \cdot (U_{x=R} - U_{\text{п}}) \right|; \quad (2.79)$$

$$\alpha \cdot (U_{x=R} - U_{\text{п}}) = D \cdot \frac{\partial U}{\partial x_{x=R}} + \left| D \cdot \delta_{\text{T}} \cdot \frac{\partial T_{\phi}(\tau)}{\partial x_{x=R}} \right|, \quad (2.80)$$

де α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·°C); β – коефіцієнт масообміну, м/с;
 U_p – рівноважний вологовміст, кг вол./кг с. реч.; R – товщина нарізки
 плодів, мм.

Отримані диференціальні рівняння (2.78 – 2.80) дають змогу
 обґрунтувати оптимальні режими й параметри теплоносія в камері та
 описати характер впливу фізичних параметрів навколишнього середовища на
 технологічні показники процесу.

Енергію зв'язаної води у фруктах $q_{зв}$ розраховуємо за формулою

$$q_{зв} = 4200 \cdot \frac{U_p - U_k}{2} + c_{mn} \cdot T_{mn2} + (c_n \cdot T_{mn2} + r) \cdot d_2 + (T_\phi(\tau) \cdot S_{пр}), \text{ кДж/кг}, \quad (2.81)$$

де $q_{зв}$ – енергія зв'язаної води у фруктах, кДж/кг; U_p , U_k – відповідно
 початковий та кінцевий вологовміст фруктів, кг вол./кг с. реч.; c_n , c_{mn} –
 відповідно питома теплоємність водяної пари і теплоносія, кДж/(кг·°C); r –
 питома теплота пароутворення, кДж/кг; T_{mn2} – температура теплоносія, °C; d_2
 – вологовміст теплоносія, над висушуваним матеріалом, г/кг; $S_{пр}$ – ентропія
 висушеного матеріалу з розрахунку на один кілограм видаленої
 води, кДж/(кг·°C).

Напрями векторів градієнта температури й вологовмісту всередині
 матеріалу у періоді нагрівання є протилежними, перенесенню води в
 середині висушеного матеріалу J_m , за таких умов:

$$J_m = -D \cdot \rho_{пр} \cdot (\Delta U - \delta_T \cdot \Delta T(\tau)), \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}, \quad (2.82)$$

В період охолодження градієнт температури і вологоперенесення
 зменшується за таких умов:

$$J_m = -D \cdot \rho_{пр} \cdot (\Delta U + \delta_T \cdot \Delta T(\tau)), \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}. \quad (2.83)$$

Для визначення масовіддачі в період сушіння складемо параметричну
 схему процесу масовіддачі при сушінні в геліосушарці, що наведено на рис.
 2.9 [6, 16, 18, 44, 46].

Коефіцієнт масовіддачі β залежить від маси фруктового матеріалу Δm ,
 кг, коефіцієнта активності води a_w , площі поверхні нагрівання фруктової
 сировини S_ϕ , м², тиску водяної пари над продуктом P_ϕ , Па, тиску водяної

пари в теплоносії $P_{тн}$, Па, і розраховується за формулою [46]:

$$\beta = \frac{\Delta m}{S_{\phi} \cdot (a_{\omega} \cdot (P_{тн} - P_{\phi}))}, \text{ м/с.} \quad (2.84)$$

Коефіцієнт активності води визначається за формулою [46]:

$$a_{\omega} = \exp \left[- \frac{\Delta p \cdot m_{\text{моль}}}{\rho \cdot R \cdot (T_{\phi}(\tau) + 273)} \right], \quad (2.85)$$

де $m_{\text{моль}}$ – молекулярна маса води, г/моль; ρ – густина води (або розчинника), кг/м³; R – універсальна газова стала ($R = 8,314 \cdot 10^3$), Дж/(моль·К); Δp – перепад тиску, рівний різниці між тиском у зоні рідини і тиском насиченої пари теплоносія при даній температурі повітря, Па.

Рисунок 2.9 – Параметрична ~~Діаграма~~ *Діаграма* процесу масовіддачі при сушінні *фруктового* ~~фруктів у геліосушарці~~ *матеріалу*

На зовнішнє і внутрішнє перенесення вологи й тепла в сировині має вплив форма ~~матеріалу~~ *матеріалу*. Коефіцієнти масообміну при одному і тому ж стані повітря залежно від форми матеріалу будуть набувати різних значень. Тому під час використання вказаних коефіцієнтів для розрахунку процесу сушіння необхідно враховувати площу поверхні нагрівання фруктової сировини.

Отримана математична модель процесу сушіння фруктів у геліосушарці дає змогу розрахувати: (2.73, 2.74) – температуру теплоносія і фруктів в сушильній камері, (2.75) – вологовміст теплоносія; описує: (2.76) – закономірності зміни теплотехнічних параметрів теплоносія, (2.77) – закономірності зміни теплофізичних параметрів матеріалу, що подається сушінню в сушильній камері, (2.78 – 2.80) – процес сушіння фруктів, (2.82, 2.84) – потік вологи у висушуваному матеріалі, (2.85) – коефіцієнт масовіддачі.

2.3 Визначення тривалості процесу сушіння

За основу для розрахунку тривалості сушінні фруктів у геліосушарці, взято рівняння, запропоноване О.В. Ликовим [36, 50]:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{W_n - W_{кр.}}{N} + \frac{1}{K} \cdot \ln \left[\frac{W_{кр.} - W_p}{W_{кр.} - W_p} \right], \quad (2.86)$$

де τ – тривалість сушіння фруктів, с; τ_1 – тривалість періоду постійної швидкості сушіння, с; τ_2 – тривалість періоду заповільнюючої швидкості сушіння, с; W_n і $W_{кр.}$ – відповідно початкова та кінцева вологість фруктів, які визначаються експериментально, %; N – швидкість сушіння, яка визначається за допомогою експерименту, %/с; $W_{кр.}$ – критична вологість фруктів у критичній точці процесу сушіння, яка визначається експериментально, %; K – коефіцієнт сушіння, який визначається експериментально, с; W_p – рівноважна вологість фруктів для заданого режиму сушіння, %.

Загальна тривалість сушіння фруктів τ залежить від конструктивно-технологічних параметрів геліосушарки і фізичних параметрів навколишнього середовища та визначається за формулою

$$\tau = \frac{W_n - W_{кр.}}{N} + \frac{1}{K} \cdot \ln \left[\frac{W_{кр.} - W_p}{W_{кр.} - W_p} \right] + \frac{\Delta m \cdot c_{np} \cdot (T_{\phi 2} - T_{\phi 1}) + h_{шар} \cdot \rho_{np} \cdot (\sum S_{пеш}) \cdot c_{np} \cdot (T_{mn3} - T_{mn2})}{S_{ск} \cdot \nu_{mn} \cdot \rho_{mn} \cdot c_{mn} \cdot (T_{mn2} - T_{mn1}) / \tau_{роб} - (S_{нк} \cdot E) - S_{сз} \cdot K \cdot (T_{кам} - T_{нс}) - V_{та} \cdot \rho_{та} \cdot c_{та} \cdot (T_{та2} - T_{та1}) / \tau_{роз}}, \text{ с.} \quad (2.106)$$

де $\tau_{роб}$ – тривалість нагрівання сушильної камери, с; $\tau_{роз}$ – тривалість розрядки теплового акумулятора, с.

Отриманий вираз дає змогу розрахувати тривалість процесу сушіння фруктів в геліосушарці (2.87).

Висновки до розділу 2

У результаті теоретичних обґрунтувань параметрів і режимів роботи геліосушарки можна зробити такі висновки:

1. Отриманий енергетичний баланс геліосушарки (2.6 – 2.14) описує ефективність роботи геліосушарки та дозволяє розрахувати корисно застосовану і витрачену теплову енергію на процес сушіння, визначити раціональні шляхи використання та збереження теплової енергії в даному процесі.

2. Отримані аналітичні рівняння, дають змогу обґрунтувати

конструктивні параметри геліосушарки, а саме: (2.20) – площу сприймальної поверхні повітряного колектора, (2.25 – 2.27) – кут встановлення дзеркального концентратора відносно надходження сонячної енергії, (2.34) і (2.37) – об'єм і масу акумулятора, (2.59–2.68) – геометричні розміри сушильної камери.

3. Запропонована математична модель процесу сушіння фруктів у геліосушарці дає змогу розрахувати: (2.73, 2.74) – температуру теплоносія і фруктів в сушильній камері, (2.75) – вологовміст теплоносія; описує: (2.76) – закономірності зміни теплотехнічних параметрів теплоносія, (2.77) – закономірності зміни теплофізичних параметрів матеріалу, що подається сушінню в сушильній камері, (2.78 – 2.80) – процес сушіння фруктів, (2.81, 2.84) – потоки вологи у висушуваному матеріалі, (2.85) – коефіцієнт масовіддачі.

4. Отриманий вираз (2.87) дає змогу розрахувати тривалість процесу сушіння фруктів у геліосушарці.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Нами прийнята така програма експериментальних досліджень:

- визначення робочих характеристик (енергетичні характеристики розробленого сушильного апарата, тепломасообмінні характеристики процесу сушіння фруктів) геліосушарки при стандартних режимах сонячного освітлення і типових (сезонних) метеорологічних умовах;
- проведення натурних випробувань геліосушарки;
- дослідження технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором залежно від способу і товщини нарізки плодів та фізичних параметрів навколишнього середовища;
- перевірку адекватності результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

3.2 Загальна методика експериментальних досліджень

Відповідно до поставлених завдань дослідження проводили поетапно в певній послідовності (рис. 3.1).

Етапи дослідження пронумеровані в порядку їхнього виконання; типові потоки інформації показані суцільними лініями зі стрілками, а нетипові – пунктирними.

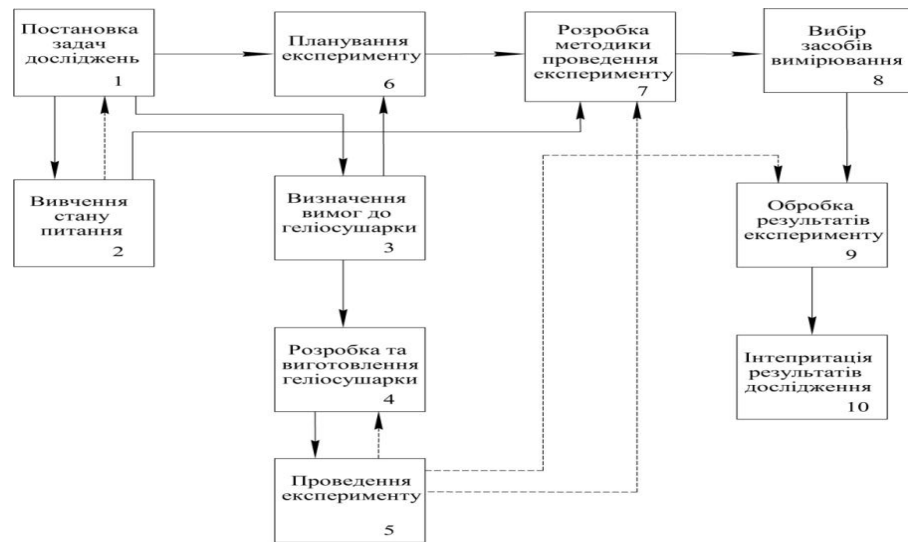


Рисунок 3.1 – Схема методики експериментальних досліджень

Після вивчення стану питання, накопичення та аналізу відповідної інформації (наведених у розділах 1 і 2) визначені основні етапи досліджень, які передбачають:

- розробку та виготовлення дослідного зразка геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором;
- планування експерименту;
- вибір засобів вимірювань, підготовку лабораторного обладнання та приладів до роботи;
- проведення дослідів;
- аналіз отриманих результатів.

Формулюючи завдання досліджень, ми враховували сукупність ідентифікаторів процесу та очікуваний результат дослідження.

Об'єктом аналізу під час огляду стали нові ідеї та завдання, підходи до вирішення цих завдань, результати попередніх досліджень, економічні дані, можливі шляхи досягнення поставленої мети.

Під час аналізу теоретичних робіт звертали увагу на значущість чинників процесу сушіння з тим, щоб надалі незначущими чинниками можна було знехтувати. Це дало змогу отримати відносно нескладну математичну модель процесу сушіння фруктів у геліосушарці при збереженні її

адекватності та спростити подальший аналіз. Також була визначена область досліджень з урахуванням наявних обмежень.

Етапи 1...2 пов'язані з постановкою задач дослідження та вивченням стану питання впливу конструктивно-технологічних параметрів геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором і фізичних параметрів навколишнього середовища на характеристики процесу сушіння фруктів.

Етапи 3...5, пов'язані зі створенням і доопрацюванням експериментальної установки та проведенням пошукових дослідів, дозволили уточнити математичне формулювання завдання і методики проведення експериментів.

Етапи 6...7 склали основу методичної частини експериментального дослідження. Надійність дослідів оцінювали за рекомендаціями [2, 10].

Етапи 8...10 передбачають вибір засобів вимірювань, підготовку лабораторного обладнання та приладів до роботи, проведення дослідів, обробку і аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень.

Обробку результатів експериментальних досліджень проводили із застосуванням методів математичної статистики на ПЕОМ за допомогою програм «Microsoft Office Excel 10», «Mathcad 15». Особливу увагу звернуто на критерії, що підтверджують достовірність і значущість результатів дослідів, а також адекватність отриманих математичних моделей.

3.3 Методика підготовки фруктів до сушіння

Зміну вологовмісту фруктів залежно від обробки, розміру і форми нарізки матеріалу досліджували на лабораторній установці (див. арк.6 граф.частини) за умовами 6 дослідів. Під час дослідження процесу сушіння були використані фрукти різних сортів: яблука Семирічка, з початковою

вологістю $W_n = 70,3 \div 85,2$ %. Маса однієї партії при разовому завантаженні в геліосушарку сиріої фруктової сировини складає 5,5 кг.

Дослід 1. Вплив способу бланшування на процес сушіння фруктів. Підготовка сировини: було проведено сортування, мийку фруктів, нарізку кружальцями і дольками завтовшки $5 \div 11$ мм.

Нарізані фрукти бланшували трьома способами:

- 1) Бланшування в розчині цукру 3 хв (на 1 л води 10 г цукру).
- 2) Бланшування в розчині солі 3 хв (на 1 л води 10 г солі).
- 3) Без обробки.

Після бланшування фрукти укладали на решета і поміщали в сушильну камеру. У ході сушіння безперервно вимірювали вологість фруктів. Закінчення сушіння визначали зважуванням до постійної маси. Для кожного варіанта визначали тривалість сушіння і зменшення маси.

Дослід 2. Вплив товщини нарізки на процес сушіння фруктів.

Підготовка сировини: фрукти миють, нарізають кружечками і дольками різної товщини:

- 1) варіант – кружечки 5 мм;
- 2) варіант – кружечки 8 мм;
- 3) варіант – кружечки 11 мм;
- 4) варіант – дольки 5 мм;
- 5) варіант – дольки 6 мм;
- 6) варіант – дольки 7 мм. Сушіння в геліосушарці;
- 7) варіант – дольки 7 мм. Сушіння в шафі ВСП-50.

Якісно висушені фрукти повинні відповідати вимогам ГОСТ 27548-87 «Методи визначення вологи фруктів» [14]:

- нарізані фрукти при стисканні стають вологими, але соку не виділяють – сировина волога;
- прив'ялена рівномірно маса скручується в джгут, якщо не спостерігається вологовидалення, вологість її не перевищує 60 %;

- сухі фрукти при деформації вигинаються і не тріскають, це означає, що продукт готовий і може бути упакований для зберігання.

3.4 Методика визначення технологічних параметрів висушеного матеріалу

Теплові та технологічні розрахунки, необхідні для термічної обробки фруктів, вимагають знання їх теплофізичних характеристик (густини, питомої теплоємності, теплопровідності, усадки). Залежно від сорту, вологості, температури та інших визначальних чинників теплофізичні характеристики дають кількісну оцінку теплофізичних властивостей фруктів і швидкості їх нагрівання.

Питома теплоємність фруктів при вологості від 80 до 95 %, для яблук $c_{\phi} = 3,75 \div 3,804$ кДж/кг \cdot° С, а під час сушіння визначаємо за формулою [15]:

$$c_{np.} = c_{с.м.} + c_{вол.} \cdot U, \text{ кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{С)}, \quad (3.1)$$

де U – вологовміст фруктів; $c_{вол.} = 4,19$ кДж/(кг \cdot° С) – теплоємність води; $c_{с.м.}$ – теплоємність сухої маси речовини, кДж/(кг \cdot° С).

Коефіцієнт теплопровідності λ визначаємо за формулою [15]:

$$\lambda = \frac{Q}{(S_{\phi} \cdot \tau_{наг} \cdot \Delta T / l)}, \text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{С)}, \quad (3.2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м 2 \cdot° С); Q – кількість переданої теплоти, кДж; S_{ϕ} – площа поверхні нагрівання фруктової сировини, м 2 ; $\tau_{наг}$ – тривалість нагрівання, с; ΔT – різниця температур, $^{\circ}$ С; l – розмір частинки, м.

Коефіцієнт теплопровідності яблук дорівнює $\lambda_{\phi} = 0,1 \div 0,6$ Вт/(м 2 \cdot° С), фруктового соку $\lambda_c = 0,52$ Вт/(м 2 \cdot° С).

У процесі сушіння плоди дають значну усадку, при зменшенні об'єму в 3-4 рази. Залежність відносного зменшення об'єму плоду δ_u від поточного вологовмісту U можна записати таким чином:

$$\delta_u = \frac{V_H - V_U}{V_H} = \frac{d_H^3 - d_U^3}{d_U^3}, \quad (3.3)$$

де V_n, V_U – відповідно початковий і поточний об'єм плоду, m^3 ; d_n, d_U – початковий і поточний діаметр плоду, м. Усадка відбувається рівномірно, що сприяє одночасному збільшенню пористості матеріалу. При цьому у процесі сушіння від вологості 40 ÷ 35 % до кінцевого вологовмісту збільшується поверхня змочування, а у радіаційних сушарках ще й поверхня опромінення нижніх шарів продукту. Усе це разом змінює умови обтікання висушуваного продукту потоком повітря, що впливає на кінетику сушіння.

Власна щільність, або фізична густина, яблук складає $\rho_{np} = (\rho_{зовн} - \rho_{вн})$ $\rho_{np} = 790 \div 1200$ $кг/м^3$. Але для процесів тепло- і масообміну важливими технологічними характеристиками є насипна щільність ρ_n та шпаруватість ε , пов'язані між собою такими співвідношеннями [17]:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{np} - \rho_n}{\rho_{np}}, \quad (3.4)$$

$$\rho_n = \rho_{np} \cdot (1 - \varepsilon_c), \quad кг/м^3. \quad (3.5)$$

Зазвичай середня шпаруватість насипаного шару фруктів складає $\varepsilon_c = 0,42$ [17].

Для оцінки вологості фруктів використовують відносні величини – вологість та вологовміст, де всі співвідношення стосуються довільної маси матеріалу, а не одиниці об'єму, як у газах:

- вологість матеріалу визначають за відношенням маси води (пари) у матеріалі, кг, до маси всього вологого матеріалу:

$$w = \frac{m_{вол}}{m}, \quad кг/кг; \quad d = \frac{m_{вол}}{m}, \quad г/кг, \quad \text{або} \quad W = \frac{m_{вол}}{m} \cdot 100\%, \quad \%; \quad (3.6)$$

- вологовміст матеріалу визначають за відношенням маси води у матеріалі, кг, до маси сухого матеріалу:

$$u = \frac{m_{вол}}{m - m_{вол}} \quad \text{або} \quad U = \frac{m_{вол}}{m - m_{вол}} \cdot 100\%, \quad кг \text{ вол./кг с. реч.}, \quad (3.7)$$

Виходячи з наведених співвідношень, зв'язок між вологістю і вологовмістом можна виразити такими рівняннями:

$$w = \frac{u}{u+1} \text{ або } u = \frac{w}{1-w}, \text{ кг вол./кг с. реч.} \quad (3.8)$$

Рівноважною називають вологість, яка відповідає рівності тисків насиченої пари біля поверхні матеріалу та в об'ємі навколишнього повітря. Початкова вологість усіх свіжонарізаних яблук приймається рівною $W_n = 80,2\%$. Проте у сушарку фрукти закладають після попереднього бланшування, тому початкова вологість закладки у різних дослідах неоднакова, але з різницею, не більшою за 5%.

Масу закладки визначали за різницею показів при зважуванні повних решет G_n та порожніх: $m = G_n - G_0$. Зменшення маси продукту впродовж першої і наступних годин приймається рівним різниці показів ваги:

$$\left. \begin{aligned} \Delta m_1 &= G_n - G_1 \\ \Delta m_2 &= G_1 - G_2 \\ \Delta m_n &= G_{n-1} - G_n \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

За результатами поточного зважування зручніше розраховувати вологовміст замість вологості, бо при порівнянні двох послідовних значень нема потреби зводити їх до спільного знаменника. Зокрема, до початкової вологості $W_n = 80,2\%$ ($w_0 = 0,802$) вологовміст рівний:

$$u_0 = \frac{w_0}{1-w_0} = \frac{0,802}{1-0,802} = 4,051 \text{ кг вол./кг с. реч.}$$

Для закладки початковою масою $m_0 = 5,5$ кг маса води $m_{\text{вол}}$ і сухої речовини (маса сухих сухофруктів) m_c відповідно рівні:

$$m_{\text{вол}} = w \cdot m_0 = 0,802 \cdot 5,5 = 4,411 \text{ кг}; \quad m_c = \frac{m_{\text{вол}}}{u} = \frac{4,411}{4,051} = 1,089 \text{ кг}$$

Поточний вологовміст U розраховується за співвідношенням:

$$U_1 = u_0 - \frac{G_0 - G_1}{m_c}, \text{ кг вол./кг с. реч.}, \quad (3.10)$$

де G_0 і G_1 – відповідно початкова і кінцева маса решет з фруктами, кг.

Енергетичні затрати вологоперенесення в геліосушарці прийнято оцінювати за зміною ентальпії та вологовмісту потоку теплоносія на шляху від входу у повітряний колектор до виходу із сушильної камери. Ентальпія

вхідного потоку рівна ентальпії повітря навколишнього середовища, яку розраховують за формулою

$$i_{nc} = c_{zn} \cdot T_{nc} + (c_n \cdot T_{nc} + r_0) \cdot d_0, \text{ кДж/кг}, \quad (3.11)$$

де c_{zn} – питома теплоємність зовнішнього повітря, кДж/(кг·°C); c_n – питома теплоємність водяної пари у зовнішньому повітрі, кДж/(кг·°C); $r_0 = 2500$ кДж/кг прихована теплота пароутворення води при 0 °C; T_{nc} – температура зовнішнього повітря, °C; d_0 – вологовміст зовнішнього повітря, г/кг.

На виході повітряного колектора вологовміст повітря рівний вхідному, тому приріст ентальпії у повітряному колекторі визначається тільки вищою температурою вихідного потоку T_{mn1} :

$$i_{ПК} = c_{mn} \cdot T_{mn1} + (c_n \cdot T_{mn1} + r_0) \cdot d_{nc}, \text{ кДж/кг}. \quad (3.12)$$

На виході із сушильної камери температура T_{mn3} не перевищує температуру T_{mn1} , а вологовміст d_3 більший за рахунок втраченої фруктами вологи $\Delta m_{\text{вол}}$. Відтак ентальпія вихідного потоку визначається через його відносну вологість і температуру T_{mn3} :

$$i_{суш} = c_{mn} \cdot T_{mn3} + (c_n \cdot T_{mn3} + r_0) \cdot d_3, \text{ кДж/кг}. \quad (3.13)$$

де $c_{mn} = 1,004$ кДж/(кг·°C) – питома теплоємність теплоносія; $c_n = 1,842$ кДж/(кг·°C) – питома теплоємність водяної пари; $r_0 = 2500$ кДж/кг прихована теплота пароутворення води при 0 °C; $T_{mn1...3}$ – температура теплоносія, °C; $d_{1...3}$ – вологовміст теплоносія, г/кг.

Таким чином, енергетичні затрати вологопереносу в геліосушарці оцінюємо із зміною ентальпії і вологовмісту на шляху потоку теплоносія від входу у повітряний колектор до виходу із сушильної камери.

Висновки до розділу 3

1. Розроблена програма і методика експериментальних досліджень дає змогу визначити функціональні залежності між фізичними параметрами навколишнього середовища, теплофізичними параметрами висушуваного матеріалу і конструктивно-технологічними параметрами геліосушарки з

метою забезпечення якості висушеного продукту й зниження експлуатаційних витрат на сушіння та підтвердження висунутих теоретичних положень.

2. Наведено методику дослідження теплотехнічних характеристик геліосушарки з використанням теплового акумулятора та плоского дзеркального концентратора й описано обладнання, прилади, дослідну установку і методики, згідно з якими проводилися дослідження.

3. Геліосушарка з функціями активної сонячної енергетичної установки вимагає попереднього обґрунтування її конструктивних елементів та вибору методів контролю за перебігом енергетичних перетворень та масообмінних процесів.

4. Враховуючи мінливість погодозалежних параметрів, вимірювальні прилади повинні працювати у режимі неперервного вимірювання з функцією візуалізації результатів та їх архівування з метою наступної обробки методами математичної статистики.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Дослідження технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці

У геліосушарці було поставлено і проведено серію експериментів для обґрунтування раціонального технологічного режиму роботи запропонованої геліосушарки залежно від ступеня завантаження об'єкта сушіння. Як об'єкт сушіння були взяті фрукти: груші і яблука.

Експерименти були об'єднані спільними початковими умовами, які наведено у п. 3.3. Досліджувану сировину піддавали мийці, нарізанню до фіксованого розміру, обробці та розкладали на решетах масою 5,5 кг. Завантажені плодами решета встановлювали у сушильну камеру.

Упродовж процесу сушіння проводили проміжні зважування фруктів з метою визначення втрат маси і встановлення закономірностей сушіння. Експерименти проводили до втрат вологи постійної маси від початкового контрольного значення 5,5 кг за методикою, наведеною у п. 3.4. Умови проведення експериментів наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Початкові умови експерименту

Умови	Яблука
Загальна маса завантаження у сушильній камері, кг	5,5
Контрольна маса, кг	5,5

4.1.1 Результати технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці

Залежно від технологічних способів обробки сировини перед сушінням у розглянутих фруктах спостерігалися значні відмінності за тривалістю сушіння і якістю готової продукції.

Яблука, оброблені розчином цукру, на самому початку сушіння почали темніти. Першим завершилося сушіння яблук, підданих бланшуванню, воно складало 27 годин, груш – 27 ÷ 51 годину. Тривалість сушіння яблук без обробки складала 33 години, а груш – 53 години (рис. 4.15).

Висушені яблука розрізнялися за зовнішнім виглядом і якістю. Яблука, оброблені цукровим розчином, мали злегка темнувате забарвлення, але хороший аромат і солодкий, приємний смак. Яблука, оброблені в соляному розчині, мали яскраве і свіже забарвлення, солодкий чистий смак, але слабкий аромат. Яблука без обробки після висушування місцями злегка потемніли, але мали добрий зовнішній вигляд, аромат і смак (див. рис. 4.16).

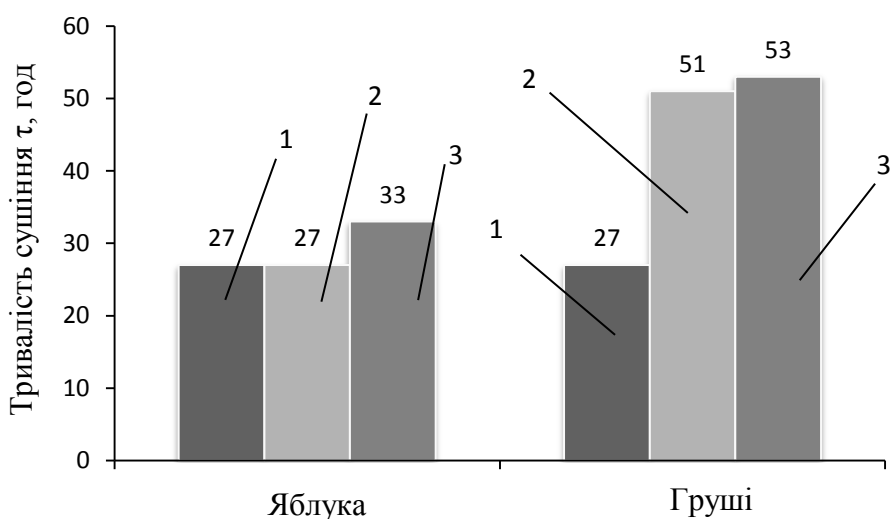


Рисунок 4.15 – Тривалість сушіння фруктів залежно від способу бланшування: 1 – у цукровому розчині; 2 – у соляному розчині; 3 – без обробки

Надмірне зменшення товщини нарізки яблук у 5 мм призводило до того, що сушена продукція ламалася, кришилася і збільшувала частку нестандартної продукції (рис. 4.16).

Зовнішній вигляд сушених яблук нарізаних різними способами і різної товщини наведено на рис. 4.16.



Рисунок 4.16 – Зовнішній вигляд сушених яблук залежно від способу бланшування

Яблука, нарізані часточками товщиною 8 мм, висушені в геліосушарці і при атмосферному сушінні. У геліосушарці інтервали часу складали $27 \div 33$ години, а при атмосферному сушінні – 87 годин.

На деяких варіантах залежно від способу і товщини нарізки фруктів визначали динаміку сушіння (рис. 4.17), для цього зразки цих варіантів, зважували через кожну годину.

Із графіків (див. рис. 4.17), які характеризують динаміку сушіння фруктів залежно від способу і товщини нарізки, видно, що найбільш оптимальні за тривалістю сушіння є яблука, нарізані кружечками товщиною 8 мм (рис. 4.16).

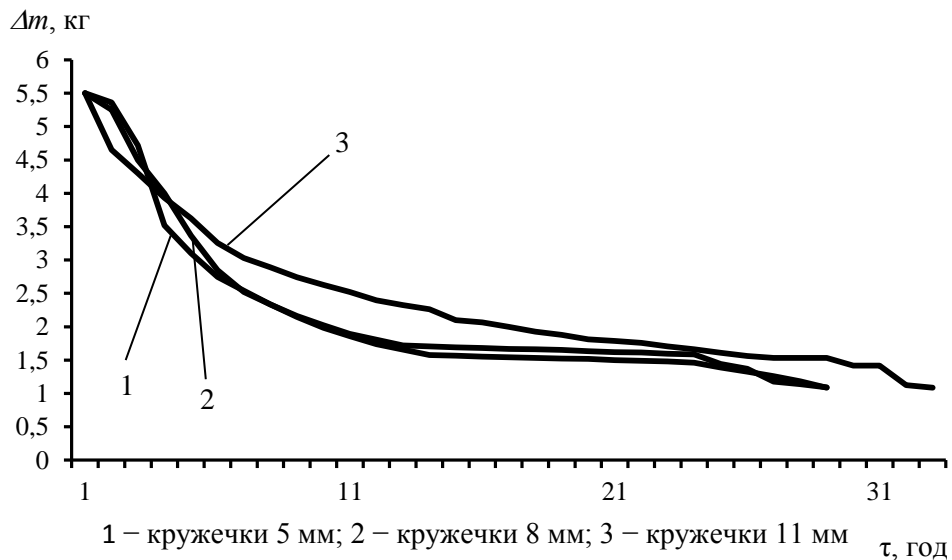


Рисунок 4.17 – Динаміка сушіння яблук

Таким чином, на основі аналізу технологічного процесу сушіння фруктів залежно від способу і товщини нарізки плодів найкращі результати за тривалістю сушіння в геліосушарці і якістю готової продукції показали: яблука нарізані кружечками товщиною 8 мм.

4.1.2 Дослідження кінетики сушіння фруктів у процесі роботи геліосушарки

Для дослідження кінетики сушіння як сировину для сушіння використали плоди яблук у кількостях по 5,5 кг (рис. 4.18).

На основі аналізу кінетики сушіння фруктів (див. рис. 4.18) встановлено, що на початку сушіння випаровування вологи проходить повільно (лінія АВ), оскільки висушуваний матеріал починає інтенсивно нагріватися. У разі збільшення температури висушуваного матеріалу випаровування вологи інтенсифікується і процес випаровування проходить

по прямій ВС.

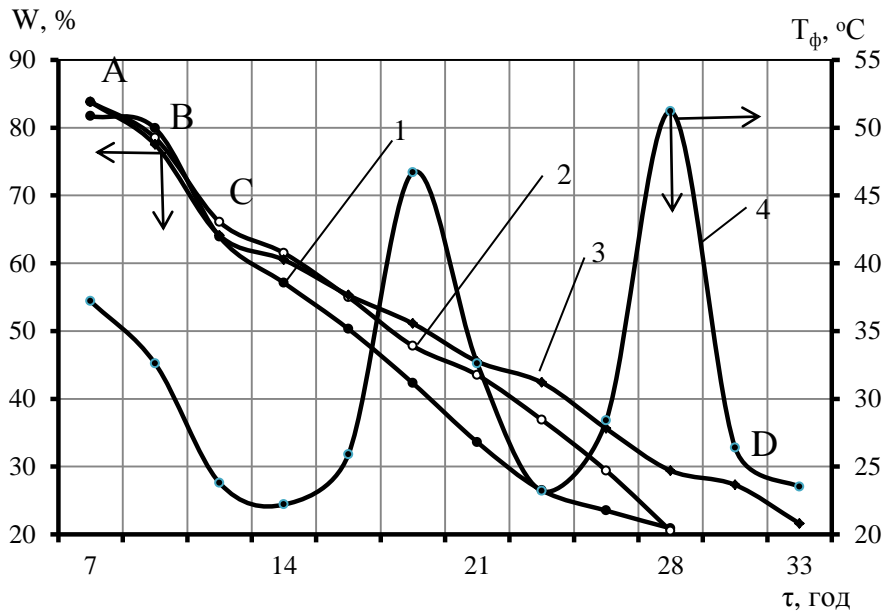


Рисунок 4.18 – Кінетика сушіння яблук: 1 – при закладанні партії 15.07.2018р. о 12⁰⁰ год., кружечки 5 мм; 2 – при закладанні партії 10.08.2018р. о 12⁰⁰ год., кружечки 8 мм; 3– при закладанні партії 15.08.2018р. о 12⁰⁰ год., кружечки 11 мм; 4 – температура висушуваного матеріалу.

Точка С характеризує момент, коли настає сповільнення процесу випаровування вологи. Вологість у точці С називають першою критичною вологістю. Лінія CD характеризує сповільнення випаровування вологи. У точці D вологість матеріалу наближається до рівноважної вологості, де сушіння припиняється.

Незважаючи на різноманітність режимів і погодних умов під час сушіння фруктів, криві сушіння мають однаковий характер, що дає змогу встановити відповідні функціональні залежності $W=f(\tau)$ і $T_{\phi}=f(\tau)$.

На підставі експериментальних даних отримана регресійна залежність температури нагріву фруктів T_{ϕ} від середньої температури теплоносія в сушильній камері $T_{\text{тис.ск.ср}}$ (рис. 4.19):

$$T_{\phi}=3,155 T_{\text{тн.ск.ср}} + 23,625. \quad (4.7)$$

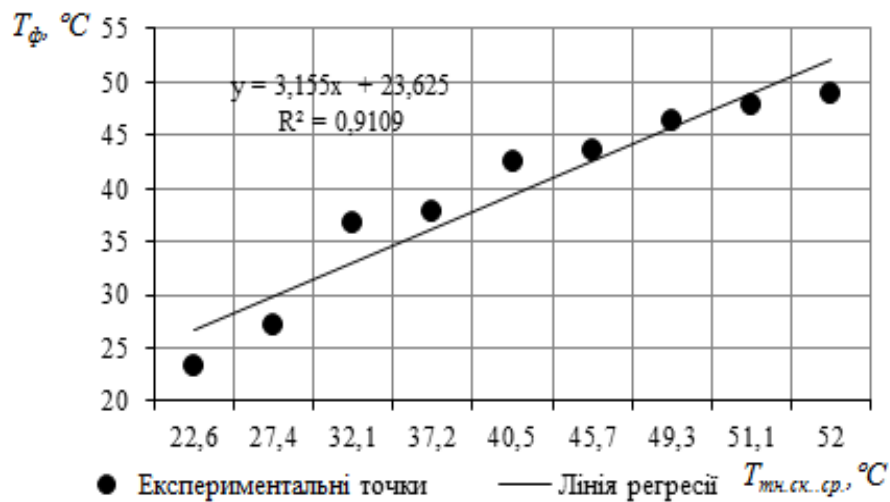


Рисунок 4.19 – Залежність середньої температури нагріву фруктів від середньої температури теплоносія в сушильній камері за період сушіння

Коефіцієнт кореляції вихідних даних $R = 0,92$, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9109$. Для даної регресійної моделі критерій $F_p = 5,1$ на рівні $n = 0,05$ при табличному значенні критерію $F_T = 6,1$, що свідчить про адекватність отриманої моделі. Перевірка за T -критерієм підтвердила достовірність довірчих інтервалів коефіцієнтів регресії.

Таким чином, незважаючи на різноманітність режимів і погодних умов під час сушіння фруктів, криві сушіння мають однаковий характер, а також дали змогу встановити функціональні залежності $W=f(\tau)$ і $T_{\phi}=f(\tau)$.

4.1.3 Дослідження технологічних режимів роботи геліосушарки

Під час проведення експериментів були отримані криві втрати маси фруктів залежно від ступеня завантаження сушильної камери розмірами $1 \times 1 \times 0,5$ м (рис. 4.20).

Як видно з графіків (див. рис. 4.20), при завантаженні сушильної камери висушуваним матеріалом масою $2,5 \div 5,5$ кг процес сушіння протікає досить інтенсивно, зі збільшенням ступеня завантаження камери до $8,5$ кг процес втрати маси сповільнюється. Тому оптимальний степінь завантаження сушильної камери складає $m_{\phi}=5,5$.

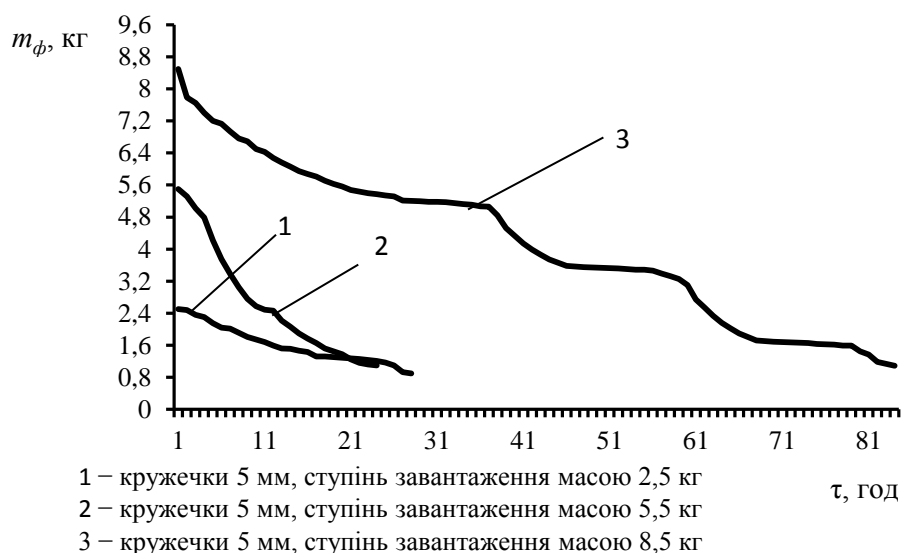


Рисунок 4.20 – Тривалість сушіння яблук залежно від ступеня завантаження сушильної камери висушуваним матеріалом

Оброблені і зведені дані в порівнянні використовуваних технологій обробки продуктів сушіння наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати технологічної обробки фруктів у геліосушарці

Умови	Яблука			
Контрольна маса фруктів, кг	2,5	2,5	5,5	8,5
Кінцева маса фруктів, кг	0,77	0,64	1,4	2,2
Температура в сушильній камері, °С	20÷60			
Тривалість сушіння при ступені завантаження сушильної камери 2,5 кг, год.	25			
Тривалість сушіння при ступені завантаження сушильної камери 5,5 кг, год.	23			
Тривалість сушіння при ступені завантаження сушильної камери 8,5 кг, год.	82			

Таким чином, отримані дані показують, що для досягнення необхідної втрати маси фруктів при температурі 20 ÷ 60 °С, технологічному процесу із використанням запропонованої геліосушарки для кожної фруктової сировини необхідна різна тривалість сушіння або зменшення ступеня завантаження сушильної камери висушуваним матеріалом з 8,5 до 5,5 кг. Такі технологічні режими сушіння можуть застосовуватися під час сушінні фруктів.

Важливими технологічними параметрами, що визначають ефективність сушіння в геліосушарці, є:

- 1) швидкість потоку теплоносія у геліосушарці, що змінювалася в межах $v_{mn} - 1 \div 3$ м/с;
- 2) температура теплоносія у сушильній камері $T_{mn} - 20 \div 60$ °С;
- 3) вологовміст теплоносія $d_{0...n}$ або $X_{0...n}$.

На момент дослідження середній вологовміст зовнішнього повітря в період випробувань складав 13,2 г/кг. Різниця між вологовмістом відпрацьованого агента сушіння d_3 і вологовмістом теплоносія на вході в сушильну камеру d_2 визначає величину видалення вологи з одного кілограма агента сушіння (рис. 4.21 і 4.22), що коливалася від 3 до 14 г/кг с. п.

Отже, дослідження проведені за температури теплоносія, що надходить у сушильну камеру в денний час, $T_{mn} = 30 \div 60$ °С, у вечірній час $T_{mn} = 30 \div 20$ °С, швидкості теплоносія $v_{mn} = 1 \div 2,5$ м/с та вологовмісту $d = 10 \div 14$ г/кг сухого повітря.

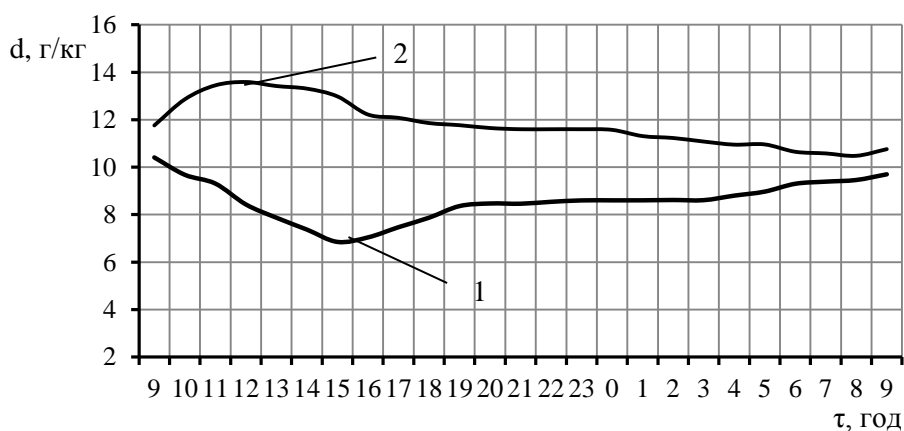


Рисунок 4.21 – Зміна вологовмісту теплоносія в процесі сушіння в геліосушарці без теплового акумулятора 15 – 16.07.2018 р.: 1 – вологовміст зовнішнього повітря ($T_{nc} = 23,4 \div 30,1$ °С); 2 – вологовміст відпрацьованого теплоносія ($T_{mn} = 23,5 \div 50,6$ °С; $v_{mn} = 1,2$ м/с)

Внаслідок непостійності зовнішніх факторів, пов'язаних з погодними умовами, обґрунтовуючи конструктивно-технологічні параметри геліосушарки, необхідно використовувати усереднені значення відповідних параметрів.

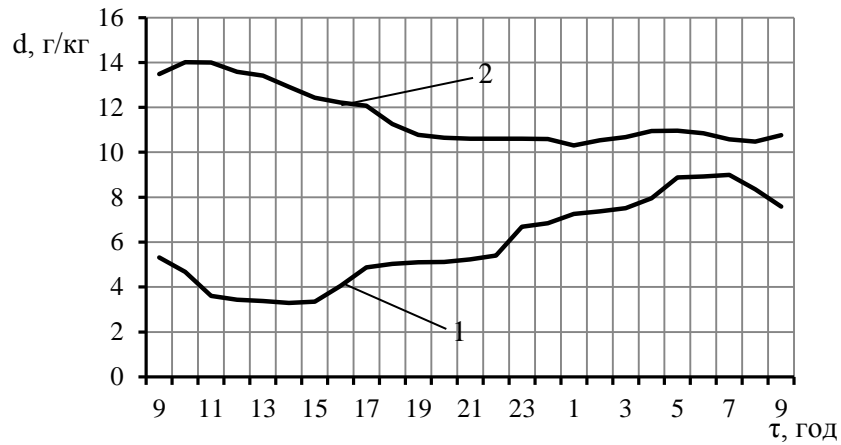


Рисунок 4.22 – Зміна вологовмісту теплоносія в процесі сушіння в геліосушарці з тепловим акумулятором 7 – 8.08. 2018 р.: 1 – вологовміст зовнішнього повітря ($T_{nc}=17,4 \div 29,3$ °C); 2 – вологовміст відпрацьованого теплоносія ($T_{mn}=18,1 \div 50,5$ °C; $v_{mn}=1,2$ м/с)

Аналізуючи отримані дані (рис. 4.23, 4,24), можна зазначити, що перенесення вологи всередині висушуваного матеріалу визначається не тільки величиною градієнтів температури й вологовмісту, а й коефіцієнтом дифузії D , який залежать від температури і швидкості теплоносія в геліосушарці та змінюється в межах $D = 0,17 \div 1,2 \cdot 10^{-10}$ м²/с. У разі збільшення температури теплоносія в сушильній камері $T_{тн}$ від 20 до 60 °C коефіцієнт дифузії D зростає (див. рис. 4.23), а зі збільшенням швидкості теплоносія $v_{тн}$ від 1 до 3 м/с коефіцієнт дифузії D зменшується нелінійно (див. рис. 4.24), що відповідає видаленню вологи, концентрованої всередині та зовні мембрани висушуваного матеріалу у кожному циклі нагрівання-охолодження.

Під час проведення експериментальних досліджень отримали криву залежності енергії зв'язаної вологи $q_{зв}$ від вологовмісту висушуваного матеріалу $q_{зв}=f(U)$ (рис. 4.25).

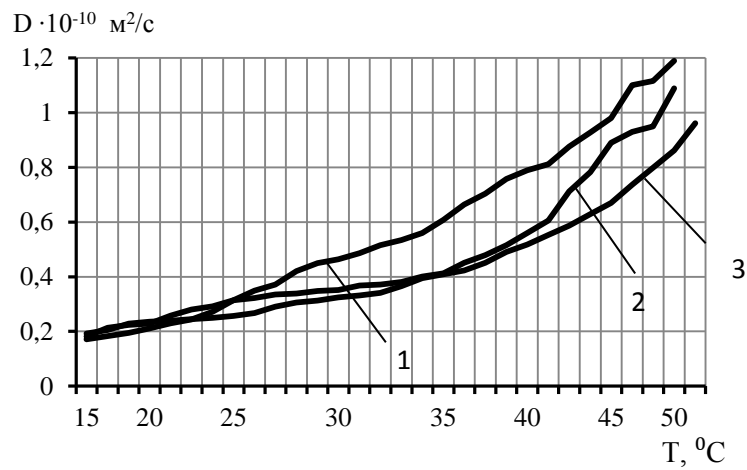


Рисунок 4.23 – Залежність коефіцієнта дифузії від температури потоку теплоносія у геліосушарці: 1 – 1 м/с; 2 – 2 м/с; 3 – 3 м/с

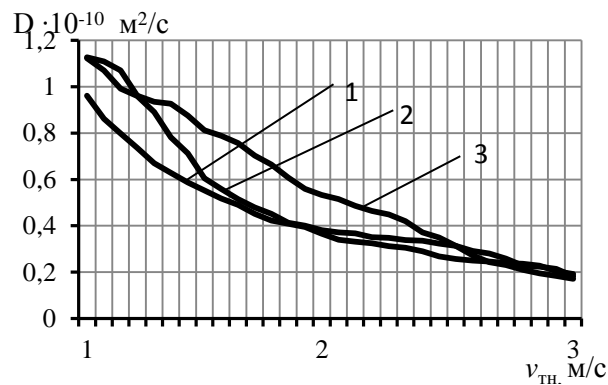


Рисунок 4.24 – Залежність коефіцієнта дифузії від швидкості теплоносія у геліосушарці: 1 – 20 °С; 2 – 30 °С; 3 – 60 °С

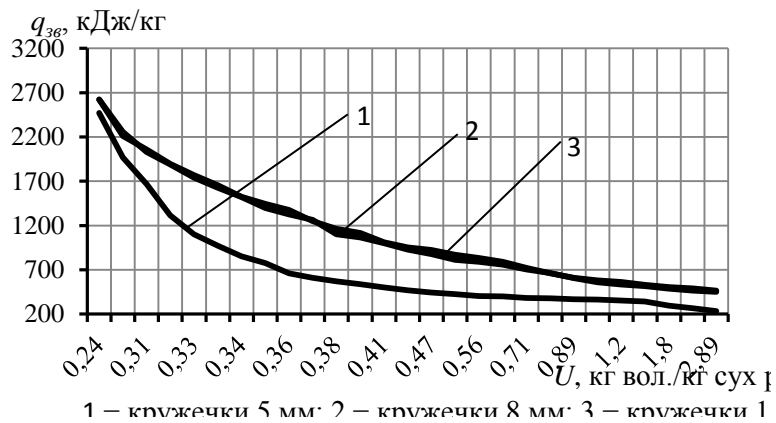


Рисунок 4.25 – Залежність енергії зв'язку води від вологовмісту яблук

Аналіз отриманих результатів (див. рис. 4.25) показує, що на початку сушіння енергія зв'язаної води $q_{зв}$ для яблук за вологовмісту U від 2,89 до 0,24 кг вол./кг сух. реч. становила від 232,6 до 2623,2 кДж/кг.

Криві інтенсивності сушіння (рис. 4.26) дають змогу проаналізувати вплив режиму сушіння на кінетику процесу. Усі криві інтенсивності сушіння зміщені по осі абсцис на величину рівноважного вологовмісту висушуваного матеріалу, а відлік вологовмісту проводиться від рівноважного.

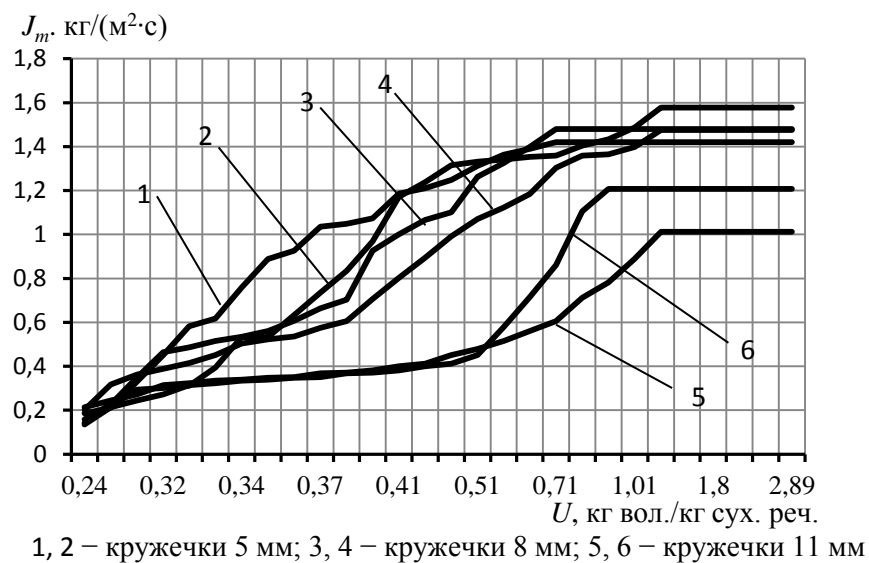


Рисунок 4.26 – Криві інтенсивності сушіння яблук

З аналізу отриманих результатів (див. рис. 4.26) встановлено, що криві інтенсивності сушіння в різні періоди 15.07 – 3.09. 2018 р. (криві 1, 3, 5) і 15.07 – 3.09. 2017 р. (криві 2, 4, 6) роботи геліосушарки, незважаючи на різноманітність режимів сушіння, фізичних параметрів навколишнього середовища та погодних умов, мають однаковий характер. Це дало змогу встановити інтенсивність сушіння J_m , яка для яблук за вологовмісту U від 2,89 до 0,24 кг вол./кг сух. реч. становить $1,57 \div 0,18$ кг/(м²·с).

Таким чином, порівняльний аналіз експериментальних кривих інтенсивності сушіння (див. рис. 4.26) дає підстави стверджувати, що геліосушарка під час сушіння забезпечує рівномірну інтенсивність і тривалість цього процесу в періоди «нагрівання» та «охолодження» і не допускає переохолодження висушуваного матеріалу.

4.1.4 Оцінка якості висушених фруктів

Зовнішній вигляд готової продукції зберіг первісний колір, а також мав приємний запах (рис. 4.27).



Рисунок 4.27 – Сушені груші і яблука

Таким чином, запропонована конструкція геліосушарки показала свою працездатність, надійність і можливість отримання якісного кінцевого продукту.

Основні техніко-експлуатаційні показники запропонованої конструкції геліосушарки відповідають розрахунковим, і, таким чином вона нічим не поступається за технічними характеристиками існуючим сонячним сушаркам.

4.2 Розрахунок конструктивно-технологічних параметрів геліосушарки

Витрата теплоносія на квадратний метр геліосушарки:

$$Q_{mn} = 11,3 \cdot 1,2 = 13,56 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Площа теплопередачі поверхні теплового акумулятора геліосушарки (зовнішня теплообмінна поверхня):

$$S_{ma} = \frac{803,4}{24 \cdot 30} = 1,1 \text{ м}^2.$$

Об'єм теплового акумулятора геліосушарки:

$$V_{ma} = \frac{824,5 \cdot 0,35}{169 \cdot 5} = 0,35 \text{ м}^3.$$

Маса акумулюючої речовини для теплового акумулятора геліосушарки:

$$m_{ma} = 0,35 \cdot 142,65 = 49,92 \approx 50 \text{ кг.}$$

Теплопродуктивність повітряного колектора:

$$Q = 1,5 \cdot 0,78 \cdot (578,2 \cdot (1,2 \cdot 0,56) - 1,3 \cdot (45,3 - 30,3)) = 432 \text{ Вт.}$$

Станом на середину вересня середньоденне надходження сонячної енергії на 1 м^2 сонячного колектора з оптимальним кутом нахилу $\beta = 36^\circ$ за даними [59] становить $H_\beta^0 = 3,35 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$. Якщо ефективність сонячного колектора прийняти рівним його оптичному ККД (зазвичай $\eta_0 \approx 0,8$), то для забезпечення вологовидалення протягом двох днів площу колектора потрібно вибирати з такої умови:

$$S \geq \frac{6,56/2}{0,8 \cdot 3,35} = 1,22 \text{ м}^2 \text{ приймаємо } 1,5 \text{ м}^2.$$

Кількість теплової енергії $W_{m.e.d}$, кДж, яку виробляє повітряний колектор:

$$W_{m.e.d} = 12 \cdot 578,2 \cdot 1,5 \cdot 0,7 \cdot 3,96 = 28849,1 \text{ кДж, або } 8013,8 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Кількість теплової енергії $W_{m.e.n}$, кДж, що відводиться від теплового акумулятора:

$$W_{m.e.n} = 50 \cdot 0,845 \cdot (45,6 - 20,9) = 1043,5 \text{ кДж або } 289,8 \text{ Вт}\cdot\text{год.}$$

Поточна теплова енергії $N_{гс}$, що виробляється геліосушаркою за період сушіння:

$$N_{гс} = 8013,8 + 289,8 = 8303,6 \text{ Вт}\cdot\text{с.}$$

Об'єм повітропроводу повітряного колектора:

$$V_{np} = 0,198 + \left(\frac{0,099}{2} \right) = 0,2475 \text{ м}^3.$$

Внутрішній об'єм сушильної камери:

$$V_{ск} = 1 \cdot 1 \cdot 0,5 = 0,5 \text{ м}^3.$$

Потужність вентилятора:

$$N_g = \frac{50,853}{0,34} = 149 \approx 0,146 \text{ кВт.}$$

Теплова потужність геліосушарки:

$$N_{zc} = 830 \cdot 4,6 \cdot 0,6 \cdot 0,623 = 1427,2 \text{ Вт.}$$

Вхідні величини, необхідні для розрахунку геліосушарки наведено у табл. 4. 4.

Таблиця 4.4 – Об'єктивні характеристики порізаної фруктової сировини

Величина	Значення	Величина	Значення
Маса сушильного матеріалу	$m = 5,5 \text{ кг}$	Кінцева вологість фруктів	$W_k = 20,2\%$
Питома теплоємність фруктів (яблук)	$c_{\phi} = 3,55 \text{ Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$	Рівноважна вологість фруктів	$W_p = 30,5\%$
Початкова вологість фруктів	$W_n = 72,4\%$	Критична вологість фруктів	$W_{kp} = 30,79 \%$

Початкова маса вологи у висушуваному матеріалі рівна:

$$m_{\text{вол}} = \frac{W_n \cdot m}{100} = \frac{72,4 \cdot 5,5}{100} = 3,982 \text{ кг.}$$

Маса сухого матеріалу $m_c = m - m_{\text{вол}} = 5,5 - 3,982 = 1,518 \text{ кг}$;

Початковий вологовміст:

$$U_n = \frac{m_{\text{вол}}}{m_c} = \frac{3,982}{1,518} = 2,623 \text{ кг/кг.}$$

Кінцева маса і вологовміст:

$$m_k = \frac{W_k \cdot m}{100} = \frac{20,2 \cdot 5,5}{100} = 1,11 \text{ кг.}$$

$$U_k = \frac{m_{\text{вол}}}{m_c} = \frac{1,11}{1,518} = 0,731 \text{ кг/кг.}$$

Втрата маси при сушінні до кінцевої вологості 20,2 %:

$$\Delta m = 3,982 - 1,11 = 2,872 \text{ кг}$$

Продуктивність сушильної камери за один цикл сушіння:

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100 - W_1}{100 - W_2} = 5,5 \cdot \frac{100 - 72,4}{100 - 20,2} = 1,87 \text{ кг/год.}$$

Необхідна маса видалення вологи до кінцевої вологості 20,2 %:

$$m_{\text{вол.}} = m_{\text{поч}} \frac{W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}}}{100 - W_{\text{кін}}} = 5,5 \cdot \frac{72,4 - 20,2}{100 - 20,2} = 3,57 \text{ кг, або } 241,7 \text{ моль.}$$

Енергозатрати на видалення вологи рівні сумі прихованої теплоти випаровування r та енергії десорбції зв'язаної вологи $q_{\text{зв}}$. Відповідно з наведеним там виразом десорбцію зв'язаної вологи масою 4,149 слід розраховувати за формулою:

$$q_{\text{зв}} = 2100 \cdot (2,623 - 0,731) + 2418,4 = 6391,6 \text{ кДж/кг.}$$

Нами було прийнято енергія десорбції 4200 кДж/кг. Відтак енергія десорбції вологи масою $\Delta m = 4,149$ кг не повинна перевищувати значення:

$$Q_{\text{суш}} = 6391,2 \cdot 3,696 = 23624 \text{ кДж або } 6,56 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Упродовж першої години (початок о 12 годині дня) фізичні параметри навколишнього середовища становили: температура повітря $T_{\text{нс}} = 28,9^\circ\text{C}$, відносна вологість повітря $\varphi_{\text{нс}} = 32,4\%$, яким відповідає тиск насиченої пари $p_{\text{нп}} = 3,99$ кПа.

Вологовміст зовнішнього повітря:

$$d = 0,622 \frac{\varphi p_n}{p - \varphi p_n} = 0,622 \frac{0,324 \cdot 3,99}{101,3 - 0,324 \cdot 3,99} = 0,008 \text{ кг/кг.}$$

Ентальпія навколишнього повітря (вхідного повітря):

$$i_{\text{нс}} = 1,004 \cdot 28,9 + (1,842 \cdot 28,9 + 2500) \cdot 0,008 = 49,4 \text{ кДж/кг.}$$

Параметри повітря на виході з повітряного колектора: $T_{\text{тн1}} = 56,2^\circ$, волога у повітряному колекторі не прибуває, тому вологовміст залишився рівним попередньому: $d = 0,008$ кг/кг. У такому разі вологість повітря на виході з повітряного колектора не повинна перевищувати 10% (за $h-d$ діаграмою) $p_{\text{нп}} = 16,69$ кПа, а за розрахунками:

$$\varphi_{\text{тн1}} = \frac{x p}{(0,622 + x) p_n} = \frac{0,008 \cdot 101,3}{(0,622 + 0,008) \cdot 16,69} \cdot 100\% = 0,077 \cdot 100\% = 7,7\%.$$

Значення $T_{mн1}$ приймаємо рівним температурі повітря на виході з повітряного колектора, то у ньому ентальпія потоку зростає до значення:

$$i_{ПК} = 1,004 \cdot 56,2 + (1,842 \cdot 56,2 + 2500) \cdot 0,008 = 77,2 \text{ кДж/кг.}$$

Параметри агента сушіння на виході з сушильної камери:

$$T_{тн3} = 56,8^\circ; \varphi_{тн3} = 38,8\%, p_{тн} = 17,17 \text{ кПа;}$$

$$d = 0,622 \frac{0,388 \cdot 17,17}{101,3 - 0,388 \cdot 17,17} = 0,070 \text{ кг/кг;}$$

$$i_{суш} = 1,004 \cdot 56,8 + (1,842 \cdot 56,8 + 2500) \cdot 0,035 = 148,2 \text{ кДж.}$$

Маса видаленої вологи на 1 кг повітря протягом однієї години:

$$\Delta m_{e1} = 0,035 - 0,008 = 0,028 \text{ кг/кг повітря.}$$

За об'ємної витрати повітря $0,23 \text{ м}^3/\text{год}$ або масової $m = \rho V = 1,29 \cdot 0,23 = 0,297 \text{ кг/год}$, потоком повітря буде видалено

$$0,297 \cdot 0,028 = 0,008 \text{ кг/год або } 8 \text{ г/год,}$$

$$\Delta m_e = m_{пoch} \frac{W_{пoch} - W_{кін}}{100 - W_{кін}} = 5,5 \cdot \frac{72,4 - 69,3}{100 - 69,3} = 0,55 \text{ кг.}$$

Вологовміст теплоносія: $d = 622 \cdot \frac{(38,8/100) \cdot 17,17}{100,1 \cdot (32,4/100) \cdot 9,99} = 12,5 \text{ г/кг.}$

Процес геліосушіння наведено на I-d - діаграмі (рис. 4.28) зображений лініями АВ - нагрівання теплоносія в повітряному колекторі, при $d_{тн1} = d_{тн3}$ ВС - процес сушіння при $I = \text{const}$.

Коефіцієнт масовіддачі β залежить від маси фруктового матеріалу m_ϕ , кг, коефіцієнта активності води a_ω , площі поверхні нагрівання фруктової сировини S_ϕ , м^2 , тиску водяної пари над продуктом P_ϕ , Па, тиску водяної пари в теплоносії $P_{тн}$, Па, (див. рис.4.29):

$$\beta = \frac{0,0012 \cdot (0,00025 \cdot (17,23 - 17,17))}{5,5} = 3,27 \cdot 10^{-9} \text{ м/с.}$$

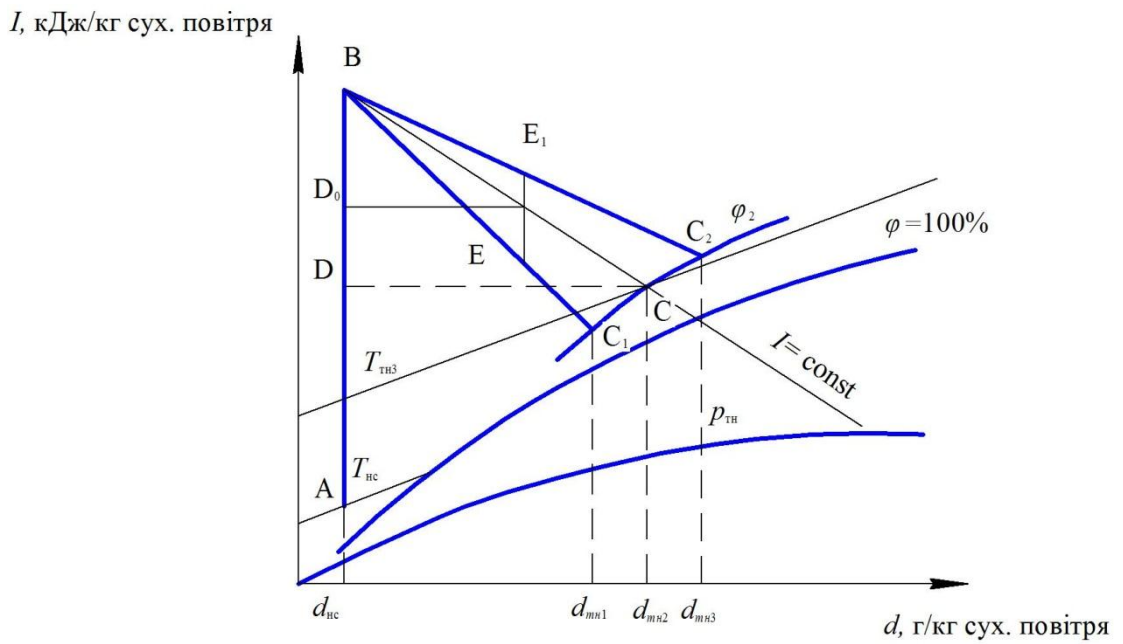


Рисунок 4.28 – Зміна параметрів теплоносія у геліосушарці

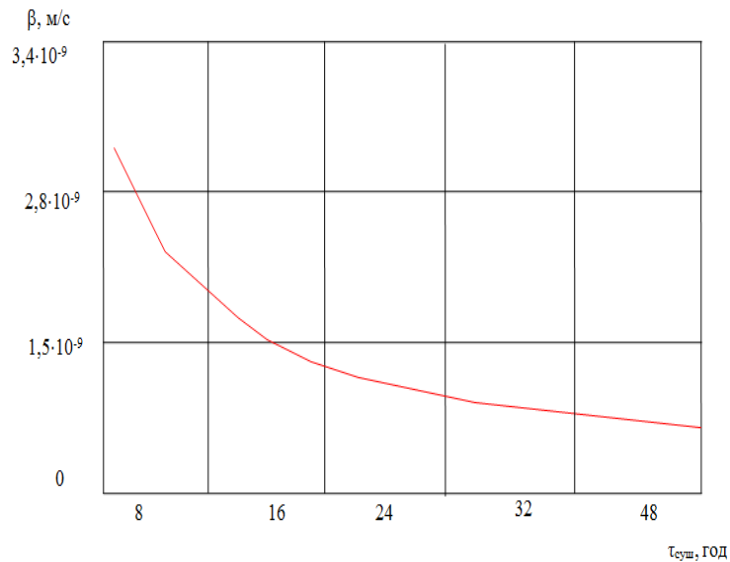


Рисунок 4.29 – Залежність коефіцієнта масовіддачі при сушінні яблук від тривалості сушіння

Підставляючи експериментальні дані в рівняння теплового балансу (див. формули (2.6) і (2.7)) розраховуємо показники та зводимо їх у табл.4.5.

Таблиця 4.5 – Тепловий (енергетичний) баланс геліосушарки

Надходження теплоти	Значення складових балансу, кДж		Відношення $Q/Q_{заг} \cdot 100$ %		Втрата теплоти	Значення складових балансу, кДж		Відношення $Q/Q_{заг} \cdot 100$ %	
	Денний час	Нічний час	денний час	Нічний час		Денний час	Нічний час	денний час	Нічний час
Енергія сонячного випромінювання, що поглинається абсорбером	578,2	-	36,4	-	Теплота, витрачена на нагрівання решет	26283	1234,7	23,2	18,8
Теплота, яку виробляє абсорбер	28849	-	27,3	-	Теплота, затрачена на нагрів продукту	12061	507,2	22,7	2,9
Теплота, що надходить у сушильну камеру, від теплоносія, нагрітого в колекторі і тепловим акумулятором	26569	1236,5	15,8	64	Теплота затрачена на випаровування вологи	12015	502,7	22,4	31,2
Теплота, що підводиться тепловим акумулятором	615,4	-	20,5	-	Теплота, видалена відпрацьованим теплоносієм	1793	132,9	20,9	34,7
Теплота, відведена від теплового акумулятора		615,4		35,9	Втрати теплоти в навколишнє середовище	412,6	24,5	10,8	12,4
Всього	56612	1852	100	100	Всього	52565	2402	100	100

Отже, аналіз структури розподілу сонячної енергії, що надходить на повітряний колектор, свідчить, що геліосушарка за один цикл сушіння (24

години) використовувала енергію сонячного випромінювання в межах від 400 до 600 Вт/м², перетворивши її на теплоту (28849 кДж), яку поглинув теплоносії (26569 кДж) і затратив на нагрівання фруктів (12061 кДж) та випаровування вологи (12015 кДж), а частину – тепловий акумулятор (615,4 кДж), теплова потужність геліосушарки складає $N_{гс.сер.} = 117 \div 1429,3$ Вт.

Висновки до розділу 4

1. На основі аналізу технологічного процесу сушіння фруктів залежно від способу і товщини нарізки плодів найкращі результати за тривалістю сушіння і якістю готової продукції показали яблука, нарізані кружечками товщиною 8 мм, а груші – дольками товщиною 6 мм.

2. Обґрунтовано методику інженерного розрахунку геліосушарки та отримано залежності для оцінки складових енергетичних показників за умов комбінованого впливу плоского дзеркального концентратора і теплового акумулятора.

3. Порівняльний аналіз експериментальних кривих інтенсивності сушіння дозволяє стверджувати, що геліосушарка під час сушіння забезпечує рівномірну інтенсивність і тривалість даного процесу в періоди «нагрівання» та «охолодження» і не допускає переохолодження висушуваного матеріалу. Отже, математична модель технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці є надійною й цілком придатною для подальшого використання.

ВИСНОВКИ

У роботі виконано теоретичне узагальнення й подано новий розв'язок актуальної науково-практичної задачі з обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи геліосушарки фруктів, а саме:

1. На підставі аналізу існуючих способів і засобів сушіння фруктів встановлено, що найперспективнішим для особистих селянських і фермерських господарств є використання геліосушарки з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором.

2. Отримані аналітичні рівняння дають можливість обґрунтувати конструктивні параметри геліосушарки. Удосконалено математичну модель конвективного сушіння фруктів у геліосушарці, в основу якої покладено спрощений механізм тепло- і масообміну, що дає змогу визначити зміну температури і вологовмісту в матеріалі, тепло- і масообмін між теплоносієм і матеріалом.

3. На основі аналізу технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці залежно від способу і товщини нарізки плодів найкращі результати за тривалістю сушіння і якістю готової продукції показали: яблука, нарізані кружечками товщиною 8 мм.

4. Встановлено, що для забезпечення продуктивності геліосушарки 1,085...1,87 кг/год сухої продукції її параметри мають бути такими: площа сприймальної поверхні повітряного колектора $S_{пк} = 1,5 \text{ м}^2$; маса теплового акумулятора $m_{та} = 50 \text{ кг}$; площа плоского дзеркального концентратора $L = 1,5 \text{ м}^2$; внутрішній об'єм сушильної камери $V_{вн.ск} = 0,5 \text{ м}^3$.

5. Порівняльний аналіз експериментальних кривих інтенсивності сушіння дозволяє стверджувати, що геліосушарка під час сушіння забезпечує рівномірну інтенсивність і тривалість даного процесу в періоди «нагрівання» та «охолодження» і не допускає переохолодження

висушеного матеріалу. Отже, математична модель технологічного процесу сушіння фруктів у геліосушарці є надійною й цілком придатною для подальшого використання.