

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Самойленко Катерина Миколаївна

УДК 664.8.047

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ЗАСАДИ

СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ БІЛКОВОВМІСНИХ ПРОДУКТІВ

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Катерина САМОЙЛЕНКО

Науковий консультант – Петрова Жанна Олександрівна, чл.-кор. НАН
України, доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Самойленко К.М. Наукові засади створення енергоефективних теплотехнологій отримання білкововмісних продуктів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика». Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена інтенсифікації тепломасообміну при зневодненні білкововмісної сировини та створення енергоефективних теплотехнологій отримання білкововмісних продуктів з м'ясної сировини та культивованих грибів.

Вихід України на світовий торговий ринок як країни-імпортеру сільськогосподарської продукції обумовлює нарощування потужностей української харчової промисловості. Підвищення конкурентоспроможності української продукції потребує як підвищення її якості, так і розширення її асортименту. В зв'язку з чим, доволі перспективною бачиться розробка теплотехнологій вітчизняного промислового виробництва сушених натуральних білкововмісних продуктів із м'яса свинини, яловичини, культивованих грибів ерінги, шіїтаке, глива звичайна, печериця звичайна - легкодоступного в Україні джерела протеїнів.

Оскільки у світі і в Україні особливо гостро стоять питання збереження енергетичних ресурсів, що передбачає раціональне використання електроенергії, викопного біопалива, розробку та застосування альтернативних видів палива, відновлюваних джерел енергії, застосування енергоефективних режимів зневоднення, то основними питаннями при розробці теплотехнологій є зниження енерговитрат на процес зневоднення та збереження біологічно активних речовин.

Найбільш сучасним способом переробки є сушіння, яке дозволяє продовжити термін придатності сировини, що має нетривалий термін зберігання.

Сушіння вологих матеріалів вважається одночасно теплотехнічним та технологічним процесом, під час якого змінюються технологічні та біохімічні властивості матеріалу. У більшості технологій загальні витрати на процес сушіння складають 50 - 70 %. Тому для вирішення проблеми енергоефективності теплотехнологій необхідно вирішувати, перш за все, ефективність процесів зневоднення.

До сучасних способів зневоднення білкововмісної сировини відносяться як класичні – сублімаційне, конвективне, кондуктивне, розпилювальне так і гібридні технології, зокрема мікрохвильо-вакуумне, мікрохвильо-вакуумне-конвективне, ультразвукове-вакуумне, сублімаційно-інфрачервоне та деякі з новітніх технологій, такі як холодна плазма з інфрачервоним сушінням.

При дослідженні процесів зневоднення білкововмісної сировини здебільшого досліджують ступінь регідратації, усадку продукту, збереження кольору, вміст ароматоутворюючих речовин, хімічний склад тощо. Застосування гібридних технологій дали неоднозначні результати енергетичних та якісних характеристик. Варто зазначити, що ці комбіновані методи сушіння є дорого вартісними. В зв'язку з цим, питання енергоефективності та забезпечення збереження біологічно активних речовин нативної сировини потребує додаткових досліджень та розробок нових, але простих та надійних способів сушіння. На сьогоднішній день в Україні недостатньо виробництва з переробки білкововмісної сировини, що дозволяє зберегти якість нативного матеріалу.

Враховуючи складну енергетичну ситуацію як в Україні, так і у світі, важливим етапом при розробці теплотехнології отримання сухих білкововмісних продуктів є енерговитрати. Тому було досліджено процеси підготовки сировини до сушіння з подальшим зневодненням конвективним та комбінованим способом з метою розробки ефективних режимів сушіння за

рахунок комбінованого енергопідведення та отримання сухого харчового продукту з підвищеним вмістом білків. Такі продукти швидкого приготування необхідно розробляти з метою легкого використання та швидкого способу насичення поживними речовинами для людей, які знаходяться в екстремальних умовах, а також військовослужбовців та спортсменів.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у шести розділах, в яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи.

У вступі обґрунтовано стан наукової проблеми, актуальність та важливість, яка вирішується у дисертаційній роботі, сформульовано мету і задачі дослідження, охарактеризовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено відомості щодо особистого внеску здобувача та апробації результатів досліджень, представлена структура та об'єм дисертаційної роботи.

У першому розділі виконано аналіз літературних джерел, що стосується основних аспектів щодо перспективи виробництва білкововмісних харчових порошоків з м'яса свинини, яловичини та культивованих грибів ерінги, шиїтаке, глива, печериця звичайна; особливостей розробки підготовки сировини до зневоднення, проаналізовано процеси тепломасообміну при сушінні білкововмісної сировини з точки зору енергоощадності процесу та збереження біологічно активних речовин нативної сировини.

Грунтуючись на результатах опрацювання літературних джерел, було визначено мету даної роботи та задачі, що в ній вирішуються.

У другому розділі зроблено вибір об'єктів дослідження харчової білкововмісної сировини, яка виробляється в Україні та є перспективною для виробництва білкововмісних продуктів, наведено її характеристики. Для теоретичних та експериментальних досліджень було обрано: м'ясна сировина – свинина, яловичина, культивовані гриби – ерінги, шиїтаке, глива, печериця звичайна. Ці білкововмісні продукти в Україні виробляються у великому обсязі. Зокрема, українські фермери відроджують підприємництво для виробництва, переробки та реалізації м'ясної, молочної продукції,

збільшується кількість малих фермерських господарств з вирощування культивованих грибів.

Наведено методики проведення експериментальних досліджень процесу зневоднення, визначення теплофізичних, сорбційних, регідратаційних, якісних властивостей білкововмісної сировини. Наведено опис та принцип дії експериментального конвективного стенду, приладу ДМКИ-01, диференціального сканувального мікрокалориметра ДСМ-2М, молоткової дробарки, установки для дослідження дисперсного складу рослинної сировини, приладу Aqualab3TE.

У третьому розділі проведено аналітичні та експериментальні дослідження волого-теплової обробки білкововмісної сировини, які показали можливість підвищення їх ефективності.

Проведено аналіз підготовки білкововмісної сировини до сушіння та виявлено, що здебільшого м'ясну сировину переробляють на м'ясні сухі продукти у вигляді слайсів, чипсів, паличок, пластівців та інші, які вважаються корисним швидким перекусом. Однак, для застосування м'ясної сировини у такому вигляді неможливе у продуктах швидкого приготування (сухі супи, каша та ін.), оскільки в цьому випадку м'ясний продукт повинен мати високу відновлюваність.

Загальна тенденція вирощування культивованих грибів направлена до зростання як у світі, так і в Україні. Це пов'язано із збільшенням попиту на споживання грибів, що відносяться до корисних та оздоровчих продуктів. Відповідно є актуальним питання переробки некондиційованої сировини.

Однією з головних проблем при сушінні м'ясних продуктів є затвердіння поверхні або утворення скоринки. Поверхневий шар твердіший і менш проникний, ніж внутрішня частина продукту. Виявлено різке збільшення жорсткості під час сушіння у в'ялених м'ясних продуктах, коли вміст води досягає критичного значення.

Враховуючи ці фактори, розроблено попередню підготовку м'ясної сировини до сушіння, яка включає в себе теплову обробку протягом 20 хв.

Визначено розмір та форму сировини, що дозволяє ефективно провести підготовку та сушіння. Запропонований спосіб попередньої обробки білкововмісної сировини дав змогу зменшити енерговитрати під час сушіння.

Досліджено кінетику зневоднення білкововмісної сировини. Найбільш енергозатратні способи зневоднення є сублімаційний, вакуумний та інші. Враховуючи це, нами було досліджено менш енергоємні способи - конвективне, інфрачервоне зневоднення та поєднання цих двох способів.

Проведено багато експериментальних досліджень із визначення впливу зміни швидкості теплоносія, товщини шару на процес сушіння білкововмісної сировини. Варто зазначити, що чим більша швидкість теплоносія, тим менша тривалість процесу. Відповідно, чим менша товщина досліджуваного зразка, тим тривалість менша.

Визначено оптимальні режими для зменшення тривалості процесу. Такими режимами виявились конвективний двоступеневий та комбінований.

Комбінований режим відбувається наступним чином: на початку процесу до зразку подається теплота від двох енергоносіїв (інфрачервоне випромінювання та конвективне). При досягненні зразком критичної температури для білкововмісної сировини, один із теплоносіїв вимикали – інфрачервоне випромінювання, та досушували при конвективному способі до кінця процесу. При цьому, температура зразка не перевищувала критичну температуру 55-60°C.

Кінетику сушіння м'ясної сировини досліджували при конвективному 55°C, 80°C, комбінованому інфрачервоно-конвективному 3800 Вт/м²+55°C способами у формі гранул 5 мм та кубиків 5x5x5 мм.

Тривалість при комбінованому способі 3800 Вт/м²+55°C для м'яса свинини у формі гранул у 1,7 р. є меншою у порівнянні із режимом 55°C. Найнижча швидкість є для зразків за режиму 55 °C, яка становить 1,7 %/хв, а найвища для комбінованого способу - 3,15 %/хв.

При дослідженні сушіння м'яса свинини у вигляді кубиків, спостерігаємо, що при сушінні за режиму 55°C тривалість становить 200 хв, а

за комбінованого режиму – 355 хв, тобто у 1,8 р довше. Ймовірно, це відбувається тому, що при утворенні гранул була порушена структура білків м'яса, в той час як у кубиках цільного м'яса вона не порушувалась і тому випаровування вологи з гранул відбувається краще, а від цього і інтенсивність процесу зневоднення вища.

Дослідження кінетики зневоднення м'яса яловичини проводили лише для гранул, оскільки сушити м'ясну сировину у вигляді кубиків енергетично недоцільно, як показали результати досліджень м'яса свинини. Тривалість сушіння при розробленому інфрачервоно-конвективному режимі є меншою в 1,25 рази у порівнянні із режимом 55°C.

Для культивованих грибів застосовували конвективний у діапазоні від 60°C до 100°C, інфрачервоний від 2000 Вт/м² до 3800 Вт/м², конвективний двоступеневий 100/60°C та комбінований інфрачервоно-конвективний 3800 Вт/м²+60°C способи.

Для конвективного двостадійного режиму, процес починався при температурі теплоносія 100°C до досягнення критичної температури матеріалу, далі температуру теплоносія зменшували до 60°C та продовжували процес.

Проведена порівняльна характеристика тривалості сушіння культивованих грибів при запропонованих ефективних режимах зневоднення. Не дивлячись на майже однакову початкову вологість, тривалість процесу для всіх грибів різна. Найшвидше піддаються зневодненню культивовані гриби глива звичайна 62 та 64 хв для конвективного двоступеневого та комбінованого інфрачервоно-конвективного режимів відповідно. На другому місці шийтаке із тривалістю 97 хв та 115 хв. Гриби ерінги мають найдовшу тривалість 145 хв та 160 хв при ефективних режимах у порівнянні з іншими культивованими грибами. Це залежить від хімічного складу кожного виду грибів, умов їх вирощування та зберігання тощо.

На основі проведених експериментальних досліджень кінетики сушіння м'ясної сировини та культивованих грибів було розроблено сушений

гранульований м'ясний продукт з підвищеним вмістом білку. У складі продукту присутня білкововмісна сировина як тваринного так і рослинного походження, а також овочі. Вдалося об'єднати ці інгредієнти таким чином, щоб утворився смачний корисний продукт із високим вмістом білку та достатньою кількістю харчових волокон.

Вперше було розроблено технологію сушеного м'ясного гранульованого продукту, який здійснюється наступним чином. М'ясна сировина, гриби, морква, селера проходить стадію підготовки з тепловою обробкою - гриби, селера, морква протягом 1 хв та м'ясна сировина 20 хв. Далі інгредієнти змішуються, гранулюються і після цього подаються на сушіння за комбінованим інфрачервоно-конвективним способом. Співвідношення компонентів гранульованого м'ясного продукту є наступним - м'ясо 60 %, гриби 20 %, селера 10 %, морква 10 %. Характер процесу зневоднення продукту наближений до кривих сушіння м'яса, оскільки саме цього інгредієнту у складі гранульованого продукту найбільше. Тривалість при комбінованому інфрачервоно-конвективному способі $3800 \text{ Вт/м}^2 + 55^\circ\text{C}$ становить 83 хв.

Розробка теплотехнології сушіння грибів потребує, в свою чергу, глибокого вивчення механізму та енергетики процесу їх зневоднення, який має певні особливості та відмінності порівняно із зневодненням рослинної сировини чи продукції тваринництва. Витрати теплоти на випаровування вологи з гриба печериці звичайної в процесі конвективно-кондуктивного сушіння вперше було визначено за допомогою диференціального мікрокалориметра випаровування ДМКИ-01, що поєднує в собі можливості калориметрії та термогравиметрії.

Момент самого початку випаровування не вдається зафіксувати через накладання процесу прогріву зразків до температури сушіння на процес випаровування з них вологи. Проте, майже відразу після прогрівання зразків спостерігається зростання витрат теплоти на випаровування води з тканин гриба печериці звичайної, їх загальний приріст у порівнянні з табличним

значенням для випаровування чистої води досягає 11 % до моменту досягнення тканинами гігроскопічної вологості.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що при зневодненні тканин гриба печериця істотно зростання енерговитрат на зневоднення відбувається вже на початкових етапах сушіння, досягає 11% перевищення понад табличним значенням для випаровування води з вільної поверхні до моменту досягнення тканинами гігроскопічної вологості та різко збільшується при спробах сушіння за межу їх гігроскопічної вологості.

Теплоємність тканин плодового тіла гриба печериця з вологістю $W = 0 - 95$ % відн. вперше було визначено в діапазоні $t = 32,5 - 87,5^{\circ}\text{C}$. Отримано експериментально сімейство кривих зміни теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця зі зміною їх вологості $C=f(W)$ при різній температурі зразків.

Значення теплоємності, вираховані за формулою достатньо добре (з середньою похибкою 2,12 %) співпадають з отриманими експериментальними даними. Окрім вологості гриба $W = 10$ % відн., при якій імовірно, відбулася деградація білкових структур гриба.

Ефективність процесу сушіння визначається критерієм оптимізації сушіння, який визначає відношення кількості теплоти, витраченої від нагрівання матеріалу до випаровування значної вологи за нескінченно малий проміжок часу. Було визначено критерій оптимізації сушіння Rb , що залежить від температури теплоносія та вологовмісту. Характер зміни критерію оптимізації сушіння доводить ефективність впровадження запропонованих режимів і свідчить про те, що теплота корисно витрачається на видалення вологи.

Проведено розрахунок тривалості та швидкості процесів сушіння білкововмісної сировини рослинного походження. Була побудована крива кінетики сушіння грибів ерінги при температурі теплоносія 60°C в координатах $W - N\text{max } \tau$, для визначення характеру процесу сушіння.

Визначено загальну розрахункову тривалість для оптимального температурного режиму.

Розроблена фізична та математична модель процесу сушіння сировини (колоїдних капілярно-пористих матеріалів). Процес конвективного сушіння відбувається наступним чином, сировина знаходиться на піддоні та обдувається верхня частина поверхні матеріалу і контактує з теплоносієм.

Розрахункові дослідження тепломасопереносу в колоїдному капілярно-пористому матеріалі, що відносяться до процесів конвекційного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів, виконуються на основі чисельного розв'язання системи рівнянь, до якої входять рівняння переносу вологи та рівняння переносу енергії.

Чисельні дослідження виконуються для випадку конвекційного сушіння зразка колоїдного капілярно-пористого матеріалу (культивованих грибів). Даний процес передбачає підвід теплоти конвективним способом від розігрітого повітряного потоку до матеріалу, який висушується. Зразок у формі прямокутного паралелепіпеда розміщується в сушильній камері, у яку подається розігрітий теплоносій.

Порівняння результатів чисельного моделювання процесів конвекційного сушіння зразка колоїдних капілярно-пористих матеріалів з експериментальними результатами показало їх достатньо задовільне якісне узгодження. Водночас спостерігається певна розбіжність у кількісних показниках даних результатів. Отже, розглянута розрахункова модель може бути використана для наближеного визначення характеристик процесу сушіння, зокрема часу.

У четвертому розділі досліджено кінетику сушіння білкововмісної сировини на дослідно-промисловій камерній сушарці із завантаженням до 100 кг, яка розроблена в Інституті технічної теплофізики НАН України. Для збільшення ефективності всередині камери змонтовані нагрівальні елементи, відповідно до руху теплового агента, які встановлені перед візками по всій їх висоті та розміщені навпроти піддонів. Характер процесу сушіння найбільш

точно описується кривими тривалості та швидкості сушіння. Було досліджено кінетику сушіння для м'ясної сировини за температури теплоносія $t = 60^{\circ}\text{C}$, швидкості руху теплоносія $V = 3 \text{ м/с}$, товщина матеріалу $\delta = 5 \text{ мм}$, вологовміст повітря $d = 10 \text{ кг/г с.п.}$ із зміною та без зміни напрямку потоку теплоносія. Процес триває 300 хв. Температура матеріалу зростає поступово протягом всього процесу для обох режимів. Однак, після зміни напрямку потоку теплоносія на 120 хв, видалення вологи у випадку зміни потоку теплоносія стає більш інтенсивним, починаючи із 150 хв експерименту. Тобто, вологість матеріалу при режимі без зміни потоку теплоносія становить 18 % на 300-ій хв., а при режимі зі зміною напрямку потоку - цю ж вологість досліджуваний зразок має вже на 250 хв. Даний розроблений спосіб дозволяє зменшити тривалість сушіння на 50 хв, або на 20 %. Найбільш доцільно, провести зміну напрямку на 120 хв або через 2 години, в області зниження видалення вологи з матеріалу. Максимальна швидкість сушіння без зміни напрямку потоку сушильного агенту складає 0,22 %/хв, а із зміною – 0,37 %/хв. Отже, максимальна швидкість сушіння зі зміною потоку теплоносія є в 1,68 раз вища.

Дослідження процесу сушіння культивованих грибів на дослідно-промисловій камерній сушарці проводили конвективним 60°C та комбінованим способом $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$. Зміна вологості на початку процесу відбувається однаково, проте після 45 хв експерименту спостерігається, що випаровування вологи матеріалу відбувається інтенсивніше при комбінованому способі і так триває до кінця процесу. Відповідно, за 300 хв експерименту за конвективного способу матеріал досягнув позначки вологості 35 %, а за комбінованого до 8 %. Для досягнення вологості матеріалу 8 % при температурі теплоносія 60°C тривалість процесу становить 390 хв, що на 90 хв довше, ніж при комбінованому $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$.

Визначено енергетичні витрати на процес зневоднення культивованих грибів на дослідно-промисловій камерній сушарці. На початку процесу перші 30 хв спостерігаємо високі енергетичні витрати на нагрів матеріалу 5400 кДж/кг випареної вологи. Далі, по мірі прогрівання, витрати енергії

зменшуються майже вдвічі та становлять 2440 кДж/кг випареної вологи. Це говорить про те, що матеріал прогрівся і почала випаровуватись волога. На даному етапі ми маємо найбільш енергоефективний показник. З 90 хв по 240 хв спостерігаємо більш-менш рівномірну витрату енергії, яка незначно зростає, а випаровування вологи в цей час зменшується. З 240 хв бачимо різке зростання витрат енергії при мінімальному випаровуванні вологи до 5335,5 кДж/кг випареної вологи. Це триває до 300 хв. При цьому енергія витрачається на нагрів матеріалу. Процес сушіння необхідно зупиняти. Середні витрати енергії на випаровування 1 кг вологи становить 3800 кДж. Розраховано коефіцієнт корисної дії сушарки, який при цих затратах становить 69 %.

У п'ятому розділі досліджено процеси подрібнення білкововмісної сировини рослинного походження на молотковій дробарці, в результаті чого отримано порошок із високим відсотком оптимальної фракції менше 0,5 мм. Виходячи із результатів досліджень, рекомендовано використовувати молоткову дробарку для подрібнення культивованих грибів.

Основними характеристиками, які дозволяють об'єктивно оцінити правильність підібраних режимів зневоднення, якість висушеного продукту вважаються залишкова вологість матеріалу, регідратаційні властивості, збереження біологічно активних речовин, хімічний склад, колірність тощо.

Вплив режимних параметрів при зневодненні, особливо температури теплоносія впливає на досліджуваний матеріал та може повністю або частково призводити до втрати біологічно активних речовин в залежності від методу сушіння, а також на відновлюваність.

Визначено відновлюваність для м'яса свинини у вигляді гранул та кубиків, а для яловичини лише для гранул. Температура витримки під час експериментального дослідження відновлюваності становила 45 °С та 90 °С. Було виявлено, що для гранул свинини навіть при температурі витримки 45 °С показник відновлюваності знаходиться в межах 130-170 %, а для кубиків – 100-120 %. За температури витримки 90 °С показник відновлюваності є ще вищим – 160-190 % для гранул, 120-130 % для кубиків. Як видно, загальна

тенденція спостерігається і для м'яса яловичини, що має показник відновлюваності – 185-195 %. Це свідчить про те, що розроблені режими зневоднення дозволяють зберегти якісні показники білкововмісної сировини тваринного походження на високому рівні.

Для визначення якості сухих грибів визначали відновлюваність за різних способів зневоднення та форми зразка (пластина, порошок). Показник відновлюваності є вищим для пластин, ніж для порошку для всіх представлених способів сушіння. Найвище значення відновлюваності культивованих грибів є для режимів сушіння 60°C, комбінованого 3800 Вт/м²+60°C та конвективного двоступеневого 100/60°C та знаходиться в межах від 79,7 % до 96,1 %.

Рівноважна вологість має важливе значення для розробки теплотехнологій отримання сухих білкововмісних харчових продуктів, оскільки визначає кінцевий вологовміст при сушінні, а також умови зберігання. Досліджено адсорбційні властивості культивованих грибів за різних способів зневоднення. Порівняння ізотерм адсорбції культивованих грибів показує, що маючи на однаковий характер цих ізотерм і однакові форми зв'язування води (адсорбційну, капілярну та осмотичну) в той же час суттєво відрізняються один від одного рівноважною вологістю. Це можна пояснити їх різним хімічним складом для кожного виду культивованих грибів.

Крім сорбційних властивостей було досліджено активність води. Досліджували зміну активності води a_w для м'ясної сировини у формі гранул та сушених культивованих грибів у формі порошку. Показник активності води для досліджуваних зразків знаходиться в межах 0,5, яка не перевищує норму для розвитку мікроорганізмів.

У шостому розділі було розроблено принципово-технологічні схеми та апаратурно-технологічні лінії для виробництва сухих білкововмісних продуктів.

Розробка сучасних теплотехнологій повинна вирішувати проблему раціонального використання одночасно сировинних, паливних та

енергетичних ресурсів. Оскільки це має як науковий, так і соціальний аспект, тому що при цьому формуються основи раціонального харчування і відповідно підвищується якість життя. Основними умовами отримання якісного сухого продукту при розробці теплотехнології є підготовка сировини до технологічної переробки, оптимальні режими сушіння та збереження біологічно активних речовин.

Розроблена принципово-технологічна схема отримання сушеного м'яса з свинини або яловичини включає в себе стадію миття сировини, нарізання на шматки 10-12 см, далі настає теплова обробка протягом 20 хв, гранулювання з розміром 5 мм, сушіння за енергоефективним комбінованим способом $3800 \text{ Вт/м}^2 + 55^\circ\text{C}$, охолодження до 20°C , пакування. Отримане сухе гранульоване м'ясо за розробленою теплотехнологією має яскравий виражений смак і аромат, властивий даній сировині в сухому вигляді, без сторонніх домішок.

Технологічний процес отримання харчового грибного порошку з культивованих грибів складається з кількох основних етапів: миття та інспекція сировини, нарізання, сушіння за енергоефективних способів конвективного двоступеневого $100/60^\circ\text{C}$ або комбінованого $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$, охолодження до 20°C , пакування. Отриманий грибний порошок за розробленою теплотехнологією має світлий колір, без сторонніх домішок, яскравий виражений смак і аромат сушених грибів, властивий даній сировині.

Принципово-технологічна схема отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту включає в себе підготовку м'ясної сировини, грибів, моркви та селери. Всі інгредієнти проходять теплову обробку (гриби та овочі 1-2 хв, м'ясна сировина 20 хв). Після цього всі інгредієнти продукту змішуються, гранулюються та сушаться при ефективному способі $3800 \text{ Вт/м}^2 + 55^\circ\text{C}$, охолоджується, пакується.

Поєднання м'яса із рослинною сировиною дає можливість запобігти окисленню жирів, при цьому покращуються органолептичні показники та збільшується харчова цінність продукту під час зберігання. Одержані сушені комбіновані гранули м'яса з грибами і рослинною сировиною чудово

набухають та відновлюються під час його використання. Завдяки низькій температурі сушіння м'ясо не оплавляється, тому не має твердості. Такий продукт підходить для застосування як самостійно так і у рецептурі продуктів швидкого приготування.

Для застосування розроблених теплотехнологій отримання сухого м'яса, грибного порошку, а також гранульованого м'ясного продукту були розроблені лінії виробництва, які складаються із різних ділянок: підготовки сировини до зневоднення, сушіння, охолодження, подрібнення, сепарації, пакування та складу готової продукції.

При розробці технологічної лінії виробництва сухих білкововмісних продуктів визначальним чинником продуктивності є потужність сушарки. Було обрано сушарку 2-х зонну на теплогенераторі ТФ2.02, з такими основними показниками: виробництво по сировині 0,23-0,26 т/год, встановлена потужність 32-34 кВт та виробнича площа становить 320 м².

Для малих фермерських господарств із застосуванням сушарки на 100 кг вихідної сировини було розраховано співвідношення витрат у відсотках на виготовлення білкововмісного порошку з культивованих грибів ерінги. Основними статтями витрат є: на сировину 62,6 %, на заробітну плату 11,3 %. Затрати електроенергії при цьому становлять 14,3 %. Очікуваний загальний річний економічний ефект від впровадження теплотехнології отримання грибного порошку складає для культивованих грибів ерінги 947 904,68 грн при терміні окупності 8,2 міс.

Практична реалізація запропонованої теплотехнології полягає у передачі результатів досліджень та впровадження грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку.

В загальних висновках наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

Наукова новизна одержаних результатів виражена у науковому обґрунтуванні теорії тепломасообміну під час зневоднення білкововмісної харчової сировини при тепломасоперенесенні в процесі сушіння, а саме:

- аналітичний аналіз методів підготовки та сушіння білкововмісної сировини дав змогу отримати нові рішення для вирішення проблем тепломасообміну в процесах сушіння;

- обґрунтовано вплив попередньої підготовки білкововмісної сировини до сушіння на тепло- та вологообмін в матеріалі і встановлені теплофізичні характеристики, які дозволили зменшити енерговитрати на 15 – 20 % із збереженням якості кінцевої продукції;

- встановлено залежність основних характеристик процесу сушіння за розробленими режимами при зневодненні білкововмісної сировини із зменшенням енерговитрат та максимальним збереженням біологічно активних речовин;

- *вперше* було визначено теплоту випаровування культивованих грибів, при цьому отримані під час сушіння значення питомих витрат теплоти на випаровування були представлені у вигляді залежності від поточного значення відносної вологості зразків, які показали складність випаровування з матеріалу у порівнянні з випаровуванням чистої води;

- *вперше* було визначено теплоємність культивованих грибів в діапазоні температур 32,5 – 87,5 С, експериментальні та теоретичні значення яких співпадають;

- встановлено залежність критерію оптимізації сушіння від вологовмісту матеріалу, що обґрунтовує ефективність розроблених режимів;

- за результатами чисельного моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів отримано графіки залежностей температури поверхні тепломасообміну та маси вологи від часу в зразку в процесі його сушіння;

- досліджено регідратаційні властивості сухих білкововмісних продуктів, отриманих при різних режимах сушіння та встановлено ефекти впливу режимів сушіння на відновлюваність отриманого продукту;
- досліджено енергоефективний процес сушіння білкововмісної сировини на дослідно-промисловій камерній сушарці, визначено енергетичні витрати на процес, які підтвердили доцільність вибраних режимів;
- визначено активність води для білкововмісної сировини як критерію збереження якості сировини;
- *вперше* визначено рівноважну вологість й оптимальні умови зберігання білкововмісних продуктів.

Практичне значення одержаних результатів:

- на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблено енергоефективні теплотехнології виробництва гранульованого м'ясного порошку з м'яса свинини, яловичини; грибного порошку з культивованих грибів шиїтаке, ерінгів, печериць та гливи звичайної та сушеного гранульованого м'ясного продукту.
- розроблено дослідно-промислові лінії отримання сухого продукту швидкого приготування із підвищеним вмістом білків;
- практична реалізація запропонованої теплотехнології полягає у передачі результатів досліджень до науково-дослідницького Інституту продовольчих ресурсів НААН для впровадження грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку;
- результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес НТУУ КПІ для підготовки фахівців за спеціальністю «Галузеве машинобудування»;
- на пріоритети нових способів подані патенти:
заявка на Патент України на Винахід № а202405902 від 12.12.2024 р.
«Спосіб одержання сушеного гранульованого м'ясного продукту»;

заявка на Патент України на Винахід № а202406176 від 24.12.2024 р.
«Спосіб одержання харчового порошку з грибів шиїтаке»,

заявка на Патент України на Винахід № а202500756 від 20.02.2025р
«Спосіб одержання м'ясного продукту швидкого приготування».

Ключові слова: тепломасобмін, кінетика, сушіння, регідратація, вологість, теплота випаровування, теплоємність, енергоефективність, м'ясо свинини та яловичини, культивовані гриби ерінги, шиїтаке, печериця, глива звичайна, сушарка на біомасі, комбінований нагрів, теплотехнологія, чисельне моделювання, математична модель, коефіцієнт дифузії, адсорбція.

ABSTRACT

Samoilenko K.M. Scientific principles of creating energy-efficient thermal technologies for obtaining protein-containing products. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.14.06 – "Technical thermal physics and industrial thermal power engineering", Institute of Engineering Thermophysics NAS Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the intensification of heat and mass transfer during the dehydration of protein-containing raw materials and the creation of energy-efficient heat technologies for obtaining protein-containing products from meat raw materials and cultivated mushrooms.

Ukraine's entry into the world trade market as an importing country of agricultural products necessitates the expansion of the capacities of the Ukrainian food industry. Increasing the competitiveness of Ukrainian products requires both improving their quality and expanding their range. In this regard, the development of heat technologies for domestic industrial production of dried natural protein-containing products from pork, beef, cultivated eryngium, shiitake, oyster mushrooms, and champignon mushrooms - an easily accessible source of proteins in Ukraine, seems quite promising.

Since the issues of energy resource conservation are particularly acute in the world and in Ukraine, which involves the rational use of electricity, fossil biofuels, the development and use of alternative fuels, renewable energy sources, and the use of energy-efficient dehydration modes, the main issues in the development of heat technologies are reducing energy consumption for the dehydration process and preserving biologically active substances.

The most modern processing method is drying, which allows you to extend the shelf life of raw materials that have a short shelf life.

Drying of wet materials is considered to be both a heat engineering and a technological process, during which the technological and biochemical properties of the material change. In most technologies, the total costs of the drying process are

50-70%. Therefore, to solve the problem of energy efficiency of heat technologies, it is necessary to solve, first of all, the efficiency of dehydration processes.

Modern methods of dehydration of protein-containing raw materials include both classical ones - sublimation, convective, conductive, spraying, and hybrid technologies, in particular microwave-vacuum, microwave-vacuum-convective, ultrasonic-vacuum, sublimation-infrared, and some of the latest technologies, such as cold plasma with infrared drying.

When studying the processes of dehydration of protein-containing raw materials, the degree of rehydration, product shrinkage, color retention, content of aroma-forming substances, chemical composition, etc. are mainly investigated. The use of hybrid technologies gave ambiguous results of energy and quality characteristics. It is worth noting that these combined drying methods are expensive. In this regard, the issue of energy efficiency and ensuring the preservation of biologically active substances of native raw materials requires additional research and development of new, but simple and reliable drying methods. Today, Ukraine does not have enough production for processing protein-containing raw materials, which allows preserving the quality of the native material.

Given the difficult energy situation both in Ukraine and in the world, an important stage in the development of heat technology for obtaining dry protein-containing products is energy consumption. Therefore, the processes of preparing raw materials for drying with subsequent dehydration by convective and combined methods were investigated in order to develop effective drying modes due to combined energy supply and obtaining a dry food product with a high protein content. Such instant products should be developed for easy use and a quick way to saturate with nutrients for people in extreme conditions, as well as military personnel and athletes.

The content of the dissertation research is presented in six sections, which present and substantiate the main results of the work.

The introduction substantiates the state of the scientific problem, its relevance and importance, which is solved in the dissertation work, formulates the

goal and objectives of the research, characterizes the scientific novelty and practical significance of the results obtained, provides information on the applicant's personal contribution and approbation of the research results, and presents the structure and scope of the dissertation work.

The first chapter analyzes the literature sources, which concern the main aspects of the prospects for the production of protein-containing food powders from pork, beef and cultivated mushrooms *eryngii*, shiitake, oyster mushrooms, champignons; features of the development of raw material preparation for dehydration, analyzes the processes of heat and mass transfer during drying of protein-containing raw materials from the point of view of energy efficiency of the process and preservation of biologically active substances of native raw materials. Based on the results of the study of literature sources, the purpose of this work and the tasks it solves were determined.

In the second chapter, a selection of research objects of food protein raw materials, which are produced in Ukraine and are promising for the production of protein products, is made, and its characteristics are given. For theoretical and experimental studies, the following were selected: meat raw materials - pork, beef, cultivated mushrooms - eringi, shiitake, oyster mushrooms, common champignons. These protein products are produced in Ukraine in large quantities. In particular, Ukrainian farmers are reviving entrepreneurship for the production, processing and sale of meat and dairy products, the number of small farms for the cultivation of cultivated mushrooms is increasing.

Methods for conducting experimental studies of the dehydration process, determination of thermophysical, sorption, rehydration, and qualitative properties of protein-containing raw materials are presented. A description and principle of operation of the experimental convective stand, DMKI-01 device, DSM-2M differential scanning microcalorimeter, hammer crusher, installation for studying the dispersed composition of plant raw materials, Aqualab3TE device are presented.

In the third chapter, analytical and experimental studies of the moisture-heat treatment of protein-containing raw materials were conducted, which showed the possibility of increasing their efficiency.

An analysis of the preparation of protein-containing raw materials for drying was conducted and it was found that mostly meat raw materials are processed into dry meat products in the form of slices, chips, sticks, flakes, etc., which are considered a useful quick snack. However, the use of meat raw materials in this form is impossible in instant products (dry soups, porridge, etc.), since in this case the meat product must have high recyclability.

The general trend of growing cultivated mushrooms is directed towards growth both in the world and in Ukraine. This is due to the increase in demand for consumption of mushrooms, which are considered useful and health-improving products. Accordingly, the issue of processing unconditioned raw materials is relevant.

One of the main problems in drying meat products is surface hardening or crusting. The surface layer is harder and less permeable than the interior of the product. A sharp increase in hardness during drying has been found in cured meat products when the water content reaches a critical value.

Taking into account these factors, a preliminary preparation of meat raw materials for drying was developed, which includes heat treatment for 20 minutes. The size and shape of the raw materials were determined, which allows for effective preparation and drying. The proposed method of pre-treatment of protein-containing raw materials made it possible to reduce energy consumption during drying.

The kinetics of dehydration of protein-containing raw materials was studied. The most energy-intensive methods of dehydration are sublimation, vacuum, and others. Taking this into account, we studied less energy-intensive methods - convective, infrared dehydration, and a combination of these two methods.

Many experimental studies have been conducted to determine the influence of changes in the speed of the heat carrier and the thickness of the layer on the drying process of protein-containing raw materials. It is worth noting that the higher the

speed of the heat carrier, the shorter the duration of the process. Accordingly, the smaller the thickness of the sample under study, the shorter the duration.

The optimal modes for reducing the process duration were determined. These modes turned out to be convective two-stage and combined.

The combined mode occurs as follows: at the beginning of the process, heat is supplied to the sample from two energy carriers (infrared radiation and convective). When the sample reaches the critical temperature for protein-containing raw materials, one of the heat carriers is turned off - infrared radiation, and dried using the convective method until the end of the process. At the same time, the sample temperature does not exceed the critical temperature of 55-60°C.

The drying kinetics of meat raw materials were studied using convective 55°C, 80°C, and combined infrared-convective 3800 W/m²+55°C methods in the form of 5 mm granules and 5x5x5 mm cubes.

The duration of the combined method of 3800 W/m²+55 °C for pork meat in the form of granules is 1.7 years shorter than in the 55 °C mode. The lowest rate is for samples in the 55 °C mode, which is 1.7%/min, and the highest for the combined method is 3.15%/min.

When studying the drying of pork meat in the form of cubes, we observe that when drying at 55 °C, the duration is 200 min, and in the combined mode - 355 min, i.e. 1.8 times longer. This is probably because the structure of meat proteins was disturbed during the formation of granules, while in whole meat cubes it was not disturbed and therefore the evaporation of moisture from the granules is better, and therefore the intensity of the dehydration process is higher.

The study of the kinetics of dehydration of beef meat was carried out only for granules, since drying meat raw materials in the form of cubes is energetically impractical, as the results of the research on pork meat showed. The drying duration in the developed infrared-convective mode is 1.25 hours shorter than in the 55°C mode.

For cultivated mushrooms, convective in the range from 60 to 100°C, infrared from 2000 to 3800 W/m², two-stage convective 100/60°C and combined infrared-convective 3800 W/m² +60°C methods were used.

For the convective two-stage mode, the process began at a coolant temperature of 100°C until the critical temperature of the material was reached, then the heat carrier temperature was reduced to 60 °C and the process continued.

A comparative characteristic of the drying duration of cultivated mushrooms under the proposed effective dehydration regimes was carried out. Despite the almost identical initial humidity, the duration of the process for all mushrooms is different. The fastest dehydrated cultivated mushrooms are oyster mushrooms, 62 and 64 min for the convective two-stage and combined infrared-convective regimes, respectively. Shiitake is in second place with a duration of 97 min and 115 min. Eringi mushrooms have the longest duration of 145 min and 160 min under effective regimes compared to other cultivated mushrooms. This depends on the chemical composition of each type of mushroom, the conditions of their cultivation and storage, etc.

Based on experimental studies of the drying kinetics of meat raw materials and cultivated mushrooms, a dried granulated meat product with a high protein content was developed. The product contains protein-containing raw materials of both animal and plant origin, as well as vegetables. It was possible to combine these ingredients in such a way as to form a tasty, healthy product with a high protein content and a sufficient amount of dietary fiber.

For the first time, a method for obtaining a dried meat granulated product was developed, which is carried out as follows. Raw meat, mushrooms, carrots, celery undergo a preparation stage with heat treatment - mushrooms, celery, carrots for 1 min and raw meat for 20 min. Next, the ingredients are mixed, granulated and then sent for drying using a combined infrared-convective method. The ratio of the components of the granulated meat product is as follows - meat 60%, mushrooms 20%, celery 10%, carrots 10%. The nature of the product dehydration process is close to the meat drying curves, since this ingredient is the most abundant in the

granulated product. The duration of the combined infrared-convective method of $3800 \text{ W/m}^2 + 55 \text{ }^\circ\text{C}$ is 83 min.

The development of thermal technology for drying mushrooms requires, in turn, a deep study of the mechanism and energetics of the process of their dehydration, which has certain features and differences compared to the dehydration of plant raw materials or livestock products. The heat consumption for the evaporation of moisture from the common champignon mushroom in the process of convective-conductive drying was first determined using the DMKI-01 differential evaporation microcalorimeter, which combines the capabilities of calorimetry and thermogravimetry.

The moment of the beginning of evaporation cannot be recorded due to the overlapping of the process of heating the samples to the drying temperature on the process of evaporation of moisture from them. However, almost immediately after heating the samples, an increase in heat consumption for the evaporation of water from the tissues of the common champignon mushroom is observed, their total increase compared to the tabular value for the evaporation of pure water reaches 11% by the time the tissues reach hygroscopic humidity.

The obtained results allow us to state that during dehydration of champignon mushroom tissues, a significant increase in energy consumption for dehydration occurs already at the initial stages of drying, reaching an 11% excess over the tabular value for evaporation of water from the free surface by the time the tissues reach hygroscopic humidity and sharply increases when attempting to dry beyond their hygroscopic humidity.

The heat capacity of the fruiting body tissues of the champignon mushroom with relative humidity $W = 0 - 95\%$ was first determined in the range $t = 32.5 - 87.5^\circ\text{C}$. A family of curves of changes in the heat capacity of the fruiting body tissues of the champignon mushroom with changes in their humidity $C=f(W)$ at different sample temperatures was experimentally obtained.

The values of heat capacity calculated by the formula are quite good (with an average error of 2.12%) and coincide with the obtained experimental data. In

addition to the humidity of the fungus $W = 10\%$ rel., at which the degradation of the protein structures of the fungus probably occurred.

The efficiency of the drying process is determined by the drying optimization criterion, which determines the ratio of the amount of heat spent from heating the material to the evaporation of significant moisture in an infinitely small period of time. The number of the drying optimization criterion depends on the temperature of the coolant and moisture content. The nature of the change in the drying optimization criterion proves the effectiveness of the implementation of the proposed modes and indicates that the heat is usefully spent on moisture removal.

The duration and speed of drying processes of protein-containing raw materials of plant origin were calculated. We construct a curve of the kinetics of drying of *eryngii* mushrooms at a coolant temperature of 60°C in the coordinates $W - N_{max} \tau$, to determine the nature of the drying process. The total estimated duration for the optimal temperature regime was determined.

A physical and mathematical model of the drying process of cultivated mushrooms (colloidal capillary-porous materials) has been developed. The convective drying process occurs as follows: the raw material is placed on a pallet and the upper part of the material surface is blown and comes into contact with the heat carrier.

Computational studies of heat and mass transfer in colloidal capillary-porous materials, related to the processes of convection drying of colloidal capillary-porous materials, are performed on the basis of numerical solution of a system of equations, which includes the moisture transfer equation and the energy transfer equation.

Numerical studies are performed for the case of convection drying of a sample of colloidal capillary-porous material. This process involves the supply of heat by convection from a heated air flow to the material being dried. The sample in the form of a rectangular parallelepiped is placed in a drying chamber, into which a heated coolant is supplied.

Comparison of the results of numerical modeling of the processes of convection drying of a sample of colloidal capillary-porous materials with the

experimental results showed their quite satisfactory qualitative agreement. At the same time, there is a certain discrepancy in the quantitative indicators of these results. Therefore, the considered computational model can be used for an approximate determination of the characteristics of the drying process, in particular the time.

The fourth chapter investigates the kinetics of drying protein-containing raw materials in a pilot-industrial chamber dryer with a load of up to 100 kg, which was developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. To increase efficiency, heating elements are mounted inside the chamber, in accordance with the movement of the thermal agent, which are installed in front of the carts along their entire height and placed opposite the pallets. The nature of the drying process is most accurately described by the curves of the duration and drying speed. The drying kinetics for meat raw materials were investigated at a coolant temperature of $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, a coolant speed of movement of $V = 3\text{ m/s}$, a material thickness of $\delta = 5\text{ mm}$, and an air moisture content of $d = 10\text{ kg/g}$ dry air with and without changing the direction of the coolant flow. The process lasts 300 min. The material temperature increases gradually throughout the process for both modes. However, after changing the direction of the coolant flow for 120 min, moisture removal in the case of changing the coolant flow becomes more intense, starting from 150 min of the experiment. That is, the moisture content of the material in the mode without changing the coolant flow is 18% at the 300th min, and in the mode with changing the flow direction - the same moisture content of the sample under study is already at 250 min. This developed method allows you to reduce the drying time by 50 min, or by 20%. It is most advisable to change the direction for 120 min or after 2 hours, in the area of reducing moisture removal from the material. The maximum drying rate without changing the direction of the drying agent flow is 0.22%/min, and with changing it - 0.37%/min. Therefore, the maximum drying rate with changing the coolant flow is 1.68 times higher.

The study of the drying process of cultivated mushrooms in an experimental and industrial chamber dryer was carried out using a convective 60°C and a

combined method of $3800 \text{ W/m}^2+60^\circ\text{C}$. The change in humidity at the beginning of the process occurs in the same way, but after 45 minutes of the experiment it is observed that the evaporation of moisture from the material occurs more intensively with the combined method and continues until the end of the process. Accordingly, in 300 minutes of the experiment, the material reached a humidity level of 35% with the convective method, and up to 8% with the combined method. To achieve a material humidity of 8% at a coolant temperature of 60°C , the process duration is 390 minutes, which is 90 minutes longer than with the combined $3800 \text{ W/m}^2+60^\circ\text{C}$.

The energy costs for the process of dehydration of cultivated mushrooms in an experimental and industrial stone dryer were determined. At the beginning of the process, for the first 30 minutes, we observe high energy costs for heating the material, 5400 kJ/kg of evaporated moisture. Then, as it warms up, the energy costs decrease almost by half and amount to 2440 kJ/kg of evaporated moisture. This indicates that the material has warmed up and moisture has begun to evaporate. At this stage, we have the most energy-efficient indicator. From 90 min to 240 min, we observe a more or less uniform energy consumption, which increases slightly, and moisture evaporation at this time decreases. From 240 min, we see a sharp increase in energy costs with minimal moisture evaporation to 5335.5 kJ/kg of evaporated moisture. This continues up to 300 min. In this case, energy is spent on heating the material. The drying process must be stopped. The average energy consumption for evaporation of 1 kg of moisture is 3800 kJ. The efficiency of the dryer was calculated, which at these costs is 69%.

In the fifth chapter, the processes of grinding protein-containing raw materials of plant origin in a hammer mill were investigated, as a result of which a powder with a high percentage of the optimal fraction of less than 0.5 mm was obtained. Based on the research results, it is recommended to use a hammer mill for grinding cultivated mushrooms.

The main characteristics that allow us to objectively assess the correctness of the selected dehydration modes and the quality of the dried product are the residual

moisture of the material, rehydration properties, preservation of biologically active substances, chemical composition, color, etc.

The influence of operating parameters during dehydration, especially the temperature of the coolant, affects the material under study and can completely or partially lead to the loss of biologically active substances depending on the drying method, as well as on the recoverability.

The recoverability was determined for pork meat in the form of granules and cubes, and for beef only for granules. The holding temperature during the experimental study of recoverability was 45 °C and 90 °C. It was found that for pork pellets, even at a holding temperature of 45 °C, the recoverability index is within 130-170%, and for cubes - 100-120%. At a holding temperature of 90 °C, the recoverability index is even higher - 160-190% for pellets, 120-130% for cubes. As can be seen, the general trend is also observed for beef meat, which has a recoverability index of 185-195%. This indicates that the developed dehydration modes allow maintaining the quality indicators of protein-containing raw materials of animal origin at a high level.

To determine the quality of dried mushrooms, the recoverability was determined for different dehydration methods and sample forms (plate, powder). The recoverability index is higher for plates than for powder for all presented drying methods. The highest value of the recoverability of cultivated mushrooms is for drying modes 60°C, combined 3800 W/m²+60°C and convective two-stage 100/60°C and is in the range from 79.7% to 96.1%.

Equilibrium humidity is important for the development of thermal technologies for obtaining dry protein-containing food products, since it determines the final moisture content during drying, as well as storage conditions. The adsorption properties of cultivated mushrooms under different dehydration methods were studied. Comparison of adsorption isotherms of cultivated mushrooms shows that, having the same nature of these isotherms and the same forms of moisture binding (adsorption, capillary and osmotic), at the same time they significantly differ

from each other in equilibrium humidity. This can be explained by their different chemical composition for each type of cultivated mushrooms.

In addition to the sorption properties, water activity was investigated. The change in water activity a_w for meat raw materials in the form of granules and dried cultivated mushrooms in the form of powder was investigated. The water activity indicator for the studied samples is within 0.5, which does not exceed the norm for the development of microorganisms.

In the sixth chapter, principle and technological schemes and equipment and technological lines for the production of dry protein-containing products were developed.

The development of modern heat technologies should solve the problem of rational use of raw materials, fuel and energy resources at the same time. Since this has both a scientific and social aspect, because at the same time the foundations of a rational diet are formed and, accordingly, the quality of life increases. The main conditions for obtaining a high-quality dry product when developing heat technology are the preparation of raw materials for technological processing, optimal drying modes and preservation of biologically active substances.

The developed principle and technological scheme for obtaining dried meat from pork or beef includes the stage of washing raw materials, cutting into pieces of 10-12 cm, heat treatment for 20 min, granulation with a size of 5 mm, drying using an energy-efficient combined method of $3800 \text{ W/m}^2+55^\circ\text{C}$, cooling to 20°C , packaging. The obtained dried meat using the developed heat technology has a bright pronounced taste and aroma inherent in this raw material in a dry form, without foreign impurities.

The technological process of obtaining edible mushroom powder from cultivated mushrooms consists of several main stages: washing and inspection of raw materials, cutting, drying using energy-efficient methods of convective two-stage $100/60^\circ\text{C}$ or combined $3800 \text{ W/m}^2+60^\circ\text{C}$, cooling to 20°C , packaging. The mushroom powder obtained using the developed heat technology has a light color,

no foreign impurities, a bright pronounced taste and aroma of dried mushrooms, inherent in this raw material.

The principle and technological scheme for obtaining a dried granulated meat product includes the preparation of meat raw materials, mushrooms, carrots and celery. All ingredients undergo heat treatment (mushrooms and vegetables 1-2 min, meat raw materials 20 min). After that, all the ingredients of the product are mixed, granulated and dried using an effective method of $3800 \text{ W/m}^2 + 55^\circ\text{C}$, cooled, packaged.

The combination of meat with vegetable raw materials makes it possible to prevent fat oxidation, while improving organoleptic characteristics and increasing the nutritional value of the product during storage. The resulting dried combined granules of meat with mushrooms and vegetable raw materials swell and recover perfectly during use. Due to the low drying temperature, the meat does not melt, therefore it is not hard. Such a product is suitable for use both independently and in the formulation of instant products.

To apply the developed heat technologies for obtaining dried meat, mushroom powder, as well as granulated meat products, production lines were developed, consisting of various sections: preparation of raw materials for dehydration, drying, cooling, grinding, separation, packaging and storage of finished products.

When developing a technological line for the production of dry protein-containing products, the determining factor in productivity is the dryer capacity. A 2-zone dryer was used on a TF2.02 heat generator, with the following main indicators: production by raw material 0.23-0.26 t/h, installed capacity 32-34 kW and production area 320 m^2 .

For small farms using a dryer per 100 kg of raw material, the ratio of costs in percent for the production of protein-containing powder from cultivated eryngium mushrooms was calculated. The main cost items are: 62.6% for raw materials, 11.3% for wages. Electricity costs are 14.3%. The expected total annual economic effect from the implementation of the heat technology for obtaining mushroom powder is

UAH 947,904.68 for cultivated mushrooms *eryngii* with a payback period of 8.2 months.

The practical implementation of the proposed heat technology consists in transferring the results of research and introducing mushroom powder into the technology of obtaining sausage products in order to expand the range of food products with a high protein content.

The general conclusions provide a list of the main scientific and practical results obtained in the dissertation work.

The scientific novelty of the obtained results is expressed in the scientific substantiation of the theory of heat and mass transfer during dehydration of protein-containing food raw materials during heat and mass transfer during the drying process, namely:

- analytical analysis of methods for preparing and drying protein-containing raw materials made it possible to obtain new solutions for solving problems of heat and mass transfer in drying processes;

- the influence of preliminary preparation of protein-containing raw materials before drying on heat and moisture exchange in the material was substantiated and thermophysical characteristics were established, which allowed reducing energy consumption by 15 - 20% while maintaining the quality of the final product;

- the dependence of the main characteristics of the drying process on the developed modes for dehydration of protein-containing raw materials with reduced energy consumption and maximum preservation of biologically active substances was established;

- ***for the first time***, the heat of vaporization of cultivated mushrooms was determined, while the values of specific heat consumption for vaporization obtained during drying were presented as a dependence on the current value of the relative humidity of the samples, which showed the difficulty of evaporation from the material compared to the evaporation of pure water;

- *for the first time*, the heat capacity of cultivated mushrooms was determined in the temperature range of 32.5–87.5 °C, the experimental and theoretical values of which coincide;

- the dependence of the drying optimization criterion on the moisture content of the material was established, which substantiates the effectiveness of the developed modes;

- based on the results of numerical modeling of heat and mass transfer during convective drying of colloidal capillary-porous materials, graphs of the dependences of the temperature of the heat and mass exchange surface and the mass of moisture on time in the sample during its drying process were obtained;

- the rehydration properties of dry protein-containing products obtained under different drying modes were investigated and the effects of the influence of drying modes on the recoverability of the obtained product were established;

- the energy-efficient process of drying protein-containing raw materials on a pilot-industrial chamber dryer was investigated, the energy costs for the process were determined, which confirmed the feasibility of the selected modes;

- the water activity for protein-containing raw materials was determined as a criterion for preserving the quality of raw materials;

- *for the first time*, the equilibrium humidity and optimal storage conditions for protein-containing products were determined.

Practical significance of the results obtained:

- Based on the results of theoretical and experimental research, energy-efficient heat technologies for the production of granulated meat powder from pork and beef; mushroom powder from cultivated shiitake mushrooms, eryngii, champignons and oyster mushrooms, and dried granulated meat product have been developed;

- Experimental and industrial lines for producing a dry instant product with a high protein content have been developed;

- The practical implementation of the proposed heat technology consists in transferring the research results to the Research Institute of Food Resources of the NAAS for the introduction of mushroom powder into the technology for producing sausage products in order to expand the range of food products with a high protein content;

- The results of the dissertation work have been implemented in the educational process of NTUU KPI for the training of specialists in the specialty "Industrial Mechanical Engineering";

- patents filed on priorities of new methods:

application for the Patent of Ukraine for Invention No. a202405902 dated 12.12.2024 «Method for obtaining a dried granulated meat product»;

application for the Patent of Ukraine for Invention No. a202406176 dated 12.24.2024 «Method for obtaining food powder from shiitake mushrooms»,

application for the Patent of Ukraine for Invention No. a202500756 dated 02.20.2025 «Method for obtaining a quick-cooking meat product».

Keywords: heat and mass transfer, kinetics, drying, rehydration, humidity, heat of vaporization, heat capacity, energy efficiency, pork and beef meat, cultivated eryngii mushrooms, shiitake, champignon, oyster mushroom, biomass dryer, combined heating, heat technology, numerical modeling, mathematical model, diffusion coefficient, adsorption.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав та у виданнях України, що індексовані в міжнародних наукометричних базах даних (*Scopus та Web of Science*):

1. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Bessarab, O., **Samoilenko, K.**, Grakov, D., & Petrov, P. (2023). Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 12 (3). 444-457. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-3-10> [Фахове видання, SCOPUS, Q3] (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних)
2. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P., Vyshnievskyi, V., & Petrov, A. (2024). Adsorption properties of fast-food products. *Journal of Chemistry and Technologies*. 32(4). 1030-1038. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.302324> [Фахове видання, категорія А, SCOPUS, Q4]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз)
3. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Vyshnevskyi, V., Petrov, P., & Koval I. (2024). The energy-efficient chamber dryer for drying meat products. *Food Science and Technology*. 18(4), 74-81. <https://doi.org/10.15673/fst.v18i4.3142> [Фахове видання, категорія А, Web of Science, Q4, SCOPUS, Q4]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації)
4. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Slobodianiuk, K., Petrov, P. (2025). Drying of protein-carotene-containing raw materials based on carrot and fabaceae. *Journal of Chemistry and Technologies*, 33(2), 401-417 <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v33i2.320931> [Фахове

видання, категорія А, SCOPUS, Q4]. (*Внесок здобувача: проведений огляд літератури за даною тематикою, підготовка матеріалів до публікації*).

5. Sniezhkin, Yu.F., Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O., **Samoilenko, K.M.**, Petrov, A.I., Biriukov, S.O. (2025). Energy-efficient low-temperature unit of condensation type for drying seed grain. *Energy Technologies & Resource Saving*, 82(1), 127-137. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.09> [Фахове видання, категорія А, SCOPUS, Q4]. (*Внесок здобувача: проведений огляд літератури за даною тематикою, підготовка матеріалів до публікації*).

6. Petrova, Z., Novikova, Y., Petrov, A., **Samoilenko, K.**, Golodryga, M. (2025). Peat processing into composite fuel. *Paliva*, 17(1), 13-19. <https://doi.org/10.35933/paliva.2025.01.03> [SCOPUS, Q4]. (*Внесок здобувача: проведений огляд літератури за даною тематикою, підготовка матеріалів до публікації*).

7. Sniezhkin, Y., Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Y., Vyshnievska, T. (2025). Research of sorption of composites based on municipal solid waste and biomass. *Vidnovluyana energetika*, 1(80), 159-167. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).159-167](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).159-167) [Фахове видання, категорія А, SCOPUS, Q4]. (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*).

8. Sniezhkin, Yu., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Dakhnenko, V., Biriukov, S. (2025). Renewable energy sources in heat pumps for energy efficient low-temperature drying of seed grain. *Vidnovluyana energetika*, 2, 173-181 [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\)173-181](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81)173-181) [Фахове видання, категорія А, SCOPUS, Q4]. (*Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень*).

Статті у наукових фахових виданнях України:

9. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., **Samoilenko, K.M.**, Vishnevsky, V.M. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. *Енергетика та автоматика*, 6, 15-27. <https://doi.org/10.31548/energiya2020.06.015> [Фахове видання, Index

Copernicus, Google Scholar та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

10. Petrova Zh., **Samoilenko K.**, Vishnevsky V. (2020). Processes of heat and mass transfer during drying of red beetroot. *Energy Engineering and Control Systems*, 6(2), 81 – 87. <https://doi.org/10.23939/jeecs2020.02.081> [Фахове видання, Google Scholar, CrossRef та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

11. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., **Самойленко, К.М.** (2021). Комплексна енергоефективна теплотехнологія одержання антиоксидантного буряково-томатного барвнику та насіння томатів. *Scientific Works*, 85(1), 34-42. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i85.2239> [Фахове видання, Index Copernicus, Google Scholar та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації).

12. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.** (2021). Adsorption Properties of Combined Vegetable Powders. *Energy Engineering and Control Systems*, 7(1), 38 – 47. <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.01.038> [Фахове видання, Google Scholar, CrossRef та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

13. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P. (2022). Equilibrium humidity as one of important energy-efficiency indexes in drying of food powder materials of biological nature. *Energy Engineering and Control Systems*, 8(2), 90–97. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.090>. [Фахове видання, Google Scholar, CrossRef та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації).

14. Petrova, Zh., Slobodianiuk, K., **Samoilenko, K.**, Vishnevsky, V., Grakov O. (2022). Research of the kinetics of the drying process of combined plant

materials. *Scientific Works*, 86(1), 69-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2406> [Фахове видання, Index Copernicus, Google Scholar та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

15. Петрова, Ж. О., Кузнєцова, І. В., **Самойленко, К.М.** (2023). Зниження енергоємності процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів шляхом застосування комбінованих методів сушіння на прикладі *Pleurotus Eryngii*. *Продовольчі ресурси*, 11(21), 141-148. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-14> [Фахове видання, Google Scholar та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

16. Давиденко, Б.В., **Самойленко, К.М.** (2024). Теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів як об'єктів сушіння. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(2), 42-51. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.5> [Фахове видання, Google Scholar та ін]. (Внесок здобувача: теоретичний розрахунок досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

17. Петрова, Ж.О., Кузнєцова, І.В., **Самойленко, К.М.**, Петров, П.І., Маноха, Д.О. (2025). Переробка білкововмісної рослинної сировини на сухий продукт. *Продовольчі ресурси*, 13(24), 33-44. <https://doi.org/10.31073/foodresources2025-24-03> [Фахове видання, Google Scholar та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

18. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.** (2025). Research on convective drying of common oyster mushroom. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 50(4), 67-74. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.7> [Фахове видання, Google Scholar та ін]. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

Монографії:

19. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu., **Samoilenko, K.** (2021). *Blending and drying of antioxidant raw materials*. Monograph. LLC “Tvory”, 107. ISBN 978-966-949-760-4. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/03/monografija2.1.pdf> (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

20. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., **Самойленко, К.М.**, Слободянюк, К.С. (2022). *Тепломасообмінні процеси отримання комбінованих функціональних порошків*. Монографія. Тропеа, 148. ISBN 978-617-789-60-4. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/09/monografija-teplomasoobminni-procesi-0.pdf> (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

Колективні монографії:

21. Slobodianiuk K.S., **Samoilenko K.M.** (2020). Research of heat and mass transfer during convective drying of colloid capillary-porous materials. *Integration of traditional and innovation processes of development of modern science*. Riga, Latvia. “Baltija Publishing”, 227-245. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-021-6-39> (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

22. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Paziuk, V., Mykhailyk, V., Korinchevska, T., **Samoilenko, K.** (2023). Technological aspects of producing refuse derived fuel. TEC031000 Power Resources / General Publishing monograph indexed SCOPUS <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-02-3.ch3> , p. 76-105. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

23. Petrova, Zh. O., **Samoilenko, K. M.** (2024). Convective drying of Shiitake mushrooms with a focus on functionality and naturalness. *Responsible production and consumption: realization in new generations of food products: Scientific monograph*. Riga, Latvia. “Baltija Publishing”, 266-282. ISBN 978-9934-26-445-0 <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-11> (Внесок здобувача:

проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації).

Охоронні документи:

24. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., **Самойленко, К.М.**, Вишнівський, В.М., Петров, П.І. (2024). Спосіб одержання сушеного гранульованого м'ясного продукту (Заявка № а202405902). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». *(Внесок здобувача: розробка способу одержання сушеного гранульованого м'ясного продукту, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).*

25. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., **Самойленко, К.М.**, Петров, А.І. (2024). Спосіб одержання харчового порошку з грибів шиїтаке. (Заявка № а202406176 від 24.12.2024 р.). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». *(Внесок здобувача: розробка способу одержання харчового порошку з грибів шиїтаке, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).*

26. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., **Самойленко, К.М.**, Петров, П.І. (2025). Спосіб одержання м'ясного продукту швидкого приготування. (Заявка № а202500756). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». *(Внесок здобувача: розробка способу одержання м'ясного продукту швидкого приготування, проведення досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних та патентний пошук).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. **Самойленко, К.М.** (2021). Сучасні методи сушіння грибів шиїтаке (*lentinula edodes*). *Збірник тез доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" КПП ім. Ігоря*

Сікорського, 89-91. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

28. Петрова ,Ж.О., **Самойленко, К.М.** (2021). Рівноважна вологість сухих продуктів швидкого приготування (горохово-морквяного супу-пюре). *Збірник тез доповідей XXIX всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів" КПП ім. Ігоря Сікорського*, 30-33. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації).

29. Petrova, Zh.O., **Samoilenko, K.M.**, Novikova, Yu.P., Vyshnievska, T.A. (2022). Investigation of the adsorption properties of powder-form colloidal capillary-porous materials based carrot. *Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»*, 9-10. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

30. Петрова Ж.О., **Самойленко К.М.**, Новікова Ю.П., Граков Д.П. (2022). Адсорбційні властивості сухих функціональних продуктів швидкого приготування. *Збірник тез: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні досягнення біотехнології» Національний авіаційний університет* 76-78. <https://doi.org/10.18372/2306-6407.1.17168> (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

31. **Самойленко, К.М.** (2022). Адсорбційні властивості колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи. *Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (5-7 грудня 2022 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПП ім. Ігоря Сікорського», 95-97. (Внесок здобувача: проведення експериментальних*

досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації).

32. Petrova, Zh., Novikova, Yu., **Samoilenko, K.**, Petrov, P. (2023). Adsorption studies of functional quick cooking products on the example of borsch. *Theoretical and practical aspects of modern scientific research: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Seoul-Vinnytsia: Case Co., Ltd. & European Scientific Platform, UDC001 (08)*. ISBN 978-617-8126-69-8. ISBN 978-89-5764-769-1 (PDF). 84-85. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

33. **Самойленко, К.М.**, Пазюк, В.М. (2023). Енергоефективність в процесах сушіння при переробці колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи. *XIII Міжнародна онлайн конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, 56. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

34. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Slobodianiuk, K., Novikova, Yu. (2025). Adsorption research of pea puree soup. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC*, 143-145. <https://doi.org/10.36074/logos-04.04.2025.029> (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

35. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu. (2025). Effect of heat carrier temperature during convective drying of cultivated shiitake mushrooms. *The international conference food for life “Evolution of Sugar: Advanced Technologies for the Next Generation Bioeconomy”*, 73-75. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

36. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P., Yurchak, O. (2025). The Influence of Dehydration Mode on the Duration of the Drying Process of Protein-Containing Raw Materials of Animal Origin. *5th International Scientific Conference Chemical Technology and Engineering*. Lviv, Ukraine, 389-394. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
37. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.** (2025). The influence of mode parameters on the drying duration of cultivated mushrooms. *Збірник тез доповідей XVI міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»* Інститут технічної теплофізики НАН України, 49. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).
38. **Самойленко, К.М.**, Вишнівська, Т.А. (2025). Залежність коефіцієнту набухання від режимів сушіння м'яса свинини. *Збірник тез доповідей XVI міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*. Інститут технічної теплофізики НАН України, 146. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів до публікації).
39. Петрова, Ж., Дмитренко, Н., **Самойленко, К.** (2025). Теплота випаровування води із плодового тіла гриба печериці звичайної (*agaricus campestris*) при різних температурах. *Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сучасної теплоенергетики, присвячена 105-річчю від дня народження професора Драганова Бориса Харлампійовича*, 14-16. (Внесок здобувача: проведення літературного огляду, підготовка матеріалів до публікації).
40. Дмитренко, Н.В., Іванов, С.О., **Самойленко, К.М.** (2026). Вплив температури та зневоднення на питому теплоємність плодового тіла гриба печериця. *The 2nd International scientific and practical conference "Scientific development in a changing world" SPC "Sci-conf.com.ua"*, Lviv, Ukraine. 206-208.

ISBN 978-966-8219-80-1. (Внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз експериментальних даних).

41. Дмитренко, Н.В., **Самойленко, К.М.** (2026). Специфіка видалення зв'язаної води з тканин плодового тіла гриба печериця звичайна при сушінні. *The 4th International scientific and practical conference "European science and innovation congress" Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 157-159.* (Внесок здобувача: проведення літературного огляду, підготовка матеріалів до публікації).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	48
ВСТУП	49
РОЗДІЛ 1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД СТАНУ, СПОСОБІВ ТА МЕТОДІВ ЗНЕВОДНЕННЯ БІЛКОВОВМІСНОЇ СИРОВИНИ	58
1.1. Основні методи переробки та сушіння м'яса свинини та яловичини	60
1.2. Аналіз сучасного стану переробки та сушіння культивованих грибів	68
1.3. Характеристика сушильного обладнання для переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження	119
1.4. Висновки до першого розділу та завдання дослідження	129
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	132
2.1. Білкововмісна сировина тваринного походження як об'єкт досліджень	132
2.2. Білкововмісна сировина рослинного походження як об'єкт досліджень	137
2.3. Методи досліджень білкововмісної сировини	144
2.4. Експериментальні установки проведення досліджень	156
2.5. Похибка обробки результатів експериментів	165
2.6. Висновки до другого розділу	167
РОЗДІЛ 3. ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ПРИ СУШІННІ БІЛКОВОВМІСНОЇ СИРОВИНИ	169
3.1. Підготовка білкововмісної сировини тваринного походження свинини та яловичини до зневоднення	170
3.2. Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини тваринного походження на конвективному сушильному стенді	173

3.3. Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини рослинного походження з культивованих грибів ерінги, шиїтаке, глива звичайна, печериця звичайна на конвективному сушильному стенді	180
3.4. Підготовка м'ясного гранульованого продукту та сушіння на конвективному сушильному стенді	201
3.5. Визначення теплофізичних властивостей культивованих грибів на диференціальному мікрокалориметрі ДМКИ-01	203
3.5.1. Визначення теплоти випаровування з тканин плодового тіла культивованих грибів	203
3.5.2. Визначення теплоємності тканин плодового тіла культивованих грибів	206
3.6. Зміна стану води в тканинах культивованих грибів під час сушіння	210
3.7. Дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні білкововмісної сировини, зміни критерію оптимізації сушіння.....	212
3.8. Розрахунок тривалості та швидкості процесів сушіння білкововмісної сировини	215
3.9. Чисельне моделювання процесу тепломасопереносу при сушінні білкововмісної сировини	219
3.10. Висновки до третього розділу	229
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ БІЛКОВОВМІСНОЇ СИРОВИНИ НА ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВІЙ КАМЕРНІЙ СУШАРЦІ З КОМБІНОВАНИМ НАГРІВОМ ТЕПЛОНОСІЯ	230
4.1. Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини тваринного походження з м'яса курятини, свинини та яловичини	234
4.2. Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини з культивованих грибів	236
4.3. Розрахунок витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи в залежності від температури	237

4.4. Висновки до четвертого розділу	239
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДИСПЕРГУВАННЯ, ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА АДСОРБЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІЛКОВОВМІСНОЇ СИРОВИНИ	240
5.1. Дослідження процесів диспергування білкововмісної сировини рослинного походження	240
5.2. Визначення якісних характеристик білкововмісної сировини після сушіння	243
5.3. Дослідження процесів адсорбції білкововмісної сировини	253
5.4. Дослідження активності води білкововмісної сировини	264
5.4. Висновки до п'ятого розділу	269
РОЗДІЛ 6. ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО М'ЯСА, ПОРОШКУ ІЗ КУЛЬТИВОВАНИХ ГРИБІВ, ГРАНУЛЬОВАНОГО М'ЯСНОГО ПРОДУКТУ ШВИДКОГО ПРИГОТУВАННЯ НА ОСНОВІ М'ЯСА, ГРИБІВ, МОРКВИ ТА СЕЛЕРИ	270
6.1. Розробка енергоефективної теплотехнології отримання харчового порошку із білкововмісної сировини м'яса свинини, яловичини	272
6.2. Технологія отримання харчового порошку із білкововмісної сировини культивованих грибів ерінги, шиїтаке, глива, печериця звичайна	273
6.3. Технологія отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту	275
6.4. Обладнання по виготовленню білкововмісних порошоків тваринного та рослинного походження	276
6.5. Техніко-економічне обґрунтування впровадження теплотехнології отримання натуральних сухих харчових продуктів з підвищеним вмістом білку	281
6.6. Висновки до шостого розділу	287
ВИСНОВКИ	288
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	292
Додатки	318

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

W – вологість матеріалу, %;

W_p – рівноважна вологість матеріалу, %;

t – температура теплоносія, °С;

V – швидкість теплоносія, м/с;

d – вологовміст повітря, г/кг с. п.;

τ – тривалість процесу сушіння, с;

$N = dW/d\tau$ – швидкість сушіння, %/хв.;

t – температура матеріалу, °С;

δ – товщина шару матеріалу, мм;

c – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

Q_{BT} – питомі витрати теплоти, кДж/кг вип. вологи;

χ – відносний коефіцієнт сушіння;

r – питома теплота випаровування вологи, кДж/кг;;

b – температурний коефіцієнт сушіння;

Rb – критерій оптимізації сушіння;

φ – відносна вологість повітря, %;

m_e – загальна маса води у зразку, кг;

m_{et} – маса еталонної речовини, кг;

s_e – площа під піком плавлення води у зразку, мВ·с;

s_{et} – площа під піком плавлення еталонної речовини, мВ·с;

ΔH_e – ентальпія плавлення води у зразку, кДж/кг;

ΔH_{et} – ентальпія плавлення еталонної речовини, кДж/кг.

ККПМ – колоїдні капілярно-пористі матеріали;

ІЧВ – інфрачервоне випромінювання

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Враховуючи загальну тенденцію до збільшення кількості спожитої енергії в усьому світі, вартість її безперервно підвищується та зростає дефіцит. Тому гостро стоять проблеми створення та широкомасштабного впровадження сучасних енергоефективних теплотехнологій, які забезпечують скорочення енергоносіїв, оскільки додаткова складність в тому, що виробництво та переробка сільськогосподарської продукції відбувається в умовах підвищеного споживання газу та інших енергоносіїв з низьким коефіцієнтом корисної дії і великими втратами сировини при переробці.

Шляхи зниження питомих енерговитрат під час сушіння, розроблення способів інтенсифікації процесу залежно від певного методу та об'єкту зневоднення, теплотехнології і сушильного обладнання ґрунтуються на узагальненні закономірностей тепломасообміну і є предметом теоретичних й експериментальних досліджень багатьох вітчизняних та іноземних вчених і достатньо широко висвітлено в наукових працях А.А. Долінського, Ю.Ф. Снежкіна, Ж.О. Петрової, Л.Ю. Авдєєвої, В.М. Пазюка, К.Д. Малецької, О.Г. Бурдо, В.М. Атаманюка, В.О. Потапова, М.І. Погожих, Паламарчука І.П. та інших.

Процеси сушіння присутні майже в усіх галузях промисловості. Питання енергоефективності способів сушіння є одним із найактуальніших напрямків дослідження в сучасній науці. Сушіння вологих матеріалів є одночасно теплотехнічним та технологічним процесом, під час якого змінюються технологічні та біохімічні властивості матеріалу.

Основним із способів продовжити термін придатності білкововмісної сировини є сушіння. Це значно збільшує термін споживання, з подальшим довготривалим зберіганням.

Одним із вагомих недоліків свіжої сировини, особливо м'яса та культивованих грибів, є короткий термін зберігання. Наприклад, для грибів

1-3 дні (температура навколишнього середовища) і 3-5 днів (4 °С) після збору врожаю.

У більшості технологій загальні витрати на процес сушіння складають 50-70 %. Тому для вирішення проблеми енергоефективності теплотехнологій необхідно вирішувати, перш за все, ефективність процесів зневоднення.

Одним із найпоширеніших способів є конвективне сушіння. Недоліком є те, що при термолабільній температурі теплоносія процес є тривалим, а при підвищеній температурі сушіння відбуваються негативні зміни для біологічно активних речовин та, відповідно, якості готової продукції. Наприклад, для отримання сушеного гриба з кінцевим вмістом вологи 4–5% тривалість сушіння матеріалу може становити 10–12 год [1, 2, 3, 4, 5].

Широкого розповсюдження набули гібридні технології, до яких належать мікрохвильово-вакуумне, сублімаційне сушіння та деякі з новітніх гібридних технологій, такі як холодна плазма з інфрачервоним сушінням.

Однак гібридні технології, такі як сублімаційно-інфрачервоне та мікрохвильово-вакуумне-конвективне сушіння дали неоднозначні результати якісних та енергетичних характеристик, тому це питання потребує додаткових досліджень та розробки нових, але простих, енергоефективних та надійних методів сушіння. Варто відмітити, що ці комбіновані методи сушіння є дорого вартісними.

На сьогоднішній день в Україні недостатньо виробництва з переробки білкововмісної сировини, що дозволяє зберегти якість нативного матеріалу.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до тематик науково-дослідних робіт відділу «Тепломасопереносу в теплотехнологіях» Інституту технічної теплофізики НАН України. Базовими науково-дослідними роботами для підготовки і подання даної дисертаційної роботи були держбюджетні прикладні та фундаментальні дослідження в рамках наступних тем:

– 1.7.1.879 «Наукові засади підвищення енергоефективності теплотехнологій при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів» (2017-2021 рр., РК № 0117U002650).

– 1.7.1.897 «Інтенсифікація тепломасопереносу при зневодненні колоїдних капілярно-пористих матеріалів та розроблення енергоефективного сушильного обладнання» (2020-2024 рр., РК № 0120U103352, ОК № 0225U003159).

– 52-07/03-2021 «Підвищення енергоефективності тепломасообмінних процесів при зневодненні термолабільних колоїдних капілярно-пористих матеріалів в інноваційних теплонасосних сушарках» (2021-2022 рр., РК № 0121U111865, ОК № 0223U000132, 0221U106933).

– 1.7.1.910 «Інтенсифікація тепломасообмінних процесів при зневодненні та термообробці дисперсних матеріалів» (2025-2029 рр., РК № 0125U003694).

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних засад та експериментальне підтвердження комплексної та ефективної переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження, тепломасообмінні процеси та створення енергоефективних теплотехнологій з отриманням харчових порошків високої біологічної цінності, які є основою продуктів харчування для використання в екстремальних умовах населення, військовослужбовців та спортсменів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- проаналізувати сучасний стан наукових та практичних розробок отримання харчових порошків із білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження;

- встановити теплофізичні параметри попередньої підготовки до сушіння білкововмісної сировини з метою зменшення енерговитрат на процес при збереженні біологічно активних речовин;

- дослідити тепломасообмін зневоднення білкововмісних матеріалів з урахуванням властивостей сировини і режимів сушіння;
- розробити енергоефективні режими зневоднення білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження;
- визначити теплофізичні характеристики, теплоту випаровування і теплоємність та фізико-хімічні властивості білкововмісних порошків;
- розрахувати залежність критерію оптимізації сушіння від режимів сушіння;
- виконати чисельне моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів;
- дослідити сорбційні властивості та активність води висушеної білкововмісної сировини;
- визначити відновлення харчових порошків (гранул, кубиків, пластин, порошків) білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження від режимних параметрів сушіння, форми матеріалу та температури відновлення;
- розробити енергозберігаючі теплотехнології для отримання гранульованого м'яса та грибного порошку з білкововмісної сировини;
- розробити теплотехнологію сушеного гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування на основі м'яса, грибів, моркви та селери.

Об'єкт досліджень – тепломасообмінні процеси при розробці енергоефективної теплотехнології отримання сухого м'яса, грибного порошку, та гранульованого м'ясного продукту.

Предмет досліджень – теплові режими та кінетика сушіння м'яса свинини, яловичини та культивованих грибів ерінги, шіїтаке, глива, печериця і їх теплофізичні параметри після зневоднення.

Методи дослідження. В роботі використано методи з використанням сучасних засобів вимірювання параметрів сушіння: часу проведення досліду, температури теплоносія та зменшення маси матеріалу за допомогою автоматизованих систем збору та обробки інформації в розроблених програмах "Sooshka" на спеціально спроектованих і виготовлених установках.

Обробка експериментальних даних виконувалась за допомогою комп'ютерної техніки і прикладних програмах Excel. Для оцінки якості сушеного матеріалу використані стандартні методи дослідження визначення якісних характеристик, регідраційних та сорбційних властивостей, хімічного складу. Розрахунки теоретичного дослідження тепломасопереносу здійснювалися засобами програмування. Теоретичні дослідження проведені з використанням методів, що ґрунтуються на основних положеннях теорії тепло- і масообміну, теорії подібності, що оброблялись за допомогою комп'ютерних технологій.

Наукова новизна одержаних результатів виражена у науковому обґрунтуванні теорії тепломасообміну під час зневоднення білкововмісної харчової сировини при тепломасоперенесенні в процесі сушіння, а саме:

- аналітичний аналіз методів підготовки та сушіння білкововмісної сировини дав змогу отримати нові рішення для вирішення проблем тепломасообміну в процесах сушіння;

- обґрунтовано вплив попередньої підготовки білкововмісної сировини до сушіння на тепло- та вологообмін в матеріалі і встановлені теплофізичні характеристики, які дозволили зменшити енерговитрати на 15 – 20 % із збереженням якості кінцевої продукції;

- встановлено залежність основних характеристик процесу сушіння за розробленими режимами при зневодненні білкововмісної сировини із зменшенням енерговитрат та максимальним збереженням біологічно активних речовин;

- *вперше* було визначено теплоту випаровування культивованих грибів, при цьому отримані під час сушіння значення питомих витрат теплоти на випаровування були представлені у вигляді залежності від поточного значення відносної вологості зразків, які показали складність випаровування з матеріалу у порівнянні з випаровуванням чистої води;

- *вперше* було визначено теплоємність культивованих грибів в діапазоні температур 32,5 – 87,5 С, експериментальні та теоретичні значення яких співпадають;

- встановлено залежність критерію оптимізації сушіння від вологовмісту матеріалу, що обґрунтовує ефективність розроблених режимів;
- за результатами чисельного моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів отримано графіки залежностей температури поверхні тепломасообміну та маси вологи від часу в зразку в процесі його сушіння;
- досліджено регідратаційні властивості сухих білкововмісних продуктів, отриманих при різних режимах сушіння та встановлено ефекти впливу режимів сушіння на відновлюваність отриманого продукту;
- досліджено енергоефективний процес сушіння білкововмісної сировини на дослідно-промисловій камерній сушарці, визначено енергетичні витрати на процес, які підтвердили доцільність вибраних режимів;
- визначено активність води для білкововмісної сировини як критерію збереження якості сировини;
- *вперше* визначено рівноважну вологість й оптимальні умови зберігання білкововмісних продуктів.

Практичне значення одержаних результатів:

- на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблено енергоефективні теплотехнології виробництва гранульованого м'ясного порошку з м'яса свинини, яловичини; грибного порошку з культивованих грибів шиїтаке, ерінгів, печериць та гливи звичайної та сушеного гранульованого м'ясного продукту.
- розроблено дослідно-промислові лінії отримання сухого продукту швидкого приготування із підвищеним вмістом білків;
- практична реалізація запропонованої теплотехнології полягає у передачі результатів досліджень до науково-дослідницького Інституту продовольчих ресурсів НААН для впровадження грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку;

- результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес НТУУ КПІ для підготовки фахівців за спеціальністю «Галузеве машинобудування»;

- на пріоритети нових способів подані патенти:

заявка на Патент України на Винахід № а202405902 від 12.12.2024 р.
«Спосіб одержання сушеного гранульованого м'ясного продукту»;

заявка на Патент України на Винахід № а202406176 від 24.12.2024 р.
«Спосіб одержання харчового порошку з грибів шиїтаке»,

заявка на Патент України на Винахід № а202500756 від 20.02.2025р
«Спосіб одержання м'ясного продукту швидкого приготування».

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, обґрунтуванні основної ідеї і теми дисертації, у формулюванні та доказі наукових положень, постановці та проведенні експериментальних досліджень з підготовки сировини до сушіння, тепломасообміну при зневодненні та отриманні наукових результатів, вказаних у дисертації, визначенні теплофізичних характеристик теплоти випаровування, теплоємності білкововмісної сировини, у розрахованій залежності критерію оптимізації сушіння від режимів сушіння, розрахованому чисельному моделюванню процесу тепломасопереносу при сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів, дослідженні сорбційних, регіратаційних властивостей, у розробці енергозберігаючої теплотехнології для отримання порошків з білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження та сушеного гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування на основі білкововмісних порошків.

Обговорення, аналіз та узагальнення результатів досліджень проведені з науковим консультантом доктором технічних наук, професором, чл.-кор. НАН України Петровою Ж.О.

Апробація результатів досліджень. Основні положення дисертації та її результати доповідались та обговорювались на XXI міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених

”Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, 2021), XXIX всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ”Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів” КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, 2021), XIX Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2022), VI Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні досягнення біотехнології» (Київ, 2022), XXIII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ”Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” (Київ, 2022), Theoretical and practical aspects of modern scientific research: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Seoul-Vinnitsia: Case Co., Ltd.& European Scientific Platform (Seoul-Vinnitsia, 2023), XIII Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (2023), Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale. (Paris-Vinnitsia, 2025), The international conference food for life “Evolution of Sugar: Advanced Technologies for the Next Generation Bioeconomy”(Київ, 2025), 5th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering» (Lviv, 2025), XVI міжнародній онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ, 2025), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики» (Київ, 2025), The 2nd International scientific and practical conference “Scientific development in a changing world” SPC “Sci-conf.com.ua” (Lviv, 2025), 4th International scientific and practical conference “European science and innovation congress” (Barcelona, 2026).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 41 наукових працях, з яких 8 наукових статей, що входять до наукометричних баз даних Scopus, Web of Science (з яких 1 в журналі з квантилем Q3); 10 наукових статей у фахових виданнях України; 2 монографії; 3 колективні монографії (1

з них розділ колективної монографії, що входить до наукометричної бази даних Scopus), 3 заявки на патент на винахід України; 15 матеріалів тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 209 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 335 сторінок, у тому числі 243 сторінки основного тексту, що містить 160 рисунків, 22 таблиці.

РОЗДІЛ 1.

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД СТАНУ, СПОСОБІВ ТА МЕТОДІВ ЗНЕВОДНЕННЯ БІЛКОВОВМІСНОЇ СИРОВИНИ

В основі технології переробки сільськогосподарської сировини на висушені продукти є процеси сушіння, які суттєво впливають як на енергетичні показники, так і на якість кінцевого продукту. Запровадження сучасних теплотехнологій із зменшенням енерговитрат на процес з максимальним збереженням біологічно активних речовин є вимогами сьогодення [6, 7, 8, 9].

Процеси сушіння присутні майже в усіх галузях промисловості. Як видно з рис. 1.1, витрати енергії на сушіння в агропромисловому комплексі становлять 1,2 млн. т.у.п [10].

Питання енергоефективності способів сушіння є одним із найактуальніших напрямків дослідження в сучасній науці. Процес сушіння вологих матеріалів є одночасно теплотехнічним та технологічним процесом, під час якого змінюються технологічні та біохімічні властивості матеріалу.

В світі 8...10 % спожитої енергії витрачається на процеси сушіння, в Україні – 10 % при значно меншій кількості сушильних установок. Під час сушіння в світі випаровується понад 25 млн. т. вологи, а в Україні 17 млн. т. вологи [10].



Рис. 1.1. Витрати енергії на сушіння в галузях промисловості (млн. т. у.п.)

В процесах сушіння визначальними є процеси тепло- та масообміну. Від їхньої інтенсивності залежать ефективність сушіння та економічність використання матеріальних і енергетичних ресурсів.

Під час процесу сушіння, а саме на випаровування вологи корисно витрачається лише 40 % всієї енергії, як видно з діаграми, решта 60 % - це нераціональні енерговитрати (рис. 1.2). Ефективність процесу сушіння особливо в агропромисловому комплексі пов'язана як з енергоефективністю процесу, так і з якістю продукту. Для вирішення проблеми енергоефективності теплотехнологій необхідно вирішувати, перш за все, ефективність процесів зневоднення з максимальним збереженням біологічно активних речовин [10].



Рис. 1.2. Витрати теплоти під час процесу сушіння

Шляхи зниження питомих енерговитрат під час сушіння, розроблення способів інтенсифікації процесу залежно від певного методу та об'єкту зневоднення, теплотехнології і сушильного обладнання ґрунтуються на узагальненні закономірностей тепломасообміну і є предметом теоретичних й експериментальних досліджень багатьох вітчизняних та іноземних вчених і достатньо широко висвітлено в наукових працях А.А. Долінського, Ю.Ф. Снежкіна, Ж.О. Петрової, Л.Ю. Авдєєвої, В.М. Пазюка, К.Д. Малецької, О.Г. Бурдо, В.М. Атаманюка, В.О. Потапова, М.І. Погожих, Паламарчука І.П. та інших.

1.1. Основні методи переробки та сушіння м'яса свинини та яловичини

До білкововмісної сировини тваринного походження відносять м'ясо, яке є корисним для людства саме через велику кількість білку. Виробництво м'ясних продуктів на етапі розвитку цивілізації набуває нових форм споживання, що пов'язано із розвитком життя людини та розробкою сучасних технологій переробки м'яса. Сучасний асортимент сухих м'ясних продуктів включає м'ясні пластівці, чіпси, палички, джерки, чарки, білтонг, пеммікан, пастирма, ніккі, юкола та інші.

Замінюючи БАДи, паралельно розвивається галузь продукти швидкого приготування, до складу яких входить м'ясо. Проте всі сучасні способи підготовки та процеси сушіння, які застосовуються при виробництві вищеназваних м'ясних продуктів не підходять для сушіння функціональної сировини. Оскільки в їхньому випадку вони мають бути хрумкими або в'ялими з низькою відновлюваністю. А для продуктів швидкого приготування необхідна висока відновлюваність.

Даних по зневодненню вареного м'яса небагато, а саме сьогодні починає широко використовуватись в продуктах швидкого приготування (супів, каш та ін.).

М'ясо є незамінним джерелом білка, з якого будується м'язова тканина людини. Воно особливо необхідне для людей, які займаються важкою фізичною працею, а також для військовослужбовців, спортсменів, мандрівників та туристів. У висушеному м'ясі зберігаються протеїни, мікроелементи, амінокислоти в більш концентрованому вигляді, у ньому є цинк, залізо, вітаміни групи В, які корисні для здоров'я людини.

Сушене м'ясо – при вживанні поступово розбухає у шлунку, повільно насичуючи організм корисними харчовими компонентами, даруючи почуття ситості і приплив сил. Це простий і швидкий перекус, який допомагає швидко відновити сили. Що дуже важливо для людей, які отримують посилені фізичні навантаження [11].

До національних сухих м'ясних продуктів, що виробляються за традиційними або інноваційними технологіями у країнах Америки, Європи, Азії та Африки, належать джерки, чарки, білтонг, пеммікан, пастирма, ніккі, юкола та інші. Сучасний асортимент сухих м'ясних продуктів включає м'ясні пластівці, чіпси, палички та інші [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

В Україні функціонують декілька підприємств із виробництва сушеного м'яса. Проте обсяг їх виробництва та асортимент продукції обмежені. На сьогодні відомі способи сушіння м'яса в камерних, каналних, шафових сушарках, а також на відкритому повітрі. Враховуючи тривалість даних способів сушіння сировину перед сушінням спеціально обробляють [19].

Основними недоліками конвективного методу сушіння м'яса в камерних, каналних, шафових сушарках є втрати в сухому продукті розчинних білків та значна тривалість процесу. Тому ці способи сушіння застосовуються обмежено на дрібних підприємствах [20].

Відоме промислове використання мікрохвильової НВЧ-енергії для сушіння різних харчових продуктів, у тому числі й м'яса. Характер сушіння дозволяє різко інтенсифікувати процеси тепло- і масообміну та зменшити тривалість сушіння. За останні роки запропоновані різні варіанти сушильних установок із використанням НВЧ-енергії, в тому числі в різних комбінаціях з іншими методами: конвекцією, інфрачервоним випромінюванням, ультрафільтрацією і ін. Але такі установки вітчизняного виробництва відсутні.

Сублімаційне сушіння є найбільш поширеним способом зневоднення. Воно полягає в тому, що в умовах вакууму із замороженого продукту сублімують лід, який перетворюється на пару, минаючи рідку фазу. При такому висушуванні забезпечуються мінімальні зміни фізико-хімічних і біологічних властивостей продукту не тільки в процесі сушіння, але й при тривалому зберіганні [11, 15]. Проте, сублімаційне сушіння є досить складне і вартісне, тому не набуло широкого використання.

Специфічні властивості окремих м'ясних продуктів зумовлюють різні вимоги до процесу сушіння, а, отже, і до режиму його проведення. Під час

організації сушіння необхідно врахувати технологічні властивості продуктів, як об'єктів сушіння. Значення цих властивостей і закономірностей зміни їх під час сушіння залежно від параметрів процесу дає можливість вибору найбільш раціонального способу і режимів сушіння. Раціональні параметри сушіння забезпечують мінімальні витрати енергії при максимальному збереженні високої якості продуктів.

Інтенсифікація багатьох способів сушіння відбувається, головним чином, за рахунок підвищення температури сушильного агента. Проте для деяких продуктів застосування високих температур взагалі неприпустимо з технологічних міркувань (сушіння м'яса, овочів, фруктів тощо) [11].

Для удосконалення технології виробництва сушеного м'яса, надання йому певних функціонально-технологічних властивостей виникає необхідність застосування нових способів сушіння м'ясної сировини.

У Харківському державному університеті харчування та торгівлі використовували сушіння зі змішаним теплопідведенням. На відміну від інших розповсюджених способів є створення особливих умов взаємодії зневоджуваного матеріалу з сушильним агентом – повітрям, зниженням енерговитрат та тривалості процесу, високій якості отриманого продукту за харчовою цінністю, яка не поступається сублімованим продуктам [11]. Метод зі змішаним теплопідведенням є непоширеним через відсутність таких сушарок.

Якщо в процесі сушіння відбувається негативний термічний вплив на продукт, то знижується швидкість сушіння та коефіцієнт дегідратації, що в подальшому призводить до втрати смаку, кольору та поживних речовин, вітаміни, амінокислоти тощо. Втрата води продуктом та вплив теплоти можуть призвести до утворення пор та усадки, що теж впливає на текстуру та смак м'яса [22].

У науковій роботі [23, 24] досліджували сушіння фаршу м'ясного вакуумним, ультразвуковим вакуумним та сублімаційним сушінням. Вакуумне сушіння дозволяє уникнути зміну кольору, втрату смаку та деяких

поживних компонентів. Однак не повністю дозволяє зберегти біологічно активні речовини продукту. Сублімаційне сушіння є одним із оптимальних методів сушіння, чутливої до нагрівання та окислення. При цьому вода в продуктах заморожується при низькій температурі та негайно сублімується з твердого стану в газоподібний [23, 24].

Вміст вологи та активність води в меленому сушеному м'ясі знижувалися зі збільшенням періоду сушіння та підвищенням температури. Контроль вмісту вологи та активності води в сушеному м'ясі є важливим для запобігання створенню сприятливого середовища для росту мікробів у м'ясі. Тому слід уникати тривалого перебування в середовищі з високою вологістю, щоб обмежити забруднення мікроорганізмами [24].

Таким чином, сублімовані продукти зберігають свою якість та не відбувається повна денатурація білків чи втрата вітамінів в процесі зневоднення. Заявлено, що такий продукт має низький вміст вологи, пористу структуру та може бути швидко відновлений [24, 25]. Але при цьому на процес витрачається в 7-8 разів більше енергоносіїв, що призводить до підвищення ціни.

Для сублімаційного сушіння була побудована та розв'язана модифікована математична модель для кількісного опису динамічної поведінки первинної та вторинної стадій сушіння сублімаційного сушіння м'яса індички на лотках [26].

В роботі [27] представлено вплив різних ультразвукових обробок з різною потужністю (300, 500, 800 Вт) та тривалістю (10 та 30 хв) на фізико-хімічні характеристики, текстуру, амінокислотний склад та посилення смаку з акцентом на покращення смакових якостей та аромату. Ультразвукова обробка, розриваючи м'язові волокна, дозволяє покращити проникність мембран, тим самим пришвидшити процес вивільнення вологи при сушінні. Тому ультразвукова обробка може застосовуватись на стадії підготовки сировини до сушіння [27].

Способи сушіння м'яса все більше удосконалюються та збільшується асортимент сушених м'ясних продуктів. Наприклад, «Pastirma» в Туреччині, «jerky» в Північній Америці, «carne-de-sol» в Бразилії, «biltong» в Південній Африці, «kaddid» в Північній Африці і «secina» в Іспанії – це лише деякі з багатьох видів сушених м'ясних продуктів з усього світу [23, 28].

Сухі закусочні продукти типу «Джерки», «Чіпси», «Білтонг» тощо набули популярності серед українців завдяки високій біологічній цінності, гарантованій мікробній стабільності, тривалості при зберіганні за температури навколишнього середовища та зручності у використанні.

Літературний аналіз режимів конвективного сушіння м'ясних неферментованих продуктів малих розмірів дозволив встановити мінімальну температуру процесу 49 °С. Автори вказали, що ця температура є стандартним значенням масової частки вологи, яка досягає максимуму після 20 годин обробки. При температурі сушіння понад 77 °С тривалість обробки скорочується до мінімум 8 годин [29, 30, 31].

Сушіння м'яса перегрітою парою та конвективне сушіння (температура сушильного середовища 130, 160 або 180 °С; швидкість потоку сушильного середовища 35, 45 або 55 кг/год, товщина зразка 3 мм, 6 мм, 9 мм або фарш). Зменшення товщини зразка або збільшення переданого тепла шляхом підвищення температури або швидкості сушильного середовища призводить до прискорення процесу сушіння. Однак температури вище 160 °С викликають зміни всередині та на його поверхні та перешкоджають випаровуванню зв'язаної вологи на поверхні м'яса. Цей так званий ефект затвердіння поверхні гірший для сушіння на повітрі, ніж для сушіння перегрітою парою, і призводить до ще тривалішого часу сушіння та вищого кінцевого вмісту вологи. Сушіння перегрітою парою знижує активність води швидше, ніж сушіння на повітрі на початку процесу сушіння, але ті ж значення досягаються в кінці циклу сушіння. Крім того, дослідження доводить, що відсутність кисню під час сушіння перегрітою парою призводить до запобігання або мінімізації реакцій окислення ліпідів, що призводить до низьких перекисних чисел.

Небажані зміни якості, такі як сторонні присмаки та запахи, майже не розвиваються під час сушіння перегрітою парою навіть за високих температур і тривалого часу сушіння [32].

Наступний сучасний метод сушіння м'ясних продуктів, який має експериментальний характер – вакуумно-інфрачервоне. Нерівномірне випаровування вологи призводить до надмірного ущільнення верхнього шару, що додає твердості та одночасно крихкості консистенції, при застосуванні механічної сили структура зразка руйнується з утворенням стружки.

Сушіння сировини при температурі повітря 80°C призводить до швидшого нагрівання сировини в 1,5 рази, ніж при 60°C, і процес триває до кінцевої вологості 10,85 %. Завдяки сушінню при температурі повітря 80°C отримують такі характеристики сушеного м'яса: крихке, ламке, надмірно сухе, важко змочується.

В результаті експериментальних досліджень автори запропонували режим вакуумно-інфрачервоного сушіння м'яса птиці з температурою 60°C, тривалістю обробки - не менше 60 хвилин. Перевага вакуумно-інфрачервоного сушіння над конвективним сушінням - скорочення тривалості сушіння в 3,3 - 3,5 рази.

У дослідженні [33] миттєве контрольоване падіння тиску (DIC) було використано як новий метод попередньої текстуруючої обробки свіжого м'яса грудки курятини перед сушінням гарячим повітрям, щоб змінити текстуру м'яса. Мікроструктурні зміни скоротили час сушіння та збільшили кінетику регідратації та водоутримувальну здатність [33].

У статті [34] досліджується вплив умов розпилювального сушіння на фізико-хімічні властивості порошку гідролізату курячого м'яса.

У дослідженні [35] вивчався вплив конвективного сушіння повітрям на якість сирого та вареного курячого філе при температурі 60, 70 та 80°C. Сирі зразки були нарізані на розміри 20 мм × 20 мм × 7 мм, а варені зразки були попередньо проварені в гарячій воді та нарізані на аналогічні розміри. Було помічено, що варені зразки мали нижчий початковий вміст вологи та сушилися

швидше, ніж сирі зразки. Здатність до регідратації була нижчою у варених зразках, що може бути пов'язано з жорсткою структурою, що утворилася в результаті процесу попереднього приготування. Це ще більше зменшило поглинання води зразком.

Хоча запропоновані методи сушіння інтенсифікують процес, вакуумно-сублімаційний метод є витратним методом, який вимагає додаткового конвективного сушіння в кінці процесу, вакуумно-інфрачервоний метод за рекомендованої температури сушіння 60°C висушує матеріал лише до 22,53 %, що також вимагає додаткового конвективного сушіння для зниження вологості.

Тобто, при всіх вищезазначених методах оптимально використовувати конвективне сушіння. Конвективний метод сушіння також можна інтенсифікувати, проводячи попередню термічну обробку м'яса перед сушінням (двостадійну обробку), але, на жаль, дослідження не вказують на те, наскільки прискорюється процес. Конвективний метод сушіння продуктів харчування, овочів та фруктів широко поширений і використовується в сушарках різних типів, таких як: камерні, тунельні, конвеєрні, вібраційні тощо [36, 37, 38, 39]. Питома витрата тепла в існуючих камерних та тунельних сушарках становить 6700 - 8900 кДж/кг випареної вологи.

У науковій роботі [40] представлено дослідження кондуктивного сушіння м'яса в умовах стиснення з навантаженням, що викликає надлишковий тиск пари у поверхневому шарі м'яса. Вплив стиснення на м'ясо може значно змінювати кінетику процесу, що, в свою чергу, позначається на якісних характеристиках готового продукту і показниках процесу. Нещодавні дослідження виявили необхідність подальшого пошуку способів інтенсифікації процесу кондуктивного сушіння, зокрема шляхом стиснення м'яса нагрівальними поверхнями.

Стенд складається з модернізованого електричного контактного грилю "Frosty SP-1A3" (Італія), що забезпечує двостороннє підведення теплоти до дослідного зразка (3) нагрівальними поверхнями (1, 2) (Рис. 1.3). Регулювання

температури зазначених поверхонь відбувається за допомогою приладу 7 «ТРЦ 02 Універсал плюс» і двох датчиків температури “pt 100”, які введено у верхню та нижню нагрівальні поверхні (1, 2) в точці, що відповідає геометричному центру кожної з поверхонь на глибину 0,00005 м від поверхні нагрівання. Витрата енергії фіксується за допомогою лічильника електроенергії (4) “Сиррум S121Н”, а також монітором-лічильником електроенергії “Smart maic D101” (5), що надає можливість вимірювання, реєстрації та візуалізації зміни споживання електроенергії та параметрів електричної мережі. Маса дослідного зразка фіксувалася до і після сушіння за допомогою аналітичних ваг “AXIS AD-600”. Тривалість процесу кондуктивного сушіння фіксувалася за допомогою секундоміра. Температура на поверхні дослідного зразка контролювалася приладом (6) «ТРЦ 02 Універсал плюс» за рахунок 2 термопар ХК-0,5, спаї яких вводилися у поверхневий шар дослідного зразка [40].

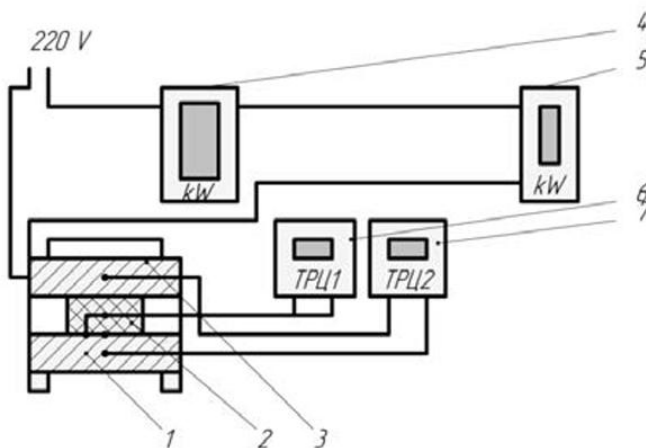


Рис. 1.3. Схема експериментального стенду для дослідження процесів кондуктивного сушіння м'яса:

- 1 – нижня нагрівальна поверхня; 2 – верхня нагрівальна поверхня;
- 3 – дослідний зразок; 4 – однофазний лічильник електроенергії “Сиррум S121Н”; 5 – монітор-лічильник електроенергії “Smart-maic D101”; 6 – прилад «ТРЦ 02 Універсал плюс», що визначає температуру дослідного зразка;
- 7 – прилад «ТРЦ 02 Універсал плюс», що регулює температуру нижньої та верхньої нагрівальних плит [40]

Науковцями встановлено фактичну кінетику вологовмісту і температури у поверхневому шарі в умовах стиснення. Дослідження показали, що стиснення істотно впливає на тривалість процесу сушіння та витрату енергії незалежно від товщини виробу. Встановлено, що питома витрата енергії найменша у зразків товщиною 0,003 м і склала 0,46 кВт*год/кг випареної вологи, що обґрунтовує раціональну товщину під час кондуктивного сушіння в умовах стиснення 0,003 м. Апроксимація фактичної кінетики вологовмісту і температури підтверджує загальний вигляд їхніх аналітичних моделей у вигляді модифікованих експонент, що враховують товщину дослідного зразка і масу навантаження. Подальші дослідження будуть спрямовані на пошук можливостей додаткового скорочення тривалості процесу і зменшення витрат енергії [40].

Усе вищесказане наполягає на розробці теплотехнології отримання сухих м'ясних продуктів для застосування у розробці продуктів швидкого приготування.

1.2. Аналіз сучасного стану переробки та сушіння культивованих грибів

Враховуючи дефіцит повноцінного білка в харчовому раціоні населення України необхідно звернути увагу на збільшення споживання рослинної продукції, яка може бути джерелом цього нутрієнту. Таким продуктом, який здатний задовольнити потребу в білках, є культивовані гриби [41].

Гриби є надзвичайно корисною заміною тваринного білку в раціоні людини. Люди використовували гриби протягом тисячоліть як для їжі, так і для ліків. Наприклад, Шиїтаке (*Lentinula edodes*), другий за кількістю вирощуваних їстівних грибів світу, становить близько 25 % світового виробництва грибів та є одними з найпопулярніших і найбільш споживаних грибів у всьому світі як у свіжому, так і в сухому вигляді.

Загальна тенденція вирощування культивованих грибів направлена до зростання як у світі, так і в Україні. Це пов'язано із збільшенням попиту на споживання грибів, що відносяться до корисних та оздоровчих продуктів. Для

Україні наразі - це є перспективним напрямком для створення та розвитку бізнесу із прогнозами на зростання експорту культивованих грибів, вирощених у Україні.

У 2022 році загальний дохід ринку склав 56 мільярдів доларів США, з яких 22 мільярди доларів США принесли печериці. 17 мільярдів доларів США – гливи, 10 мільярдів доларів США – гриби шиїтаке, а 7 мільярдів доларів США – інші види (рис. 1.4) [42].

У наступні роки продовжувалися позитивні тенденції, і у 2023 році загальний дохід ринку склав 62 мільярди доларів США. З них 24 мільярди доларів США – печериці, 19 мільярдів доларів США – гливи, 11 мільярдів доларів США – гриби шиїтаке та 8 мільярдів доларів США – інші види [42].

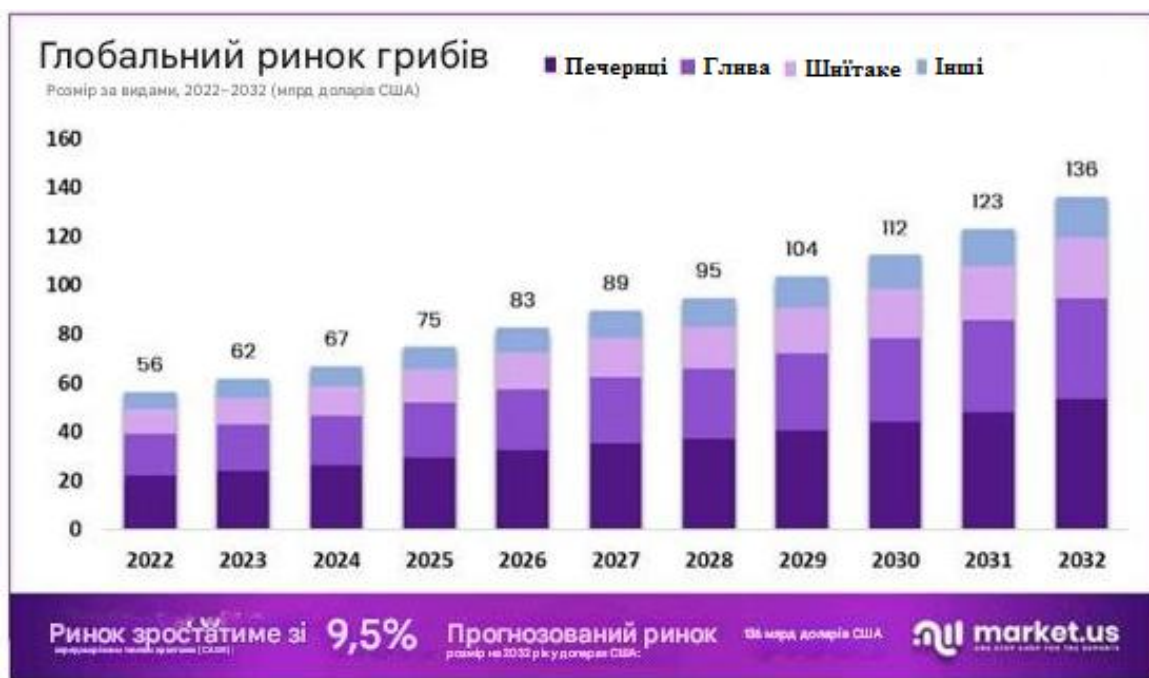


Рис. 1.4. Прогнозований глобальний ринок вирощування культивованих грибів за період 2022-2032 рр. у світі [42]

У 2024 р. ринок продовжує зростати, досягнувши загального доходу в 67 мільярдів доларів США. Гриби печериці, глива, шиїтаке та інші забезпечили 26 мільярдів доларів США, 20 мільярдів доларів США, 12 мільярдів доларів США та 8 мільярдів доларів США відповідно [42].

Очікується, що ця тенденція зростання збережеться, і, за прогнозами, ринок досягне загального доходу в 136 мільярдів доларів США у 2032 році. Це відображає стійкий та перспективний характер світової грибною галузі в різних її сегментах [42].

Культивовані гриби застосовуються не лише для споживання, а й у таких галузях як косметологія, медицина (рис. 1.5) [42]. Світовий ринок грибів демонструє різноманітний розподіл частки ринку між різними галузями кінцевого використання. У цьому розподілі харчова промисловість займає найбільшу частку, керуючи 42 % ринку, що свідчить про значну присутність грибів у кулінарному застосуванні в усьому світі. За нею слідує фармацевтичний сектор, який займає значну частку в 34 %. Це демонструє зростаючу важливість грибів у розробці фармацевтичної продукції та ліків [42].



Рис. 1.5. Розподіл частки ринку культивованих грибів між різними галузями кінцевого використання

Крім того, косметична промисловість також відіграє помітну роль, займаючи 24% частки ринку, що свідчить про використання грибів у засобах догляду за шкірою та косметиці [42].

Такий розподіл підкреслює універсальність грибів та їхній широкий вплив у різних секторах. Це робить їх цінним та багатогранним товаром на світовому ринку.

У світовому ландшафті виробництва грибів та трюфелів материковий Китай є беззаперечним лідером, вносячи 41 117,74 тисячі метричних тонн у цю процвітаючу галузь (рис. 1.6). Японія зі значним відривом займає друге місце з обсягом виробництва 469,05 тисячі метричних тонн. Польща, маючи потужний сільськогосподарський сектор посідає третє місце з обсягом виробництва 387,8 тисячі метричних тонн, що підкреслює її роль як основного постачальника. Сполучені Штати та Нідерланди йдуть за ними з обсягом виробництва 343,82 та 260 тисяч метричних тонн відповідно. Індія та Іспанія ще більше зміцнюють світовий ландшафт виробництва з 243 та 163,8 тисячі метричних тонн відповідно. Канада робить значний внесок зі 137,8 тисячі метричних тонн. Франція, з обсягом виробництва 99,11 тисячі метричних тонн, додає свою унікальність до різноманітного світового ринку грибів та трюфелів. Ці літературні дані підкреслюють домінуюче становище материкового Китаю, а також визнають значний внесок різних інших країн у цю процвітаючу галузь [42].

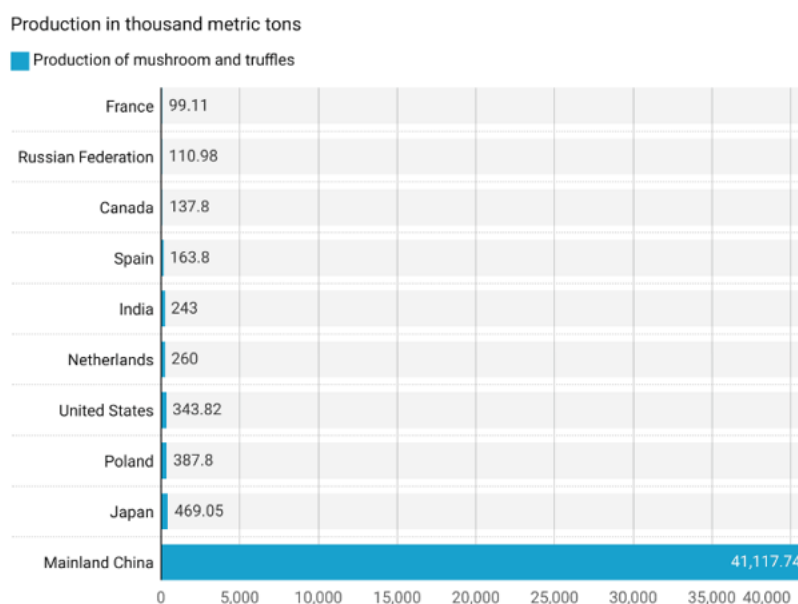


Рис. 1.6. Світове виробництво культивованих грибів

За даними FAOSTAT виробництво грибів зросло з 0,5 млн тонн в 1961 році до 10,24 млн т в 2017 році. Загалом світове виробництво культивованих

грибів почалося із 0,17 тонни в 1960 році і досягло 34,8 тонни до 2013 року, і, як вважають, в даний час воно перевищило 40 тонн [42].

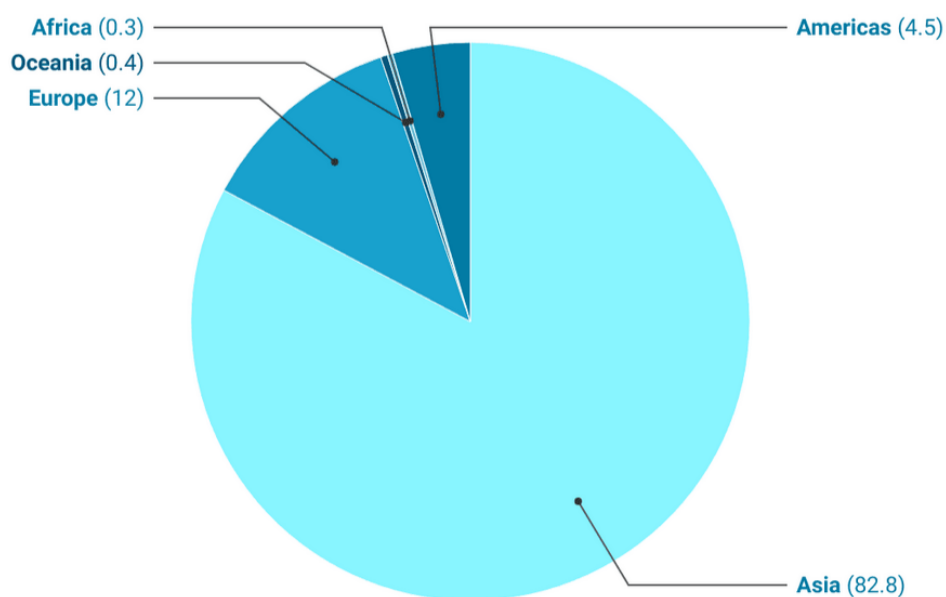


Рис. 1.7. Розподіл виробництва культивованих грибів на різних континентах

Згідно розподілу виробництва культивованих грибів на різних континентах: Азія займає лідируючу позицію з часткою 82,8 %, Європа – 12 %, Океанія та Африка 0,4 та 0,3 % від загального обсягу виробництва відповідно, Америка – 4,5 % (рис 1.7). Відповідно, Азія займає перше місце у виробництві культивованих грибів [42].

Згідно з даними Volza Global Export, світові поставки сушених грибів досягли 147,8 тис. одиниць, за рахунок 2594 експортерів, які обслуговують 4212 покупців.

Основними напрямками світового експорту сушених грибів є Нідерланди, Сполучені Штати та Німеччина.

Німеччина є найбільшим експортером з 13 657 поставками, за нею йде Китай з 13 187 поставками, а Нідерланди посідають третє місце з 12 061 поставкою.

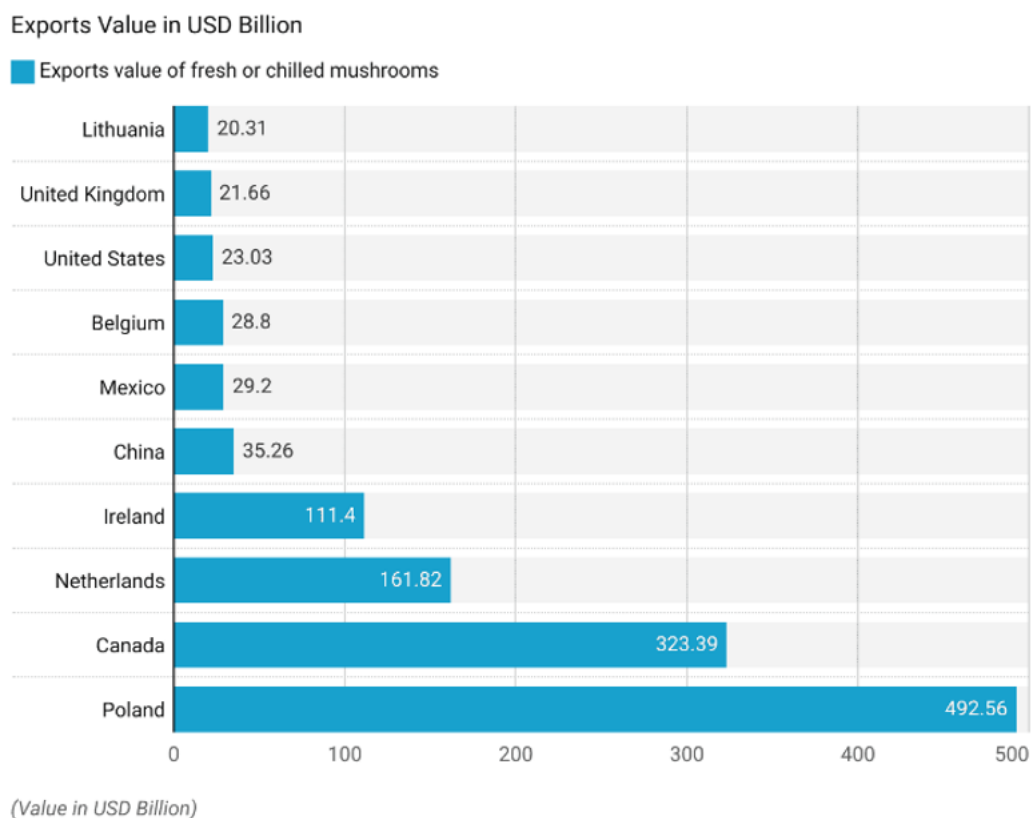


Рис. 1.8. Статистичні дані експорту культивованих грибів

Як видно з рис. 1.8, на світовому ринку свіжих чи охолоджених грибів на першому місці є Польща з вартістю 492,56 млн дол США, на другому – Канада з вартістю у 323,39 млн дол США. На третьому – Нідерланди та Ірландія. У той час як Китай, Мексика та Бельгія демонструють відносно нижчі експортні значення на рівні 35,26 млн дол США, 29,2 млн дол США та 28,8 млн дол США, однак вони залишаються активними учасниками цього ринку. Сполучені Штати Америки та Велика Британія показують експортну вартість у розмірі 23,03 млн. дол. США та 21,66 млн. дол. США. Литва має найменший показник. Отже, ці дані відображають світову динаміку глобальної індустрії експорту свіжих чи охолоджених культивованих грибів. Лідерами з експортної вартості є Польща та Канада.

Щодо імпорту грибів, то у 2022 р. Канада стала основним постачальником грибів до Сполучених Штатів Америки - 76 % від загального імпорту, а також Канада та Китай [42].

Була проведена статистична обробка щодо купівлі культивованих грибів залежно від вікових груп (рис. 1.9).

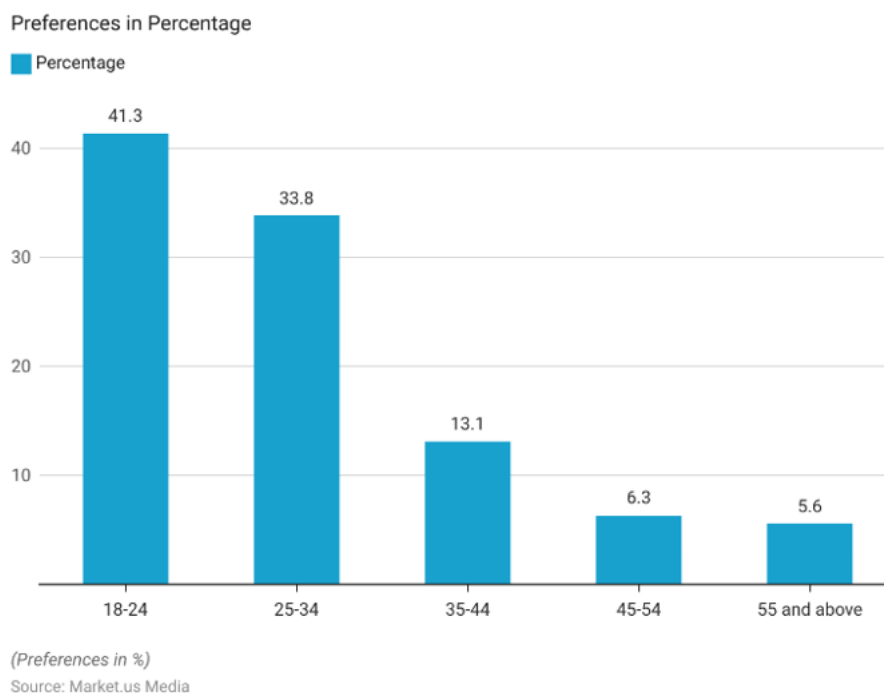


Рис. 1.9. Статистичні дані купівлі та споживачів культивованих грибів [42]

Дані на рис. 1.9. показують, що вікова група 18-24 роки становить найбільший сегмент покупців грибів, складаючи 41,3% від загальної кількості. Відразу за нею йде вікова група 25-34 роки, яка становить 33,8 % споживачів грибів. Натомість вікові групи 35-44, 45-54 та 55 років і старше представляють менші відсотки – 13,1%, 6,3% та 5,6% відповідно.

Ця статистика показує, що молодші вікові групи, особливо ті, хто віком від 18 до 34 років, виявляють більшу перевагу культивованим грибам, тоді як старші вікові групи демонструють порівняно нижчий рівень зацікавленості у споживанні грибів.

Розуміння цих вікових уподобань може допомогти у розробці маркетингових стратегій, спрямованих на задоволення потреб певних демографічних сегментів [42].

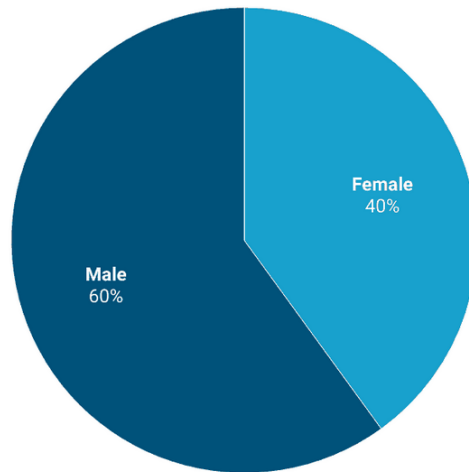


Рис. 1.10. Статистичні дані щодо споживачів залежно від гендерної політики [42]

Згідно з гендерною статистикою на переваги споживачів для придбання культивованих грибів впливає стать з помітною невідповідністю у відсотках – серед яких 60 % - чоловіки, а решта 40 % - жінки (рис. 1.10). Розуміння гендерних уподобань може бути корисним для підприємств та маркетингу для адаптації цілей та пропозицій [42].

Уподобання споживачів щодо сорту культивованих грибів представлені на рис. 1.11. Як видно, більшість споживачів надають перевагу 68,8 % грибам печериці, для гливи звичайної 23,1 %, решта грибів 8,1 % [42].

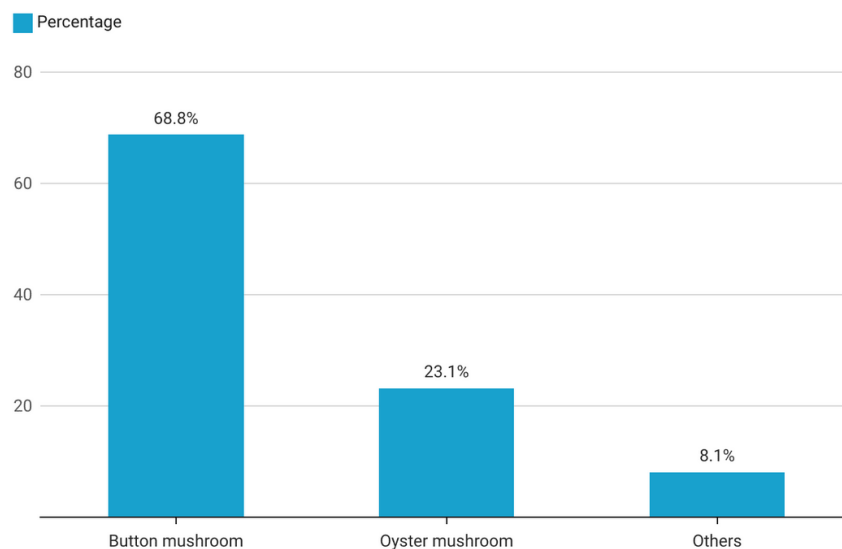


Рис. 1.11. Статистичні дані споживачів культивованих грибів залежно від сорту [42]

Одним із вагомих недоліків свіжої рослинної сировини, особливо культивованих грибів, є короткий термін зберігання, які мають 1-3 дні (температура навколишнього середовища) і 3-5 днів (4°C) термін зберігання після збору врожаю. Це пов'язано з відсутністю поверхневої кутикули, яка захищає її від фізичного, мікробного пошкодження та втрати води. Висока швидкість дихання та вміст вологи роблять їх дуже вразливими до мікробної атаки та погіршення кольору поверхні (ферментативне потемніння). Такі фактори, як швидкість транспірації/дихання, стадія росту/зрілості, патогенна атака, а також умови зберігання, такі як температура, газовий склад, відносна вологість тощо, значною мірою сприяють втраті якості культивованих грибів [42].

Якість грибів зазвичай оцінюють як виробники, так і споживачі за певними основними ознаками, які визначають їх цінність на ринку. Вони мають бути візуально привабливими з точки зору кольору поверхні, зовнішнього вигляду, рівня свіжості, аромату та текстури, тургору та наявності росту мікробів/слизу тощо [43].

Свіжий гриб шийтаке містить від 85 % до 90 % води, здебільшого утримується всередині відсіків, які відрізняються клітинною структурою та зберігають клітинну цілісність. Таким чином, це важливий фактор для збереження свіжості грибів. Ця вода продовжує зменшуватися після збору врожаю через перенесення з клітин/позаклітинного простору до поверхні, яка потім випаровується.

Згідно зі спостереженнями [44], розрив клітинних вакуолей призводить до міграції води до цитоплазми клітини, а потім до зовнішньої поверхні. Це спричиняє загальну втрату ваги та розм'якшення грибів. Швидкість втрати вологи залежить від стану або зрілості грибів, температури, відносної вологості, циркуляції повітря та атмосферного тиску під час зберігання.

Виробники зазвичай зберігають свіжі гриби в поліетиленових пакетах після збору врожаю, щоб запобігти втраті вологи, що задовільно покращує термін зберігання на кілька днів [45]. Однак тривале зберігання призводить до

поверхневої конденсації вологи всередині мішків, що в подальшому призводить до псування грибів [46]. Будь-яка подальша втрата більше 5 % маси свіжих грибів викликає небажане погіршення якості [43].

Хоча гриби можна на короткий термін зберігати при низьких температурах (<15 °C) після збору врожаю вимагає точного моніторингу параметрів, які можуть вимагати складного обладнання. Це пояснюється тим, що під час холодного зберігання необхідний належний баланс вологості, оскільки, в іншому випадку, це може спричинити значну втрату ваги (у сухій атмосфері) та ріст мікроорганізмів (у вологій атмосфері) [47].

Щоб вирішити вищевказані проблеми, свіжі гриби часто піддають упаковці в контрольованій атмосфері (САР) або упаковці в атмосфері (МАР) перед зберіганням у холодній атмосфері, щоб запобігти погіршенню після збору врожаю, одночасно дозволяючи транспортувати їх у різні місця. Це здається економічно ефективнішим методом, ніж використання складного обладнання. Це вважається найбільш економічним, ефективним і найпростішим методом обмеження дихання грибів, росту мікроорганізмів тощо [43, 47].

САР (зберігання в контрольованій атмосфері) вимагає підтримки постійних атмосферних умов протягом періоду зберігання на основі зміни складу газу, спричиненого диханням грибів. З іншого боку, МАР (зберігання в модифікованій атмосфері) – це застосування газоподібної атмосфери/повітря під час початкового зберігання, яке динамічно змінюється під час зберігання в упакованих плівках. У більшості повідомлень про упаковку грибів шийтаке використовували МАР (зберігання в модифікованій атмосфері), оскільки це простіше та дешевше, ніж (зберігання в контрольованій атмосфері) САР. Однак і САР (зберігання в контрольованій атмосфері), і МАР (зберігання в модифікованій атмосфері) є методами короткочасного консервування, які продовжують термін зберігання свіжих грибів на кілька днів (від 10 до 15 днів) [47].

Одним із способів продовжити термін придатності культивованих грибів є сушіння. Термічна дегідратація (сушіння) запобігає більшій частині псування, наприклад ферментативному потемнінню, росту мікробів тощо, шляхом зменшення активності води. Це значно збільшує термін придатності грибів після сушіння, які потім можна безпечно зберігати в належних умовах [43].

Існує також окрема споживча перевага щодо сушених грибів, зокрема шийтаке, оскільки сушіння надає унікальний і характерний смак та аромат. Найпопулярнішим методом термічної дегідратації є конвективне сушіння, при цьому гаряче повітря подає тепло через природну або примусову конвекцію, викликаючи зневоднення грибів. Вважається, що це тривалий, трудомісткий процес. Однак він економічно вигідний і простий в установці. Оскільки швидкість сушіння перешкоджає внутрішньому опору, це часто призводить до небажаних змін якості сушених грибів, що змусило дослідників розробити вдосконалені технології термічної дегідратації [43, 48].

Зовнішній вигляд є основним показником, на який звертають увагу споживачі, купуючи як свіжі, так і сушені гриби. Зміна кольору в основному пов'язана із окисленням вуглеводів та ферментативним потемнінням, автоокисленням та неферментативними реакціями (сушені гриби) [43].

Зміни внаслідок ферментативного потемніння у свіжих грибах пов'язані з поліфенолоксидазами, які викликають окислення деяких фенольних сполук (безбарвних) до хінонів (червоні/червонувато-коричневі), а потім до кольорових комплексів (меланін тощо) з амінокислотами. Хоча ферментативне потемніння також може відбуватися через фенолпероксидазу, для цього потрібен перекис водню, якого зазвичай менше в грибних тканинах [43, 49, 50].

Також фізичні чи механічні пошкодження під час обробки або транспортування можуть легко спровокувати ферментативне потемніння [43, 51]. Таким чином, запобігання розриву клітинної тканини шляхом правильного поводження, інактивації ферментів за допомогою тепла, зміни рН

і додавання добавок (підкислювачів) може запобігти ферментативному потемнінню в свіжих грибах.

Зміни внаслідок автоокислення відбуваються наступним чином. У харчових продуктах або харчових матеріалах окислення зазвичай відбувається в вуглеводах і жирах, які іноді супроводжуються неокислювальне псування. Окислення жиру зазвичай не є проблемою для грибів (як свіжих, так і висушених) через низький вміст жиру [43, 52], тоді як окислення вуглеводів відбувається після ферментативного чи неферментативного окислення. Процеси, якими можна керувати термічною обробкою або додавання добавок.

Було досліджено, що автоокислення є корисним для грибів, оскільки воно дає характерні 8-вуглеці летючі сполуки, відповідальні за його аромат. Зокрема, 1-октен-3-ол отримують з доступних поліненасичених жирних кислот шляхом автоокислення. [43, 53].

Гриби містять значну кількість різних поживних речовин і фітонцидів, добре відомі своїми корисними полісахаридами, білками та вітамінами, особливо вітаміном D через високий вміст ергостеролу [43, 54]. Однак цей вміст змінюється після збору врожаю через біохімічні зміни, дихання, активність ферментів і вплив умов зберігання [43, 55]. Гриби мають унікальний аромат завдяки летким і нелетким сполукам, таким як цукри, вільні амінокислоти, органічні кислоти, нуклеотиди. Особливий смак (смак умами) властивий лише грибам. Свіжий шийтаке містить 20,1% 1-октен-3-олу, 20,7% 2-октанону, 9,8% 1,2,4-тритіолана і 8,2 % пентатіепанів [43].

Якщо говорити про культивовані гриби після зневоднення, то у сушених грибах відбувається неферментативне потемніння або реакція Майяра між вільними амінокислотами, пептидами або білками (аміногрупи) і відновлюючими цукрами (карбонільні групи) під час термічної обробки чи сушіння [43, 56]. Швидкість неферментативного підрум'янювання повільна і залежить від вологості грибів. Це відбувається лише під дією тепла і не відбувається в ліофілізованих грибах або грибах, які зберігаються при низьких температурах. Вченими [57] було виявлено, що висока температура

спричинила розрив клітин, що призвело до вивільнення амінокислот і відновлюючих цукрів, викликаючи Майяра підрум'янювання в сушеному шиїтаке. Незважаючи на те, що це спричиняє зміни кольору поверхні, неферментативне підрум'янювання створює кращий смак умами в термічно оброблених чи зневоднених грибах шиїтаке завдяки збільшенню вмісту летких сполук, амінокислот тощо [43, 58].

Загалом сушені гриби мають більш насичений аромат, ніж свіжі. Частково це пов'язано зі смаком умами, який виникає під час термічної дегідратації. Як правило, 8 сполук вуглецю (наприклад, 1-октен 3-ол) разом із сполуками сірки (тієпанами) надають грибам унікальний смак/аромат. Було також помічено, що загальні концентрації загальних летких речовин і циклічних сполук сірки зросли в грибах, висушених при конвективній сушці при 80°C, порівняно зі свіжими. Колір, губчастість і загальний сенсорний смак грибів шиїтаке також виявилися прийнятними після сушіння.

Клітинна стінка культивованих грибів містить хітин та глюкани. Ці сахариди змінюються під час термічної дегідратації, що призводить до жорсткості грибів, підвищення їх твердості, жування тощо [43, 59]. Жорсткість можна зменшити шляхом регідратації сушених грибів у гарячій воді або техніки вакуумної регідратації для швидкої регідратації [43, 60].

Було досліджено, що конвективне сушіння грибів шиїтаке викликає лігніфікацію тканин через міграцію вологи. Це викликає зморщування тканин гіф і затвердіння внутрішніх структур. Таким чином, таке сушіння підвищує твердість грибів. [43,61].

Мікрохвильове сушіння сприяє пористості структури в середині грибів шиїтаке, що робить їх хрусткими із помірною твердістю [43, 62]. Такі відмінності в текстурі часто використовуються харчовою промисловістю для виробництва різних продуктів на основі грибів.

Основними із сучасних методів сушіння культивованих грибів можна назвати сублімаційне, конвективне, мікрохвильове, вакуумне, мікрохвильове-вакуумне, сушіння розпиленням-сублімацією, комбіноване волого-

конвективне, електричне сушіння гарячим повітрям, сушіння далеким інфрачервоним випромінюванням (FIRD), гарячим повітрям із проміжним інфрачервоним сушінням (PIRD), вакуумне мікрохвильове сушіння з розпилювальним шаром (VMSD), комбіноване сушіння гарячим повітрям з миттєвим контрольованим перепадом тиску та багато інших.

Конвективне сушіння вважається одним із найпростіших. Було досліджено кінетику зневоднення в залежності від розміру (цілий гриб та подрібнений), при цьому доведено, що подрібнені гриби втрачали воду швидше, ніж цілі [43].

У статті [1], описано, що гриби шиїтаке, попередньо оброблені високою температурою протягом 30 хв, а потім висушені звичайним конвективним сушінням (HAD), збільшили коефіцієнт регідратації та твердість, одночасно демонструючи зменшення потемніння поверхні, усадки та вмісту формальдегіду. Як ферментативні, так і неферментативні процеси під час початкових стадій сушіння сприяли потемнінню, яке пізніше стабілізувалося, оскільки ферменти інактивувалися під дією тепла, і відбувалися лише неферментативні реакції. Складна міграція вологи, що відбувається під час сушіння, призвела до пористої мікроструктури та зниження твердості, що сприяло кращій регідратації [59].

У 2020 році вченими [63] запропоновано та досліджено комбіноване волого-конвективне сушіння, змінивши неоднорідні умови сушіння та додавши відносну вологість на рівні 30 %. Ці дослідження з різним ступенем вологості показали, що збільшення вологості під час сушіння дало зразок грибів з меншою усадкою та кращим коефіцієнтом регідратації, але сушіння займало більше часу. Під час сушіння градієнти вологи та температури, що утворюються всередині продукту, викликають мікроструктурне напруження, яке зрештою призводить до деформації матеріалу (тканини), що називається усадкою. Результати показали, що сушіння у вологій атмосфері значно зменшує усадку та деформацію грибів шиїтаке, а також забезпечує м'яку текстуру порівняно з грибами висушеними конвективним способом [63].

Zhang та ін. [64] порівняли сублімаційне при -50°C , в тіні (сонячне) при 28°C та конвективне сушіння при 50, 100 та 150°C відповідно. З досліджень видно, що загальний вміст фенолів, амінокислот, вуглеводів та антиоксидантна активність були вищими для зразків за конвективного сушіння. Тектурні властивості показали, що зразки за конвективного сушіння були більш хрусткими та твердими, порівняно зі зразками, висушеними іншими методами [64].

Сублімаційне сушіння вважається одним з найкращих методів, який видаляє воду з різних біологічних матеріалів та дає кінцеві продукти значно вищої якості. Оскільки вода знаходиться у формі льоду (твердого стану), вона, як правило, захищає зовнішню форму (первинну структуру) матеріалу під час сушіння. Це також запобігає надмірному усадці та втраті об'єму. Застосовувані температури нижче нуля захищають та зберігають поживні речовини та біоактивні сполуки. Таким чином, воно дуже ефективно для сушіння грибів шиїтаке, які потребують повного сушіння без втрати об'єму, поживних речовин та сенсорних якостей [43, 65].

Сублімаційне сушіння продемонструвало краще збереження білків та полісахаридів (2,47 мг/г та 1,79 мг/г відповідно) у грибах шиїтаке порівняно з інфрачервоним сушінням (2,3 мг/г та 1,39 мг/г) [43, 66].

Згідно з Arguoroulos та ін. [43, 67, 68], сублімовані гриби шиїтаке мали найвищу яскравість кольору з найнижчою жовтизною, що свідчить про мінімальне потемніння поверхні. Вони також показали найвищу пористість зразків ($83,4 \pm 0,5\%$), що відповідає мікроструктурним характеристикам, визначеним за допомогою електронної мікроскопії. Тектурно, зразки, отримані сублімаційним методом, мали найнижчу твердість і максимальну хрусткість, як і очікувалося споживачами для сушених шиїтаке. Не спостерігалось суттєвих змін у вмісті жирів та вуглеводів.

Сублімаційний метод також краще утримував фенольні сполуки, ніж інші методи. В унікальному дослідженні Liu, Luo та ін. [43, 69], вивчали вплив сублімаційного та конвективного сушіння на конформацію ланцюга

полісахаридів, екстрагованих з грибів шиїтаке. З екстрагованих полісахаридів (2 нейтральних та 2 кислих) було відзначено, що сублімаційний метод мав мінімальний вплив на конформацію ланцюга, ніж конвективний, який в іншому випадку сприяв α -конфігурації та зменшував β -конфігурацію в нейтральних та кислих полісахаридах відповідно. Сублімаційний метод посилював антиоксидантну активність, тоді як конвективний сприяв імуностимулюючій активності грибів.

Однак цей метод вважається дуже трудомістким та складним для масштабування. Він також залежить від кількості завантаження, тому збільшення кількості грибів, що сушаться, значно збільшить час сушіння та витрати енергії. Крім того, цей метод є дорогим для промислового виробництва і тому часто обмежений лабораторним використанням (Bhatta et al., 2020). Тому постійно розробляються нові, дешевші технології, які використовують відповідне або мінімальне нагрівання, для досягнення якості, що відповідає якості сушених грибів методом сублімаційного сушіння [65].

Одним із найшвидших методів сушіння культивованих грибів вважається мікрохвильове сушіння. При цьому методі важливо враховувати енергетичні критерії, оскільки виробництво грибів є величезною галуззю та виробляється мільйонами тонн у всьому світі.

Незважаючи на багато переваг, мікрохвильове сушіння має свої обмеження. Одним з них є неоднорідність температури під час нагрівання, а іншим — створення гарячих точок у порожнинах, де локальна температура підвищується до небажаного рівня, що призводить до потенційного обвуглювання [43, 70].

У статті Zhang та ін [43, 71] висвітлено, що в результаті досліджень було визначено меншу антиоксидантну активність та загальний вміст фенолів для грибів шиїтаке, висушених у мікрохвильовій печі потужністю 800 Вт протягом 4 хв, порівняно з конвективним та сублімаційним методом. Було зафіксовано про найнижчий вихід полісахаридів, білків та уронової кислоти для шиїтаке, висушених у мікрохвильовій печі, порівняно з конвективним, сублімаційним

та вакуумним сушінням [43, 72]. Також було відзначено, що за сушіння культивованих грибів даним методом відбувається максимальне потемніння поверхні зразка порівняно з іншими методами.

Тому, враховуючи вищезазначені фактори, і не дивлячись на те, що метод мікрохвильового сушіння є простим та швидким, дослідниками за останній час застосовується цей метод лише у комбінації з іншими режимами для досягнення необхідної якості продукту. Одним із прикладів такого комбінованого методу є метод періодичного мікрохвильового сушіння, який значно скоротила час сушіння порівняно з конвективним. Це дало найвищий вміст полісахаридів (240,28 мг/100 г) та значний азотний аромат (1,17%) під час сушіння, а також помірний рівень альдегідів (0,26%) та кетонів (4,22%). Дослідники розробили подібну комбінований мікрохвильо-вакуумний метод, який, усуває недоліки мікрохвильового сушіння [43, 57].

Tian Y., Zhao, Y., Huang, J., Zeng, H., & Zheng, B. порівнювали мікрохвильо-вакуумний метод із мікрохвильовим, а також із конвективним [43, 72]. Мікрохвильо-вакуумний метод забезпечує кращі якісні показники у порівнянні із звичайним мікрохвильовим чи конвективним. Наприклад, вихід полісахаридів ($13,32 \pm 0,75$ г/100 г сухої маси), коефіцієнт усадки ($45,45 \pm 3,49$), коефіцієнт регідратації ($398,66 \pm 9,06$), різниця в кольорі поверхні ($\Delta E: 5,47 \pm 1,98$) у порівнянні відповідно.



Рис. 1.12. Схема комбінованого мікрохвильово-вакуумно-інфрачервоного методу сушіння [62]

Kantrong, H., Tansakul, A., Mittal, G.S. досліджували сушіння шийтаке за допомогою мікрохвильового вакууму та мікрохвильового вакууму +

інфрачервоного нагрівання. [43, 62]. На рис. 1.12. зображено схему комбінованого мікрохвильо-вакуумно-інфрачервоного методу сушіння культивованих грибів шіітаке [62].

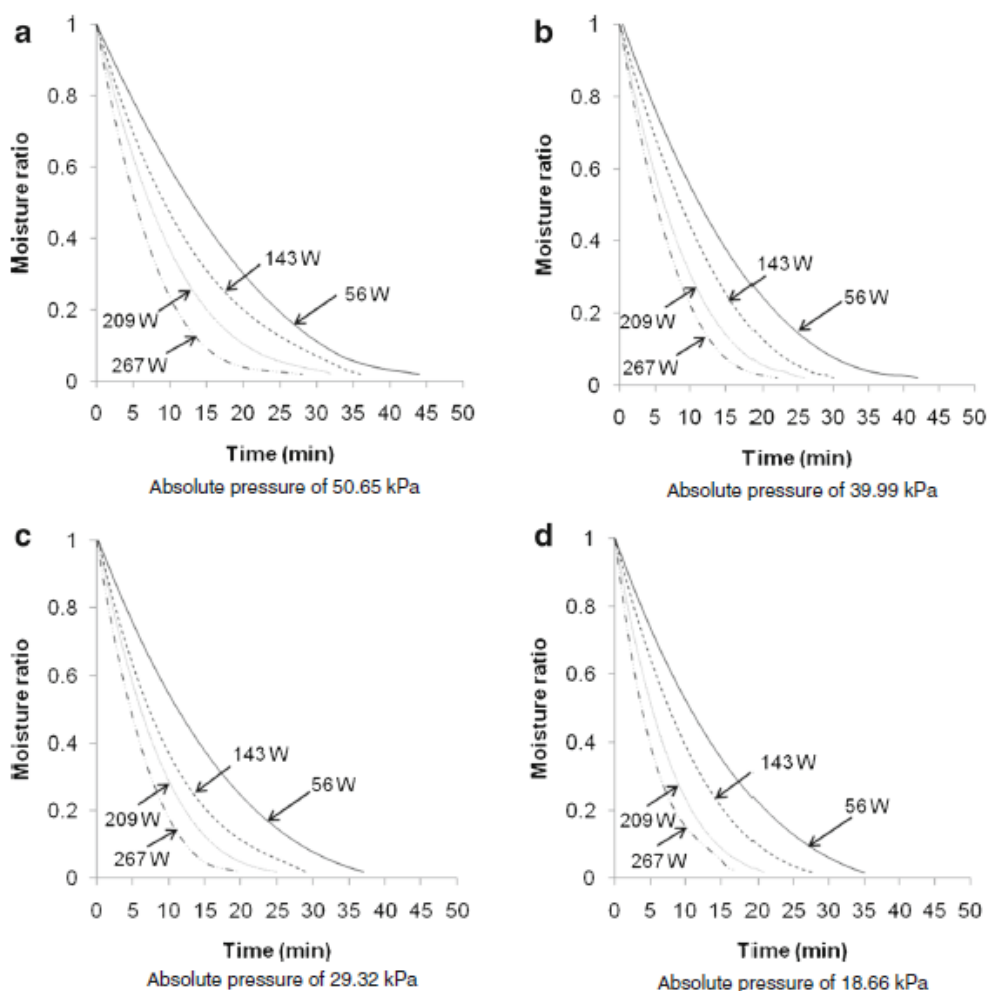


Рис. 1.13. Вплив потужності мікрохвильової печі та абсолютного тиску на коефіцієнт вологості грибів шіітаке під час сушіння мікрохвильо-вакуумним методом (MVD) [62]

Робочі потужності мікрохвиль та абсолютний тиск для мікрохвильового вакууму становили 56, 143, 209 та 267 Вт і 18,66, 29,32, 39,99 та 50,65 кПа відповідно, до яких комбінованим методом при потужності 100 та 200 Вт було додано інфрачервоне випромінювання. Швидкість сушіння збільшувалася зі збільшенням потужності мікрохвиль, а потужність інфрачервоного випромінювання збільшувалася зі зменшенням абсолютного тиску (рис. 1.13). Було висловлено припущення, що метод мікрохвильо-вакуумний +

інфрачервоне нагрівання за оптимізованих умов потужності мікрохвиль (267 Вт), абсолютного тиску (18,66 кПа) та потужності інфрачервоного випромінювання (200 Вт) може забезпечити кращий колір, коефіцієнт регідратації та текстуру сушених грибів шиїтаке, у порівнянні з іншими (рис. 1.14) [43, 62].

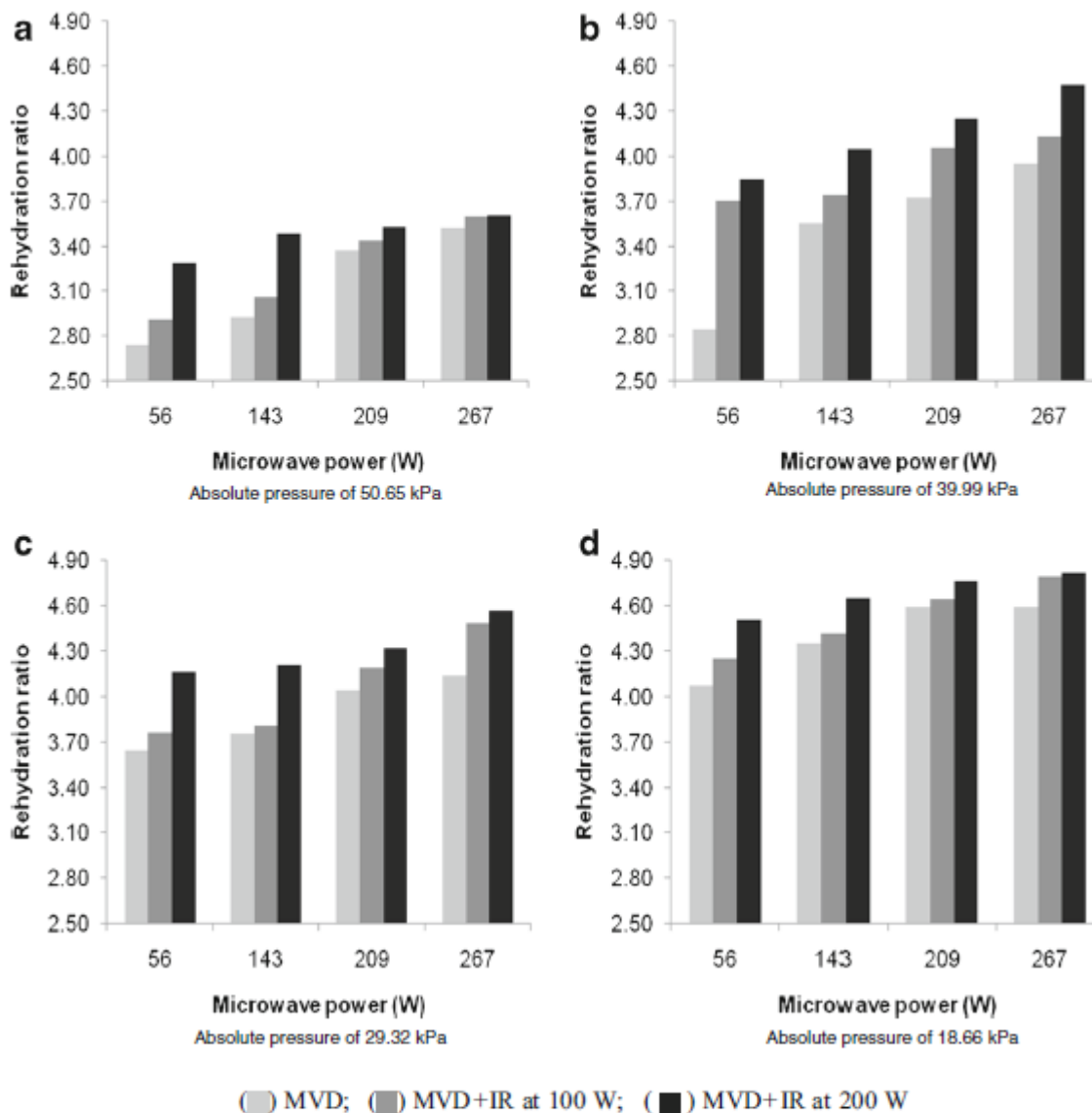


Рис. 1.14. Коефіцієнт регідратації сушених грибів шиїтаке за різних умов сушіння [62]

Питоме споживання енергії під час сушіння за допомогою мікрохвильо-вакуумного сушіння (MVD) грибів шиїтаке наведено на рис. 1.15.a. Результати показали, що при кожній потужності P питоме

споживання енергії зменшується зі збільшенням потужності (MW), оскільки час сушіння коротший при вищій потужності (MW). При постійній потужності (MW) зниження Р зменшує питоме споживання енергії. Це пов'язано з тим, що сушіння за нижчої потужності Р призводить до коротшого часу сушіння, що зменшує питоме споживання енергії.

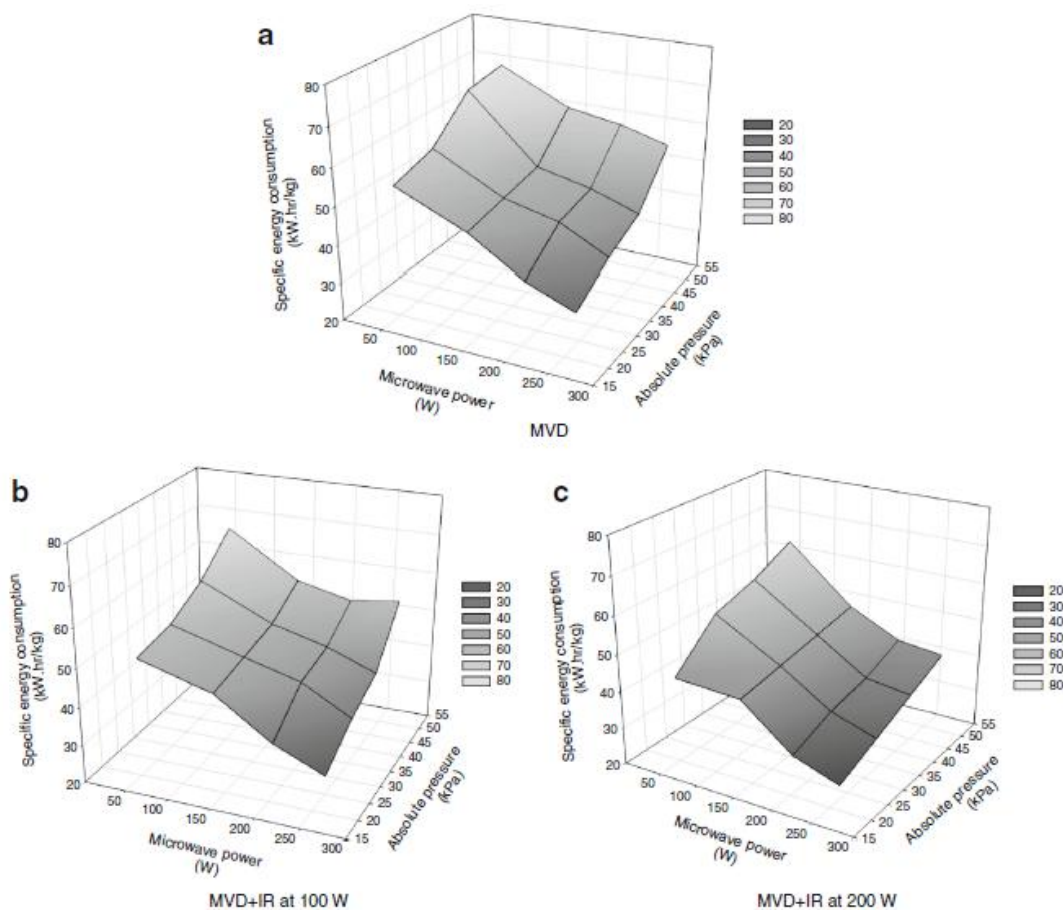


Рис. 1.15. Питоме споживання енергії під час мікрохвильово-вакуумного (MVD) та мікрохвильово-вакуумно-інфрачервоного (MVD+IR) сушіння гриба шиїтаке [62]

Питоме споживання енергії грибами, які проходять мікрохвильово-вакуумне сушіння (MVD+IR) при 100 та 200 Вт, показано на рис. 1.15. b та 1.15. c. Враховуючи вплив інфрачервоного випромінювання (IR), питоме споживання енергії зменшувалося зі збільшенням (IR), оскільки час сушіння був коротшим при вищій потужності (IR) [62].

Дослідниками [62] запропоновано використовувати при зневодненні культивованих грибів метод інфрачервоного випромінювання в поєднанні з

мікрохвильовим вакуумним сушінням (MVD+IR), оскільки це значно покращило колір висушених зразків шиїтаке, а також коефіцієнт регідратації та текстуру регідратованих зразків. Крім того, збільшення MW та IR, а також зниження P призвели до зменшення часу сушіння та питомого енергоспоживання. Як оптимальні умови для сушіння грибів шиїтаке було запропоновано сушіння методом MVD+IR при 267 W MW у поєднанні з 200 W IR під робочим тиском 18,66 кПа [62].

Більш складний комбінований метод сушіння конвективним та мікрохвильо-вакуумним методом призвів до менших змін кольору поверхні ($17,05 \pm 4,67$), ніж звичайний конвективний, а також була краща пористість ($57,4 \pm 1,2\%$) сушених грибів та м'якша текстура [43, 67].

Politowicz, J., Lech, K., Lipan, L., Figiel, A., Carbonell-Barrachina, A. A. досліджували мікрохвильо-вакуумне сушіння та комбінований мікрохвильо-вакуумний-конвективний для шиїтаке [43, 73]. Збільшення потужності мікрохвиль у мікрохвильо-вакуумному методі збільшило вміст летких сполук у шиїтаке (з 680 до 1096 мкг 100 г^{-1}). Однак у комбінованому мікрохвильо-вакуумно-конвективному попередньо висушені гриби при 60, 70°C, а потім висушені за мікрохвильо-вакуумному при 480/240 Вт, призвели до небажаної втрати (~90%) загальної кількості летких речовин, що свідчить про те, що комбінований мікрохвильо-вакуумний-конвективний не може бути оптимальним методом для сушіння шиїтаке.

Kurata, D., Orikasa, T., Komuro, M., Sasaki, K., Koide, S. досліджували мікрохвильо-вакуумне сушіння культивованих грибів шиїтаке при різній потужності мікрохвиль (25 Вт/г, 50 Вт/г та 75 Вт/г сухої речовини) та різному абсолютному тиску (3 кПа, 10 кПа та 20 кПа). Час сушіння скоротився майже в 13-70 разів, ніж при високоаккумулятивному сушінні (конвективний). Також було виявлено, що гриби, висушені при тиску 20 кПа, мали найвищий вихід гуанілової кислоти. Загальна сенсорна якість грибів була значно підвищена, ніж при висушуванні методом гідроксисечовини (конвективний). Цей метод може бути корисним для виробництва закусок на основі грибів та готових до

вживання харчових продуктів, які потребують більшої хрусткості та м'якості [43, 73].

Ще одним методом є сушіння культивованих грибів, за допомогою проміжного інфрачервоного сушіння та вакуумного мікрохвильового сушіння з розпилювальним шаром [43, 73, 74]. Обидва методи виявилися кращими, ніж конвективний, з точки зору часу сушіння та якості продукту. Вакуумний метод мав регідратаційну здатність 450 %. Також було відзначено, що він кращий за текстурою (50 N), вмістом цукру ($36,86 \pm 0,40\%$) та загальним балом сенсорних уподобань $18,05 \pm 0,76$. Дослідники часто виявляли зв'язок між внутрішньою мікроструктурою грибів під час сушіння та їх загальною текстурою.

В одному з таких звітів Zhao, Y., Bi, J., Yi, J., Jin, X., Wu, X., & Zhou, M. [66] зазначили, що попередня обробка грибів шиїтаке ультразвуком на частоті 28 кГц протягом 15 хв перед інфрачервоним сушінням (1350 Вт при 60 °C) скоротила загальний час сушіння на 21,43 %. Також було виявлено, що внутрішня мікроструктура сушених грибів, попередньо оброблених ультразвуком, є однорідною пористою, що забезпечувало бажану текстуру, таку як зниження твердості та підвищення хрусткості. Попередня обробка запобігала надмірному потемнінню поверхні, і гриби, як спостерігалось, мали гарну форму та зовнішній вигляд.

Іншими дослідниками висвітлено дослідження нової технології, яка називається обробкою холодною плазмою, яка широко використовується для покращення процесу зневоднення та збереження якості та поживності різних харчових продуктів, також була застосована для грибів шиїтаке [75]. Пряма обробка холодною плазмою та холодна плазмово-активована вода використовувалися для попередньої обробки грибів шиїтаке, які додатково сушилися за допомогою конвекції при температурі від 50 до 70°C. Мікроморфологічні особливості, такі як внутрішньоклітинні простори, більші порожнини та менша щільність на поверхні грибів, спостерігалися за допомогою SEM-аналізу. Обробка холодною плазмою покращувала

масообмін під час сушіння, що ще більше знижувало енергію активації, тривалість та необхідну енергію, ніж необроблені зразки. Гриби, оброблені холодною плазмою, мали кращий вміст фенольних з'єднань (463,30 мг/100 г), флавоноїдів (100,70 мг/100 г) та відносне інгібування DPPH (0,201), ніж необроблені гриби, що робить обробку холодною плазмою надійним методом попередньої обробки, що робить кінцевий продукт кращої якості [75].

Позитивний вплив комбінованих або гібридних технологій на сушіння грибів був обговорений багатьма дослідниками [43]. Нові гібридні технології конвекційного сушіння з використанням середнього інфрачервоного випромінювання (MIRCD), сушіння з використанням гарячого повітря (конвекція) та радіочастот (НА-RF) та сушіння з використанням гарячого повітря (конвекція) та мікрохвиль (НА-MW) були розроблені та досліджені Wang, H., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. на грибах шіітаке [76].

Ці експерименти в лабораторних умовах показали значну якість продукту, ніж при конвективному сушінні. Температура для всіх експериментів становила 60°C, а потужність 4 Вт/г для гібридних технологій. Мікрохвильо-конвективний метод продемонстрував найкоротший час сушіння, тоді як сушіння з використанням середнього інфрачервоного випромінювання (MIRCD) та сушіння з використанням гарячого повітря (конвекція) та радіочастот (НА-RF) сушені гриби мали менші зміни кольору та втрати поживних речовин. Метод конвекційного сушіння з використанням середнього інфрачервоного випромінювання (MIRCD) забезпечив низьку усадку та кращу регідратацію. Він також продемонстрував кращі мікроструктурні закономірності, що пояснюють його текстуру та кращі якісні характеристики.

Подібна гібридна техніка поєднувала сушіння в середньому інфрачервоному діапазоні (MIRD) з сублімаційним сушінням (FD) для сушіння грибів шіітаке, що призвело до скорочення часу сушіння, покращеної регідратації, збереження кольору та летких ароматичних сполук [43, 77].

Якісні показники (регидратація та мікроструктурні дослідження) показали, що сублімаційне зневоднення (FD) з подальшим сушінням в середньому інфрачервоному діапазоні (MIRD) була кращою, ніж навпаки, а також заощадила 48 % часу. Ця комбінація також мала значний вплив на збереження характерного аромату, спричиняючи збільшення вмісту сполук сірки (1,2,4-третіолан, диметил, трисульфід). Було виявлено, що сублімаційне зневоднення (FD) з подальшим (MIRD) краще зберігає якість грибів [43].

Zhao, Bi, Yi, Jin та ін. розробили новий метод, що використовує концепції гібридної технології, що називається комбінованим миттєвим контрольованим скиданням тиску гарячим повітрям, і порівняли його з методами конвекції, теплового насоса, сублімаційного сушіння та сушіння в інфрачервоному діапазоні. Однак він не показав хороших результатів, оскільки було відзначено, що метод далекого інфрачервоного випромінювання давав гриби кращої якості, ніж інші методи, з точки зору кольору ($\Delta E = 6,10$), текстури (34,82 N), коефіцієнта регидrataції (7,55) та загального зовнішнього вигляду [43, 78].

Отже, спираючись на вищезазначений аналіз літературних джерел та порівнюючи ефективність та вплив нових та традиційних методів, можна відмітити, що споживачі часто віддають перевагу сушеним грибам на основі їхнього кольору (помірне підрум'янення), текстури (хрустка), сильного смаку/аромату умами та мінімальної усадки з кращою/швидшою здатністю до регидrataції.

То ж, за допомогою мікрохвильово-вакуумного, сублімаційного сушіння та деяких новітніх гібридних технологій, такі як холодна плазма та інфрачервоне сушіння з випаровуванням за допомогою гідроксисечової сушіння (HAD), можна виробляти сушені шіїтаке, які відповідають очікуванням споживачам. Однак гібридні технології, такі як сублімаційно-інфрачервоне та мікрохвильово-вакуумне-конвективне сушіння дали неоднозначні результати якісних та енергетичних характеристик, тому це

питання потребує додаткових досліджень [43]. Варто відмітити, що ці комбіновані методи сушіння є дорого вартісними.

Дослідники весь час намагаються розробити нові, але прості та енергоефективні та надійні методи сушіння. Найпростішим та найпопулярнішим вважається конвективне сушіння. Однак, як зазначено у вищеописаних наукових працях, при цьому методі відбувається небажане побуріння, зниження аромату, поживних речовин та призводить до твердої текстури, що спричиняє неефективну регідrataцію. Сучасні комбіновані методи демонструють незначні відмінності щодо якості кінцевого продукту, проте залишаються на розсуд виробників, які схильні виправляти конкретні недоліки у своїх виробничих процесах, застосовуючи ці методи. Технології з використанням мікрохвильової печі показують багатообіцяючі результати, але потребують початкового капіталу, кваліфікованої робочої сили, регулярного обслуговування, а неправильне поводження може призвести до катастрофічного зниження якості шийтаке. Нові методи розроблені з єдиною метою отримання найкращих якісних характеристик шийтаке, але вони є дуже дорогими, мають високі капітальні витрати та на обслуговування.

Оскільки шийтаке, на відміну від деяких екзотичних грибів, є типовим недорогим продуктом, який іноді навіть є частиною основного раціону для багатьох споживачів, його собівартість обов'язково повинна бути низькою. Це змушує виробників вибирати найекономічніший метод термічної дегідратації без шкоди для якості кінцевого продукту. Майбутні дослідження, що стосуються цих процесів для шийтаке, повинні враховувати комбіновані технології, при яких складніша техніка прискорює процес разом із кращим виходом, в той час як простіша техніка враховує економічні аспекти комбінованого процесу [43]. То ж пошук енергоефективних режимів для зневоднення культивованих грибів є актуальним завданням.

Крім шийтаке, до розповсюджених культивованих грибів відносяться ерінги - королівська глива (*Pleurotus eryngii*), що широко використовується в харчовій промисловості завдяки своїм кулінарним якостям, привабливій

текстурі та смаку, а також має фармацевтичні властивості. Цей гриб, в основному, культивують у Китаї та Японії, а його частка ринку в Кореї вища, ніж у інших різновидів грибів [79].

Лише 45 % культивованих грибів використовується у свіжому вигляді, оскільки вони є сезонними та мають короткий термін зберігання [79, 80].

До основних методів сушіння культивованих грибів ерінги відносяться як традиційні, так і сучасні, при чому дослідники постійно прагнуть до розробки найбільш енергетично вигідного методу зневоднення.

Сублімаційні методи застосовуються і для сушіння грибів ерінги, однак у традиційних системах заморожування текстура зазнає серйозних пошкоджень через великі кристали льоду, що утворюються під час повільнішого блочного заморожування [79, 81]. Невідповідні методи заморожування призводять до утворення великих кристалів льоду, які руйнують конфігурацію клітинної стінки свіжих продуктів.

Порівняно з повільнішим блочним заморожуванням, метод індивідуального швидкого заморожування (IQF) з використанням криогенних газів швидко знижує температуру зразка до точки замерзання та зберігає цілісність клітин, майже не змінюючи їхню поживну якість та сенсорні характеристики [79].

У дослідженні [79] шийтаке заморожували методом природної конвекції повітря (NF) при температурі -20°C або методом заморожування IQF при температурі $-62,5^{\circ}\text{C}$ (швидкість 8,23 м/с) згідно з методом, описаним Shim et al. [82]. Коли температура всередині зразків досягала -20°C , процес заморожування припиняли, і вони зберігалися у вакуумній упаковці при температурі -20°C . Всі заморожені зразки розморожували одним із наступних трьох методів: (NT) при кімнатній температурі, FT при 4°C або мікрохвильове (MT) при 620 Вт. Розморожування припиняли, коли температура всередині зразків досягала 4°C .

На рис. 1.16. представлено криві розморожування міні- та нарізаних кубиками грибів, які були оброблені трьома методами розморожування.

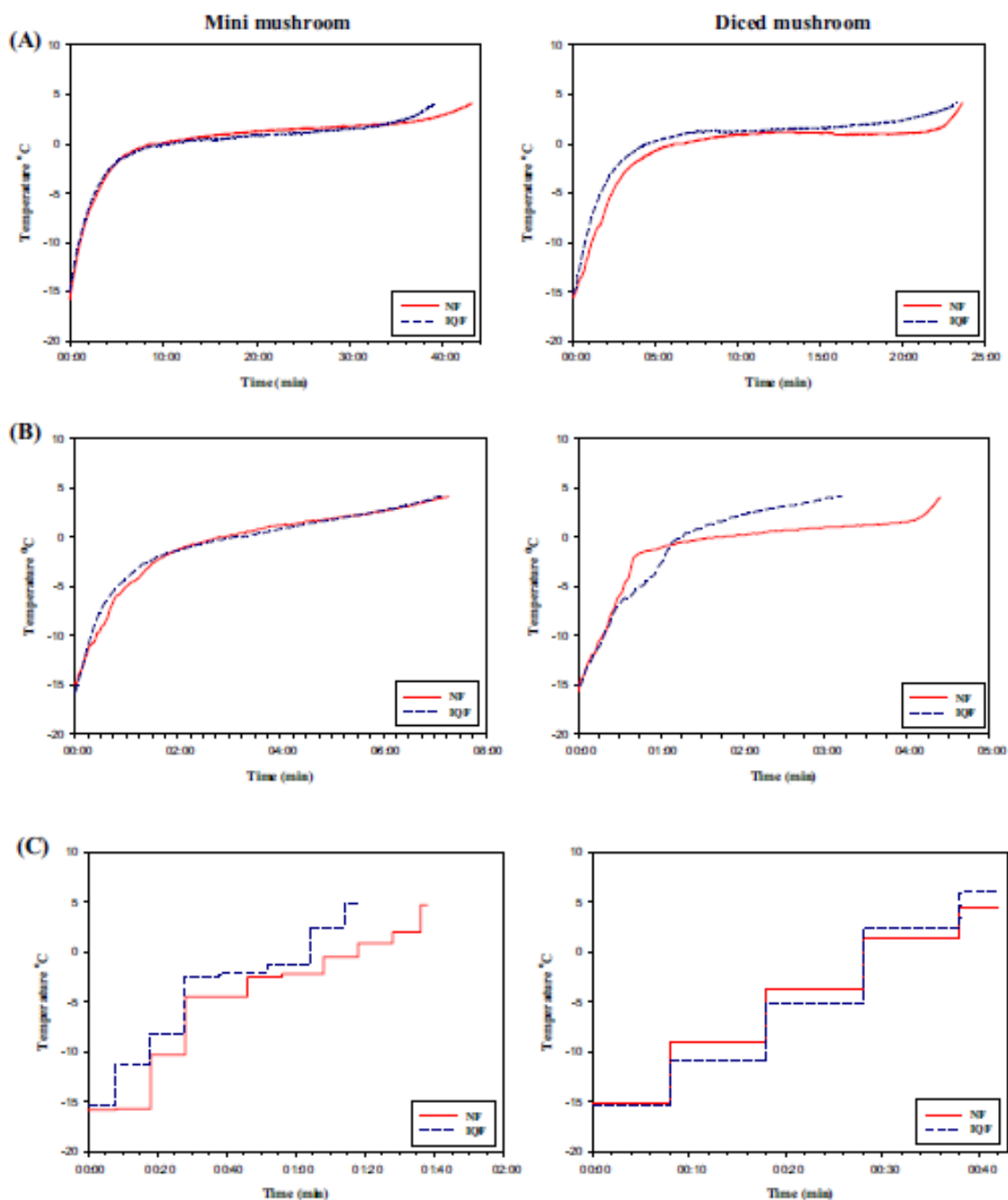


Рис. 1.16. Криві розморожування для різних методів розморожування:
 (A) NT (природне повітряне конвекційне розморожування);
 (B) FT (розморожування у проточній воді);
 (C) MT (мікрохвильове розморожування). NF Природне заморожування, IQF Індивідуальне швидке заморожування

Усі зразки показали, що процес розморожування помітно сповільнювався, коли температура була вище 0°C [79].

У випадку NT (без заморожування), міні-гриби, заморожені методом NF (без заморожування), розморожувалися найдовше – 42,48 хв, а ті, що були заморожені методом IQF (замороження окремо), – 38,56 хв, щоб досягти 4°C. У випадку нарізаних кубиками грибів, зразки, заморожені методом IQF (замороження окремо), досягали 4°C швидше порівняно з тими, що були заморожені методом NF. У FT (без заморожування), зразки міні-грибів IQF (без заморожування окремо) та NF (без заморожування окремо) показали однакові криві розморожування. Зразкам знадобилося 7 хвилин, щоб досягти 4°C.

Однак час, витрачений на нарізані кубиками гриби, заморожені природним методом (NF), був довшим, ніж на ті, що були заморожені методом індивідуального швидкого заморожування (IQF). Порівняно зі зразками природного повітряного конвекційного розморожування NT (без заморожування окремо), зразки розморожування у проточній воді (FT) індивідуального IQF та природного NF досягають 4°C швидше [79].

Зразки, що були заморожені методом індивідуального швидкого заморожування (IQF) розморожуються швидше, ніж зразки заморожені природним методом (NF), оскільки NF призводить до утворення великих кристалів льоду, що може уповільнити криву розморожування. У цьому дослідженні діаметр пор IQF менший, ніж у NF.

Метод індивідуального заморожування (IQF), вважається кращим способом заморожування зразків для збереження цілісності клітин, а також текстури [79]. Однак методи сублімаційного сушіння є енергозатратними.

У науковій статті [83] представлено експериментальні дослідження сушіння культивованих грибів ерінги конвективним методом. Дослідники подрібнювали гриби, поміщали до сушильної камери з постійною температурою 40, 50, 60, 70 та 80°C відповідно, відносною вологістю 20 % та швидкістю повітря 2 м/с (рис. 1.17, 1.18).

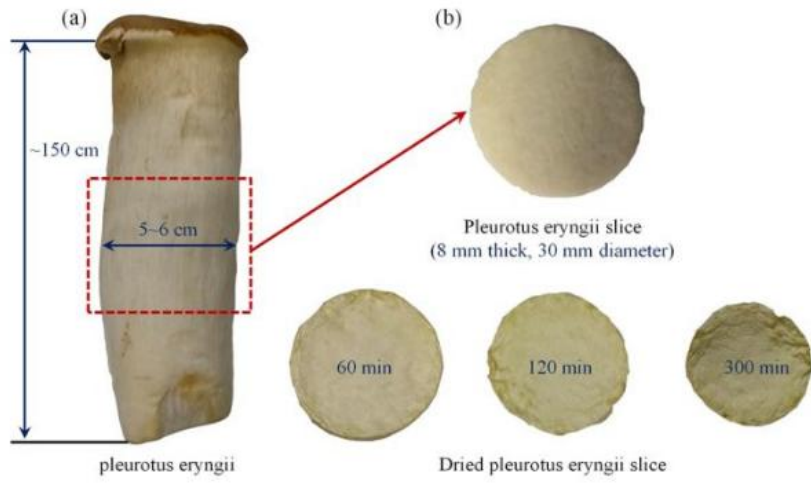


Рисунок 1: (a) Свіжий *P. eryngii* та його зрізи та (b) до та після сушіння.

Рис. 1.17. Культивовані гриби ерінги а - свіжий гриб, б – зрізи до та після сушіння [83]

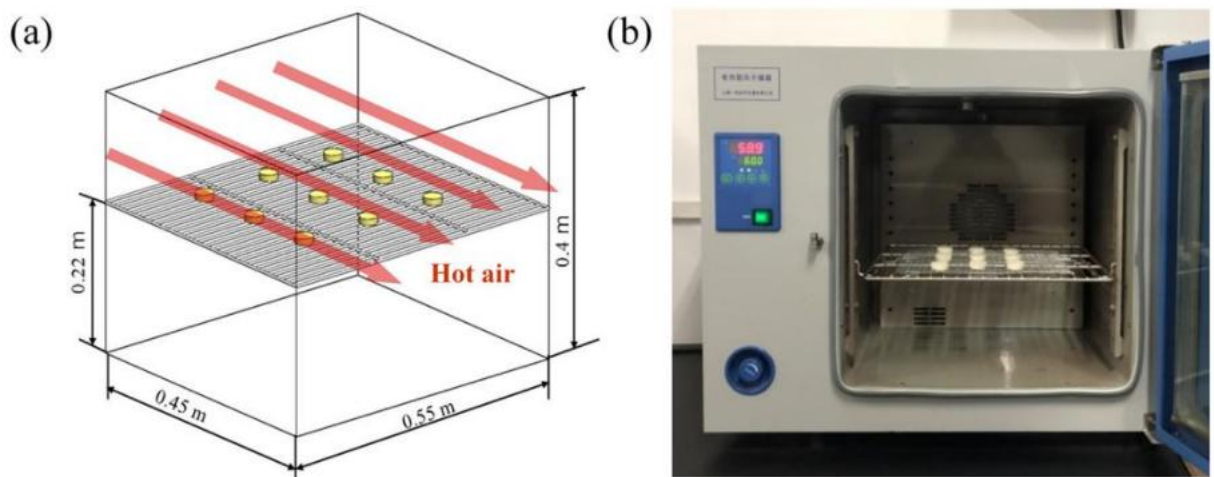


Рис. 1.18. Процес сушіння гарячим повітрям: (a) схема процесу сушіння гарячим повітрям та (b) сушильна камера [83]

На рис. 1.19 представлено кінетику конвективного сушіння культивованих грибів ерінги з товщиною зразка 8 мм за температури теплоносія 40 - 80°C та швидкості 2 м/с. Як видно, при збільшенні температури теплоносія швидкість видалення вологи є прямо пропорційна. Знадобилося 250, 210, 160, 140 та 130 хв, щоб висушити зразки до рівноважної вологості за температури 40, 50, 60, 70, 80 °C відповідно (рис. 1.19). Це пояснюється тим,

що вищий градієнт температури між зразком та теплоносієм (навколишнім середовищем) прискорює випаровування та рух вологи в середині зразка гриба під час процесу. Також зазначено, що тривалість сушіння збільшується зі збільшенням товщини зразка [83].

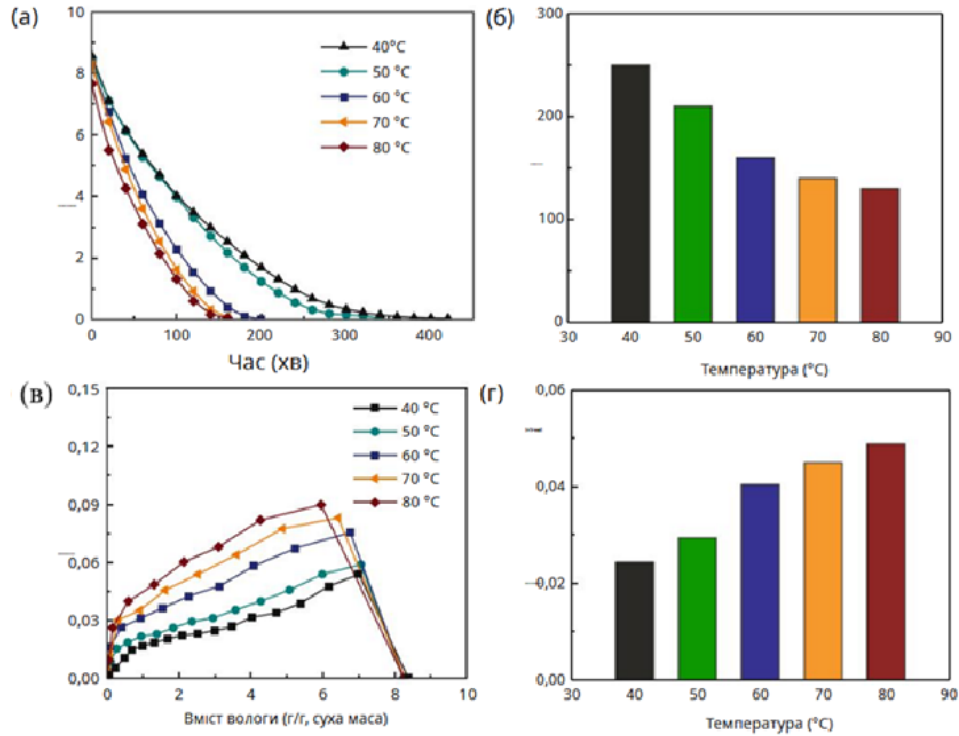


Рис. 1.19. Кінетика сушіння зрізів культивованих грибів ерінги товщиною 8 мм та діаметром 30 мм за різних температур теплоносія зі швидкістю повітря 2 м/с: а – зміна вмісту вологи в залежності від часу; б – тривалість процесу за різних температур; в – зміна швидкості сушіння в залежності від вологості; г – порівняння швидкості висихання за різних температур

Таблиця. 1.1.

Ефективний коефіцієнт дифузії вологи зразків культивованих грибів ерінги в залежності від температури теплоносія [83]

Number	Hot air temperature (°C)	Sample thickness (mm)	ln(MR)	D_{eff} ($10^{-9} m^2/s$)
1	40	8	$\ln MR = -2.3234 \times 10^{-4}t + 0.6322$	1.51
2	50	8	$\ln MR = -2.5338 \times 10^{-4}t + 0.6051$	1.64
3	60	8	$\ln MR = -3.1588 \times 10^{-4}t + 0.5042$	2.05
4	70	8	$\ln MR = -4.4537 \times 10^{-4}t + 0.5103$	2.89
5	80	8	$\ln MR = -5.0246 \times 10^{-4}t + 0.5777$	3.26
6	70	4	$\ln MR = -2.0959 \times 10^{-3}t + 0.6354$	3.40
7	70	12	$\ln MR = -1.5443 \times 10^{-4}t + 0.5016$	2.25

Дані експериментальні результати показують, що під час процесу конвективного сушіння зрізів культивованих грибів спостерігається лише період спаду швидкості, а період постійної швидкості не спостерігається. Час сушіння може скорочуватися зі збільшенням температури гарячого повітря та/або зменшенням товщини зразка. Логарифмічна модель найкраще відповідає кінетиці сушіння гриба. Ефективні коефіцієнти дифузії вологи представлені в таблиці 1.1.

Висушені скибочки стають темнішими зі збільшенням температури теплоносія, а загальна зміна кольору збільшується з 5,40 до 18,73 при підвищенні температури від 40 до 80°C, що вказує на реакцію побуріння Майяра зі зменшенням вмісту вологи під час сушіння. Це дослідження допомагає зрозуміти кінетику сушіння культивованих грибів ерінги та може допомогти в оптимізації процесу сушіння та розробці нового сушильного обладнання [83].

У науковій статті [84] висвітлено дослідження та вплив різних методів сушіння: природне (ND), конвективне (HD), вакуумне (VD), інфрачервоне (ID), мікрохвильове (MD) та сублімаційне (FD) сушіння на колірність, коефіцієнт усадки (SR), коефіцієнт регідратації (RR), твердість, хрусткість, мікроструктуру, поживні компоненти та вільні амінокислоти культивованих грибів ерінги.

Результати показали, що на ці параметри помітно впливають різні методи сушіння. Серед них сублімаційний (FD) був найефективнішим, який зберіг основні характеристики свіжого гриба за вищезазначеними показниками, на другому місці природний (ND) та конвективний (HD) при 40 °C. Однак, незважаючи на найкоротший час сушіння, обробка мікрохвильовим (MD) методом не підходила для процесу сушіння скибочок культивованих грибів, оскільки вона погіршувала фізико-хімічні властивості та спричиняла значні втрати основних поживних речовин та вільних амінокислот. Дані результати забезпечують теоретичну основу для промислової переробки культивованих грибів [84].

Для сушеної сільськогосподарської продукції колір є одним з найважливіших показників якості, що впливає на апетит споживачів, сприйняття та товарну цінність продукції. Чим менша загальна різниця в кольорі (ΔE), тим ближчий колір до свіжого зразка. Значення кольору свіжих та сушених скибочок ерінгів, висушених різними методами, наведено в Таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Колір свіжих та висушених зрізів грибів ерінги

	Color parameters			
	L*	a*	b*	ΔE
Fresh	72.8 ± 3.9ab	-0.2 ± 0.2d	4.6 ± 0.5c	
ND	55.5 ± 4.0cd	1.7 ± 0.3b	10.3 ± 0.9bc	21.3 ± 2.6 bc
HD40	64.1 ± 2.8bc	1.6 ± 0.4bc	15.5 ± 4.9b	19.4 ± 1.1 c
HD60	54.5 ± 4.2cd	1.4 ± 0.3bc	13.4 ± 2.4b	23.7 ± 2.3 bc
VD40	53.4 ± 3.7de	2.5 ± 0.4b	11.4 ± 1.2b	23.8 ± 1.3 bc
VD60	52.3 ± 2.8de	2.2 ± 0.8b	10.6 ± 1.1b	24.4 ± 1.5 bc
ID40	53.7 ± 2.4de	1.5 ± 0.4bc	11.7 ± 1.9b	23.5 ± 1.8 bc
ID60	51.8 ± 2.4de	2.4 ± 0.2b	13.2 ± 0.5b	25.8 ± 2.1 b
MD	44.6 ± 3.0e	7.9 ± 0.8a	25.8 ± 1.5a	39.3 ± 3.2 a
FD	79.3 ± 1.6a	0.4 ± 0.3cd	10.1 ± 1.9bc	11.2 ± 0.8 d

За винятком сублімаційного методу (FD), усі висушені зразки демонстрували меншу яскравість (значення L*), вищу червонуватість (значення a*) та жовтизну (значення b*) порівняно зі свіжим зразком, і була виявлена значна різниця ($p < 0,05$) у значеннях L*, a*, та b* серед різних методів сушіння. Подібні результати також були зареєстровані для грибів шиїтаке [72].

Як і очікувалося, значення L*, найближчі до свіжого зразка, були виявлені у зразках, висушених сублімаційним методом (FD). Це можна пояснити тим, що в сушильній камері за низької температури та тиску було присутнє менше кисню, що призвело до менш інтенсивних ферментативних реакцій потемніння та неферментативних реакцій потемніння.

Зразок конвективного сушіння (HD) при 40 °C має вищі значення L^* та нижчі значення ΔE порівняно зі зразками (HD) при 60 °C. Отже, основною причиною потемніння кольору висушеного зразка може бути нагрівання під час сушіння, що викликає неферментативні реакції потемніння, які залежать від температури та часу нагрівання [84].

Фізичні характеристики, такі як твердість, хрусткість, усадка та здатність до зневоднення, зазвичай використовуються для оцінки механічних властивостей і визначаються як стійкість матеріалу до деформації або проникнення, і залежать від поверхні та внутрішньої структури. Найголовніше, що ці параметри можуть впливати на упаковку, транспортування та їстівну якість сушеної продукції. Крім того, вільні амінокислоти є важливими смаковими активними сполуками в їстівних грибах, особливо Asp та Glu, які відповідають за смак умами їстівних грибів [84]. Тому вибір методів сушіння та параметрів обробки має велике значення.

Після процесу сушіння важливо визначати якісні показники. Дослідниками [84] визначено залежність коефіцієнту усадки (SR) та коефіцієнту регідратації (RR) різних висушених скибочок грибів ерінги від режиму сушіння, як показано на рис. 1.20.

Зразки за вакуумного, інфрачервоного та мікрохвильового методу зневоднення (VD40, VD60, ID40, ID60 та MD) мали вищий показник коефіцієнту усадки (SR), який коливався від 0,81 до 0,85, але суттєвої різниці не було. Далі наведені зразки конвективного сушіння (HD40, HD60) зі значеннями коефіцієнту усадки (SR) від 0,72 до 0,73. Найнижчий показник SR був виявлений у продуктах, отриманих сублімаційним методом FD (0,19), що вказує на те, що об'єм скибочок грибів залишався незмінним під час процесу [84].

У системі FD сублімація льоду залишала розгалужену мережу пор, тому усадка була незначною. Подібно до ND, HD був конвективним процесом сушіння, і усадка була більш помітною порівняно з FD14. Процес вакуумного методу (VD) у цьому дослідженні займав більше часу, ніж конвективний (HD)

за тієї ж температури, що призвело до усадки продукту та утворення затверділої кірки.

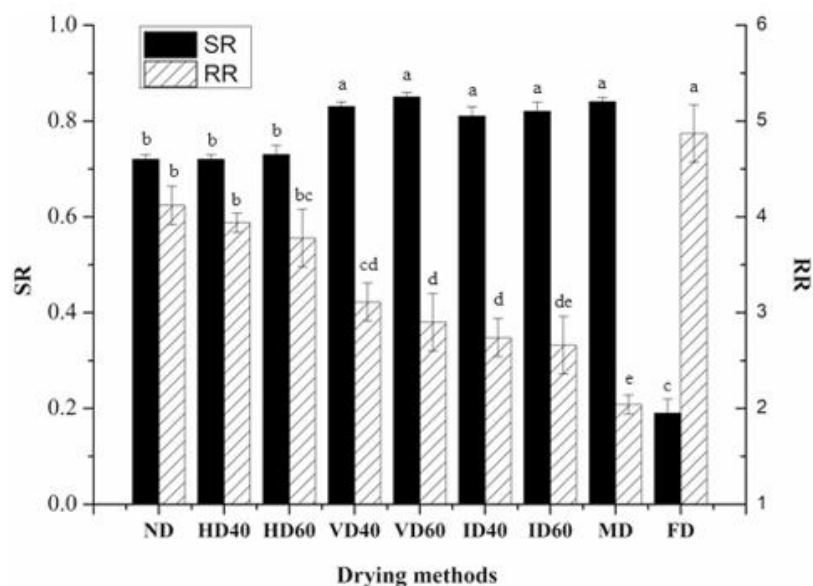


Рис. 1.20. Коефіцієнт усадки (SR) та коефіцієнт регідратації (RR) висушеного зразка ерінги за допомогою різних методів сушіння [84]: ND - природний, HD - конвективний, VD - вакуумний, ID - інфрачервоний, MD – мікрохвильовий, FD - сублімаційний

Різні малі літери вказують на статистично значущі відмінності між середніми значеннями ($p < 0,05$) для SR та RR

У процесі ID інфрачервоне випромінювання проникало в продукт, а потім перетворювалося на теплову енергію через молекулярні вібрації, і це тепло зрештою поглиналося матеріалами без нагрівання навколишнього повітря. Для зразка MD мікрохвильова енергія створила дуже пористу структуру грибів, сприяючи транспортуванню водяної пари, що призвело до набухання клітин, оскільки випаровування води прискорювалося завдяки переважному поглинанню [84].

Фізичні та хімічні зміни під час процесу сушіння мали значний вплив на коефіцієнт регідратації RR, як і пористість поверхневих пор та внутрішня структура продуктів. Як видно з рис. 1.20 зразок сублімаційного сушіння (FD) показав найвищий коефіцієнт регідратації RR (4,87), далі йдуть гриби,

висушені природним або конвективним методом (ND, HD40 та HD60), які не мали суттєвої різниці ($p < 0,05$). Конвективне та вакуумне сушіння призвели до очевидної усадки грибів, утворюючи щільну структуру, і, можливо, лише зруйновані капіляри зменшили здатність до утримання води під час регідратації [84].

Дослідниками було виявлено, що поверхня продукту мікрохвильового сушіння (MD) демонструвала значну усадку та тверду кірку, що знижувало здатність до регідратації. Температура сушіння мала незначний вплив на регідратаційну здатність зрізів грибів [84].

Однак зразки, висушені за нижчої температури, мали відносно вищий RR (відносний коефіцієнт регідратації), ніж ті, що висушені за вищої температури. Подібна тенденція спостерігалася також у інших дослідників. Це може бути пов'язано з інтенсивнішою зміною вологості зразків за вищої температури, що спричиняло серйозніше пошкодження капілярів і надалі призводило до змін осмотичних властивостей клітини, а також до меншої дифузії води через поверхню під час регідратації [84].

У таблиці 1.3. представлено вміст вологи та приблизний склад (г/100 г сухої маси) свіжих та висушених зразків культивованих грибів ерінги [84]. Як видно з даних, найвищий вміст білку, наближений до білку свіжого зразка, у грибах, висушених сублімаційним та конвективним методами.

Отже, фізико-хімічні властивості, мікроструктури, поживний склад та вільні амінокислоти культивованих грибів ерінги суттєво зазнали впливу різних методів сушіння. Серед них сублімаційний метод був найефективнішим та зберіг основні характеристики свіжого гриба щодо фізико-хімічних властивостей, мікроструктури, поживного складу та вільних амінокислот. На другому місці конвективний метод. Висновок даної наукової статті збігається з іншими в тому, що обладнання для сублімаційного методу було досить дорогим, а процедура обробки вимагала багато часу та енергії. Мікрохвильове сушіння погіршує фізико-хімічні властивості зразків

культивованих грибів та призводить до масових втрат основних поживних речовин та вільних амінокислот [84].

Тому вплив методів сушіння на біоактивні речовини, включаючи активні полісахариди та феноли, та біологічну активність грибів все ще потребує подальшого вивчення. Крім того, необхідно провести подальші дослідження процесу сушіння, щоб покращити харчову якість та якісний стан культивованих грибів ерінги [84].

Останнім часом значна кількість робіт присвячена дослідженням впливу комбінованих способів сушіння, що дозволяє інтенсифікувати процес та скоротити тривалість сушіння [84].

Наприклад, поєднання радіаційного сушіння з гарячим повітрям забезпечує найкоротший час сушіння, в той час як комбінування конвекції та радіочастотної енергії демонструє кращі властивості кольору та збереження поживних речовин гриба. За випробуваних умов, сушіння конвекцією з ІЧ випромінюванням в середньому діапазоні хвиль забезпечує мінімальну усадку та нижчу твердість при регідратації [85].

У статті [85] представлено огляд літературних джерел по процесах переробки культивованих грибів на сухий продукт. У статті вказано, що традиційним методом сушіння шиїтаке є конвективне сушіння, яке зазвичай проводять в декілька етапів при невисоких температурах, а саме, в межах від 50 до 75°C. Швидкість руху теплоносія в середньому становить не менше 0,5 м/с. Загальна тривалість процесу в залежності від типу конвективної сушарки сягає до 10-12 год. Дослідження кінетики конвективного сушіння шапинок гриба в діапазоні температур 30–70°C показало, що верхня температурна межа не повинна перевищувати 50 °C. Зі збільшенням температури та швидкості сушіння зразки характеризувались падаючими періодами швидкості сушіння при відсутності постійного періоду сушіння, що вказує на домінування дифузійного процесу видалення вологи із середини матеріалу на поверхню. Крім того, підвищення температури негативно впливало на колір висушеного матеріалу та його здатність до регідратації [85].

Таблиця 1.3.

Вміст вологи та приблизний склад (г/100 г сухої маси) свіжих та висушених зразків культивованих грибів ерінги [84].

	Moisture	Protein	Fat	Ash	Reducing sugar	Carbohydrate
Fresh		22.1 ± 0.2b	2.5 ± 0.2a	6.5 ± 0.2a	2.9 ± 0.3a	63.4 ± 0.5e
ND	4.7 ± 0.4a	21.9 ± 0.1b	2.3 ± 0.1a	6.7 ± 0.3a	2.8 ± 0.2a	63.3 ± 0.7e
HD40	4.6 ± 0.3a	21.4 ± 0.3bc	2.3 ± 0.3a	6.4 ± 0.1a	2.4 ± 0.1ab	64.3 ± 0.5e
HD60	4.5 ± 0.2a	20.8 ± 0.4c	2.4 ± 0.1a	6.3 ± 0.4a	2.0 ± 0.2bc	65.0 ± 0.6de
VD40	4.9 ± 0.5a	18.2 ± 0.2d	2.3 ± 0.2a	6.5 ± 0.5a	2.0 ± 0.2bc	67.1 ± 0.4cd
VD60	4.8 ± 0.3a	17.5 ± 0.5de	2.2 ± 0.4a	6.4 ± 0.6a	1.5 ± 0.1cd	68.1 ± 0.5bc
ID40	4.5 ± 0.4a	17.9 ± 0.1de	1.5 ± 0.2b	6.6 ± 0.3a	1.9 ± 0.2bc	68.5 ± 0.6bc
ID60	4.4 ± 0.2a	17.1 ± 0.4e	1.4 ± 0.1b	6.4 ± 0.2a	1.3 ± 0.1de	69.7 ± 1.3ab
MD	4.2 ± 0.4a	15.6 ± 0.3f	1.2 ± 0.3b	6.9 ± 0.6a	0.8 ± 0.1e	71.1 ± 1.0a
FD	4.4 ± 0.6a	25.7 ± 0.2a	2.1 ± 0.2a	6.5 ± 0.4a	2.9 ± 0.3a	60.3 ± 0.8f

Для повної інактивації грибних ферментів рекомендовано проводити сушіння за температури не вище за 70 °С для запобігання накопиченню продуктів реакції Майяра та карамелізації продукту. В процесі сушіння посилюється аромат та унікальний смак гриба. Так, при зневодненні гарячим повітрям температурою 50°С в ніжках гриба відмічено утворення більшої кількості фенольних сполук, нейтральних цукрів, нуклеотидів, аміно- та уронових кислот, ніж в шапинках. Підвищення температури до 60°С призводить до збільшення загального вмісту органічних кислот та ароматоутворюючих речовин. Зокрема, зразки висушені при температурі 70°С характеризувались найвищими показниками зазначених вище сполук (грибний смак умами) [85].

Guo та ін. [86] стверджують, що для досягнення стабільності біологічно активних речовин та високих регідратаційних властивостей, збереження кольору після зневоднення необхідно застосовувати сушіння культивованих грибів періодичним способом за температури 55°С з певними інтервалами між періодами сушіння. Наприклад, впродовж перших 5 год сушіння інтервали становлять 5 хв через кожні 55 хв процесу, впродовж наступних 7 год – 10 хв

через кожні 50 хв висушування та наприкінці процесу інтервал збільшується до 15 хв через кожні 45 хв [85].

У науковій роботі [87] вказано, що для запобігання потемніння при сушінні гарячим повітрям, шийтаке попередньо замочують у слабкому розчині гідросульфіту натрію (0,05–0,1%) впродовж 5 - 10 хв. Після цього слайси гриба висушують при температурі 30°C з поступовим її підвищенням (2°C/год) до 50 °C із загальною тривалістю процесу 12–13 год [85].

Для підвищення вмісту ароматоутворюючих речовин за рахунок термічної активації специфічних ферментів рекомендовано спочатку проводити попереднє конвективне сушіння шийтаке повітрям поступово підвищуючи температуру з 45°C до 75°C впродовж 30 хв з послідуєчим сушінням при зниженій до 45°C температурі впродовж 4,5 год. Впродовж проведення попереднього сушіння активність даних ферментів залишається високою, що сприяє утворенню ароматоутворюючих речовин та більш високому вмісту сполук сірки. Висушені за таких температурних режимів частинки гриба характеризуються більшою твердістю та коефіцієнтом регідратації, але зменшеним ступенем усадки та потемніння [1, 85].

У [88] встановлено, що температура 55°C є оптимальною при конвективному сушінні шийтаке, оскільки забезпечує найменшу тривалість процесу та найбільший вміст біологічно активних β -глюканів [85].

Перевагою конвективного сушіння є простота та доступність. Недоліком є те, що при термолабільній температурі теплоносія процес є тривалим, а при підвищеній температурі сушіння відбуваються негативні зміни для біологічно активних речовин та, відповідно, якості готової продукції. Наприклад, для отримання сушеного гриба з кінцевим вмістом вологи 4–5% тривалість сушіння матеріалу може становити 10–12 год [85].

Процеси зневоднення культивованих грибів були досліджені при сушінні за допомогою інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) у тунельних стрічкових сушарках конвеєрного типу або багатофункціональних ІЧ сушильних шафах. Прискорення процесу сушіння рослинної сировини

пояснюється тим, що ІЧ хвилі впливають лише на молекули води в матеріалі. Променевий потік тепла частково проникає всередину капілярно-пористих тіл і майже повністю поглинається, особливо ефективним є сушіння тонких шарів матеріалу – до 5–7 мм. Процес характеризується великим коефіцієнтом теплообміну, на одиницю поверхні сировини може бути передано значно більше тепла в одиницю часу, ніж при конвективному способі сушіння. Технологічний процес ІЧ сушіння грибної сировини відбувається за рахунок ІЧ випромінювання хвиль до вжиною $\lambda=0,76\text{--}15$ мкм при потужності нагрівачів $N=1\text{--}75$ кВт [85].

Продукт, нарізаний пластинами до 60 мм, розкладають в один шар та сушать в температурному діапазоні 40–60°C на відстані від джерела випромінювання до 14 см при завантаженні 2 кг/м². Дослідники пропонують раціональні умови сушіння грибів шиїтаке за допомогою ІЧ випромінювання в діапазоні хвиль $\lambda =2,4\text{--}3,0$ мкм, температурою нагріву – 60°C при швидкості повітря – 1,4 м/с [85, 89].

Для збільшення ефективності сушіння використовують попередні методи термічної підготовки грибної сировини, наприклад бланшування або обсмажування [85, 90]. У даному випадку гриби після бланшування подрібнюють на пластини товщиною 2-10 мм, обсмажують до вмісту вологи 20-40 %, з використанням 0,1-3,0 % рослинної олії до маси сировини для змащення поверхонь пластин обсмажувального апарату, досушують за допомогою інфрачервоних хвиль довжиною 1,5-6,5 мкм при потужності нагрівачів 1-75 кВт до кінцевої вологості 5-10 %, після чого продукт охолоджують до 20-25 °С та упаковують в герметичну тару [90].

У дослідженні [91] висвітлено спосіб комбінування енергії ІЧ випромінювання з іншими способами сушіння грибів. Була використана комбінація інфрачервоно-конвективного. Досліджено вплив потужності інфрачервоної лампи (150, 250 та 375 Вт), температури гарячого повітря (50, 60 та 70°C) та швидкості теплоносія (1, 2 та 3 м/с) на сушіння грибів. Результати показали, що, збільшивши потужність лампи з 150 до 375,

швидкість сушіння зростає. При підвищенні температури гарячого повітря з 50 до 70°C, а швидкості гарячого повітря з 1 і 3 м/с, втрата ваги збільшилася на 10,3 % і 13,9 % відповідно [91].

Отже, метод ІЧ сушіння грибної сировини дозволяє провести швидке видалення вологи при невисоких температурах (до 60°C), при цьому практично повністю зберігаються цінні біологічно активні речовини, вітаміни, природний колір, смак і аромат висушуваних продуктів. Однак, цей спосіб є все ж таки проблематичним, оскільки характеризується низькою продуктивністю і високими питомими витратами енергії. Крім того, через особливості поглинання ІЧ випромінювання, сушіння відбувається тільки в поверхневих шарах матеріалу, що ускладнює видалення вологи із внутрішніх шарів [85, 89].

Для одержання грибних порошоків та гранульованих продуктів використовується розпилювальне сушіння. Даний спосіб дозволяє значно розвинути міжфазну поверхню і отримати значне збільшення поверхні випаровування, за рахунок чого досягається інтенсивний масо- та теплообмін між продуктом і сушильним агентом, а також підвищення енергетичної ефективності процесу загалом. Розчини, емульсії, суспензії або пастоподібні матеріали з грибів розпорошуються в сушильній камері і при контакті з гарячим сушильним агентом (повітрям або топковим газом) за досить невеликий проміжок часу зневоднюються [85].

Сушіння методом розпилювання застосовують до матеріалів, які не можна зневоднити механічним шляхом, мають високу термочутливість і не можуть піддаватися впливу високих температур протягом тривалого часу, а також які містять частинки, здатні до агломерації. Процес протікає в дуже м'яких умовах, тому навіть нестійкі речовини добре зберігаються і легко регідратують. Цей тип сушіння дозволяє отримати сухі порошоківі продукти із заданими структурними, дисперсними і смаковими характеристиками, який не поступається за якістю продуктам, отриманим при сушінні сублімацією [85, 92].

В Інституті технічної теплофізики НАН України науковцями досліджено можливість переробки плодового тіла базидіального гриба шіїтаке в порошкову форму [92]. Дослідниками були проведені експериментальні дослідження та встановлено, що для отримання однорідної гомогенної грибної суспензії доцільне застосування механізмів дискретно-імпульсного введення енергії як ефективного інструменту впливу на високоміцні структурні елементи гетерогенних систем різної природи. Виявлено необхідність зміни структурно-механічних властивостей грибної суспензії як об'єкту сушіння розпилюванням. Дослідження мікроструктури показали, що частинки нерозчинних фракцій гриба шіїтаке в суспензії, отриманої з цілого плодового тіла, хаотично збиваються в агреговані скупчення – просторові асоціати розміром до 3–4 мм, при цьому довжина окремих гіфів шапинок або їх фрагментів (10–15 мкм) значно менша за довжину гіфів ніжок (50 – 5000 мкм). В результаті трьох циклів обробки грибної суспензії з цілого гриба методом дискретно-імпульсного введення енергії середній розмір частинок зменшився в 2,3 рази. Така ж обробка грибної суспензії з шапинок дозволяє зменшити середні розміри частинок в 20 разів – до $\delta_{\max} \leq 100\text{--}150$ мкм. Мікроструктурний аналіз порошку, отриманого з цілого плодового тіла гриба, показав, що при загальному діапазоні розмірів часток 4–120 мкм переважна їх кількість (80–85%) представляє собою досить великі агломерати розміром 20–120 мкм. Порошок, отриманий із шапинок гриба, характеризувався меншим діапазоном розмірів часток (4–60 мкм) переважно округлої форми, 75–80 % з яких складали частки 4–20 мкм. Це сприяло покращенню умов його висушування і підвищенню виходу з розпилювальної сушарки до 92% у порівнянні з виходом порошку з цілого гриба шіїтаке (менше 50%). Проведений комплекс досліджень показав доцільність отримання грибної суспензії з шапинок гриба шіїтаке. Показано, що використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії дозволяє підвищити вміст біодоступного лікувального полісахаридного комплексу в

порошку з шапинок шиїтаке в 6 разів у порівнянні з цілим свіжим плодовим тілом гриба [92].

Апробація процесу розпилювального сушіння суспензій з гриба шиїтаке, що проводилась на експериментальній розпилювальній сушарці РЦ-1,3, яка показана на рис. 1.21, довела неможливість отримання високоякісного порошку без додавання біополімерної добавки, яка сприяє покращенню тепломасообмінних, структуроутворюючих, міцнісних властивостей та термостійкості матеріалу при сушінні [92].



Рис. 1.21. Експериментальний стенд для дослідження теплофізичних параметрів розпилювального зневоднення композиційних рідинних систем (РЦ-1.3) [92]

Експериментально встановлено, що раціональна кількість біополімерної добавки в грибній суспензії для отримання порошку з покращеними структурно - механічними та органолептичними властивостями на даній розпилювальній сушарці становить $\leq 10\%$ [92].

При низькій вологості і відсутності гігроскопічних властивостей такий порошок здатний зберігати свої якісні характеристики понад 1 рік [92].

Проведений комплекс досліджень показав, що для отримання високоякісного порошку з гриба шиїтаке методом розпилювання доцільно готувати суспензії виключно з шапинок гриба [92].

Експериментально встановлено, що за відсутністю гіфів з ніжок гриба досягається необхідна висока ступінь дисперсності мікрочастинок нерозчинних фракцій в суспензії, що забезпечує однорідність дисперсного складу крапель у факелі розпилу і рівномірність їх висушування, а завдяки біополімерній добавці – високий вихід порошку з сушарки, покращення якості і збільшення терміну зберігання – ≥ 1 рік [92].

Проведені дослідження показали, що для отримання високоякісного сипкого порошку гриба шиїтаке методом розпилювання доцільно до грибної суспензії ввести декстринвмісну структуруючу добавку, наприклад, β -циклодекстрин, кількість якої має складати більше 10%, але менше 25%. Експериментально встановлено, що ЦД забезпечує більшу міцність і щільність висушених часточок як чинників поліпшення сипкості порошку, а підвищення термостійкості матеріалу у сукупності з досягненням ефекту мікрокапсулювання термолабільних складових гриба при розпилювальному сушінні дозволяють отримувати грибний порошок високої якості. За результатами проведених досліджень визначені раціональні температурні режими розпилювального сушіння суспензії з гриба шиїтаке з введеним ЦД, при апробації яких на експериментальній розпилювальній сушарці РЦ-1,3 були отримані дослідні партії сипкого порошку тривалого зберігання [92, 93].

Дослідженням культивованих грибів в різний час займались у Національному університеті харчових технологій (м. Київ). У науковій роботі [94] висвітлені дослідження впливу температури теплоносія на кількісний під час сушіння та тривалості обробки на кількісний склад амінокислот грибного порошку. Процес сушіння науковці проводили в два етапи з різними температурними режимами. На першому етапі сушіння, коли швидкість випаровування вологи і температура продукту залишаються постійними, сушіння сировини проводили при температурі 60°C. Під час другого періоду сушіння для інтенсивного зниження мікробіологічного забруднення грибів температуру сушильного агенту варіювали в діапазоні 80 – 100 °C.

Таблиця 1.4.

Зміна амінокислотного складу гливи звичайної в процесі теплової
обробки

Амінокислоти	Вміст в грибах						
	Свіжі гриби	Зразок 1 t=60 °С		Зразок 2 t=80 °С		Зразок 3 t=100°С	
	мг/100 г ср.	мг	% по мг	мг	% по мг	мг	% по мг
1	2	3	4	5	6	7	8
Кількість НАК	6,755	6,385	33,27	5,533	35,66	4,556	33,51
В тому числі:							
Ізолейцин	0,476	0,457	2,38	0,402	2,59	0,348	2,56
Лейцин	1,187	1,025	5,34	0,903	5,82	0,728	5,35
Лізин	0,960	0,938	4,89	0,826	5,33	0,658	4,84
Метіонін	0,230	0,222	1,16	0,213	1,37	0,053	0,39
Фенілаланін	0,752	0,703	3,66	0,981	6,32	0,411	3,02
Треонін	0,915	0,881	4,59	0,748	4,82	0,634	4,67
Валін	2,235	2,159	11,25	1,460	9,41	1,724	12,68
Замінні амінокислоти	12,568	12,81	66,74	9,977	64,32	9,041	66,49
В тому числі:							
Аспарагінова кислота	1,805	1,754	9,14	1,446	9,32	1,286	9,45
Серин	1,152	1,038	5,41	0,845	5,45	0,728	5,35
Глютамінова кислота	3,25	4,811	25,06	3,523	22,71	3,441	25,31
Пролін	0,570	0,404	2,11	0,377	2,43	0,208	1,53
Гліцин	0,896	0,822	4,28	0,670	4,32	0,594	4,37
Аланін	1,798	1,451	7,56	1,166	7,52	1,226	9,02
Аргінін	0,902	0,892	4,65	0,751	4,84	0,646	4,75
Гістидин	0,391	0,373	1,94	0,329	2,12	0,236	1,74
Цистин	0,452	0,146	0,76	0,107	0,69	0,043	0,31
Тирозин	1,352	1,119	5,83	0,763	4,92	0,633	4,66
Загальна кількість амінокислот	19,323	19,197	100	15,510	100	13,598	100

Сушені гриби подрібнювали і просіювали, отримуючи порошкоподібний напівфабрикат з дисперсністю до 250 мкм. Був досліджений

загальний хімічний склад порошкоподібного напівфабрикату. Одержаний грибний напівфабрикат мав кінцеву вологість 9 - 10%, містив: 15,3-16,86 % білку, 2,59-2,86 % жиру, 15,57-17,14 % клітковини, 6,11 - 6,73 % мінерального залишку, який містив кальцію 0,3-0,34 %, фосфору 0,68-0,75 % [94].

Як вказано у науковій праці та видно з таблиці, при двостадійному конвективному сушінні загальна кількість амінокислот зменшується в межах 0,65 - 29,60 %. При цьому вміст незамінних амінокислот зменшується в межах 5,47 - 32,42%, а замінних в межах 1,93 - 28,06 %. Найбільш різкі зміни амінокислотного складу спостерігаються при температурі сушіння на другому етапі при 100°C. Серед незамінних амінокислот найбільш термолабільними при даній температурі виявилися лізин (- 31 %), треонін (-30,7 %), метіонін (-75 %), лейцин (- 38,66 %). При температурі сушіння на другому етапі при 80°C кількісні втрати амінокислот в 1,5 рази менші ніж при 100 °C. Це свідчить про посилення руйнування структурних білків при підвищенні температури сушіння. Проте, при сушінні змінюються і властивості клітинних стінок грибів, що сприяє кращому вивільненню білкових речовин. Тому з точки зору доступності білків для засвоювання сушіння відіграє позитивну роль [94].

Таблиця 1.5.

Вміст амінокислот в білку порошкоподібного напівфабрикату з грибів глива звичайна в порівнянні з еталонним білком ФАР/ВООЗ

Амінокислоти	Рекомендованим ФАО/ВООЗ, мг/1 г білка	Скор, %		
		Зразок 1 t=60 °C	Зразок 2 t=80 °C	Зразок 3 t=100 °C
1	2	3	4	5
Ізолейцин	40	59	65	64
Лейцин	70	76	83	76
Лізин	55	89	97	88
Треонін	40	115	121	117
Валін	50	225	188	254
Цистин	35	55	59	20
Тирозин	60	158	187	128

З таблиці видно, що вміст амінокислот у складі порошкоподібного напівфабрикату з грибів глива звичайна при зневодненні конвективним

способом суттєво перевищує рівень ФАО/ВООЗ за такими амінокислотами, як треонін, валін, тирозин, а по вмісту лізину і лейцину наближається до норми [94].

Вченими Бурлака Т.В., Дубковецький І.В., Малежик І.Ф. досліджено сушіння культивованих грибів різними інфрачервоними випромінювачами [95].

Дослідження проводили на радіаційно-конвективній сушильній установці, що являє собою камеру, виготовлену з листів полірованого алюмінію, який володіє високим коефіцієнтом відбивання інфрачервоних променів, що покращує умови створення рівномірності опромінення об'єкта сушіння. Потік повітря переміщується під дією лопатей вентилятора, проходить послідовно через електричний калорифер і сушильну камеру, у якій контактує з матеріалом, підводячи до нього теплоту і відводячи випаровану вологу.

Науковцями було визначено, що при дослідженні при конвективному 40, 50, 60 і 70 °С та радіаційному методах та за їх поєднання, ефективним виявився радіаційно-конвективний спосіб. ІЧ-випромінювання поглинається в основному поверхнею матеріалу, що створює в поверхневому і приповерхневому шарах градієнт температур, спрямований всередину нарізаного шматочками продукту.

Це перешкоджає тепломасопереносу, тобто погіршує умови переміщення вологи з внутрішніх шарів до зовнішніх, але при висушуванні в імпульсному режимі нагрів-охолодження, при одночасному конвективному і ІЧ-енергопідведенні з рециркуляцією повітря спостерігалось підвищення якості кінцевого продукту, скорочення енерговитрат і прискорення процесу сушіння [95].

Науковцями досліджено вплив взаємодії конвекції з світлими та темними променями ІЧ випромінювачів різної потужності на процес сушіння культивованих грибів глива. Існує велика кількість приладів для генерування інфрачервоного випромінювання, головним елементом яких є випромінювач.

Він представляє собою технічне джерело теплової радіації, в якому електрична енергія перетворюється у світлову з довжиною хвилі від 0,8 – до 15 мкм. Випромінювачі діляться на дві основні групи: світлі та темні. Світлі джерела дають інфрачервоне випромінювання з малою часткою в області видимого світла і сприймаються оком. А темні – непомітні для людського ока і можуть бути сприйняті шкірою у вигляді відчуття тепла. Темні випромінювачі найбільш надійні та довговічні, нечутливі до раптового охолодження або до потрапляння краплин вологи [95].

Одержані в результаті дослідження криві комбінованого конвективно-терморадіаційного сушіння зі світлими та темними променями ІЧ-випромінювачів різної потужності наведені на рис. 1.22, 1.23.

З рисунків видно, що тривалість сушіння грибів зі збільшенням потужності ІЧ-випромінювачів зменшується з 90 до 60 хвилин для світлих променів і з 110 до 80 хвилин для темних променів. Період сталої швидкості сушіння спостерігався до першої критичної точки, а період спадної швидкості до досягнення рівноважного вологовмісту [95].

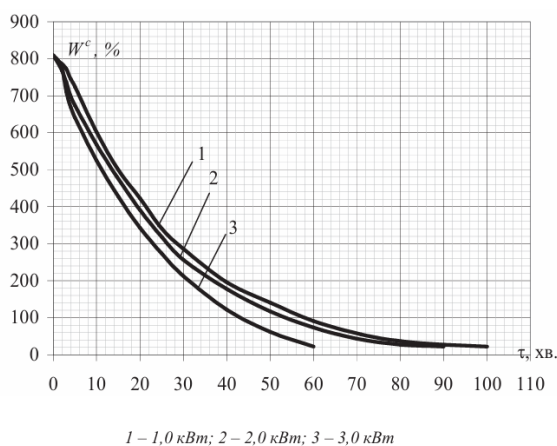


Рис. 1.22. Криві комбінованого сушіння культивованих грибів «глива звичайна» світлими інфрачервоними випромінювачами [95]

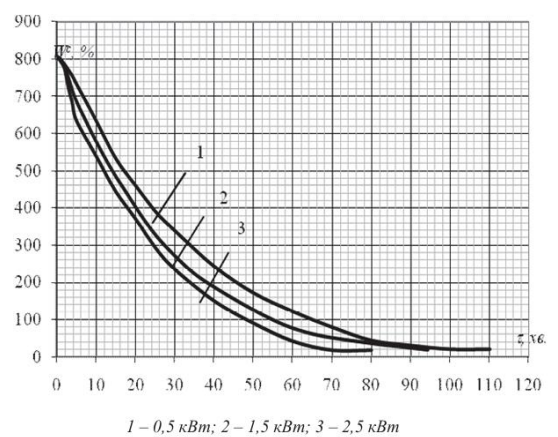


Рис. 1.23. Криві комбінованого сушіння культивованих грибів «глива звичайна» темними інфрачервоними випромінювачами [95]

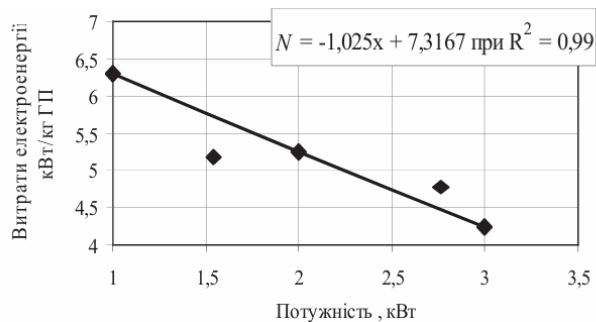


Рис. 1.24. Залежність витрат енергії від потужності світлих тенів при комбінованому методі енергопідведення, кВт/кг готового продукту [95]

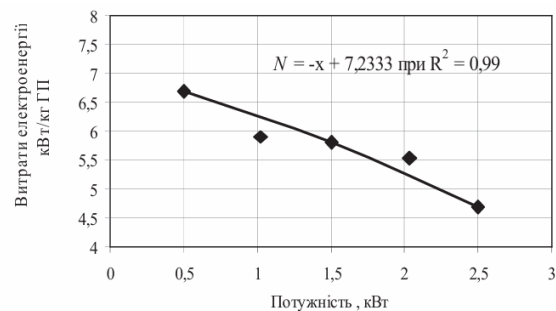


Рис. 1.25. Залежність витрат енергії від потужності темних тенів при комбінованому методі енергопідведення, кВт/кг готового продукту [95]

У роботі вказано, що швидкість повітря впливає на тривалість сушіння грибів лише у періоді постійної швидкості сушіння, а у періоді падаючої швидкості сушіння зменшення вологовмісті матеріалу практично не залежить від швидкості повітря, що не впливає на переміщення вологи в середині грибів.

Графік залежності витрат енергії від швидкості теплоносія при радіаційно-конвективному способі сушіння культивованих грибів «глива звичайна» наведено на рис. 1.24 і рис. 1.25 [95].

Оптимальна потужність темних ТЕНів становить 1,5 кВт і світлих 2 кВт при питомому навантаженні 4,4 кг/м², бо при використанні їх зберігається найбільший вміст білка і азоту. При меншій потужності ТЕНів збільшується час сушіння, що призводить до зниження вмісту біологічно активних речовин у сухому продукті.

При збільшенні потужності ТЕНів спостерігається розтріскування, деформація і потемніння сухих грибів, що призводить до зниження вмісту біологічно активних речовин [95]. На рис. 1.26 наведена схема дослідної радіаційно – конвективної сушильної установки.

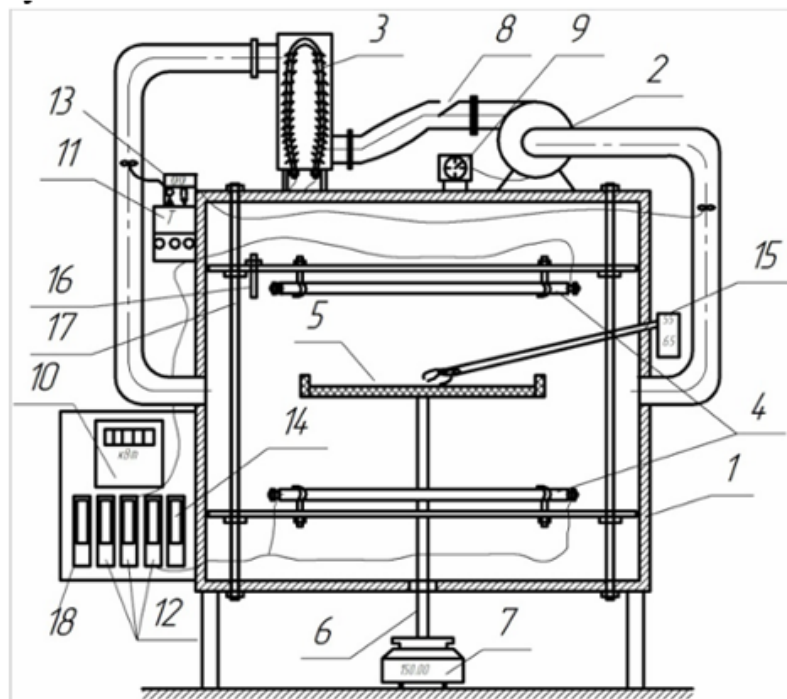


Рис. 1.26. Схема дослідної радіаційно – конвективної сушильної установки [5]:

1 – камера сушіння; 2 – вентилятор; 3 – калорифер; 4 – ІЧ генератори;
 5 – коробчастий сітчастий кошик; 6 – штанга; 7 – аналітичні терези;
 8 – шибер рециркуляції повітря; 9 – варіатор швидкостей; 10 – лічильник електроенергії; 11 – контролер температури; 12 – автоматичні вимикачі калорифера, верхніх і нижніх ІЧ генераторів; 13 – регулятор відносної вологості; 14 – автоматичний вимикач вентилятора; 15 – термометр з термопарами; 16 – контактний датчик температури; 17 – регулювальний пристрій положення вузлів ІЧ генераторів; 18 – реле включення і виключення ІЧ-генераторів

На рис 1.27 представлено порівняльний аналіз кінетики процесу сушіння культивованих грибів конвективним, терморадіаційним та конвективно-терморадіаційним способами енергопідведення та криві швидкості сушіння (рис. 1.28) [5].

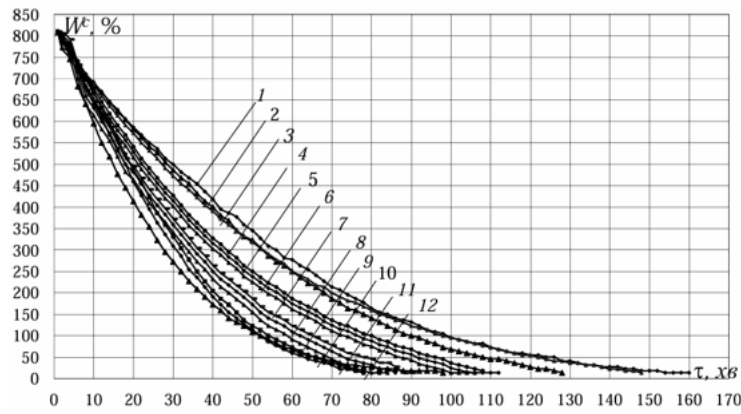


Рис. 1.27. Криві сушіння культивованих грибів глива звичайна різними способами при температурах теплоносія:

40°C: 1- конвективно-терморадіаційний; 2 – терморадіаційний;

3 – конвективний; 50°C: 4 - конвективно-терморадіаційний; 5 –

терморадіаційний; 6 – конвективний; 60°C: 7 - конвективно-

терморадіаційний; 8 – терморадіаційний; 9 – конвективний;

70°C: 11 - конвективно-терморадіаційний; 10 – терморадіаційний;

12 – конвективний

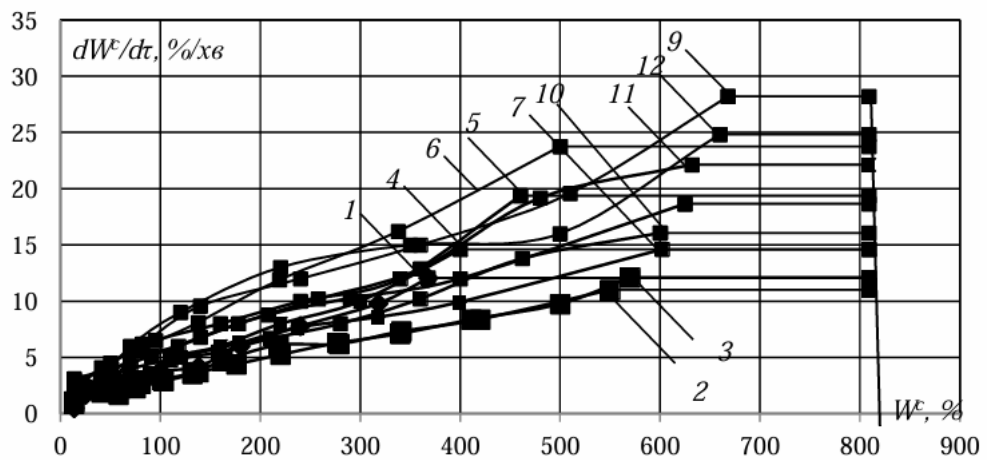


Рис. 1.28. Криві швидкості сушіння культивованих грибів глива звичайна при температурі 40°C: 1 – конвективно-терморадіаційний;

2 – конвективний; 3 – терморадіаційний; 50°C: 4 – конвективно-

терморадіаційний; 10 – терморадіаційний; 7 – конвективний; 60°C:

5 – конвективно-терморадіаційний; 11 – терморадіаційний;

8 конвективний; 70°C: 6 – конвективно-терморадіаційний;

12– терморадіаційний; 9 – конвективний

Загалом щодо дослідження сушіння гливи в даній роботі [5] доведено, що тривалість сушіння при температурі 70 °С зменшується на 52 % при конвективному, на 53 % при терморадіаційному та на 60 % при конвективно-терморадіаційному способі в порівнянні з тривалістю процесу при температурі 40 °С (рис. 1.27, 1.28). Авторами зазначено, що для даного способу зневоднення формується більш мікропориста структура висушеного продукту, тобто більша вологоутримуючу здатність, а також більш ніжну консистенцію відновленого продукту [5].

Дослідниками зроблено певні висновки та встановлено, що сушіння з використанням ІЧ-випромінювача з потужності до 2 кВт/м² призводить до поступового та найповнішого випаровування вологи, але при цьому збільшується тривалість; на противагу цьому збільшення потужності понад 12 кВт/м² призводить до пришвидшення вилучення вологи, але при цьому продукт швидше підігрівається до критичної межі, що може значно погіршити властивості кінцевого продукту [5].

Із збільшенням швидкості теплоносія від 2,5 до 4,5 м/с інтенсивність процесу зневоднювання зростає на 30 %, до 5,5 м/с – на 40 %; тривалість сушіння культивованих грибів при питомому навантаженні 8,8 кг/м² збільшується на 46 % в порівнянні з 2,2 кг/м²; при відстані від випромінювача < 3 см, температура в середині висушеного матеріалу досягала 120 °С, що призводило до згорання культивованих грибів. При тій самій температурі і відстані більше ніж 9 см тривалість сушіння збільшувалась на 12 % [5].

Дослідниками встановлено, що при температурі теплоносія в межах 40 - 70 °С найбільша кількість білка зберігається при конвективно - терморадіаційному способі сушіння, у той час як при конвективному кількість білка в середньому менша на 12 % [5].

В результаті математико-статистичної обробки дослідних даних дослідниками встановлені оптимальні технологічні параметри сушіння культивованих грибів конвективно терморадіаційним способом: температура теплоносія – 40 °С; питомий потік опромінення – 76,25 кВт; швидкість

теплоносія – 5,5 м/с; питоме навантаження – 5,5 кг/м²; відстань від інфрачервоних генераторів – 12 см [5].

Огляд вітчизняної й іноземної літератури показав, що хімічний склад культивованих грибів Шиїтаке (*Lentinula edodes*) та Глива звичайна (*Pleurotus ostreatus*) висвітлений досить повно, але недостатньо вивчені зміни властивостей грибів у процесі технологічної переробки. Ерінги (*Pleurotus eryngii*, Quél.) на ринку з'явилися нещодавно та є менш дослідженими. Аналізуючи існуючі способи сушіння культивованих грибів встановлено, що при їх виборі основними критеріями є економічність, збереження біологічно активних речовин, а також структурно-механічні і фізичні властивості сировини.

На основі аналізу літературного огляду робіт, які присвячені проблемам сушіння культивованих грибів, обґрунтовано висновок про необхідність інтенсифікації процесу сушіння із збереженням високої якості кінцевої продукції за допомогою використання комбінованого енергопідведення.

Основними методами, згідно літературних джерел, сушіння культивованих грибів сьогодні є конвективне, терморадіаційне, мікрохвильове, вакуумне, ліофільне тощо. Популярним є напрямком комбінованого сушіння – поєднання декількох методів. Основним недоліком розглянутих цих методів є висока вартість.

Із якісних показників визначається вміст полісахаридів, вітамінів В₁₂ і D₂, коефіцієнт усадки, регідратацію, колірність, вміст вільних амінокислот, леткі сполуки, досліджують мікроструктуру, твердість тощо.

1.3. Характеристика сушильного обладнання для переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження

Енергоефективність при розробці теплотехнології отримання сухого харчового продукту безпосередньо залежить від тепломасообміну, методів зневоднення та сушильного обладнання.

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено багатостадійний метод сушіння (рис. 1.29). Суть методу полягає в застосуванні на початку процесу сушіння високої температури теплоносія з поступовим зниженням і вона залежить від максимально допустимої температури матеріалу. Багатостадійні режими сушіння знижують питомі теплові витрати на випаровування 1 кг вологи на 15-25 % [96, 97].

Для використання цього методу сушіння створені багатозонні тунельні сушарки потужністю від 0,1 до 1,1 т/год по сировині (рис. 1.30). В кожній зоні такої сушарки підтримується окремий температурно-вологісний режим зневоднення.

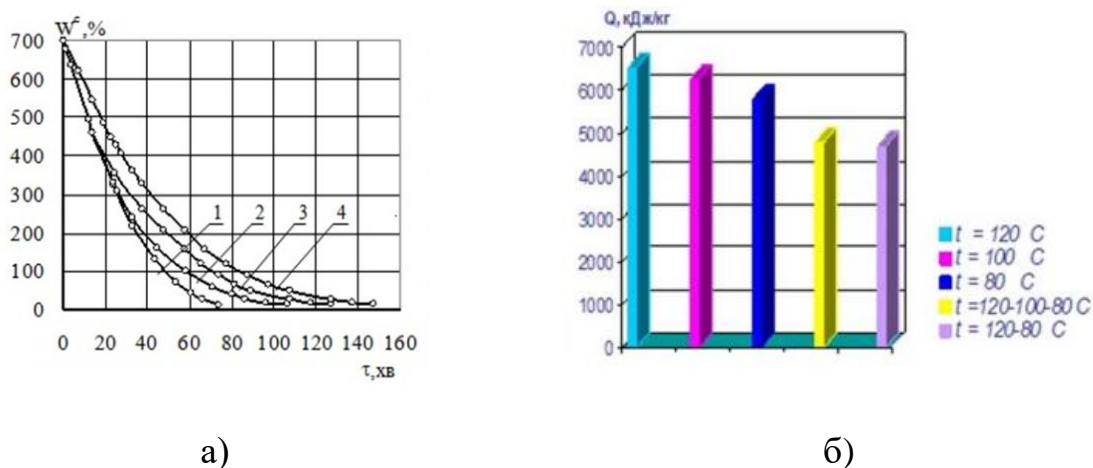


Рис. 1.29. Багатостадійне сушіння:

а) стадійні режими сушіння: столовий буряк $V = 1 \text{ м/с}$; $d = 10 \text{ г/кг с.п.}$; $g = 6,3 \text{ кг/м}^2$; 1 – 120 °C; 2 – 120...100...80°C; 3 – 120...80°C; 4 – 80°C

б) питомі теплові витрати на випаровування 1 кг вологи

Витрати енергії на 1 кг випареної вологи в 1,5-2 рази нижчі за існуючі аналоги [98]. Для зневоднення рослинної сировини в умовах високовологого клімату створено чотирьохзонну сушарку на теплогенераторах і використанням ТН в кінцевій 4-х зоні сушарки. Це дозволило в високовологих кліматичних умовах В'єтнаму вперше в світі отримати натуральні харчові порошки з ананасів і бананів, та на 10-15% знизити витрати енергії на сушарках такого типу.

Для реалізації багатостадійного методу сушіння створена багатозонна стрічкова сушарка (рис. 1.31). Вона має зону високотемпературної вологої обробки матеріалу, вісім температурних та одну зону охолодження. Потужність сушарки 1,2 тонни сировини на годину. Витрати теплоти на 1 кг випареної вологи у 1,4-2,7 рази нижчі порівняно з існуючими аналогами [99].

Загальний потенціал енергозбереження при сушінні фруктово-овочевої сировини і бурякового жому біля 0,2 млн т.у.п, в оточуюче середовище при цьому надходить 0,5 млн тонн водяної пари.



Рис. 1.30. Зовнішній вигляд двозонної сушарки

В Україні великий «парк» випарних та розпилюючих сушарок, які працюють в харчовій та хіміко-фармацевтичній промисловості. На них виробляють тисячі тонн цукру, сухого знежиреного і цільного молока, підсирної сироватки, розчинної кави, пеніциліну, стрептоміцину та інше. В більшості випадків на ці процеси сушіння витрачається в 2,5 – 3,0 рази більше

енергії, ніж необхідно для перетворення вологи в пару. Витрати енергії на ці процеси складають 0,2 – 0,3 млн т.у.п. і в оточуюче середовище надходить біля 0,6 млн тонн водяної пари. В Інституті створені ступеневі випарно-сушильні агрегати розпилюючої дії. Використання цього обладнання дозволяє одночасно вирішити: збереження БАР при зневодненні термолабільних матеріалів; концентрування розчинів; збільшення виходу продукту за рахунок процесу «мокрого» вловлювання; вирішення питань захисту навколишнього середовища та скорочення теплових витрат на 18-25% [96].

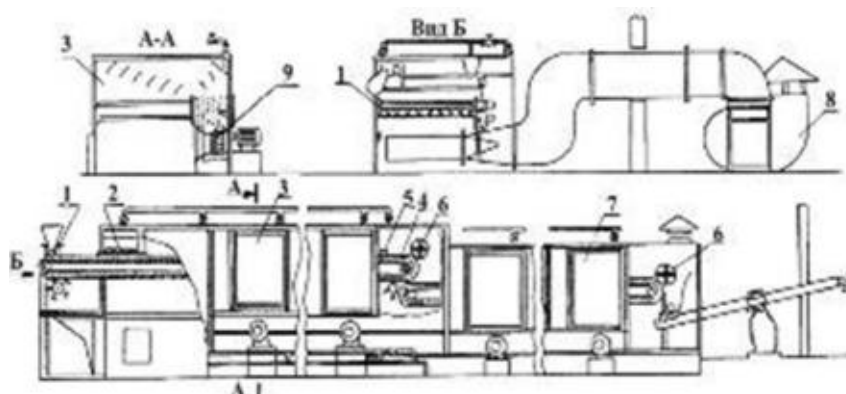


Рис. 1.31. Багатозонна стрічкова сушильна установка:

- 1 – шнек-розкладник; 2 – зона гіротермічної обробки; 3 – зона сушіння;
 4 – сушильна стрічка; 5 – розпушувач; 6 – скидач; 7 – зона охолодження;
 8 – викидний вентилятор; 9 – вентилятор сушильної зони

Потенціал енергозбереження при сушінні на розпилюючих сушарках харчових та хіміко-фармацевтичних продуктів та матеріалів становить біля 0,05 млн т.у.п. в оточуюче середовище при цьому надходить біля 0,2 млн тонн водяної пари [96].

Розроблений в Інституті високотемпературний високовологий метод сушіння дозволяє значно підвищити внутрішній перенос вологи з внутрішніх шарів матеріалу до його поверхні за рахунок підвищення температури матеріалу в період постійної швидкості сушки, тим самим інтенсифікує процес більше ніж в 2 рази. Потенціал енергозбереження при сушінні будівельних

матеріалів біля 0,7 млн т.у.п. та зменшення викидів водяної пари в оточуюче середовище можливо на 0,2 млн тонн [96].

Розроблена енергоефективна геотермальна сушарка тунельного типу на водяних калориферах, в якості палива використовують термальну воду з температурою 45-70 °С. Витрати енергії в цій сушарці тільки на привід вентилятора і циркуляційного насоса для геотермальної води і тому значно нижчі, ніж в аналогічних сушарках працюючих на парових калориферах (рис. 1.32) [96].

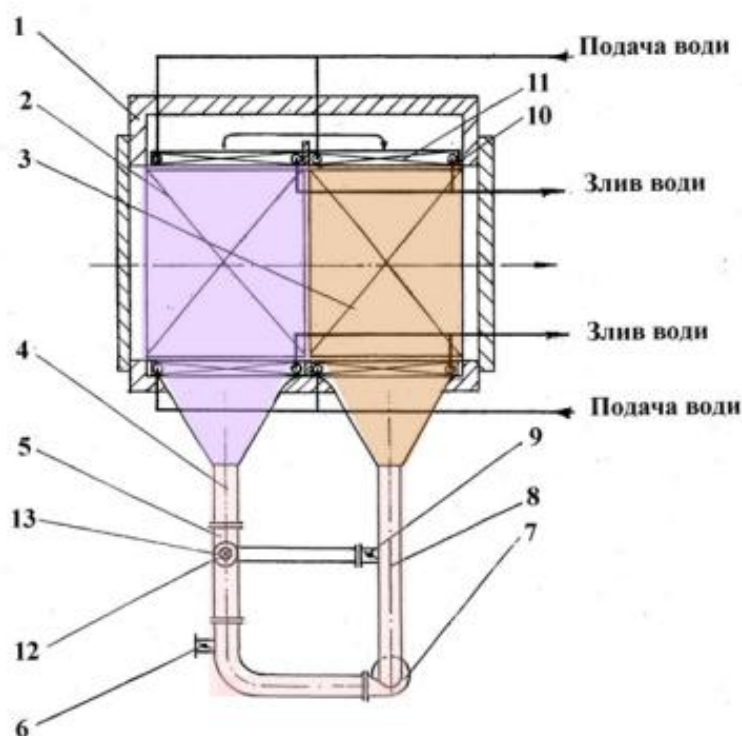


Рис. 1.32. Геотермальна сушарка: 1 – сушильна камера; 2,3 – візки; 4,5 – повітропроводи; 5 – теплогенератор; 6,9 – патрубок із заслонкою; 10,11,14,15 – калорифери; 12 – утилізатор теплоти; 13 – димова труба

Тунельні сушарки широко використовуються в виробництві сушених плодів в США, Франції, Румунії та в інших країнах. Вони використовуються для сушіння кускових (штучних) продуктів (хліб, нарізані овочі та фрукти, яблучні вижимки та ін.). Тунельна сушарка – це поєднання двох або більше шаф сушарки в послідовному розташуванні всередині тунелю. В тунельних сушарках можна проводити сушіння великих обсягів сировини та

використовувати менше енергії у порівнянні з потужністю, яку має кожна сушильна шафа при окремій її експлуатації [96].

Класифікацію тунельних сушарок можна провести наступним чином:

1. *За способом подачі сушильного агенту в робочий канал сушарки поділяються на:* прямоточні – потік теплоносія переміщується паралельно руху візків з сировиною, температура теплоносія максимальна на вході в сушильний канал; протиточні – теплоносій рухається назустріч візкам з сировиною, максимальна температура реєструється на виході візків з сушарки; комбіновані – прямоточно-протиточні двохзонні сушарки; з перехресним потоком теплоносія – потік направлений перпендикулярно руху продукту, теплоносій в кожній зоні циркулює автономно, підтримуючи задані параметри.

2. *За організацією сушильного процесу:*

- викид відпрацьованого сушильного агенту назовні;
- з рециркуляцією сушильного агенту;
- з розподіленою подачею сушильного агенту;
- з додатковим підігріванням сушильного агенту в сушильній камері.

3. *За способом нагрівання сушильного агента:* з електричними нагрівачами; вогневими калориферами; паровими калориферами; водяними калориферами.

4. *За кількістю сушильних зон:* однострунні та багатозонні.

5. *За видом сушильного агенту:* повітряна, газова, газоповітряна, парова.

6. *За режимом роботи сушильної установки:* періодичної, безперервної або циклічної дії [96].

Основним недоліком є використання ручної праці при завантаженні піддонів з матеріалом; використання топкових газів, що в свою чергу може викликати утворення канцерогенних речовин; а також паралельний рух повітря і матеріалу, при цьому зменшується контакт і теплообмін між ними. За кордоном дослідники вивчали сушіння в тунелях. Касерес-Уамбо та Менегаллі [37] працювали над моделюванням та оптимізацією

напівнеперервних тунельних сушарок для фруктів, Маруліс та Саравакос [39] також працювали над моделюванням та проектуванням процесів сушіння, а Чоу та ін. [38] досліджували сушіння харчового продукту в тунельній сушарці, Ajala et al., [36] працював над статистичним моделюванням та моделюванням процесу сушіння в тунелях. Однак, за даними Nindo, et al. [98] та Abonyi et al., [98], ефективність тунельної сушарки становить 38-42 %.

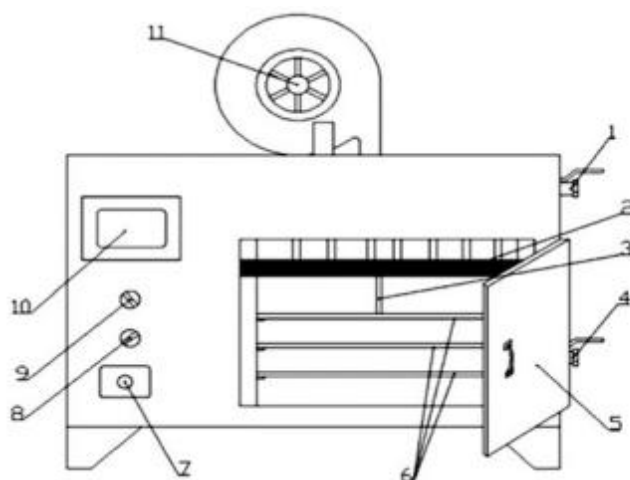


Рис. 1.33. Конвективна сушарка з інфрачервоним випромінюванням:
 1 – забір повітря; 2 – радіаційна трубка; 3 – датчик температури; 4 – вихід повітря; 5 – двері; 6 – навантажувальний матеріал; 7 – регулятор повітря; 8 – перемикач (регулятор вентилятора); 9 – перемикач (регулююча нагрівальна трубка); 10 – екран дисплея; 11 – вентилятор

При дослідженні процесу сушіння рослинних матеріалів в тунельних сушарках дослідники досліджували наступні фактори:

1. Вплив відносної вологості повітря на тривалість сушіння.
2. Вплив швидкості руху повітря на тривалість сушіння.
3. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння.

Конвективна сушарка з інфрачервоним випромінюванням складається з сушильної камери, в якій знаходяться лотки з матеріалом з встановленими нагрівальними лампами з інфрачервоним випромінюванням та вентилятором. Для зміни режиму сушіння передбачені перемикачі, що регулюють оберти вентилятора та інтенсивність випромінювання (рис. 1.33).

Виходячи з того, що при сушінні термолабільних колоїдних капілярно-пористих матеріалів неможливо інтенсифікувати процес підвищенням температури (обмежується гранично допустимою температурою і не високою температурою теплоносія), швидкістю руху теплоносія (обмежено розмірами матеріалу, невисокою швидкістю витання і викиду з сушарки), необхідність зменшення вологості теплоносія є єдино правильним рішенням, що можливо при використанні конденсаційного способу сушіння [99, 100].

Реалізація сушіння насінневих матеріалів із зниженим вологовмістом теплоносія можливо через застосування теплових насосів (ТН).

Серед переваг теплових насосів є:

- використання теплової енергії відпрацьованого теплоносія шляхом конденсації водяної пари, яка знаходиться в теплоносії;
- в процесі роботи не викидають в навколишнє середовище водяної пари, яка відноситься до парникових газів;
- ефективно працюють при низьких температурах навколишнього середовища;
- використання теплоносія для нагрівання і охолодження матеріалу;
- низькі енергетичні сервісні витрати і тривалий термін служби дозволяють створювати сучасні зерносушильні комплекси із тепловими насосами, що дасть відчутний економічний ефект.

Для сушіння білкововмісної сировини на основі сої [20, 101] була використана двохзонна тунельна сушильна установка ТФ 2.02 з двома теплогенераторами [102]. В корпусі установки розташовані бокові лабіринти ущільнення – гнучкі термостійкі войлокові фартухи. При русі візків із початкового положення вздовж всієї довжини тунелю сушарки розташовують лабіринтні ущільнення, що з дверима візків блокують повітряний рух вздовж корпусу, його виходу з установки і реалізують обдув візків за продуктивною схемою [20, 101, 103].

Схема реалізації процесу конвективного сушіння сировини в двозонній сушильній установці з теплогенераторами на біомасі зображена на рис. 1.34.

Через два отвори, що знаходяться в стінах сушильної установки, всередину тунелю сушарки виведені термометри опору, це дозволяє реєструвати температуру теплоносія в окремій зоні. Отримані температурні показники із сушильних зон фіксуються самописним приладом типу КСП 4, встановленим в пульт керування.

Теплогенератор (ТГ) для нагріву повітря розташований у допоміжному приміщенні і повітропроводом сполучено з сушаркою та вентилятором. Нагрів повітря реалізується за рахунок згорання біомаси. Контакт між нагрітим повітрям і продуктами згорання відсутній.

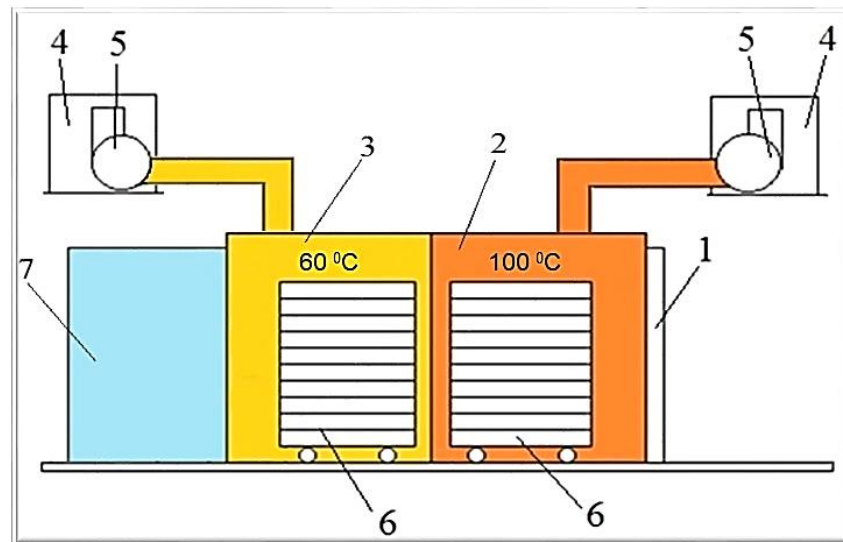


Рис. 1.34. Схема реалізації процесу конвективного сушіння досліджуваної сировини в двозонній сушильній установці з теплогенераторами на біомасі з режимними параметрами $v=2,5$ м/с, $d = 10-15$ г/кг с.п., $t_{(суш. зона 1)} = 100^{\circ}\text{C}$, $t_{(суш. зона 2)} = 60^{\circ}\text{C}$, $\delta = 15$ мм: 1 – ворота сушарки, 2 – сушильна зона 1, 3 – сушильна зона 2, 4 – теплогенератор, 5 – вентилятор, 6 – візок, 7 – зона охолодження.

Повітря, підігріте у теплогенераторі (4), вентилятором подається у зону сушіння, там з ліва направо обдуває сировину, яка знаходиться на піддонах. Потім у площині стіни сушарки і бокових поверхонь візків, рух теплоносія розвертається на 180° та розподіляється рівномірно по всій висоті візків, при

цьому обдуваючи висушуваний матеріал з права наліво. Далі через бокові рециркуляційні канали теплоносій поступає у вентилятор (5). Певна частина використаного теплоносія виходить назовні, на заміну цієї частині подається рівнозначна частина свіжого повітря. Отже, змінюється напрямок обдування висушуваного матеріалу під час пересування візків через сушильні зони, що створює додаткові нові умови для рівномірного сушіння. Описана схема дозволяє підтримати тепло-вологий режим у кожній сушильній зоні.

Для реалізації обдуванню візків за описаною схемою в корпусі установки є сталеві і бокові лабіринти ущільнювачі, вони забезпечують вздовж сушарки перепони руху повітря.

Управління ділянками сушіння і охолодження висушеного матеріалу - дистанційне, здійснюється із пульта керування.

Операція сушіння проводиться за розробленими ступеневими режимами. Відтак, в першій зоні температура теплоносія складає 100°C, на етапі високого вологовмісту матеріалу, а потім візок переходить в наступну зону з температурою 60°C. Після цього сухий матеріал надходить в зону охолодження (7) [20, 101].

За останні роки Україна втратила понад 40 % енергетичного обладнання. Тому одним із напрямків розвитку енергетики є часткова децентралізація. Перехід від традиційних джерел енергії до впровадження альтернативних є актуальним.

В Україні серед нетрадиційних видів палива можна звернути увагу на торф, запаси якого складають близько 2,04 млрд. тонн. Тому використання теплогенераторів для сушіння на біомасі з регіональних видів палива в даний час є актуальним. Торф містить велику кількість гумінових речовин, не лише енергетичний а й агрохімічний потенціал. Його використовують як паливо, а також як сировину для виробництва органічних добрив [104, 105, 106]

Огляд обладнання для сушіння рослинної сировини показує, що є значна кількість сушильних установок, які відрізняються за продуктивністю, способом підведення теплоти до матеріалу (конвективний чи кондуктивний

або поєднанням обох способів), станом матеріалу (у вигляді пасти, рідини чи зерен або шматочків нарізаного матеріалу), станом шару матеріалу в сушарці (щільний шар або псевдорозріджений) тощо. Серед конвективних сушильних установок домінують камерні сушильні установки, потім – стрічкові, тунельні, вакуумні та барабанні, а їхня продуктивність коливається в широкому діапазоні від 0,06 до 5 т/годину і вибір типу сушильного обладнання залежить від обраної схеми технологічного обладнання, об'єму сировини та матеріальних можливостей підприємства.

З аналізу літературного огляду видно, що не дивлячись на різні комбінації методів сушіння досить високе споживання теплової енергії і становить 6440 – 15660 кДж/кг випареної вологи. Тому потрібно розробити комбіновані методи сушіння для тунельних сушарок, що більш енергоефективно з максимальним збереження нативності сировини [96].

1.4. Висновки до першого розділу та завдання дослідження

З вищенаведеного літературного огляду випливає, що відомі способи переробки білкововмісної сировини рослинної походження характеризуються високими енерговитратами та низькою продуктивністю, а також низькою якістю отриманого продукту. Для сушіння білкововмісної сировини тваринного походження застосовуються різні методи, зокрема конвективне, сублімаційне, вакуумне, ультразвукове, мікрохвильове, імпульсним електричним полем та ін. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки.

Основними методами, згідно літературних джерел, сушіння культивованих грибів сьогодні є конвективне, терморадіаційне, мікрохвильове, вакуумне, ліофільне тощо. Популярним є напрямок комбінованого сушіння – поєднання декількох методів. Основним недоліком розглянутих цих методів є висока вартість.

Слід зазначити, що при переробці білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження на сушений продукт, відбуваються біохімічні та структурні зміни продукту – змінюється якість білків та інших біологічно

активних речовин, які можуть руйнуватись при неправильному температурному режимі. Тому, удосконалення існуючих методів з метою зниження енерговитрат на процес зневоднення та збереження біологічно активних речовин є актуальним завданням.

Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних засад та експериментальне підтвердження комплексної та ефективної переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження, тепломасообмінні процеси та створення енергоефективних теплотехнологій з отриманням харчових порошоків високої біологічної цінності, які є основою продуктів харчування для використання в екстремальних умовах населення, військовослужбовців та спортсменів.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- проаналізувати сучасний стан наукових та практичних розробок отримання харчових порошоків із білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження;
- встановити теплофізичні параметри попередньої підготовки до сушіння білкововмісної сировини з метою зменшення енерговитрат на процес при збереженні біологічно активних речовин;
- дослідити тепломасообмін зневоднення білкововмісних матеріалів з урахуванням властивостей сировини і режимів сушіння;
- розробити енергоефективні режими зневоднення білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження;
- визначити теплофізичні характеристики, теплоту випаровування і теплоємність та фізико-хімічні властивості білкововмісних порошоків;
- розрахувати залежність критерію оптимізації сушіння від режимів сушіння;
- виконати чисельне моделювання тепломасопереносу при конвективному сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів;

- дослідити сорбційні властивості та активність води висушеної білкововмісної сировини;

- визначити відновлення харчових порошоків (гранул, кубиків, пластин, порошоків) білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження від режимних параметрів сушіння, форми матеріалу та температури відновлення;

- розробити енергозберігаючі теплотехнології для отримання гранульованого м'яса та грибного порошку з білкововмісної сировини;

- розробити теплотехнологію сушеного гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування на основі м'яса, грибів, моркви та селери.

Основні результати досліджень опубліковані у працях [6, 7, 8, 9, 20, 99, 100, 104, 105, 106].

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Білкововмісна сировина тваринного походження як об'єкт досліджень

До білкововмісної сировини тваринного походження відноситься м'ясо тварин, зокрема курятини, свинини та яловичини.

М'язова тканина характеризується складним хімічним складом. Масова частка основних хімічних речовин у м'язовій тканині (препарованій) ссавців становить 72-80 % води, органічні речовини 20-28 %, у тому числі білки 16,5-20,9 %, ліпіди – 2-3 %, азотисті екстрактивні речовини 1-1,7 %, безазотисті екстрактивні речовини 0,7-1,4 %, неорганічні солі – 1-1,5 %. Після висушування м'язової тканини сухий залишок становить близько 30 %, у тому числі органічних речовин 20-28 %. Основним компонентом органічних речовин тканини є білки, тобто близько 80 % сухого залишку або 16,5-20,9 % маси тканини [19].

До основних білків м'язової тканини належать:

1. Міоген – складається із комплексу міогенів А, В, С та становить близько 20 % від усіх білкових волокон, розчиняється у воді, температура денатурації вільного від солей міогену 55-60 °С, ізoeлектрична точка в інтервалі рН 6,0-6,5;

2. Міоглобін – розчинний у воді білок, являється хромопротеїдом, що складається із глобіну та гему, що координаційно пов'язані між собою. Кількість його становить близько 1 %. Температура денатурації міоглобіну близько 60 °С;

3. Глобулін Х – становить 20 % від усієї кількості білкових речовин м'язової тканини. Він є повноцінним, не розчиняється у воді. Температура денатурації близько 50 °С;

4. Міоальбуміни – становлять 1-2 % білкових речовин мязового волокна і розчиняються у воді та мають температуру денатурації 45-47 °С;

5. Нуклеопротейди – зосереджені переважно в рибосомах, саркоплазматичному ретикулі. Їх особливістю є наявність у структурі молекули рибози, тобто нуклеїнові кислоти нуклеопротейдів саркоплазми є рибонуклеїновими кислотами (РНК), мають желеутворювальну здатність;

6. Міозин - повноцінний фібрилярний білок, що становить 40 % білкових волокон, добре перетравлюється. Його молекули мають виражену ферментативну активність, високу водозв'язувальну, желеутворюючу і емульгуючу здатності. У клітинах міозин здатний бути у комплексі з ліпідами. Денатурує за температури 45-50 °С [19].

Вміст ліпідів у препарованій м'язовій тканині становить близько 3 %. Ліпіди входять до складу м'язового волокна і представлені переважно фосфоліпідами, що є пластичним матеріалом і належать до структурних елементів та тригліцеридами, які виконують роль резервного енергетичного матеріалу [19].

Вітаміни м'язової тканини представлені переважно водорозчинними: В2 (рибофлавін), В6 (піридоксин), РР (нікотинамід), В3 (пантотенова кислота), біотин, інозит, холін, В12, В15, фолієва кислота та ін. Вітаміни різною мірою руйнуються за теплового оброблення: наприклад, В1 протягом теплової обробки 1 години при 97 °С втрачає активність на 80 %; В2 при тепловій обробці 120 °С руйнується на 50 %. Вітамін В12 не втрачає активності при нагріванні до 120 °С протягом перших 15 хв [19].

У м'язовій тканині міститься 1 – 1.5 % мінеральних речовин: калію, натрію, магнію, кальцію, заліза, цинку, фосфору, сірки, хлору.

Поживна цінність м'яса залежить від кількісного співвідношення вологи, білка, жиру, вмісту незамінних амінокислот, поліненасичених жирних кислот, вітамінів групи В, мікро- і макроелементів, а також органолептичних показників м'яса [19].

Білкові речовини передусім визначають поживну цінність і важливі функціональні властивості м'язової тканини. Поживність визначається біологічною цінністю та засвоюваністю речовин, що входять до складу їжі. В

свою чергу, біологічна цінність білкових речовин - це вихідний матеріал для побудови важливих елементів організму білкового походження – тканин, ферментів, гормонів. Біологічна цінність визначається тією частиною засвоєного організмом білка, як здатна задовольнити його потреби в синтезі необхідних білкових сполук і компенсації витрат на функціональну діяльність органів.

Засвоюваність білкових речовин у сучасних умовах харчування залежить від багатьох факторів, а саме від фізико-хімічного стану білка, здатності розщеплюватися ферментами травлення та способу оброблення їжі.

Про поживну цінність м'яса роблять висновок за «якісним білковим показником», що являє собою співвідношення триптофану (індексу повноцінних білків м'язової тканини) до оксипроліну (показника неповноцінних сполучнотканинних білків). Якість м'яса характеризується також за співвідношенням вода-білок, жир-білок, вода-жир. Між вмістом вологи і жиру існує зворотна кореляційна залежність [19].

М'ясо різних тварин відрізняється за вмістом води, білка, жиру та енергетичною цінністю відповідно до особливостей морфологічного складу, як видно з таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.

Масова частка хімічних речовин в основних видах м'яса [19].

М'ясо	Вміст, г на 100 їстівної частини				Енергетична цінність, кДж
	води	білка	жиру	золи	
Курятина	61,9	18,2	18,4	0,8	1008
Свинина	51,6	14,6	33,0	0,8	1485
Яловичина	67,7	18,9	12,4	1,0	782

Теплофізичні властивості м'яса (теплопровідність, теплоємність і температуропровідність) визначають характер і швидкість перебігу теплових процесів, які застосовують для отримання продуктів із новими якісними показниками. Більшість м'ясопродуктів за нормальних умов класифікують як колоїдні капілярно-пористі тіла. Складна будова, наявність фазових переходів,

а також біологічний характер походження роблять визначення теплофізичних і масо-вологообмінних характеристик дуже складним і досить наближеним процесом [19].

Теплопровідність м'яса залежить не тільки від його стану, а й від напрямку теплових потоків відносно повздовжньої осі м'язових волокон: теплопровідність м'язової тканини в напрямку паралельному волокнам, становить близько 0.88 теплопровідності у напрямку, перпендикулярному до волокон. Коефіцієнт теплопровідності м'язової тканини пісної яловичини дорівнює 0.5 Вт/(м·К), свинини напівжирної – 0.33, курятини – 0.41 Вт/(м·К).

Ж.Фур'є встановив закон теплопровідності й поклав в основу лінійний зв'язок між тепловим потоком і температурним градієнтом:

$$\vec{g} = -\lambda \nabla \theta, \quad (2.1)$$

де \vec{g} – тепловий потік, Вт; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$\nabla \theta$ – градієнт температур, К/м

Теплоінерційні властивості продукту характеризуються коефіцієнтом температуропровідності, м²/с:

$$a = \lambda / C\rho, \quad (2.2)$$

де C – питома теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина продукту, кг/м³.

Коефіцієнт температуропровідності практично не залежить від вологості продукту, якщо вона більша за гігроскопічну. За вологості, нижчої за гігроскопічну, вологість значно впливає на теплоємність.

Аналогічно теплопровідності, де перенесення теплоти відбувається від більш нагрітого до менш нагрітого тіла, маса також переноситься за наявності різниці потенціалу перенесення речовини. Рівняння перенесення речовини має такий вигляд:

$$\vec{q}_m = \lambda_m \nabla \theta_m, \quad (2.3)$$

де \vec{q}_m – вектор густини потоку вологи, кг/м²; λ_m – коефіцієнт вологопровідності, кг/м³ од. потенціалу; $\nabla \theta_m$ – градієнт потенціалу речовини, од. потенціалу/м.

Залежно від виду перенесення градієнт потенціалу речовини пропорційний градієнту тиску пари або градієнту капілярного потенціалу, або градієнту осмотичного тиску. Коефіцієнт потенціалопровідності, або коефіцієнт дифузії вологи, визначають за формулою:

$$\alpha_m = \lambda_m / (C_m \rho). \quad (2.4)$$

Теплофізичні показники м'яса залежать від вмісту вологи та жиру та представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Теплофізичні властивості м'яса

Вид м'яса	W_l , %	Ж, %	ρ , кг/м ³	C , Дж/(кг*К)	λ , Вт/(м*К)	$\alpha * 10^8$, м ² /с
Курятина	-	-	1030	3307	0.41	12
Свинина	-	-	1030	3056	0.33	10.6
Яловичина	75	0.9	1158	3517	0.50	12.6

Підвищення вологості зумовлює характерні зміни теплофізичних властивостей не тільки м'яса, а й продуктів його переробки [19].

М'ясо – складний як по структурі, так і по білковому складу комплекс, властивості якого визначаються багатьма факторами. Білковий склад м'яса складається з трьох основних по розчинності фракцій:

- водорозчинної саркоплазматичної (близько 40 % всіх білків),
- солерозчинної міофібрилярної (близько 60 % усіх білків),
- частково розчинної в лугах фракції білків строми та денатурованих білків [19].

Крім того, м'ясо характеризується відповідною структурою, в основі якої лежать властивості клітин м'яса як основи цієї структури. Частка вологи в м'ясній сировині складає близько 70-75 %. Тому, якщо говорити про додаткову гідратацію м'ясної сировини в процесі технологічної обробки, то слід це розуміти, не як просте додавання води, а як систему впливу на компоненти та структуру. Дійсно, якщо натуральний шматок м'яса помістити

у водне середовище, то з точки зору гідратації він буде інконтактний та в основному будуть відбуватись процеси дифузії, як результат різних концентрацій. Якщо провести аналогічну дію в розчині хлористого натрію з відповідною концентрацією, то дифузія піде на спад, а на перший план вийдуть процеси осмотичної взаємодії, в результаті якого іони натрію будуть проникати вглиб тканин, підвищуючи розчинність солерозчинних білків і тим самим сприяючи їх набухання в результаті додаткової гідратації [19].

Кінетично такий процес малорухливий та залежить від багатьох факторів, в тому числі від геометричних розмірів м'яса, концентрації солі. Цей процес сповільнюється цілісністю клітинної структури м'яса, що не дає можливості проявитись функціональним можливостям солерозчинних білків.

Значно швидше та ефективніше цей процес відбувається в різаному (рубленому) м'ясі, де клітинна структура м'яса механічно порушена. Тому у виробках з фаршу гідратація білків і водо-, і солерозчинних більш виражена. Також необхідно враховувати поверхневі ефекти зв'язування води, які при інших рівних умовах визначаються ступінню подрібнення. Тому, водозв'язуюча здатність високодисперсних кутерованих систем вище грубодисперсної системи.

Розчинність білків і гідратація тісно пов'язані між собою, в значній мірі впливають на якість кінцевих продуктів та визначають ступінь гідратації білків. Ступінь гідратації слід розуміти не як фізична присутність вологи, а як вологу, яка зв'язана з білком [19].

2.2. Білкововмісна сировина рослинного походження як об'єкт досліджень

До білкововмісної сировини рослинного походження відносяться культивовані гриби. Гриби шіїтаке (*Lentinula edodes*) представляють собою 25 % загального виробництва грибів у світі і є другим найбільш споживаним і культурним та їстівними грибами після *Agaricus bisporus* [43]. Техніка вирощування має багатовікову давнину, починаючи з 1100 року нашої ери за часів династії Сун у Китаї. Сьогодні Китай є основним культиватором грибів

з 72 % загального виробництва грибів, з яких шиїтаке становить 25 % виробництва.



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд шиїтаке
(*Lentinula edodes*)

Гриби шиїтаке є частиною відомих кухонь у всьому світі, їх подають як делікатеси, приготовані на пару або на повільному вогні, завдяки їхньому унікальному смаку/аромату, поживності та корисним властивостям. Гриби шиїтаке багаті полісахаридами (переважно у вигляді глюканів; наприклад, лентинан), білками, вітамінами, харчовими волокнами, ароматичними сполуками, незамінними амінокислотами, стеролами тощо (рис. 2.1).

Вони також містять близько 18 амінокислот, серед яких переважає глютамінова кислота. Шиїтаке вважається одним із найпоширеніших джерел ергостеролу, попередника вітаміну D₂ у людини. Доведено, що біологічно активні сполуки шиїтаке є антиканцерогенними, протимікробними та допомагають у запобіганні цирозу печінки та знижують рівень холестерину в крові [43].



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд ерінги
(*Pleurotus eryngii*, Quél)

Серед видів *Pleurotus*, *Pleurotus eryngii* (*P. eryngii*), також відомий як королівська глива, є рідним для південної Європи, України, Північної Африки та Близького Сходу (рис. 2.2). Він широко культивується в усьому світі і вважається одним із найбільш комерційно важливих видів роду *Pleurotus* завдяки чудовому смаку, аромату та тривалому терміну зберігання. Ерінги (*Pleurotus eryngii*, Quél)

широко вирощується та використовується завдяки своїм кулінарним якостям, привабливій консистенції та смаку, якому віддають перевагу споживачі, а також завдяки своїм фармацевтичним властивостям. В основному його культивують у Китаї та Японії, а його частка на ринку Кореї вища, ніж у інших сортів грибів [79].

Вченими [107] досліджуються терапевтичні цінності з метою отримання наукових фактів, що підтверджують споживання цього гриба як функціональної їжі. Зокрема було досліджено антиоксидантну активність цього гриба та відзначено, що *Pleurotus eryngii* мають високий рівень Zn ($74,34 \pm 5,34$ мкг/г гриба), значні кількості Cu ($8,04 \pm 0,29$ мкг/г гриба) та селену Se ($0,33 \pm 0,04$ мкг/г гриба) за рахунок чого займають перше місце за кількістю цинку, міді і селену [107].

Ерінги мають гіполіпідемічний дієтичний ефект та відносяться до їжі, що знижує рівень холестерину. Дедалі частіше зустрічаються застосування цих грибів як нутрицевтиків та корисних продуктів для здорової шкіри (активація колагену). Ерінги є сильним активатором Nrf2 на молекулярному рівні, активність якого із віком людини знижується, тому активація Nrf2 стає важливою терапевтичною стратегією для боротьби з неврологічними розладами, а також вони мають антихолестеринемічну, антиоксидантну, протипухлинну дію [107, 108, 109].

В іншому джерелі [110] зазначається, що водночас гриби ерінги багаті на білок, вуглеводи, ненасичені жирні кислоти, вітаміни та інші поживні речовини. Вона також має низький вміст жиру та високу харчову та лікувальну цінність, що призводить до її високої економічної цінності. Її висушений продукт містить 14,85% білка, 4,46% жиру, 15,51% сирової клітковини, 43,15% вуглеводів та 18 амінокислот. Він також багатий на полісахариди [111, 112] і має хороші терапевтичні ефекти, такі як його активність проти вірусів та гіпоглікемії, а також його здатність знижувати рівень холестерину, сприяти кишковому травленню, запобігати серцево-судинним захворюванням та покращувати імунітет [111, 113].

Глива звичайна (*Pleurotus ostreatus*) відомий їстівний гриб із родини плевротових, який має м'ясисті устрицеподібні шапинки сірого чи бурого кольору (5-15 см) та росте великими групами на деревині (рис. 2.3). Одне з попередніх досліджень показало, що вживання екстрактів з грибів гливи знижує рівень холестеролу, цей ефект пов'язують із вмістом в цьому грибі бета-глюканів. Гриби глива звичайна багаті на білки, харчові волокна, незамінні амінокислоти, вуглеводи, водорозчинні вітаміни (С, В) та мінерали (Na, Ca, P, Fe та K) мають унікальний статус делікатесу з високими харчовими та лікувальними цінностями. Вміст білка у них вищий порівняно з овочами, але менший порівняно з м'ясом [114].



Рис. 2.3. Зовнішній вигляд гливи звичайної (*Pleurotus ostreatus*)

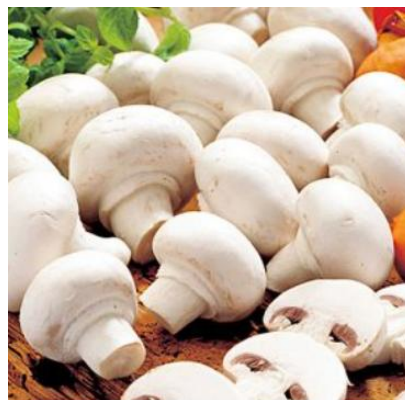


Рис. 2.4. Зовнішній вигляд печериці звичайної (*Agaricus campestris L.*)

Зовнішній вигляд печериці звичайної (*Agaricus campestris L.*) представлений на рис. 2.4. Ці гриби містять вітаміни групи В, D, РР, а також залізо, цинк, йод, калій, селен, фосфор, багато амінокислот, що необхідні для нормального функціонування організму.

Хімічний склад грибів частково відрізняється для кожного виду. На хімічний склад впливають різні фактори, включаючи структуру середовища вирощування, співвідношення вуглець/азот (С/N), температуру, рН, склад повітря тощо [115].

Вуглеводи грибів – це полігідроксильовані альдегіди або кетони та їх похідні, які залежно від ступеня полімеризації можна розділити на моно-, ди-,

оліго- або полісахариди. Вони є одним з основних компонентів вищих грибів і зазвичай складають від 46,6 до 81,1% [115, 116, 117].

Глюкоза, фруктоза, мальтоза, рамноза, арабіноза, сахароза, маніт, трєалоза та ксилоза були визначені як основні вуглеводи грибів. Однак однією важливою фракцією в грибах є глюкани, це лінійні полісахариди, інтегровані глюкозою зі зв'язком $\beta(1-3)$, $\beta(1-6)$ або $\alpha(1-3)$, присутні у складі плодових тіл [115, 118].

Полісахариди є значним компонентом у складі грибів, що проявляють пребіотичний ефект, а також гриби є джерелом хітинів або глюканів, а також мананів [119].

На рис. 2.5 представлено хімічну структуру глюканів, пов'язаних $\beta(1-3)$ або $\beta(1-6)$ зв'язком. Гриби родини аскоміцетів складаються з хітин-маннан- β -глюканів, тоді як родина базидіоміцетів складається з хітин- β -глюканів [120].

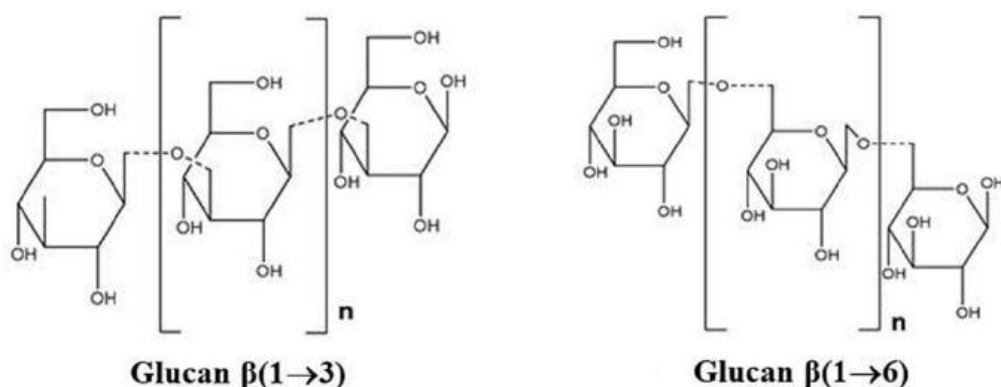


Рис. 2.5. Хімічна формула глюканів [115]

Хітин - це $\beta(1-4)$ -зв'язаний N-ацетил-глюкозам і новий полімер, який є частиною складного ланцюга біополімерів макрогрибів (білок-глюкан-хітин), який функціонально додає жорсткості клітинній стінці грибів, а також сприяє осмотичній цілісності [121, 122].

Полісахариди грибів виступають як імуномодулятори та мають протипухлинний ефект. Це може проявлятися за рахунок взаємодії полісахаридів із гомо-, гетерогліканами або білково-полісахаридними комплексами [115].

Грибні білки – це макромолекулярні компоненти, які описуються у формі амінокислотних біополімерів як будівельних блоків і складаються з серії азотистих сполук, що надають цим біомолекулам ряд фізичних, хімічних та біологічних властивостей [123, 124]. Нещодавно опубліковані наукові роботи показали, що високий вміст білка в макрогрибах є одним з найбільш поживних компонентів порівняно з іншими джерелами рослинного білка [125]. Як правило, їстівні гриби містять від 19 до 39% білка від сухої маси, будучи частиною складної мережі грибних клітин [117, 126]. Білки, пов'язані з грибами, - це переважно лектини та деякі ферменти, які можна знайти у вигляді інактивованого рибосомного ферменту або лаккази, а також імуномодулюючі грибкові білки [127]. Лектини грибів – це глікозильовані білки, які можуть бути з високою специфічністю у оборотній формі зв'язані з вуглеводами. Ці глікозильовані білки присутні в різних видах, включаючи рослини, водорості або гриби [128].

Ліпіди грибів – це різноманітна група молекул, основними характеристиками яких є розчинність в органічних розчинниках, але не у воді. Гриби містять сполуки на основі ліпідів у відсотковому співвідношенні від 1,18 до 8,39 % від сухої маси. Жирні кислоти грибів є одними з найпростіших ліпідів, утворених вуглеводневими ланцюгами довжиною від 4 до 24 ланок, з метильною групою на одному кінці ланцюга та карбоксильною групою на іншому, де подвійні зв'язки можуть бути присутніми або відсутніми, їх називають насиченими або ненасиченими відповідно [129]. Були проведені дослідження потреб у цих сполуках для організму людини та їхнього впливу на здоров'я, та було встановлено, що такі сполуки, як лінолева кислота та α -лінолева, є необхідними для споживання, оскільки організм людини не може їх синтезувати самостійно [130].

Отже, гриби містять низку хімічних сполук, що мають нутрицевтичне значення, таких як терпени, полісахариди, біоактивні білки та антиоксиданти, що робить їх терапевтично сильнішим продуктом харчування в боротьбі з різними дегенеративними захворюваннями [131, 132]. Вони є не тільки

білковою їжею, але й повноцінною здоровою їжею, яка містить усі дієтичні інгредієнти (наприклад, з високим вмістом клітковини, мінералів та вітамінів), а також значні відновлювальні сполуки для лікування різних форм раку та пухлин (β -глюкани, лектини, тритерпеноїди, токофероли тощо) [115, 131, 132, 133, 134].

Гриби характеризуються наявністю різних сполук з пребіотичним потенціалом (рис. 2.6), таких як β -глюкани, хітин та інші олігосахариди, а також деякі протеоглікани. Пребіотичні сполуки грибів мають здатність стимулювати різноманітні фізіологічні процеси, такі як імунна відповідь у кишечнику, генеруючи взаємодію з певними рецепторами або шляхом взаємодії з мікроорганізмами, що генерують молекули, такі як бутират або пропіонат, що можуть впливати на експресію цитокінів, пов'язаних з різними прозапальними процесами, що також пов'язано з посиленням засвоєння деяких поживних компонентів або навіть їх споживання в довгостроковій перспективі може бути задіяне в метаболізмі ліпідів та вуглеводів [115, 135]. Тобто, пребіотичні властивості грибів при вживанні позитивно впливають на роботу кишківника людини.

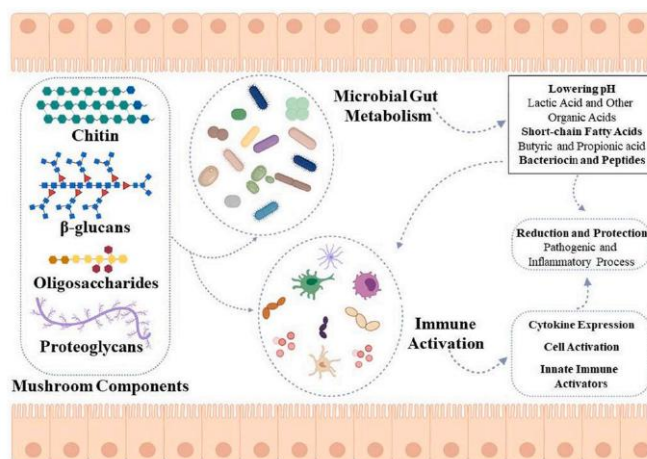


Рис. 2.6. Пребіотичний механізм дії гриба та його біоактивні компоненти

До основних антиоксидантних властивостей грибів є їх здатність поглинання радикалів DPPH [115, 136]. Численні експерименти (як *in vitro*, так і *in vivo*) показали, що культивовані гриби містять багаті на антиоксиданти мікохімічні речовини [137].

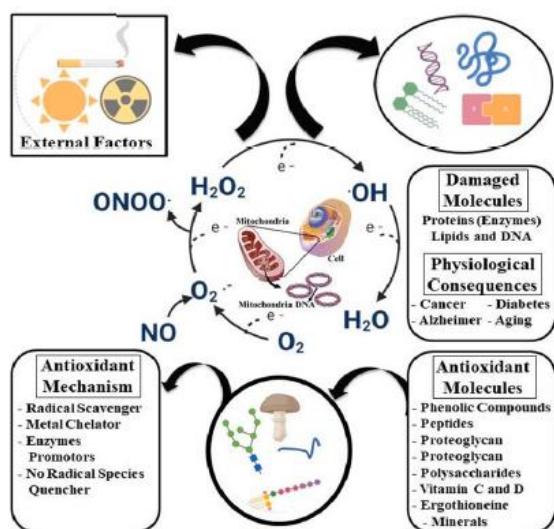


Рис. 2.7. Біомеханізм антиоксидантної дії гриба та його біоактивних компонентів

Культивовані гриби можна використовувати як надійний підхід до виробництва агентів для пригнічення окислення та контролю мікроорганізмів. Метаболіти, що екстрагуються з цих грибів, можна продавати у вигляді таблеток для полегшення захворювань, оскільки вони мають протидіабетичні, антимікробні, антиоксидантні, гіпоглікемічні властивості (рис. 2.7) [115, 138].

2.3. Методи досліджень білкововмісної сировини

Методика проведення досліджень на конвективному сушильному стенді:

1. Перед проведенням досліджень визначають початкову вологість матеріалу. Матеріал висипають в бюкси і на протягом 5 годин при температурі 105°C висушували в сушильній шафі. Після закінчення сушіння бюкси виймали з сушильної шафи і ставили в ексікатор для охолодження. Охолоджені бюкси зі зразком зважували у закритому стані на терезах.

В теорії сушіння вологість матеріалу розраховується відносно маси абсолютно сухого матеріалу, яка в процесі сушіння залишається незмінною [139].

Загальна маса вологого матеріалу (в кг):

$$q = q_{\text{вл}} + q_{\text{ср}}, \quad (2.5)$$

де $q_{\text{вл}}$ – маса води, кг; $q_{\text{ср}}$ – маса сухої речовини, кг

Вологість матеріалу по відношенню до загальної маси обчислюють за формулою, %:

$$W = \frac{q_{\text{ВЛ}}}{q} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100, \quad (2.6)$$

де m_1 – маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 – маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Вологість матеріалу по відношенню до маси сухої речовини розраховується за формулою, %:

$$W^c = \frac{q_{\text{ВЛ}}}{q_{\text{ср}}} \cdot 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100, \quad (2.7)$$

де m_1 – маса порожньої бюкси (з кришкою), г; m_2 – маса бюкси з наважкою до сушіння, г; m_3 – маса бюкси з наважкою після сушіння, г.

Формули переходу, %:

$$W = \frac{W^c}{100 + W^c} \cdot 100,$$

$$W^c = \frac{W}{100 - W} \cdot 100,$$

Якщо вологість матеріалу відносно маси сухої речовини виразити в кг води/(кг сухої речовини), то отримаємо вологовміст (питомий масовміст) матеріалу [139, 140]:

$$u = \frac{q_{\text{ВЛ}}}{q_{\text{ср}}} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \quad (2.8)$$

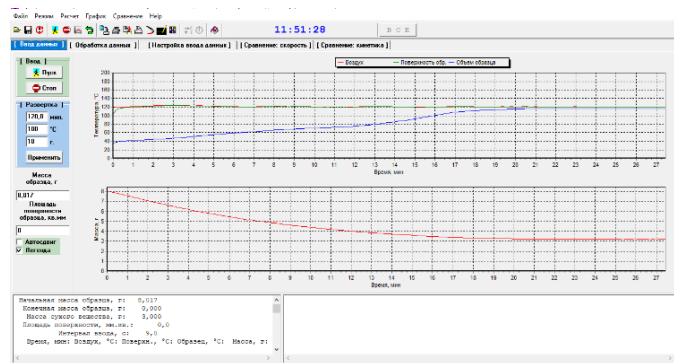


Рис. 2.8. Панель управління системою збору та обробки інформації експериментального конвективного сушильного стану

2. Дослідження сушіння матеріалів починають з встановленням режиму сушіння на стенді, розміщують матеріал на сітці, яка знаходиться на штанзі вагів в сушильній камері і вмиканням комп'ютерної програми збору та обробки інформації, що безперервно реєструє час та зміну маси навіски, температури теплоносія та температури в середині матеріалу. Приклад знімання кінетики процесу сушіння композиту наведено на рис. 2.8.

3. Розрахунок характеристик відбувається за допомогою спеціально розробленої програми «Sooshka».

3.1. Кінетика процесу сушіння:

$$W_{c.p.}(t) = \frac{G(t) - G_{a.c.}}{G_{a.c.}} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

де $G(t)$ – розрахункові маси зразка, г; $G_{a.c.}$ – абсолютно суха маса матеріалу, г.

3.2. Швидкість сушіння визначається, %/хв:

$$N = \frac{dW}{d\tau}, \quad (2.10)$$

де τ – час сушіння, хв.

3.3. Температурний коефіцієнт сушіння представляє собою оцінку похідна середньої температури зразка від вологовмісту:

$$b = dt_{cp}/du, \quad (2.11)$$

де $u = W_{c.p.}/100$ – вологовміст зразка, кг/кг с.р.; t_{cp} – вираховується як середнє значення розрахунку температури на поверхні та в матеріалі зразка, °С.

3.4. Критерій оптимізації сушіння дорівнює відношенню витрат кількості тепла на нагрівання тіла до кількості тепла на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу:

$$Rb = \frac{c}{r} b, \quad (2.12)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, кДж/(кг °С); r – питома теплота фазового перетворення, кДж/кг.

Методика досліджень та розрахунку теплоти випаровування

Визначення теплоти випаровування гриба за допомогою диференціального мікрокалориметра ДМКИ-01 засновано на синхронному вимірі зміни маси матеріалу та кількості теплоти, що витрачена на випаровування під час ізотермічного конвективно-кондуктивного сушіння. Для дослідження теплоти випаровування гриба було використано калориметричну платформу з плоскими комірками. Для експерименту використали тонкий (товщиною ~ 1 мм) зріз тканин плодового тіла гриба печериця звчайна діаметром до 40 мм. Сушіння проводили при температурах $40 \dots 80^\circ\text{C}$, швидкості повітря $0,8$ см/с та його вологовмісті 10 г/кг. Реєстрація теплового потоку і зміни маси зразка в процесі сушіння здійснювалась безперервно до моменту досягнення зразком рівноважної вологості. Масу сухих речовин визначали за ДСТУ [141] шляхом досушування зразків до постійної маси при температурі 105°C .

Поточні значення теплоти випаровування вологи зі зразка під час досліду визначали після закінчення досліду за формулою:

$$r_i = \frac{\int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} Q(\tau) d\tau}{m(\tau_i) - m(\tau_{i+1})}, \quad (2.13)$$

де r_i – питомі витрати теплоти на випаровування за час сушіння від τ_i до τ_{i+1} , кДж/кг ; τ_i та τ_{i+1} – поточні моменти часу процесу сушіння, с; $Q(\tau)$ – тепловий потік всередині робочої камери як функція часу, кДж/с ; $m(\tau_i)$ та $m(\tau_{i+1})$ – маса зразка в моменти часу τ_i та τ_{i+1} , кг.

Методика досліджень та розрахунку питомої теплоємності

Для дослідження теплоємності було використано калориметричну платформу з циліндричними комірками, які герметично укупорювали, щоб запобігти випаровуванню вологи під час досліду. Гриб подрібнювали на шматочки $3 \times 3 \times 3$ мм та робили наважки 20 мг, які підсушували при $t=60^\circ\text{C}$, швидкості повітря $0,8$ см/с та його вологовмісті 10 г/кг.

Вологість використаних зразків визначали після досліду, за стандартизованою методикою [141], за масою сухих речовин, яку визначали шляхом досушування зразків до постійної маси при температурі 105°C.

Вимірювання питомої теплоємності здійснювали за стандартизованою методикою методом покрокового сканування через кожні 5 °C [142]. На підставі отриманих даних визначали питому теплоємність тканин гриба при температурі середини температурної ступені за формулою:

$$c_i = \frac{\int_{\tau_{поч}}^{\tau_{кін}} Q(\tau) d\tau}{m(t_{кін} - t_{поч})}, \quad (2.14)$$

де c – питома теплоємність матеріалу при температурі середини температурного кроку, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; m – маса матеріалу, кг; $t_{поч}$. та $t_{кін}$ – температура початку та кінця температурного кроку, K .

Методика визначення коефіцієнту регідратації та відновлюваності

Білки у висушеному стані, проходять гідратацію в декілька етапів, одним із яких є процес набухання або коефіцієнт регідратації (RR) [143]. Регідратація (набухання) – це спонтанний процес поглинання високомолекулярним білком низькомолекулярної рідини, у даному випадку, води. Цей процес призводить до значного збільшення маси та об'єму висушеного м'яса.

Дослідження проводять ваговим методом Б.В. Зозулевича. Порядок визначення: у попередньо підготовлені бюкси зважують досліджуваний матеріал, заливають водою у співвідношенні 1:10. Витримують в термостаті, центрифугують протягом 10 хв. Відновлений продукт зважують та розраховують коефіцієнт набухання. Температура витримки 20 °C, 45 °C; час 5, 10, 30, 60 хв та 24 год.

Розрахунок: оцінка набухання проводиться за допомогою коефіцієнту регідратації K_p , який показує відносне збільшення маси продукту після

набухання і визначає здатність до встановлення початкових властивостей матеріалу при зневодненні. Коефіцієнт набухання визначається за формулою:

Коефіцієнт регідrataції (набухання) визначається за формулою:

$$K_p = \frac{G_2}{G_1}, \quad K_p = \frac{\Delta G}{G_2} \quad (2.15)$$

де K_p – коефіцієнт регідrataції (набухання);

G_1 та G_2 – маса матеріалу до та після регідrataції відповідно, г,

ΔG – приріст маси протягом процесу регідrataції, г.

Відновлюваність матеріалу B – величина, яка показує наскільки вологість відновленого матеріалу наближується до вихідної маси, яка приймається за 100 %. Визначається за формулою:

$$B = \frac{S_0}{S_1} * K_H * 100 \% , \quad (2.16)$$

де S_0 - вміст сухих речовин у вихідному матеріалі, %, $S_0 = 100 \% - W_{\text{поч}}$

S_1 - вміст сухих речовин у висушеному матеріалі, %, $S_1 = 100 \% - W_{\text{кінц.}}$

Методика визначення рівноважної вологості

Визначення рівноважної вологості досліджуваних зразків залежно від відносної вологості повітря φ застосовувався тензометричний (статичний) метод Ван Бамелена [144]. Суть цього методу полягає в тому, що зразок матеріалу із заданою вологістю витримують в ексікаторі над водним розчином сірчаної кислоти. Відома концентрація розчинів відповідає конкретному парціальному тиску пари при даній температурі, тобто відповідному значенню відносного тиску p/p_s .

У процесі адсорбції потенціалом переносу є парціальний тиск пари. Рівновага системи настає, коли при однаковій температурі повітря і матеріалу парціальні тиски пари повітря $p_{n \text{ нов}}$ і пари в тонкому шарі над матеріалом $p_{n \text{ мат}}$ рівні. Тобто $p_{n \text{ нов}} = p_{n \text{ мат}}$. За цих умов матеріал піддається дії постійної вологості W_p , яка називається рівноважною, і рівновага системи розуміється лише, як динамічна. Коли матеріал поглинає воду, $p_{n \text{ нов}} > p_{n \text{ мат}}$ - відбувається адсорбція, а коли він виділяє воду ($p_{n \text{ нов}} < p_{n \text{ мат}}$) - відбувається десорбція. У рівноважному стані вологість матеріалу W_p однакова в будь-якій його точці.

Вміст водяної пари в повітрі визначається відносною вологістю φ , яка дорівнює відношенню парціального тиску пари повітряного $p_{n\text{ пов}}$ і тиску насичення $p_{нас}$ при тій же температурі над водою.

Зразки періодично зважували на аналітичних вагах з точністю $\pm 0,0001$ г, а вимірювання маси зразка вели до досягнення постійної маси, при якій вологість їх відповідає рівноважній.

Експеримент включає три етапи:

1. Приготування розчинів.

Для створення у замкнутому просторі ексікаторів повітряного середовища із заданою вологістю, приготували розчини сірчаної кислоти різної концентрації.

Оскільки в довідниках показано залежність тиску водяної пари від розчину сірчаної кислоти в мм.рт.ст. від концентрації H_2SO_4 у вагових %, проведений перерахунок даного тиску на відносну вологість φ за формулою 2.9:

$$\varphi = p/p_s, \quad (2.17)$$

де p та p_s – парціальний тиск та тиск насичення водяної пари при тиску 760 мм рт.ст. і температурах, що охоплюють можливий діапазон їх зміни в експерименті. Результати перерахунку подані в таблиці 2.3.

У довідниках в табличній формі наведена залежність тиску водяної пари над розчинами від вагових % H_2SO_4 в розчині (тобто від її концентрації), а також залежність вмісту H_2SO_4 в грамах на 100 г розчину і на 1 літр розчину від густини розчину в г/см^3 при 20°C для кислоти густиною 1,8305 [144].

Відповідно до техніки приготування розчинів було підготовлено 6 розчинів для 6 різних φ в діапазоні від 0,4 до 0,9. Необхідні характеристики сірчаної кислоти були визначені з таблиці перерахунку (табл. 2.3) і довідковим даним (табл.2.4). Експерименти проводились при температурі навколишнього повітря $18\text{-}20^\circ\text{C}$.

Таблиця 2.3.

Відносна вологість φ над розчинами H_2SO_4 при 760 мм.рт.ст.

H_2SO_4 , вагові	φ					
	Температура пари, °С					
	10	15	20	25	30	35
10	0,956	0,962	0,981	0,956	0,955	0,956
20	0,880	0,877	0,878	0,880	0,880	0,882
25	0,814	0,821	0,827	0,825	0,826	0,828
30	0,749	0,759	0,753	0,754	0,754	0,756
35	0,673	0,680	0,662	0,665	0,660	0,669
40	0,565	0,571	0,559	0,564	0,569	0,574
45	0,456	0,461	0,456	0,463	0,465	0,472
50	0,348	0,352	0,354	0,358	0,361	0,368
55	0,250	0,250	0,251	0,291	0,264	0,268
60	0,163	0,164	0,160	0,164	0,170	0,175
65	0,0869	0,0938	0,0913	0,0962	0,101	0,104
70	0,0326	0,0391	0,0456	0,0379	0,0409	0,0451
75	0,0109	0,0156	0,0171	0,0168	0,0189	0,0190
80	0,00434	0,00469	0,00570	0,00421	0,00629	0,00711
85	0,00109	0,00156	0,00171	0,00168	0,00189	0,00190
90	0,000217	0,000235	0,000285	0,000337	0,000314	0,000474

2. Підготовка зразків.

Матеріали завантажували в заздалегідь підготовлені бюкси. Для зменшення випадкових помилок, експерименти проводилися з двома паралельними зразками. Бюкси із зразками висушували до постійної маси в сушильній електричній шафі при 130°C протягом 6 годин. Після висихання зразки зважували. Бюкси з відкритою кришкою поміщали в ексикатор згідно з протоколом експерименту. Кришка ексикатора надійно закрита. Зразки зберігали в ексикаторі протягом 32 днів до врівноваження з навколишнім середовищем.

Таблиця 2.4.

Властивості водних розчинів сірчаної кислоти при температурі 20 °С

H ₂ SO ₄ , вагові	<i>p</i> , мм рт. ст.	φ	Густина р-ну H ₂ SO ₄ , г/см ³	Концентрація р-ну H ₂ SO ₄ , , г/л
10	17,2	0,981	1,066	106,6
20	15,4	0,878	1,139	227,9
25	14,5	0,827	1,178	294,6
30	13,2	0,753	1,219	365,6
35	11,6	0,662	1,260	441,0
40	9,8	0,559	1,303	521,1
45	8,0	0,456	1,348	606,4
50	6,2	0,354	1,395	697,5
55	4,4	0,251	1,445	794,8
60	2,8	0,160	1,498	898,8
65	1,6	0,0913	1,553	1010
70	0,8	0,0456	1,611	1127
75	0,3	0,0171	1,669	1252
80	0,1	0,00570	1,727	1382
85	0,003	0,00171	1,779	1512
90	0,05	0,000285	1,814	1633

3. Проведення вимірів.

Зважування бюксів з наважками, проводили на лабораторних аналітичних вагах ВЛР – 200 г з допуском 0,5 мг. У експерименті фіксували також температуру, тиск навколишнього повітря і час.

Приріст маси зразків на початку експерименту визначали через 6 годин 40хв. Потім визначали щодня. Зважування зразків проводили до досягнення ними постійної маси.

Оскільки рівноважну вологість необхідно розрахувати відносно абсолютної сухої маси матеріалу, ця величина залишається незмінною під час процесів адсорбції-десорбції та сушки-зволоження, тому обробка всіх експериментальних даних, поглинена матеріалом волога була віднесена до маси абсолютно сухого матеріалу.

Вологість матеріалу визначали по формулі:

$$W^c = \frac{m_i - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}} - m_{\text{бюк}}}, \quad (2.18)$$

де W^c – вологість матеріалу, віднесена до маси сухого матеріалу, %; m_i – маса бюкса з вологим матеріалом (поточне значення), г; $m_{\text{сух}}$ – маса бюкса з сухим матеріалом, г; $m_{\text{бюк}}$ – маса бюкса, г.

Рівноважна вологість матеріалу визначалася по формулі:

$$W_p^c = \frac{m_p - m_{\text{сух}}}{m_{\text{сух}} - m_{\text{бюк}}}, \quad (2.19)$$

де m_p – маса бюкси з вологим матеріалом в рівноважному стані, г.

Перехід від вологості W^c , розрахованої по відношенню до маси сухої речовини матеріалу, до вологості W , розрахованої до загальної маси матеріалу, здійснюється згідно формул переходу:

$$W = \frac{W^c}{100 + W^c} \cdot 100, \quad (2.20)$$

$$W^c = \frac{W}{10 - W} \cdot 100, \quad (2.21)$$

При обробці експериментальних даних використовувалися програми Microsoft Office Excel.

Методика визначення дисперності сухого матеріалу

Для просіювання порошоків використовували установку, призначену для визначення дисперсного складу рослинної сировини, яка складається з столику з металотканими ситами, які створюють обертово-поступальний рух. Струшування сит відбувається за допомогою штовхача, встановленого над ними. Просіювання порошку відбувається на комплекті сит, зібраних в

визначеній послідовності. Зверху знаходиться сито більшого розміру з стороною квадрату 1,0 мм, а знизу меншого з стороною 0,1 мм.

Процес просіювання відбувався наступним чином:

- зважували наважку з отриманим порошком після подрібнення в кількості 100 г і завантажували на верхнє сито в комплекті сит;
- вмикали розсіювальну установку і відбувається просіювання;
- отримані фракції порошоків зважуємо на терезах.

Методика визначення активності води

Визначали показник активності води за методикою викладеною в ISO 18787:2017. Наважку зразку 0,5 г переносили в спеціальний бюкс для вимірювання показника активності води та здійснювали вимірювання.

Методика визначення стану води у білковомісній сировині

Згідно методики дослідження стану води в рослинних матеріалах було підготовлено зрізи рослинних тканин товщиною 1...1,5 мм та діаметром 5...6 мм. Для досягнення необхідного спектру вологості їх підсушували в потоці повітря з температурою 60 °С та швидкістю 3 м/с.

Зразок герметично закупорювали в спеціальний алюмінієвий контейнер (рис. 2.9) та розміщували у робочу комірку теплового блоку де охолоджували до -150 °С зі швидкістю 64 К/хв. Після встановлення температурної рівноваги в калориметричних комірках і витримці при цій температурі протягом 2 хв контейнер із зразком нагрівали до кімнатної температури зі швидкістю 4 К/хв. Одночасно реєстрували процеси, що відбуваються в матеріалі, за допомогою автоматизованої системи збору та обробки інформації «Water-5» [145]

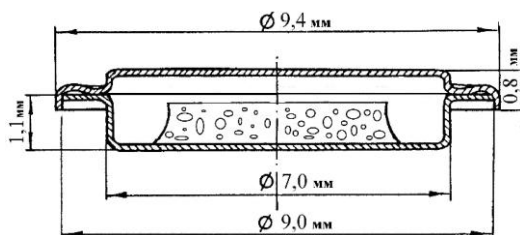


Рис. 2.9. Стандартний герметичний контейнер з комплекту ДСМ-2М зі зразком

При вимірюванні методом ДСК фіксується сума потужностей всіх теплових потоків, що виникають при зміні температури в результаті як фазових переходів, так і зміни теплоємності матеріалу. Тобто, на ДСК-кривих реєструються піки, що відповідають виділенню або поглинанню теплоти при зміні ентальпії в результаті фазового переходу I роду, і перегини, що відповідають різкій зміні питомої теплоємності при фазовому переході II роду. Однак у більшості випадків зміна питомої теплоємності речовини в порівнянні зі зміною ентальпії при фазовому переході I роду настільки мала, що досить гарним наближенням для відображення зміни власне питомої теплоємності в районі піка теплопоглинання чи тепловиділення вважають пряму, яка з'єднує точки початку й кінця піку. Площа, яку на рис. 2.18 замальовано чорним кольором та яка знаходиться між кривою піку плавлення замерзаючої води і нанесеною прямою зміни теплоємності в районі піку, є пропорційною тепловому ефекту фазового переходу I роду, в даному випадку – ефекту плавлення вільної води [145].

Чисельне визначення теплового ефекту фазового переходу I роду роблять на підставі даних градуювання калориметра, отриманих при дослідженні в тих же умовах експерименту еталонної речовини з відомим значенням ентальпії аналогічного фазового переходу, що відбувається при близькій температурі. Для дослідження стану води в рослинних тканинах в якості еталонної речовини було використано дистильовану воду подвійної перегонки.

Шляхом обробки за допомогою комп'ютерної програми «Water-5» ДСК-кривих, записаних у пам'ять комп'ютера в процесі експерименту, та на підставі даних градуювання визначали площі піків плавлення (шляхом інтегрування за методом трапецій) та масу вільної (замерзаючої) води в рослинних тканинах. Кількість незамерзаючої води, що по визначенню є зв'язаною, обчислювали як різницю між загальним вмістом води в зразку і масою замерзаючої води. Загальну кількість води в досліджуваних зразках

визначали після закінчення калориметричних вимірів методом висушування у сушильній шафі при 105°C.

Повний алгоритм розрахунку зв'язаної води представлений формулою:

$$m_{з.в.} = m_в - (m_{ет} \cdot s_в \cdot \Delta H_{ет} / s_{ет} \cdot \Delta H_в) \quad (2.22)$$

де $m_{з.в.}$ – маса незамерзаючої (зв'язаної) води у зразку, кг;

$m_в$ – загальна маса води у зразку, кг;

$m_{ет}$ – маса еталонної речовини, кг;

$s_в$ – площа під піком плавлення води у зразку, мВ·с;

$s_{ет}$ – площа під піком плавлення еталонної речовини, мВ·с;

$\Delta H_в$ – ентальпія плавлення води у зразку, кДж/кг;

$\Delta H_{ет}$ – ентальпія плавлення еталонної речовини, кДж/кг.

Однак, у припущенні, що ентальпія плавлення вільної води у зразку дорівнює ентальпії плавлення дистильованої води, використаної в якості еталонної речовини, масу зв'язаної води у зразку визначали за спрощеною формулою [145]:

$$m_{з.в.} = m_в - m_{в.в.} = m_в - (m_{ет} \cdot s_в / s_{ет}) \quad (2.23)$$

2.4. Експериментальні установки для проведення досліджень

Експериментальний конвективний сушильний стенд і методика досліджень для переробки колоїдних капілярно-пористих матеріалів

Дослідження кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів проводили на експериментальному конвективному стенді, який обладнаний автоматичною системою збору та обробки інформації (рис. 2.10) [146], який складається з основних компонентів: 3-х сушильних камер (1), блоку електричних нагрівачів (2), вентилятора (3), ізольованих повітропроводів та систем контролю процесу сушіння.

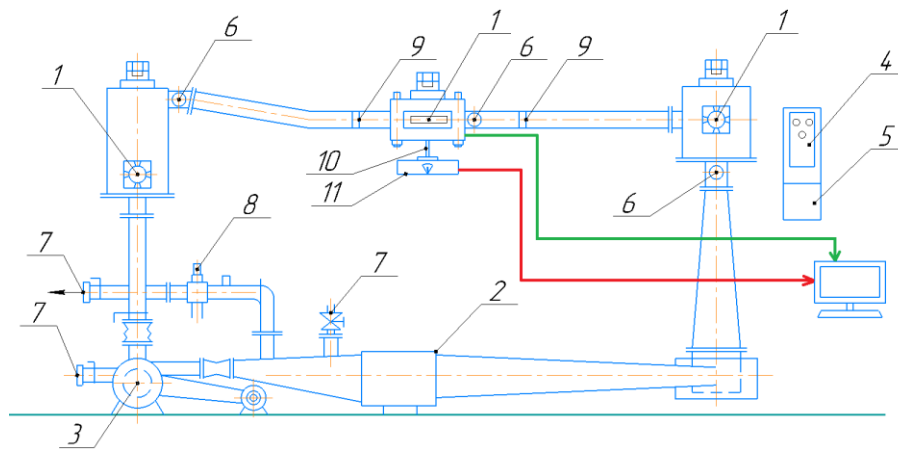


Рис. 2.10. Схема експериментального конвективного стенду для сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів [147]: 1 – сушильні камери; 2 – електричні нагрівачі; 3 – вентилятор; 4 – терморегулятор; 5 – регулятор швидкості теплоносія; 6 – термометри опору; 7 – патрубки з шиберами; 8 – психрометр; 9 – спеціальні решітки; 10 – штанга терезів; 11 – ваги AD-500

На щиті керування регулятором швидкості теплоносія (5) налаштовується робота вентилятора (3), який дозволяє досягнути широкий діапазон коливань швидкості і температури теплоносія. Відцентровим вентилятором за допомогою перетворювача частоти при ручному регулюванні шляхом зміни подачі повітря регулюється швидкість руху теплоносія. Патрубками з шиберами (7) можливо регулювати співвідношення між відпрацьованим і свіжим повітрям.

Зразок дослідного матеріалу розміщують на штангах терезів (10), після встановлення на стенді заданого режиму дослідження. При цьому безперервно реєструється зменшення маси зразка в процесі сушіння за допомогою вагів AD-500 (11) з'єднаних з комп'ютером.

На конвективному сушильному стенді допускається здійснювати термічну обробку рослинної сировини теплоносієм температурою 30 – 150 °С і швидкістю 0,5 – 5 м/с. Встановлені високоточні ваги можуть реєструвати зміни маси зразка до 0,001 г. Температура в сушильній камері підтримується з точністю до 0,02°С. Зчитування експериментальних даних про зміну маси та температури зразка, температури сушильного агента в сушильній камері

відбувається 7 раз за хвилину і записується на комп'ютері. Похибки запису даних на експериментальному конвективному сушильному системою автоматизованого збору інформації становить для температур не перевищує $\pm 1^{\circ}\text{C}$ та маси $\pm 5\text{мг}$.

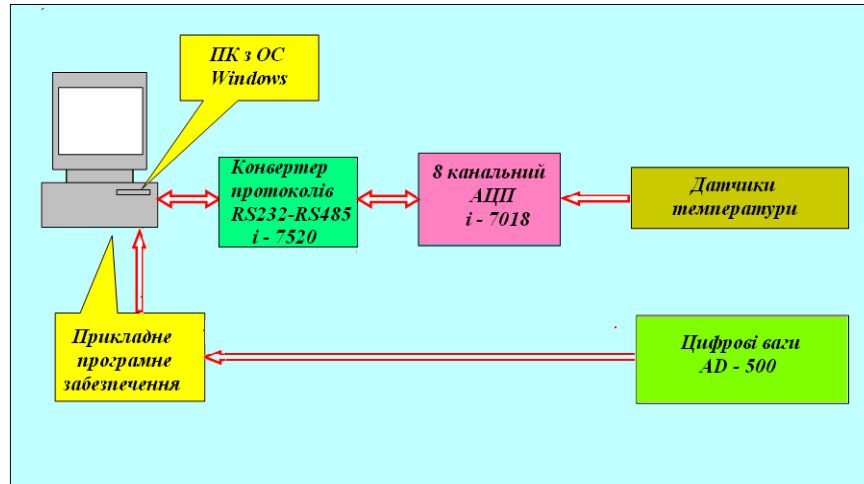


Рис. 2.11. Структурна схема автоматизованого збору та обробки інформації із конвективного сушильного станду

Для підвищення точності, інформативності та зручності обробки інформації, отриманої в ході експерименту, експериментальний станд оснащений допоміжним обладнанням, таким як аналого-цифровий перетворювач і-7018, конвертором-інтерфейсом і-7520 та персональним комп'ютером з процесором CPU AMD ATHLON XP 2200+ (рис. 2.11).

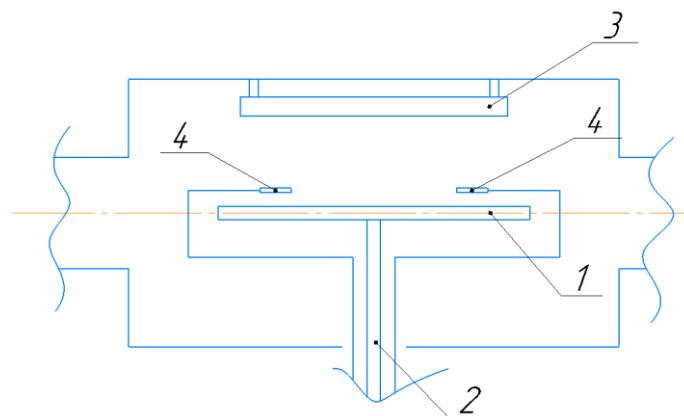


Рис. 2.12. Сушильна камера експериментального конвективного станду:

1 – сітка, 2 – штанга терезів; 3 – інфрачервоні лампи, 4 – термопари

Сушильна камера, представлена на рис. 2.12, являє собою прямокутний короб з листового металу з знімальним люком. Камера має прозоре скло, через яке можна спостерігати за станом матеріалу в процесі сушіння. Для визначення зміни маси під час сушіння на вагу встановлена штанга 2 із сіткою 1, на якій розташовують матеріал, що піддається термічній обробці. В матеріал встановлюється хромель-копелеві термоелектричні перетворювачі 4 (ДСТУ 2837 – 94 [148]) діаметром 0,2 мм, для знімання експериментальних даних зміни температури. Також у камері встановлені інфрачервоні випромінювачі 3.

Інфрачервоне або радіаційне сушіння – видалення рідини, найчастіше всього води з матеріалів при підводі до них теплоти ІЧ випромінюванням (ІЧВ). Пристрої з ІЧВ сушінням знайшли використання в різних галузях промисловості. Основним недоліком ІЧВ сушіння є нерівномірність випромінювання, яке надходить на нерівну поверхню дисперсних матеріалів при їх зневодненні через що відбувається їх локальний перегрів або недогрів. Найбільше ці недоліки проявляються при сушінні ІЧВ термолабільних матеріалів, температура яких не може перевищувати 50 °С. До них відносяться матеріали рослинного і тваринного походження, а також велика кількість полімерів. При цьому треба мати на увазі, що термічне руйнування, наприклад, матеріалів тваринного походження призводить не тільки до «обуглювання» продуктів сушіння, а й до теплового руйнування в продукті амінокислот, втрати вітамінів та інших біологічно активних компонентів сировини [96].

Теплове випромінювання, яке використовується в техніці, має довжину хвилі в інтервалі $\lambda = 0,8-800$ мкм. Передача необхідної для випарювання енергії від джерела випромінювання до молекул води в складі, матеріалу, що зневоднюється, відбувається збудженням теплових коливальних процесів резонансними частотами спектра випромінювання молекул води і молекул самого матеріалу. В загальному випадку для взаємодії теплового випромінювання з матеріалом, сушіння є актуальним в усьому інфрачервоному діапазоні довжини хвиль. Тому, при виборі джерела

випромінювання можливо розглядати його як абсолютно чорне або сіре тіло, яке має цілий спектр випромінювання з розподілом, яке описується законом Планка [11, 96].

$$e(\lambda nT) = 2\pi C_1(n) \left(\lambda^5 \left[e^{\frac{C_2(n)}{\lambda T}} - 1 \right] \right)^{-1} \quad (2.24)$$

де, $e(\lambda nT)$ – спектральна напівкуляста густина випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м³; λ – довжина хвилі, м; T – абсолютна температура, К; $C_1(n) = h C(n)^2$; $C_2(n) = \frac{hc(n)}{K}$; $C(n) = \frac{c_0}{n}$; $C_0 = 2.9979 \cdot 10^8$ – швидкість світла в вакуумі, м/с; n – коефіцієнт переломлення середовища; h – $6,6262 \cdot 10^{-34}$ – постійна Планка, Дж*с; $K = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ – постійна Больцмана.

Дослідженнями встановлено, що найбільш оптимальний при використанні в установках ІЧВ сушіння є лампові джерела випромінювання – лінійні газонаповнені лампи розжарювання з вольфрановою спіраллю. Такі лампи малоінерційні, що забезпечує високу керованість процесом теплового впливу на матеріал, а також в найбільшій мірі відповідають вимогам екологічної чистоти при переробці термолабільних матеріалів.



Рис. 2.13. Зовнішній вигляд сушильної камери із застосуванням інфрачервоних ламп з можливістю регулювання теплового потоку від 100 Вт/м² до 3800 Вт/м²

Тому при дослідженнях кінетики сушіння м'яса курятини був використаний ламповий ІЧВ нагрівач, а тривалість його дії керувалась значенням температури, матеріалу, що зневоднюється.

Сушильна камера має прозоре скло через яке можна спостерігати за станом матеріалу в процесі сушіння (рис. 2.13). Через скло видно зміни кольору матеріалу та усадки.

Всі ці зміни взаємопов'язані та впливають на механізм перенесення теплоти та вологи в матеріалі під час сушіння. Процес сушіння є нестационарним, він ускладнений випаровуванням вологи та переносом теплоти та описується за допомогою кривих сушіння кривими швидкості сушіння та температурними кривими [11].

Диференційний мікрокалориметр для визначення теплофізичних властивостей досліджуваної сировини ДМКИ-01

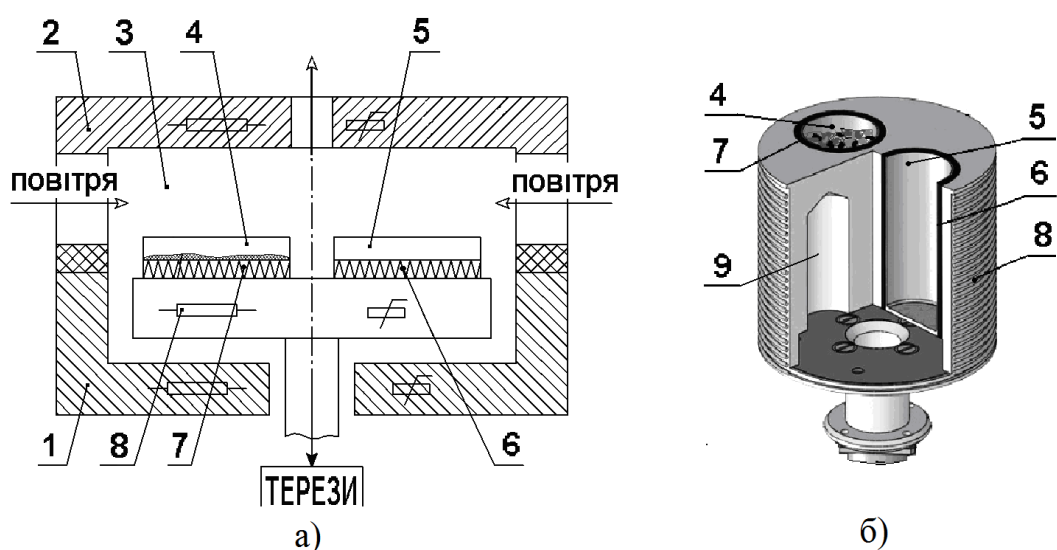


Рис. 2.14. Схема будови теплового блоку ДМКИ-01 з плоскими комірками (а) та калориметричної платформи з циліндричними комірками (б):
 1, 2 – верхній і нижній термостатовані блоки; 3 – робоча камера; 4 – комірка з пробєю тканин гриба; 5 – комірка з еталоном; 6, 7 – перетворювачі теплового потоку; 8 – корпус калориметричної платформи з основним електронагрівником; 9 – порожнина для полегшення платформи

Для визначення теплоємності та питомої теплоти випаровування культивованих грибів було застосовано диференціальний мікрокалориметр ДМКИ-01, розроблений в Інституті технічної теплофізики НАН України [149]. Прилад складається з теплового блоку (рис. 2.14.а), аналітичних терезів, компресора, блоку електронного керування і персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням.

Молоткова дробарка та установка для дослідження дисперсного складу

Для подрібнення сухого матеріалу використовували молоткову дробарку, в якій матеріал дробиться за рахунок удару молотків, які підвішені до ротора, що обертається у робочому просторі дробарки, обмеженому футерованим броньовими плитами корпусом. Додаткове (вторинне) дроблення матеріалу здійснюється при ударі грудки об броньові плити корпусу дробарки. Дроблення матеріалу відбувається доти його зерна не зможуть пройти крізь щілини колосникової решітки [150].

На рис. 2.16 зображено зовнішній вигляд установки для дослідження дисперсного складу досліджуваної сировини. До складу установки входить набір сит із різним розміром від 1,0 мм до 0,16 мм.



Рис. 2.15. Зовнішній вигляд молоткової дробарки



Рис. 2.16. Установка для дослідження дисперсного складу рослинної сировини

Прилад диференціальної сканувальної калориметрії для визначення стану води в рослинних тканинах

Для визначення фракційного стану води в рослинних тканинах було використано калориметричний комплекс (рис. 2.17) на базі диференціального сканувального мікрокалориметра ДСМ-2М (1) [145], який було додатково обладнано системами вентиляції та охолодження теплового блоку і автоматизованою системою збору та обробки інформації. В основу схеми теплових вимірювань калориметра покладено принцип автоматичної компенсації різниці температур між вимірювальною (робочою) і порівняльною (еталонною) комірками теплового блоку калориметра. Термін «сканувальна» визначає такий режим роботи калориметра, при якому температура калориметричної системи змінюється в часі.

Тепловий блок калориметра (2) (рис. 2.17) має дві калориметричні комірки та термостат у вигляді сосуду Д'юара. Робоча й еталонна комірки споряджені індивідуальними нагрівачами, що дозволяє здійснити принцип «збалансованого нуля». Контейнер зі зразком в робочій комірці і порожній контейнер в комірці порівняння нагріваються з однаковою швидкістю (швидкістю сканування), а автономні нагрівачі через систему автоматичного регулювання, розміщену в електронному блоці (3), вирівнюють їх температури. Диференціальний сигнал від автономних нагрівачів є пропорційним різниці між поданими на них потужностями, тобто різниці між тепловими потоками в калориметричних комірках. При розміщенні в робочу комірку досліджуваної речовини він є пропорційним теплоті, що виділяється або поглинається при її нагріванні або охолодженні [145].

Електронний блок (3) містить в собі блоки живлення, завдання температурних режимів та регуляторів. Його призначенням є задавання та підтримка теплового і швидкісного режимів експерименту, та отримання диференціального сигналу щодо змін напруги, яка подається на нагрівачі калориметричних комірок теплового блоку, на протязі експерименту [145].

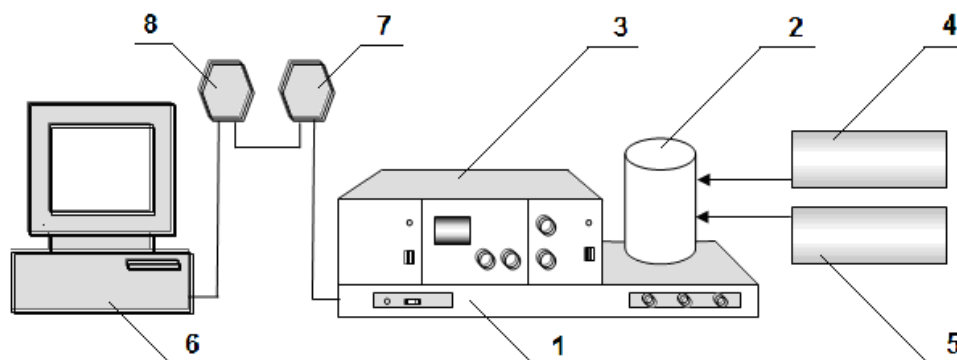


Рис. 2.17. Схема калориметричного комплексу на базі диференціального сканувального мікрокалориметра ДСМ-2М:

1 – ДСМ-2М; 2 – тепловий блок; 3 – електронний блок; 4 – система вентиляції; 5 – система охолодження; 6 – персональний комп'ютер з програмним забезпеченням; 7 – аналого-цифровий перетворювач; 8 – конвертер протоколів

Система вентиляції теплового блоку (4) складається з балону з газоподібним гелієм та двох адсорберів, заповнених силікагелем, призначених для додаткового зневоднення гелію. Вентиляція теплового блоку підсушеним гелієм в процесі експерименту дозволяє запобігти конденсації вологи в калориметричних комірках та уникнути реєстрації артефактів при роботі в низькотемпературному діапазоні [145].

Охолодити завантажені в прилад контейнери до температури початку експерименту, яка в досліджах значно нижча від кімнатної, покликана система охолодження теплового блоку (5). В якості холодоагенту, який подається в термостат теплового блоку (2), використовують або спирт з температурою 268К, який охолоджують в кріостаті МК-70, або рідкий азот.

Аналого-цифровий перетворювач типу *i-7018* (7) та конвертер протоколів типу *i-7520* (8) забезпечують перетворення вихідного аналогового сигналу з електронного блоку (3) в цифрову форму і передачу цифрових даних до персонального комп'ютера (6).

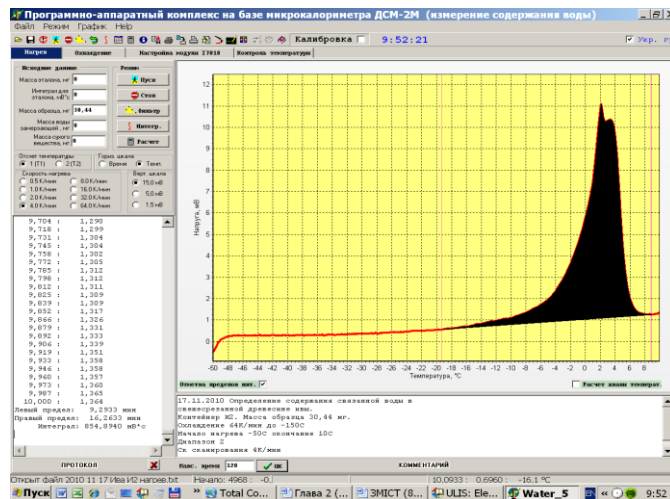


Рис. 2.18. Вигляд вікна керування системою збору та обробки інформації програми «Water-5» при визначенні стану води в рослинних матеріалах



Рис. 2.19. Прилад Aqualab3TE (Rotronic, Швейцарія)

Накопичення й обробка результатів досліджень стану води в рослинних матеріалах здійснювалась за допомогою спеціально розробленої прикладної комп'ютерної програми «Water-5» (рис. 2.18), яка написана мовою Delphi [145].

Вимірювання термодинамічних показників усіх зразків здійснювали на приладі Aqualab3TE (Rotronic, Швейцарія) за температури 18-20 °C з точністю вимірювання 1,5 %, 0,3 °C, 0,003 од. a_w +1.5% від значення (рис. 2.19).

2.5. Похибка обробки результатів експериментів

Після проведення дослідів проводили статистичну обробку результатів вимірювань за відомою методикою [151, 152].

За результатами дослідів визначили:

а) середнє арифметичне значення отриманих даних:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (2.25)$$

де y_i – результат i – го дослідів;

n – кількість дослідів.

б) середню квадратичну похибку по виборці:

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (2.26)$$

в) стандартне відхилення закону розподілу:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}}, \quad (2.27)$$

г) середню арифметичну похибку середнього арифметичного:

$$\sigma = \frac{S_c}{\sqrt{n}}, \quad (2.25)$$

в) коефіцієнт варіації:

$$V_m = \frac{S_c}{\bar{y}} \cdot 100\%, \quad (2.28)$$

д) похибка дослідів:

$$v = \pm \frac{S_c}{(\bar{y}\sqrt{n})} \cdot 100\%, \quad (2.29)$$

Для перевірки того, що розсіювання експериментальних даних носить випадковий характер, визначаємо коефіцієнти асиметрії g і ексцесу E за формулами:

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^3}{\left[\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \cdot \sqrt{n}, \quad (2.30)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^4}{\left[\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2 \right]^2} \cdot n - 3, \quad (2.31)$$

Розсіювання вважаємо випадковим, якщо воно значно перевищує величину σ_g і σ_E , які визначаються виразами:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{6 \cdot (n-1)}{(n-1) \cdot (n+3)}}, \quad (2.32)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{24 \cdot n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n-1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)}}, \quad (2.33)$$

Якщо $g > 3 \cdot \sigma_g$ і $E > 3 \cdot \sigma_E$ тоді проводяться додаткові вимірювання.

Результати досліджень були середніми не менше, ніж трьох повторень. Закономірності підтверджувались в кожному паралельному дослідженні. Експериментальні дані оброблялись за Фішером – Стьюдентом на рівні 0,95.

Висновки до другого розділу

1. У розділі обґрунтовано вибір сировини для подальшого дослідження.
2. Викладено підібрані та використані методики для проведення і обробки результатів експериментальних досліджень.
3. Наведено опис приладів та установок, за допомогою яких були проведені експериментальні теплофізичні, фізико-хімічні дослідження харчових продуктів з підвищеним вмістом білку та викладено методи проведення і обробки результатів експериментальних досліджень.
4. В дослідженнях використовували стандартні прилади і методи, а саме: експериментальний стенд для дослідження процесів конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів - для визначення кінетики

сушіння досліджуваної сировини; диференційний мікрокалориметр для визначення теплофізичних характеристик ДМКИ-01, прилад Aqualab3TE – для визначення показнику активності води білкововмісної сировини рослинного та тваринного походження, молоткова дробарка та установка для дослідження дисперсного складу, прилад диференціальної сканувальної калориметрії для визначення стану води в рослинних тканинах; методика досліджень та розрахунку теплоти випаровування та теплоємності, методика досліджень кінетики зневоднення, методика визначення коефіцієнту регідратації та активності води в сухій сировині ваговим методом Б.В. Зозулевича, методика визначення дисперсності.

5. Аналіз похибок експериментальних вимірювань підтвердив точність отриманих результатів.

Основні результати досліджень опубліковані в працях [144].

РОЗДІЛ 3.

ТЕПЛОМАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ ПРИ СУШІННІ БІЛКОВОВМІСНОЇ СИРОВИНИ

Дефіцит білку для українського населення становить більш, ніж 20 % [153]. При дефіциті білку в раціоні харчування можуть виникати різні захворювання, а також скорочується ймовірна тривалість життя.

До сировини, яка містить велику кількість білку відносять продукти тваринного (м'ясо, риба, яйця, молочні продукти) та рослинного (горіхи, насіння, бобові, сочевиця, соя, суха спіруліна) походження. Найвищий відсоток має соя до 43 г/100 г, м'ясна сировина 31г/100 г, гарбузове насіння 30 г/100 г, сочевиця 27 г/100 г, суха спіруліна до 50 г/100 г [145, 155].

У попередніх роботах Інституту технічної теплофізики НАН України було розроблено технології переробки фітоестрогенної сировини на основі сої, а також переробка бобових та створення функціональних композицій на основі гороху та квасолі [20, 155, 156, 157].

Дефіцит рослинного білку у харчових продуктах можна усунути, збільшивши виробництво зернобобових культур та багаторічних бобових трав. Вихід білку із соєвого насіння, що вирощене на 1 га поля за однакового врожаю (20 ц/га), у 2,5 рази вищий, ніж із соняшникового насіння і в 2 рази, ніж з горохового насіння (рис. 3.1) [101, 158].

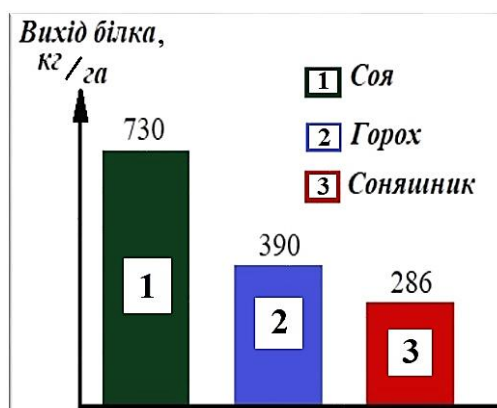


Рис. 3.1. Вихід білка, кг/га

Наукові дослідження за останні 20 років показали, що продукти на основі сої мають властивість зміцнювати здоров'я [158]. Прогнозується, що на

найближчий період часу найважливішим фактором харчування людей по всьому світі може стати соя [159]. Білкововмісні продукти на базі сої – ідеальне джерело важливих для організму амінокислот, що доповнюють білки зернових, а також можуть повністю замінити тваринний білок [159].

При дослідженні білкововмісної сировини на основі квасолі та гороху було розроблено попередню підготовку білково-каротиновмісної сировини на основі моркви та бобових до зневоднення та її вплив на фізико-хімічні властивості досліджуваних матеріалів. За рахунок цього були розроблені композиції поєднання білкововмісної та каротиновмісної сировини, внаслідок чого за рахунок білків та жирів відбувається стабілізація каротиноїдів в процесі сушіння. Розробка композиції за рахунок поєднання моркви із білкововмісною сировиною (квасоля, горох), дає можливість зберегти каротиноїди на 95,6 % та зменшити зміну кислотного числа білкововмісної складової. Проведений різнофакторний експеримент засвідчив, що найкращі якісні показники сушіння білково-каротиновмісної композиції отримані при таких режимах: температура 70°C, швидкість 3,5 м/с та товщина шару матеріалу 10 мм [157].

3.1. Підготовка білкововмісної сировини тваринного походження свинини та яловичини до зневоднення

Популярність м'яса зростає в усьому світі протягом останніх кількох десятиліть [160]. Основними причинами, що пояснюють зростання привабливості м'ясної сировини для споживачів, є конкурентні ціни, висока харчова якість та відсутність релігійних та культурних перешкод. Тим не менш, м'ясо класифікується як швидкопсувний продукт, що є ідеальним середовищем для росту мікробів, а його псування створює економічні проблеми та загрозу здоров'ю як для виробників, так і для споживачів. Варто зазначити, що м'ясо не тільки надзвичайно схильне до псування, але й часто бере участь у поширенні харчових захворювань, оскільки воно здатне містити величезну кількість патогенних бактерій, особливо коли споживач поводить з таким м'ясом неконтрольованим чином [160].

Гігієнічне втручання під час підготовки та обробки м'яса саме по собі не може забезпечити безпечний харчовий продукт через постійний потік бактерій, які потрапляють на переробний завод, та неминуче перехресне забруднення, що ускладнює їх видалення з такого м'яса.

У зв'язку з цим існує багато способів деконтамінації курячих туш або їх розрізаних частин, таких як фізичні методи (вода, ультрафіолетове світло, опромінення надвисокий тиск тощо), хімічні методи (хлор, органічні кислоти, неорганічний фосфат тощо) та їх комбінація. На жаль, не всі методи деконтамінації застосовуються, оскільки фізична або хімічна обробка курячих туш заборонена в Європі, згідно з деякими правилами ЄС, проте вона схвалена в США [160].

Сире м'ясо не є безпечним продуктом та може бути інфіковане шкідливими бактеріями, такими як сальмонела, лістерія та кишкова паличка, на ін., що може призвести до харчових отруєнь. Мікробна активність зменшується при тривалій термічній обробці за 100°C (10-30 хв) або при досягненні внутрішньої температури м'яса 71 °C для всіх видів м'яса. Також ефективним є заморожування, але для цього потрібно дотримуватися стабільної температури нижче – 18 °C протягом мінімум 7 днів.



Рис. 3.2. Зворотня етикетка сухих курячих слайсів ТМ «Рябчик»

Багатьма виробниками сушених м'ясних снєків на упаковці вказується температура сушіння від 45 до 80 °С (рис. 3.2). Однак, така температура не завжди є ефективною для забезпечення безпечності харчового продукту.



Рис. 3.3. Попередня підготовка м'ясної сировини (курятини) до сушіння [11]

Отже, на властивості отриманої продукції впливає попередня підготовка сировини (нарізання, теплова обробка). Теплова обробка м'яса доводить продукт до споживчої якості, зменшує мікробне та гельмінтне забруднення.

Враховуючи вищезазначені фактори, нами було розроблено поперепо підготовку м'ясної сировини до сушіння. М'ясо грудки курятини досліджували науковці ІТТФ НАН України Ю.Ф. Снежкін та П.І. Петров (рис. 3.3).

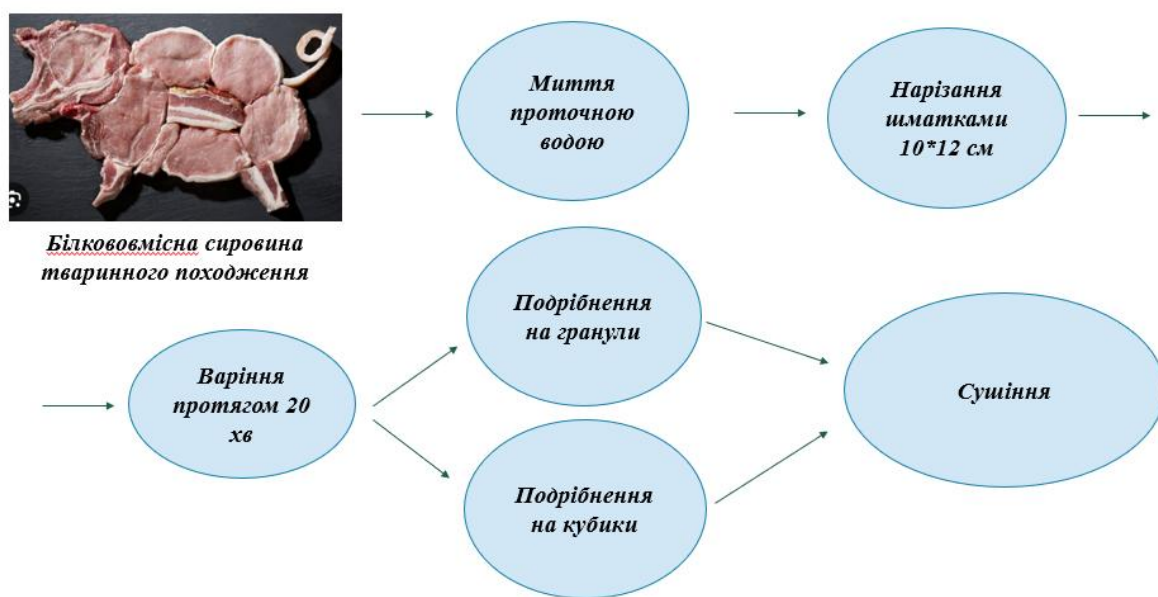


Рис. 3.4. Попередня підготовка м'ясної сировини (свинина, яловичина) до сушіння

В даній науковій роботі досліджено білкововмісну сировину тваринного походження на прикладі свинини та яловичини. М'ясо свинини, яловичини (рис. 3.4.) промивали під проточною водою, нарізали на шматочки 10x12 см та варили протягом 20 хв з моменту закипання.

Після цього нарізали м'ясо на кубики формою 5x5x5 мм, а для отримання гранул використовували мясорубку з діаметром сітки 5 мм, на якій перекручували відварене м'ясо, в результаті чого були отримані гранули діаметром 5 мм. Сировина у вигляді гранул чи кубиків далі подавалась на сушіння [161].

3.2. Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини тваринного походження на конвективному сушильному стенді

Термін «дегідратація білків» передбачає процес зневоднення, який є важливим фактором при розробці теплотехнологій із забезпеченням високих показників органолептичності сушених продуктів та активність білкових речовин [162, 163].

Дегідратація може бути оборотна та необоротна. Необоротна дегідратація відбувається з денатурацією білків.

Дегідратація білкових продуктів може застосовуватись ціленаправлено, враховуючи технологічний процес або може бути результатом впливу різних небажаних факторів, наслідком яких є втрати функціональних властивостей білками, наприклад, розчинності чи водоутримуючої здатності.

Основними причинами дегідратації, а отже і денатурації, є дія теплової енергії, хімічних речовин, інтенсивний механічний вплив, плин часу, опромінення або їх комплексна дія. В реальних технологічних процесах, ймовірно, неможливо точно встановити причинно-наслідкові зв'язки таких факторів як денатурація, дегідратація та зміна агрегатного стану білків, оскільки ці процеси йдуть одночасно та характеризують технологічний процес з різних сторін [164].

Однією з причин дегідратації є денатурація білків, в результаті чого змінюється як їх агрегатний стан, так і відношення до води. Тому одним із

основних ознак дегідратації є переходи колоїдного стану білкових речовин: золь-гель, гель (1-го роду) – гель (2-го роду), розчин-флокулят [164, 165].

Причиною дегідратації можуть бути також денатураційні зміни білку під дією теплової енергії. Більшість технологічних процесів побудовані на ефекті теплової денатурації білкових речовин та, як наслідок, необоротній дегідратації білків. Одночасні процеси денатурації, коагуляції та агрегації призводять до дегідратації білкових систем [164, 165].

Під денатурацією розуміють втрату білками їх природних (фізико-хімічних, біологічних) властивостей в результаті зміни їх унікальної структури під впливом різних факторів. Деякі технологічні фактори – висока чи низька температура, різні опромінення, значні зміни рН, іонна сила, зміна колоїдної рівноваги, інтенсивна механічна дія та інші поверхневі ефекти, ферментація, протеоліз, хімічні речовини та модифікація, вплив часу – викликають денатурацію білків. При цьому порушуються найбільш чуттєві четвертинна, третинна і вторинна структури білків. Первинна, як правило, не порушується. Але під впливом хімічних факторів можливе порушення і на рівні первинної структури [164, 165].

Потрібно одночасно оцінювати фізіологічну роль денатурації. Втрата білком в процесі денатурації своєї біохімічної індивідуальності в цілому полегшує переварювання готових продуктів. Тому засвоєння денатурованих білків, як правило, відбувається більш ефективно, ніж нативних. Це також стосується інактивації білків-інгібіторів, наприклад, в насінні олійних культур. Ці білки виконують в рослинах захисну функцію, але в значній мірі впливають на травлення людини, суттєво зменшуючи функцію трипсину і хімотрипсину. Денатурація, як технологічний фактор, значно знижує вплив цих білків. Але відомо, що засвоєння залежить від ступеня денатурації. Так, білково-вуглеводні комплекси утворюються при реакції меланоїдиноутворення у відношенні білка оцінюються як денатурація, засвоюються гірше рецептурних компонентів, а продукти більш глибоких

стадій меланоїдиноутворення здатні в певній мірі негативно впливати на травлення [164, 165].

Отже, дослідження сушіння конвективним способом білкововмісної сировини, враховуючи вище описані властивості, дозволить отримати якісну продукцію при зменшенні енерговитрат на процес.

Одним із основних параметрів зневоднення є температура теплоносія, яка сприяє формуванню відповідних функціонально-технологічних властивостей сушеного продукту.

Дані для побудови кривих сушіння були отримані на експериментальному стенді з автоматичним збором та обробкою інформації [11]. При цьому автоматично фіксувалась маса зразка та зміни його температури в процесі сушіння. Зневоднення відбувається нагрітим повітрям при постійному режимі, тобто при постійній температурі повітря t_c , його відносній волозі φ та швидкості руху теплоносія V . Для інтенсифікації процесу сушіння було використано стенд із встановленим в сушильну камеру блоком інфрачервоних ламп з можливістю регулювання теплового потоку від 100 Вт/м² до 3800 Вт/м². Зміна потужності ламп відбувається регулятором реостатного типу, як було описано у другому розділі.

На функціональні властивості отриманої продукції впливає попередня підготовка сировини (нарізання, тепла обробка), яка була описана в підрозділі 3.1. «Підготовка білкововмісної сировини тваринного походження свинини та яловичини до зневоднення».

Після розробленої попередньої підготовки білкововмісної сировини тваринного походження, у технології отримання якісного продукту настає період зневоднення.

Як було сказано раніше, традиційні існуючі методи переробки м'яса не підходять для отримання сухих функціональних продуктів, тому основна задача нашої підготовки до сушіння є зневоднення у такій формі та вигляді матеріалу, щоб прискорити процес сушіння та підвищити відновлюваність

матеріалу в продуктах швидкого приготування. М'ясну сировину досліджували у вигляді кубиків та гранул [163].

Криві сушіння характеризують зміну середньої (інтегральної) вологи матеріалу W в часі t і мають характерний для колоїдних капілярно-пористих матеріалів вигляд.

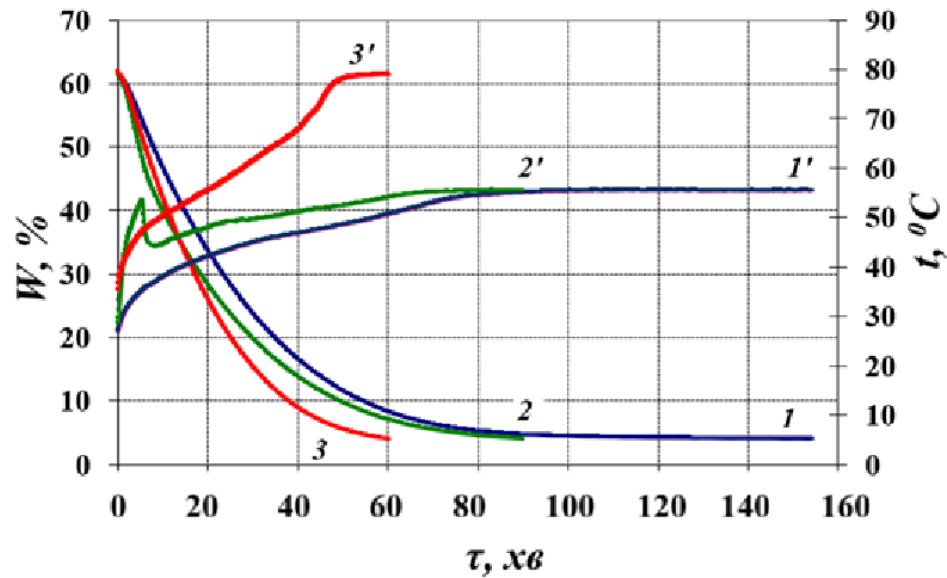


Рис. 3.5. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння м'яса свинини (гранули $d=5$ мм, маса 0,5 г) $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:
1,1' - 55°C; 2,2' – 3800 Вт/м² + 55°C; 3,3' – 80°C

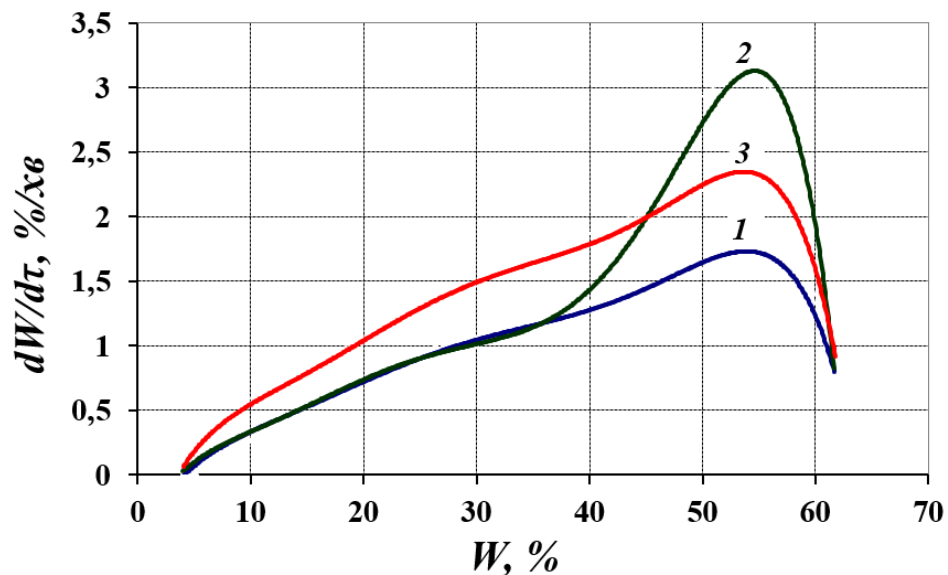


Рис. 3.6. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння м'яса свинини (гранули $d=5$ мм, маса 0,5 г) $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:
1 – 55 °C; 2 - 3800 Вт/м² + 55 °C; 3 – 80 °C

Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння м'яса свинини у вигляді гранул представлено на рис. 3.5 та 3.6. при конвективному сушінні 55°C, 80 °C та комбінованому інфрачервоно-конвективному 3800 Вт/м²+55°C. З рис видно, що тривалість при комбінованому режимі для гранул у 1,7 р є меншою у порівнянні із режимом 55°C. Інтенсивність підтверджена і графіками по швидкості. Найнижча швидкість є для зразків за режиму 55°C, яка становить 1,7 %/хв, а найвища - для комбінованого є 3,15 %/хв, тобто швидше у 1,85 р.

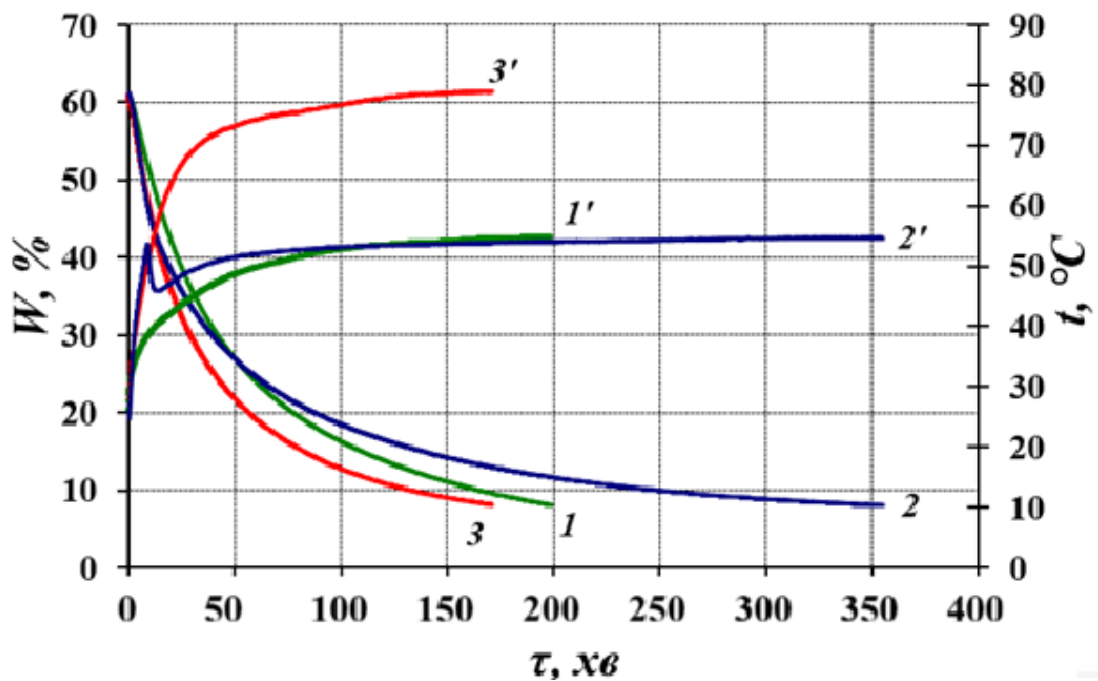


Рис. 3.7. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння м'яса свинини (кубики 5x5x5 мм, маса 0,5 г) $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:
1,1' - 55°C; 2,2' – 3800 Вт/м² + 55 °C; 3,3' – 80 °C

На рис. 3.7 та 3.8 показані криві сушіння м'яса свинини у вигляді кубиків. При цьому спостерігаємо, що при сушінні кубиків за режиму 55 °C тривалість становить 200 хв, а за комбінованого режиму – 355 хв, тобто довше у 1,8 рази. Ймовірно, це відбувається тому, що при утворенні гранул була порушена структура білків м'яса, в той час як у кубиках цільного м'яса вона не порушувалась і тому випаровування вологи з гранул відбувається краще, а від цього і інтенсивність процесу зневоднення вища [11].

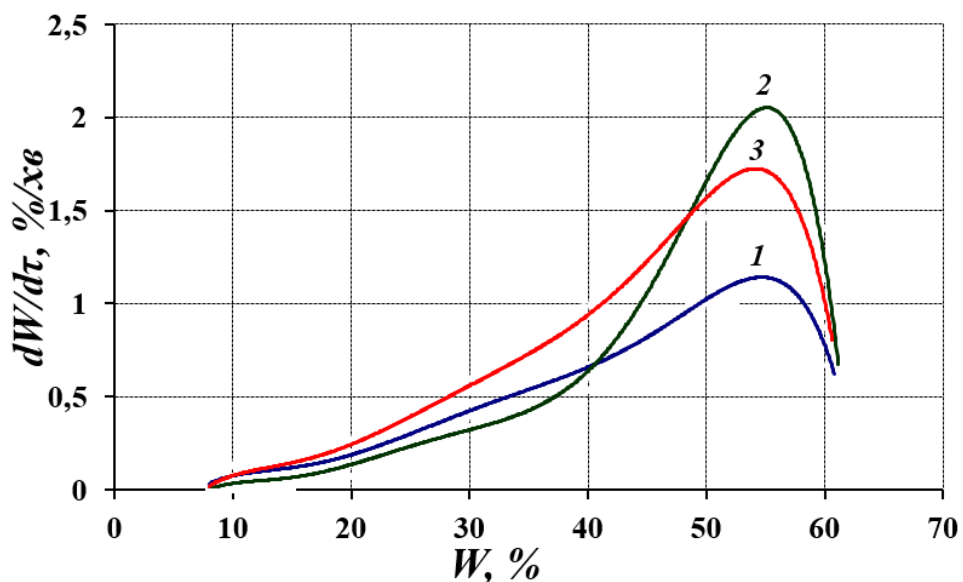


Рис. 3.8. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння м'яса свинини (кубики кубики 5x5x5 мм, маса 0,5 г)

$v = 3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$

1 – 55 °C; 2 - 3800 Вт/м² + 55 °C; 3 – 80 °C



Рис. 3.9. Фото кубики м'яса свинини після сушіння



Рис. 3.10. Фото гранули м'яса свинини після сушіння

Як видно, при зневодненні зразків у вигляді гранул тривалість зневоднення становить 90 хв, а для зразків у вигляді кубиків – 355 хв. Тобто, тривалість гранул є у 3,9 р. швидше, ніж кубиків. На рис. 3.9 та 3.10 зображено зовнішній вигляд сушеного мяса у вигляді гранул та кубиків.

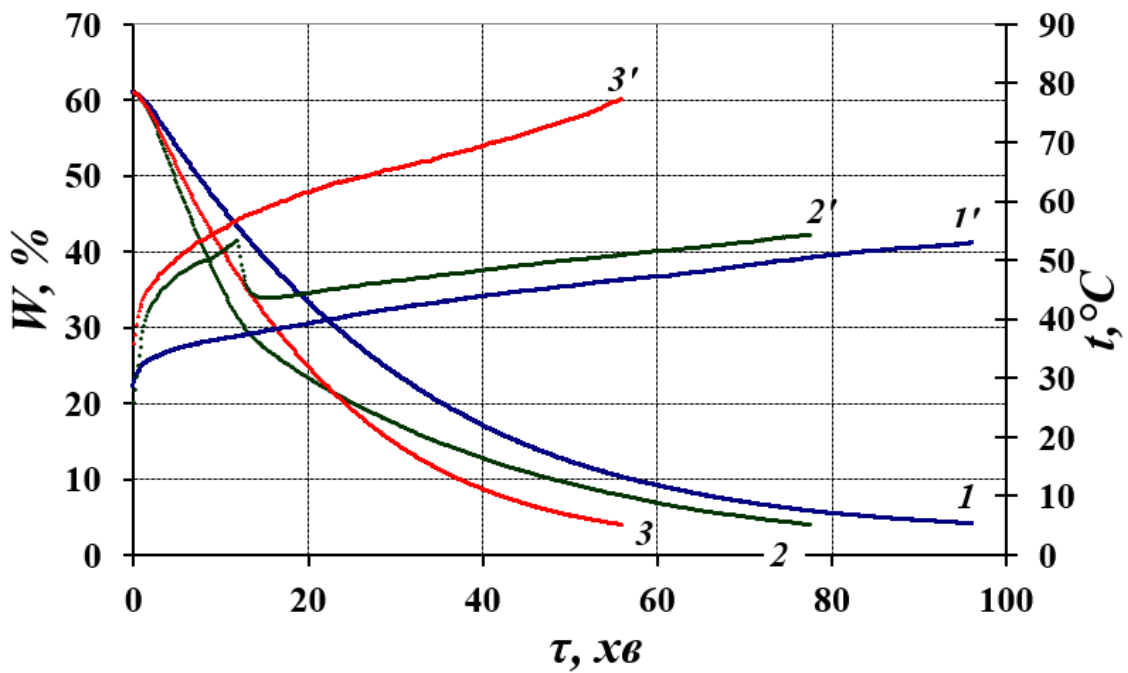


Рис. 3.11. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння м'яса яловичини (гранули) $d=5$ мм, маса 0,5 г, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:
 1,1' - 55°C; 2,2' – 3800 Вт/м²+ 55 °C; 3,3' – 80 °C

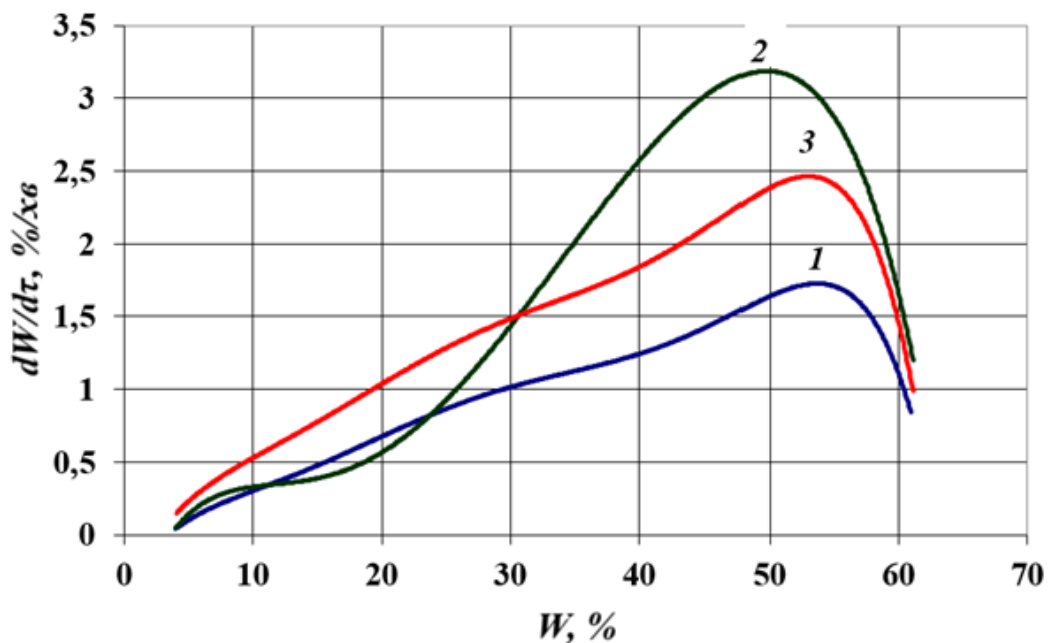


Рис. 3.12. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння м'яса свинини (гранули) $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:
 1 – 55 °C; 2 - 3800 Вт/м²+55 °C; 3 – 80 °C



Рис. 3.13. Фото гранули м'яса яловичини після сушіння

Дослідження кінетики зневоднення м'яса яловичини проводили лише для гранул, оскільки сушити м'ясну сировину у вигляді кубиків енергетично недоцільно, як показали результати досліджень м'яса свинини.

На рис. 3.11 та 3.12 показано криві сушіння м'яса яловичини. Як видно з рисунків, тривалість сушіння при розробленому інфрачервоно-конвективному режимі є меншою в 1,25 р. у порівнянні із режимом 55 °С.

3.3. Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини рослинного походження з культивованих грибів ерінги, шіїтаке, глива звичайна, печериця звичайна на конвективному сушильному стенді

Отримані ефективні режими для сушіння м'яса, використовували і при дослідженні кінетики сушіння культивованих грибів, досліджуючи та змінюючи лише форму зразка.

Як було зазначено у першому розділі, одним із способів продовжити термін придатності культивованих грибів є термічна дегідратація (сушіння), яка запобігає більшій частині псування, наприклад ферментативному потемнінню, росту мікробів тощо, шляхом зменшення активності води. Це значно збільшує термін придатності грибів після сушіння, які потім можна безпечно зберігати в належних умовах.

На основі аналізу літературного огляду робіт, які присвячені проблемам сушіння культивованих грибів, обґрунтовано висновок про необхідність інтенсифікації процесу сушіння із збереженням високої якості кінцевої продукції за допомогою використання комбінованого енергопідведення. Основними методами, згідно літературних джерел, сушіння культивованих грибів сьогодні є конвективне, терморадіаційне, мікрохвильове, вакуумне,

ліофільне тощо. Недоліком основних розглянутих методів є висока вартість. Ефективним є напрямком комбінованого сушіння – поєднання декількох методів.

Для досліджень було обрано найменш енерговитратні способи: традиційне конвективне сушіння, сушіння інфрачервоним випромінюванням та поєднання цих двох методів з метою досягнення зменшення тривалості процесу з одночасним збереженням біологічно активних речовин.

Характер процесу сушіння найбільш повно описується кривими сушіння (в координатах вологість матеріалу – час), кривими швидкості сушіння (в координатах швидкість сушіння – вологість матеріалу) та температурними кривими (в координатах температура матеріалу – вологість). Криві сушіння характеризують зміну середньої (інтегральної) вологості матеріалу W_c в часі τ [20].

Дослідження кінетики сушіння культивованих грибів проводились на удосконаленому експериментальному стенді, який складається з таких основних частин: сушильної камери, системи нагрівання та подачі вентилятором теплоносія в камеру сушіння, ізольованих повітропроводів, вагів, регуляторів швидкості та термометрів опору [11, 20].

Дільниця теплової підготовки повітря виконана у вигляді прямокутного короба, в якому розміщений трьохсекційний електронагрівач потужністю 4,5 кВт, який дозволяє підтримувати та регулювати температуру повітря в широких діапазонах. Для точної підтримки заданої температури встановлений терморегулятор Овен ТРМ 101 з точністю спрацювання сигнальних контактів $\pm 0,5$ °С та термометрів опору ТСМ-50 [11, 20].

Зміна в широкому діапазоні швидкості руху теплоносія та його температури досягається регулюванням роботи вентилятора на щиті керування регулятором швидкості. Швидкість руху теплоносія змінюються шляхом зміни подачі повітря відцентровим вентилятором за допомогою частотного перетворювача при регулюванні вручну.

Співвідношення між відпрацьованим та свіжим повітрям можна регулювати за допомогою шиберів на патрубках [20].

Нарізані культивовані гриби накладаються в сітчасту корзину, яка встановлюється на ваги в сушильній камері. Камера має прозоре скло, через яке можна спостерігати за станом матеріалу в процесі сушіння. Зокрема, можна відмітити момент зміни кольору зразка від впливу режимів теплоносія, процес усадки і змінити режим за необхідності.

В камері встановлений блок інфрачервоних ламп з можливістю регулювання теплового потоку від 0 до 3800 Вт/м². Зміна потужності ламп відбувається регулятором реостатного типу [96].

В роботах [13, 15, 18, 24, 28, 43, 57] висвітлені експериментальні дослідження із визначення впливу зміни швидкості теплоносія, товщини шару на процес сушіння білкововмісної сировини. Тому в представлених дослідженнях ці показники стали.

Варто зазначити, що чим більша швидкість теплоносія, тим менша тривалість процесу. Відповідно, чим менша товщина досліджуваного зразка, тим тривалість менша.

Досліджували вплив температури теплоносія на тривалість процесу при конвективному сушінні грибів ерінги при 60°C, 70°C, 100 °C (рис. 3.17). Як видно, з рисунку, чим вища температура теплоносія, тим менша тривалість зневоднення та більша швидкість сушіння (рис. 3.14 – 3.15).

Тривалість процесу при 100 °C становить 75 хв та відбувається у 3,2 р швидше у порівнянні з режимом 60 °C. Однак, використання теплоносія з високою температурою з метою інтенсифікації процесу обмежується якісними показниками матеріалу.

Тому в подальших дослідженнях використовували температуру теплоносія, яка не перевищує критичну для білкововмісних матеріалів.

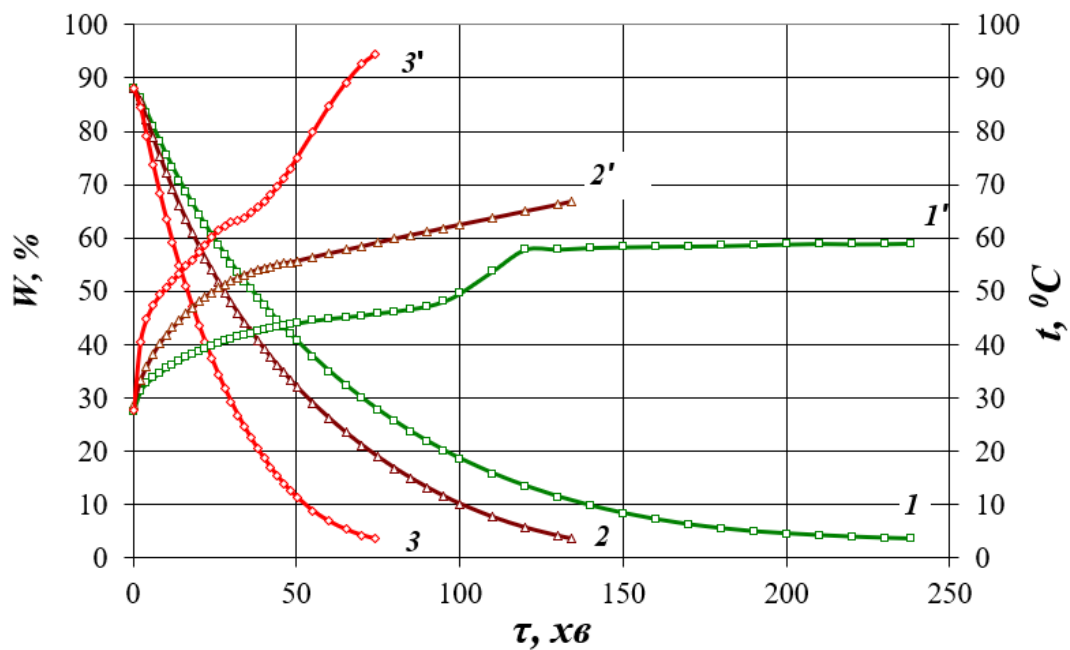


Рис. 3.14. Вплив температури на тривалість процесу при конвективному сушінні грибів Ерінги 20x10x10 мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:

1 – 60°C; 2 - 70°C; 3 –100°C

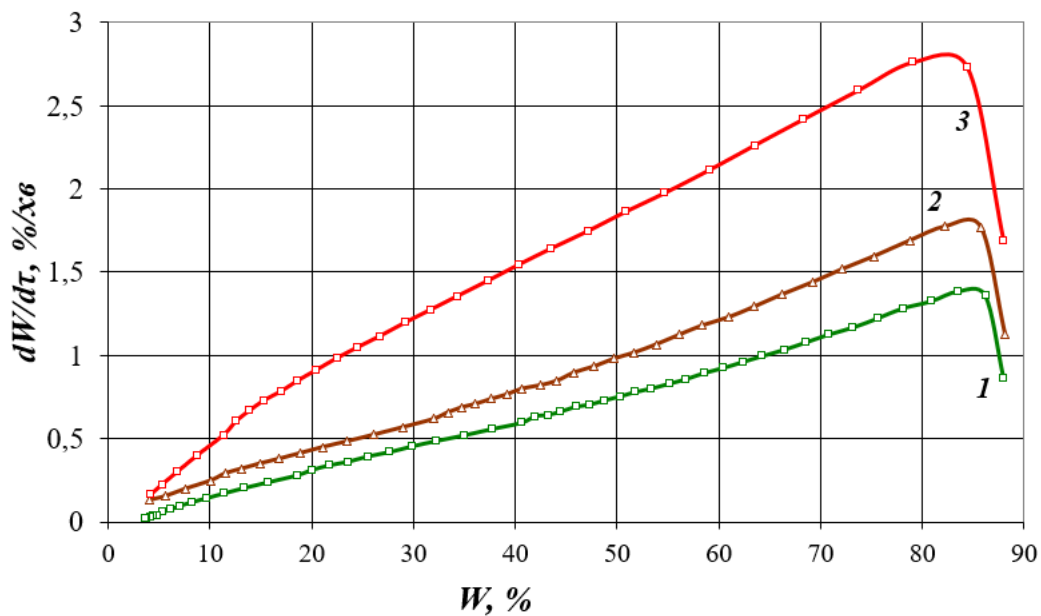


Рис. 3.15. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння при конвективному сушінні грибів ерінги 20x10x10 мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:

1 – 60°C; 2 - 70°C; 3 –100°C

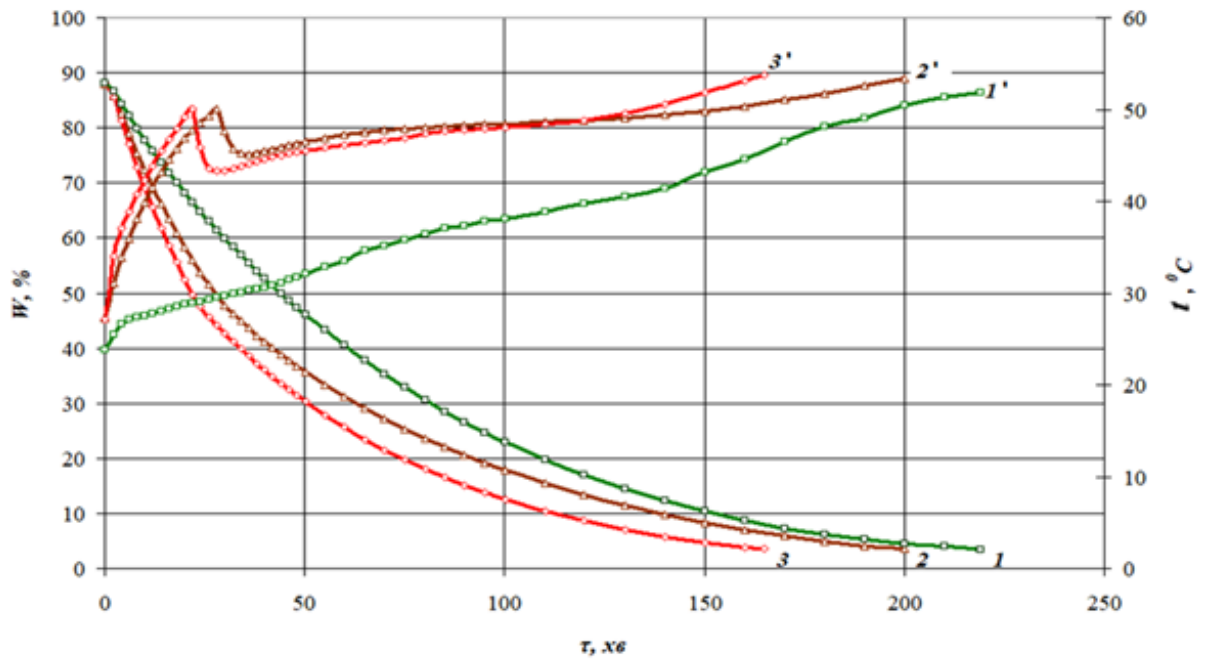


Рис. 3.16. Вплив інфрачервоного випромінювання (ІЧВ) на кінетику процесу сушіння грибів ерінги 20x10x10 мм, $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:
 1 – інфрачервоне 3800 Вт/м²; 2 - комбіноване 3000 Вт/м²+60°C;
 3 – комбіноване 3800 Вт/м²+60°C

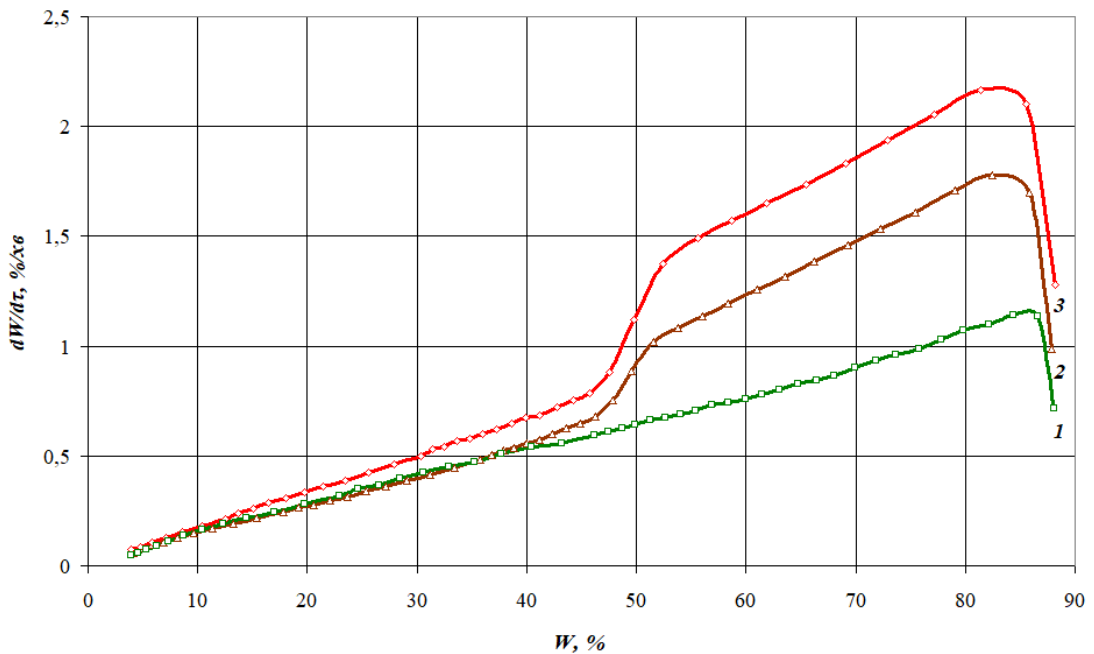


Рис. 3.17. Вплив інфрачервоного випромінювання на швидкість сушіння грибів Ерінги $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:
 1 – інфрачервоне 3800 Вт/м²; 2 - комбіноване 3000 Вт/м²+60°C;
 3 – комбіноване 3800 Вт/м²+60°C

На рисунках 3.16 та 3.17 представлено вплив потужності інфрачервоного випромінювання на швидкість сушіння грибів Ерінги. Як видно з рисунків, при зневодненні культивованих грибів ерінги за комбінованого інфрачервоно-конвективного способу з потужністю ІЧВ 3000 Вт/м^2 (рис. 3.16, крива 2, 2') тривалість є в 1.25 р довша, у порівнянні з режимом з потужністю 3800 Вт/м^2 (рис. 3.16, крива 3,3'). Відповідно, швидкість сушіння збільшується із збільшенням потужності лампи (рис. 3.17). В наступних дослідженнях використовували потужність лампи 3800 Вт/м^2 , оскільки якісні показники при цьому були в нормі.

Було визначено оптимальні режими для зменшення тривалості процесу. Такими режимами виявились конвективний двоступеневий та комбінований.

Комбінований режим – це коли на початку процесу до зразку подається теплота від двох енергоносіїв (в даному випадку інфрачервоне випромінювання (ІЧВ) та конвективне).

На рис. 3.18. представлені криві конвективного сушіння (крива 1,1') із температурою теплоносія 60°C , інфрачервоне сушіння з потужністю лампи 3800 Вт/м^2 на конвективному сушильному стенді - далі ІЧВ (крива 2,2') із температурою навколишнього середовища 20°C та комбінований спосіб сушіння $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$ (крива 3,3') [166, 167, 168].

На початковій стадії прогріву температура поверхні матеріалу підвищується, швидко досягаючи температури мокрого термометра, тому перший період практично не прослідковується. В цей період відбувається найбільш інтенсивна вологовіддача і вся теплота, яка передається матеріалу, витрачається на випаровування вологи; в цей час матеріал не нагрівається і температура його рівна температурі рідини, що випаровується.

Як видно з рис. 3.18, тривалість сушіння культивованих грибів ерінги при конвективному способі становить 240 хв (крива 1,1'), а при ІЧВ – 225 хв (крива 2,2'). При комбінованому способі процес сушіння починається із одночасної подачі теплоти від двох енергоносіїв, а саме інфрачервоне випромінювання 3800 Вт/м^2 та конвективне 60°C . Як видно з кривих 3,3' (рис. 3.18), на початку

процесу спостерігається стрімке нагрівання матеріалу до 50 °С за 20 хв. З метою запобігання перегріву матеріалу та збереження біологічно активних речовин, в даній точці вимикали один із теплоносіїв (ІЧВ 3800 Вт/м²). Спостерігаємо різке зниження температури матеріалу до 43 °С із подальшим поступовим нагрівом не вище 55 °С. При комбінованому способі тривалість становить лише 160 хв, при чому процес інтенсифікується в 1,5 р. у порівнянні із конвективним режимом 60 °С.

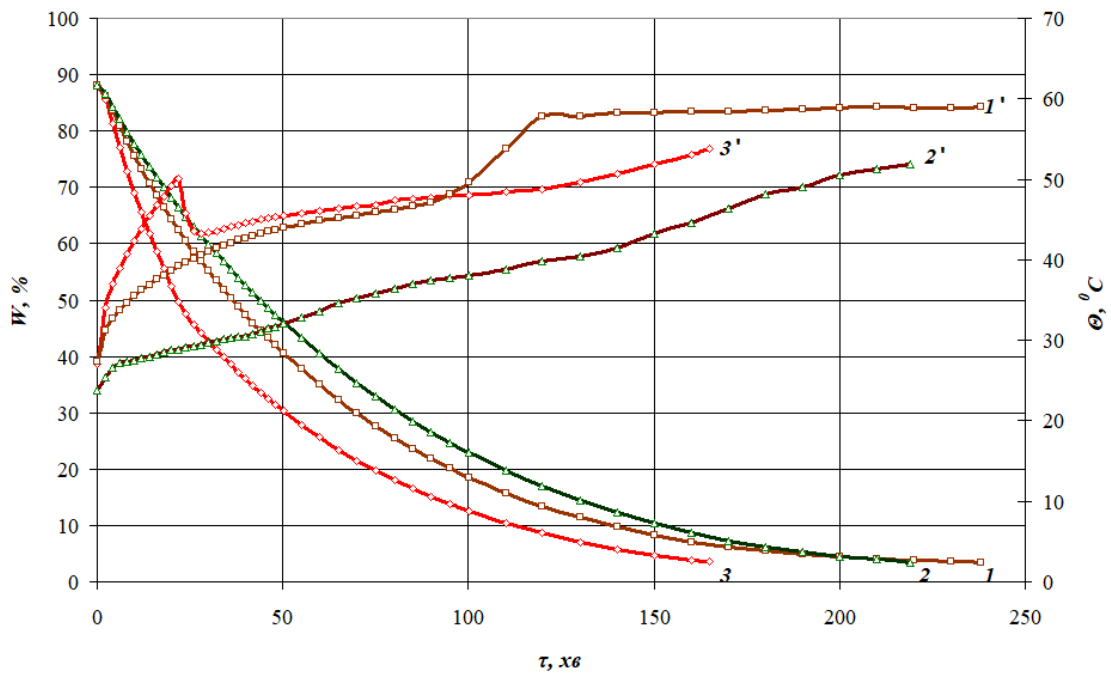


Рис. 3.18. Вплив комбінованого інфрачервоно-конвективного способу на кінетику процесу сушіння грибів ерінги $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:

1, 1' – 60°С; 2, 2' – 3800 Вт/м²; 3, 3' – 3800 Вт/м²+60°С

Швидкість сушіння – зміна вологості матеріалу за одиницю часу. На рис. 3.19 представлено вплив комбінованого інфрачервоно-конвективного способу на швидкість сушіння культивованих грибів ерінги. Як видно з рисунку, швидкість сушіння при температурі теплоносія 60°С становить 1,2 %/хв, а комбінованим способом – 2,2 %/хв.

Окрім комбінованого методу було досліджено конвективне сушіння із застосуванням ступеневого (двохстадійного) способу шляхом зниження температури теплоносія від 100 °С до 60 °С під час процесу зневоднення.

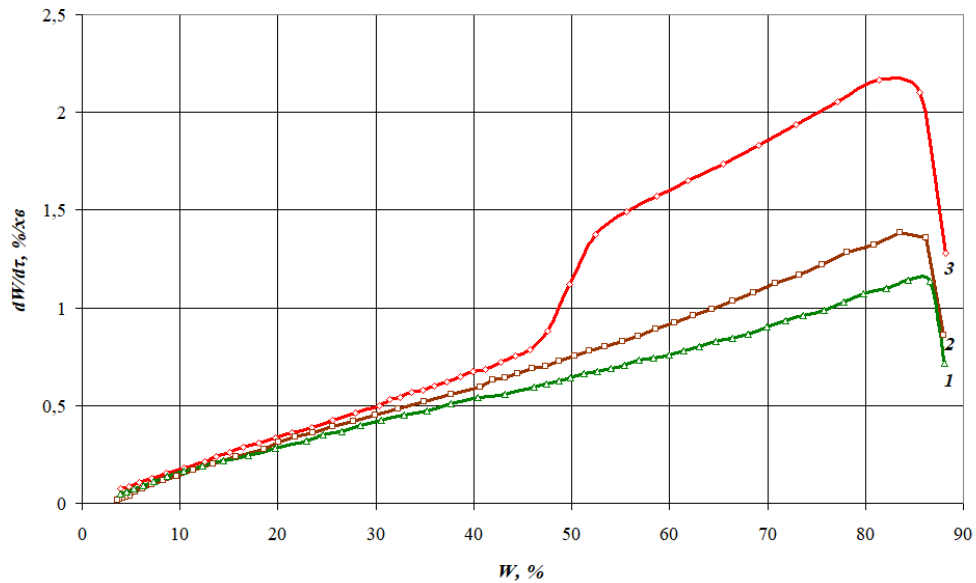


Рис. 3.19. Вплив конвективно-інфрачервоного випромінювання на швидкість сушіння грибів ерінги $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:
 1 – конвективне сушіння 60°C ; 2 – інфрачервоне сушіння 3800 Вт/м²;
 3 – комбіноване сушіння 3800 Вт/м²+ 60°C

Для конвективного двоступеневого режиму, процес починався при температурі теплоносія 100°C та тривав до досягнення температури зразка 48°C (рис. 3.20), далі температуру теплоносія зменшували до 60°C та продовжували процес. При цьому спостерігаємо, що температура матеріалу не перевищувала критичну для білкововмісних продуктів.

На рис. 3.20 та 3.21 представлено порівняльну характеристику конвективного двоступеневого та комбінованого режимів сушіння культивованих грибів ерінги з метою визначення найбільш оптимальних. На початку процесу конвективного двоступеневого сушіння при вологості матеріалу $85-88\%$, можливо використання теплоносія із температурою 100°C . При досягненні матеріалом температури $48-50^{\circ}\text{C}$ (на 20 хв експерименту), знижували теплоносій до 60°C (3.20). Проте температура матеріалу продовжувала зростати до 53°C , оскільки в даному випадку стенд не має змоги охолонути швидко і температура теплоносія по інерції знижувалась поступово.

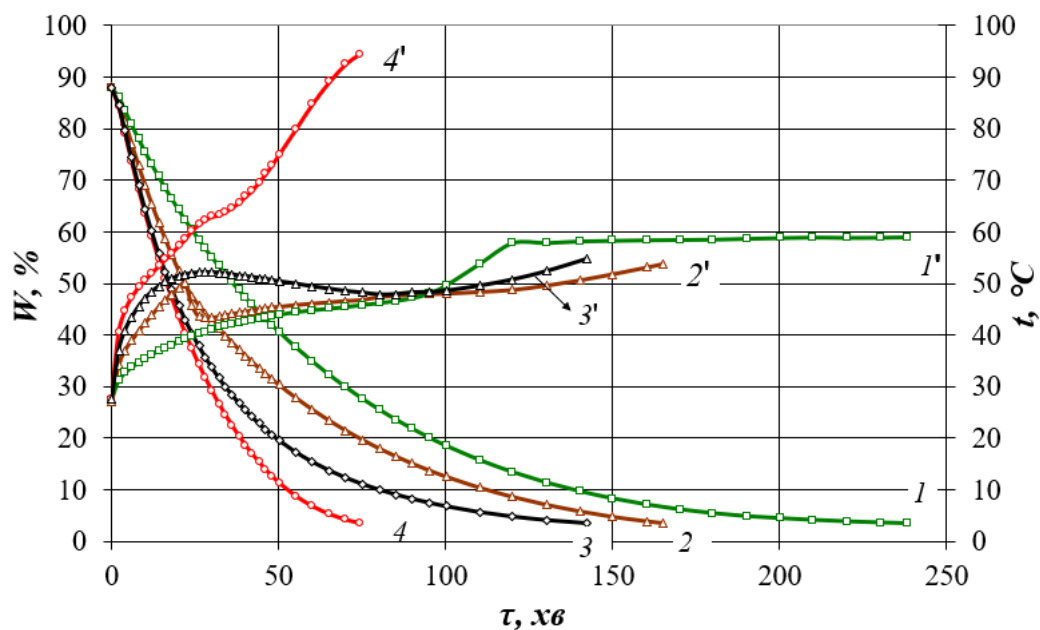


Рис. 3.20. Вплив режимів на тривалість сушіння ерінги

$V = 3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$:

1, 1' – конвективне сушіння 60°C ; 2, 2' – комбіноване сушіння $3800 \text{ Вт/м}^2+60^{\circ}\text{C}$;

3, 3' – конвективне двоступеневе сушіння $100/60^{\circ}\text{C}$;

4, 4' – конвективне сушіння 100°C

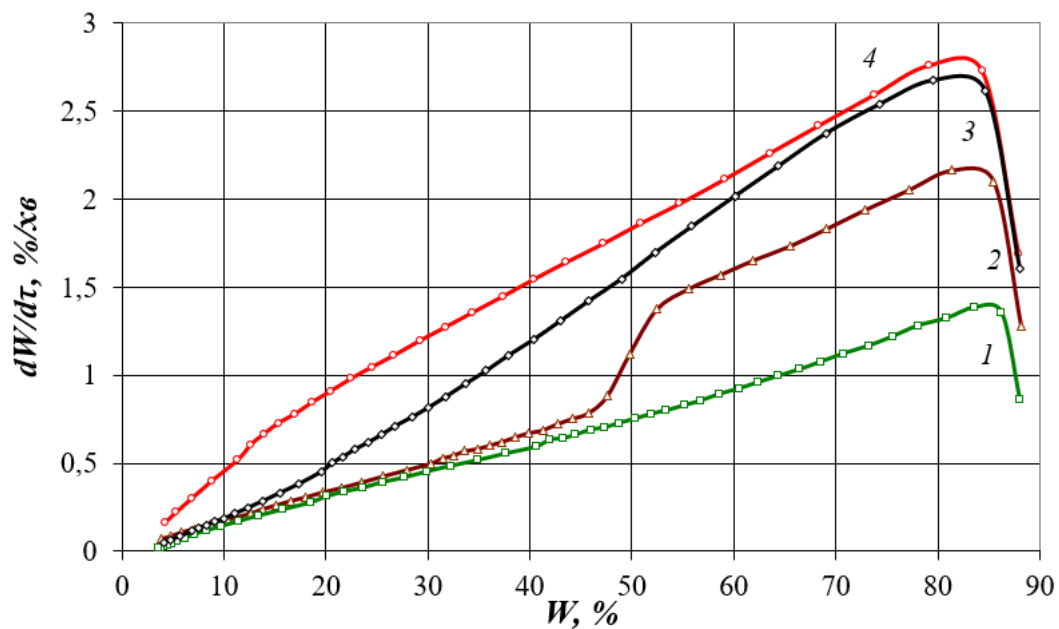


Рис. 3.21. Вплив різних режимів на швидкість сушіння грибів ерінги

$V=3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$:

1– конвективне 60°C ; 2 – комбіноване $3800 \text{ Вт/м}^2+60^{\circ}\text{C}$;

3 – конвективне двоступеневе $100/60^{\circ}\text{C}$; 4 – конвективне 100°C

При цьому, як видно з рисунку, температура матеріалу як зростала поступово, так і знижувалась поступово, займаючи більший проміжок часу. Якщо порівнювати ці два способи по тривалості процесу із термолабільним 60°C, то комбінований має тривалість в 1,5 рази, а конвективний двоступеневий - у 1,7 р. менше.

Порівнюючи комбінований (рис. 3.20, криві 2,2') та конвективний двоступеневий (рис. 3.20, криві 3,3') способи сушіння грибів ерінги, можна зробити висновок, що обидва способи мають інтенсифікацію порівняно із режимом сушіння 60 °С із різницею між собою у 15 хв.

На рис. 3.21 представлені криві швидкості сушіння грибів ерінги, з якого видно, що найнижча швидкість у режиму 60 °С (крива 1), найвища при температурі теплоносія 100°C – 2,8 %/хв, для конвективного двоступеневого режиму швидкість сушіння є досить високою (майже такою, як і для режиму 100 °С) та становить приблизно 2,7 %/хв, і для комбінованого – 2,2 %/хв.



Рис. 3.22. Зразок ерінги до сушіння



Рис. 3.23. Зразок ерінги після сушіння

На рисунку 3.22 та 3.23 показано зразок до сушіння та після сушіння, при цьому видно, що зразок має світло-солом'яний колір, що є ознакою термолабільного сушіння, аромат та смак сушених грибів.

Крім культивованих грибів ерінги (*Pleurotus eryngii*, Quél), було досліджено шиїтаке (*Lentinula edodes*), гливу звичайну (*Pleurotus ostreatus*) та печерицю звичайну (*Agaricus campestris* L.) [199, 170, 171, 172].

На рисунку 3.24 представлені криві сушіння зміни середньої (інтегральної) вологості матеріалу W в часі та температурні криві сушіння культивованих грибів шиїтаке (*Lentinula edodes*) [169]. Температура теплоносія становить 60 °С, 100 °С і ступеневий режим 100/60 °С.

В зв'язку з малою товщиною матеріалу і високою інтенсивністю випаровування, аналіз всіх кривих вказує на відсутність першого періоду сушіння. Зневоднення відбувається у другому періоді. Зміна вологості (крива 1) грибів шиїтаке при температурі теплоносія 60 °С відбувається протягом 156 хв. При цьому, як видно з температурної кривої 1', матеріал рівномірно прогрівається протягом всього періоду сушіння і лише в кінці температура матеріалу становить 55 °С.

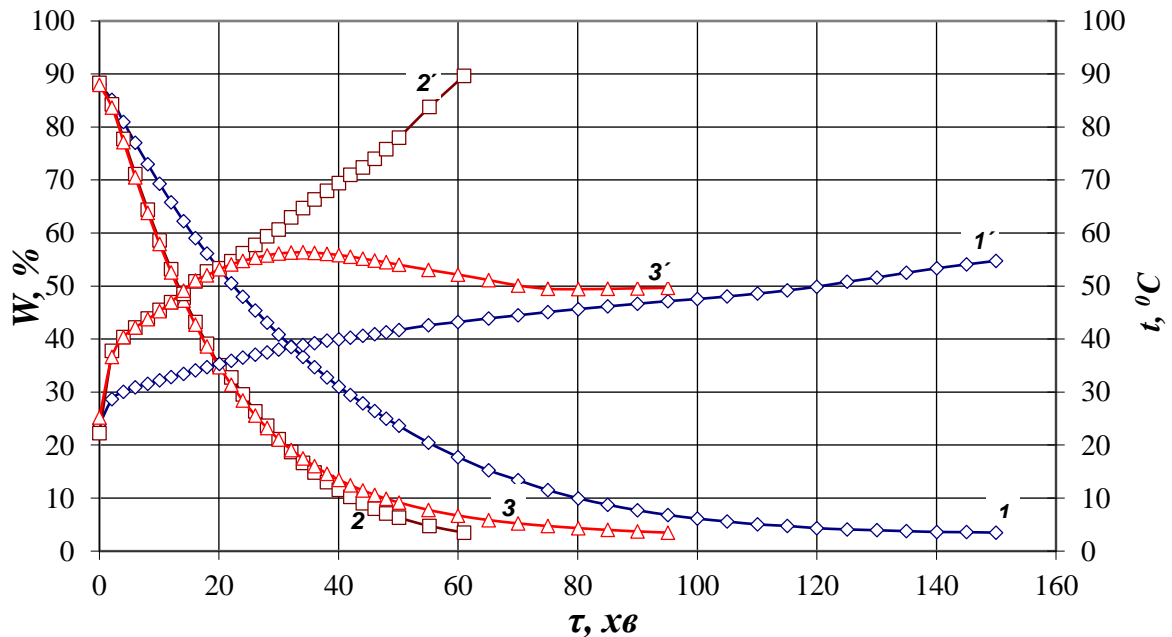


Рис. 3.24. Зміна вологості культивованих грибів шиїтаке за різних температур теплоносія $\delta = 10$ мм, $v = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п.:
1,1' – 60°С; 2,2' - 100°С; 3,3' – 100/60°С

Крива зміни вологості 2 показує, що процес інтенсифікується при температурі теплоносія 100°С і триває всього 60 хв. Температурна крива 2' вказує на інтенсивний прогрів матеріалу та на 55 хв процесу температура матеріалу різко підвищується і становить на 60 хв – 90°С. Це призводить до денатурації білків, утворення меланоїдинових реакцій, руйнуванню вітамінів

та інших небажаних процесів, хоча при цьому найкоротша тривалість процесу. Виходячи з цих досліджень, доцільно на початку процесу, коли вологість грибів висока, збільшити температуру теплоносія до 100 °С, не доводячи до високого прогріву матеріалу. Криві зміни вологості 3 та температури 3' показують, що через 20 хв температура матеріалу становить 50 °С і доцільно знижувати температуру теплоносія до 60 °С. В даному випадку дещо уповільнюється процес і його тривалість становить 97 хв, що значно більша за режим 100 °С теплоносія (крива 2,2'), проте значно менша, ніж при температурі 60 °С (крива 1,1'). Виходячи з цих даних, дослідження сушіння потрібно проводити ступеневим режимом при температурі теплоносія 100/60 °С та температурі матеріалу 60 °С [169].

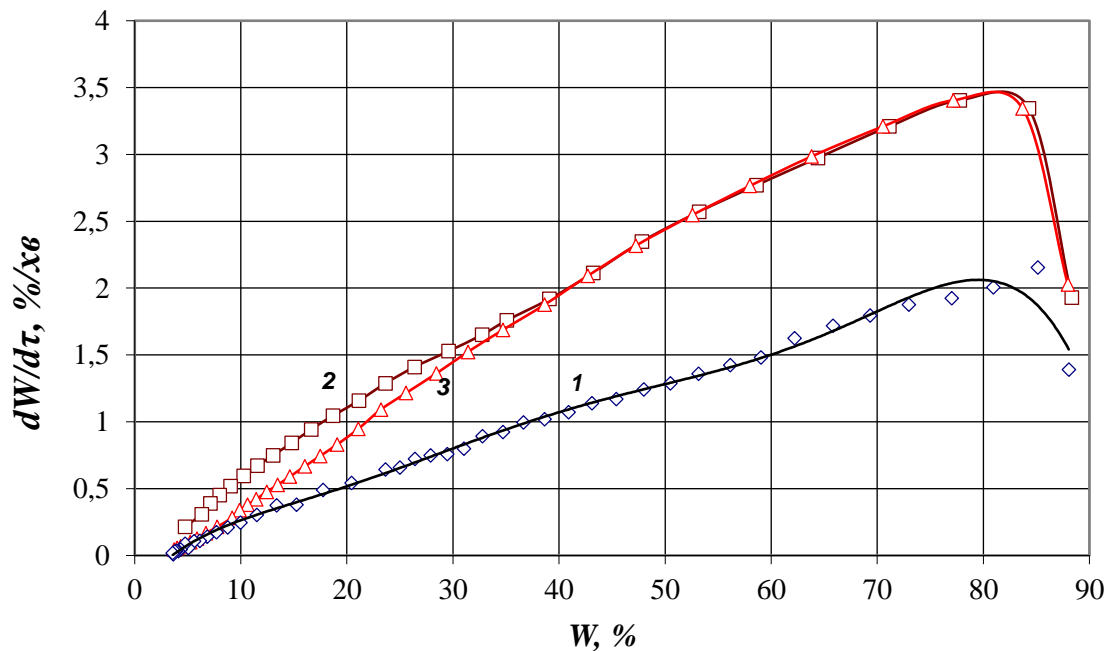


Рис. 3.25. Зміна швидкості сушіння культивованих грибів шіїтаке за різних температур теплоносія $\delta = 10$ мм, $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:
1 - 60°C; 2 - 100°C; 3 – 100/60°C

На кривих швидкості сушіння (рис. 3.25) видно, що швидкість сушіння як при температурі теплоносія 100 °С так при 100/60 °С становить 3,5 %/хв (криві 2,3). Температура 60 °С (крива 1) уповільнює швидкість сушіння. Крива швидкості ступеневого режиму (крива 3), як і на графіку зміни вологовмісту

збільшується швидкість сушіння у порівнянні із 60 °С (крива 1). Як видно, при конвективному двоступеневому режимі 100/60 °С, процес сушіння триває в 1,6 рази швидше у порівнянні із режимом 60 °С, та швидкість сушіння також є більшою та становить 3,5 %/хв [169].

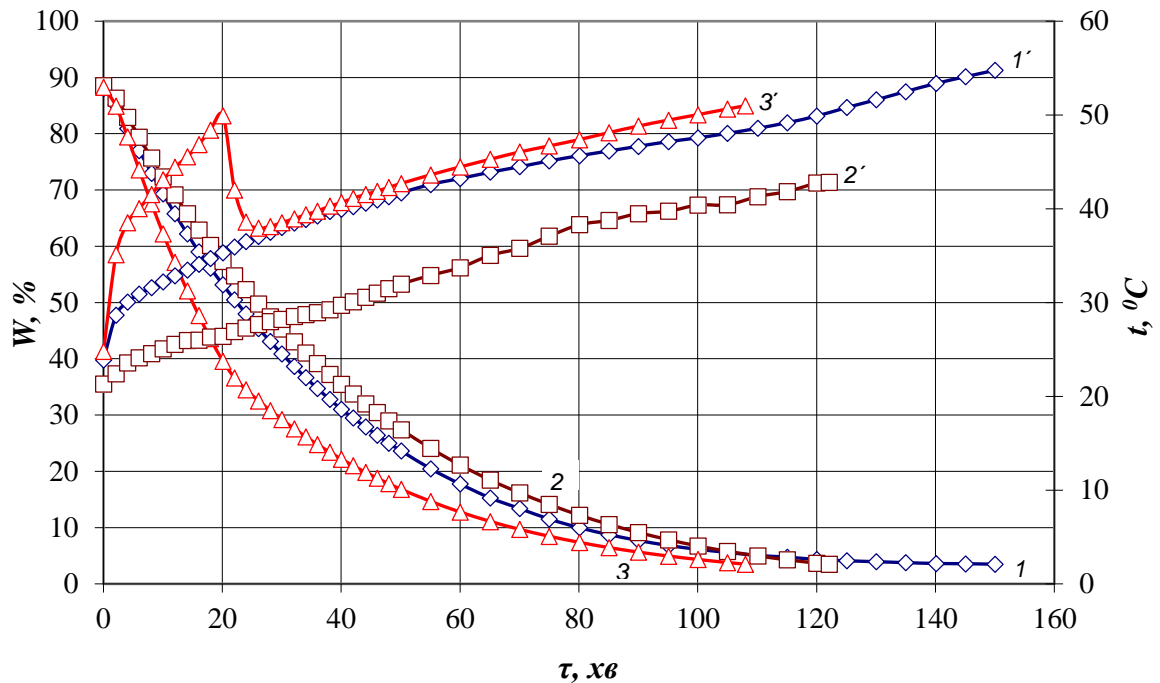


Рис. 3.26. Зміна вологості культивованих грибів Шіітаке при конвективному сушінні та ІЧВ $\delta = 10$ мм, $v = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с.п:
 1,1' – конвективне 60°С; 2,2' – інфрачервоне 3800 Вт/м² (при 20°С);
 3,3' – 3800 Вт/м²+60°С

Досліджено зміну вологості культивованих грибів Шіітаке при конвективному сушінні та ІЧВ (інфрачервоному випромінюванні при сушінні на конвективному стенді), як зображено на рис. 3.28 [169].

На графіку (рис. 3.26) показана порівняльна характеристика конвективного режиму 60°С (криві 1,1'), режиму сушіння при інфрачервоному випромінюванні 3800 Вт/м² на конвективному стенді із температурою навколишнього середовища 20 °С (криві 2,2') та комбінованого (інфрачервоно-конвективного) режиму 3800 Вт/м²+60°С (криві 3,3').

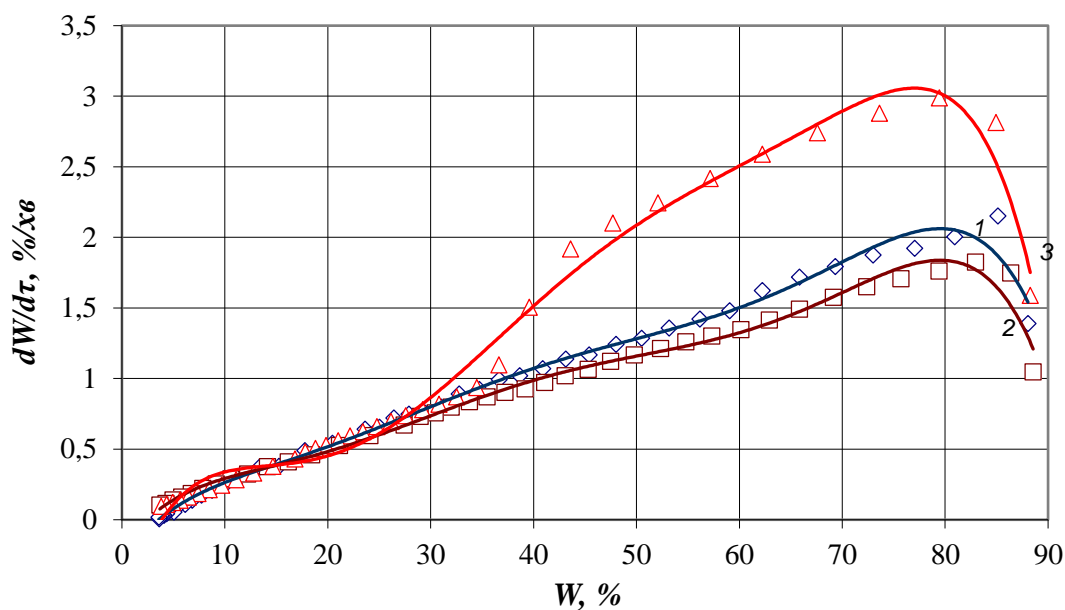


Рис. 3.27. Вплив температури теплоносія при конвекції та ІЧВ (інфрачервоного випромінювання) при сушінні на конвективному стенді на швидкість сушіння грибів шийтаке $\delta = 10$ мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:
 1 - 60°C ; 2 – 3800 Вт/м^2 (при 20°C); 3 – $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$

Як видно з рис. 3.26, тривалість сушіння при ІЧВ (криві 2,2') становить 122 хв, що є на 19 % швидше, ніж при конвективному режимі 60°C . Крива 3,3' показує комбіноване сушіння – на початку процесу було одночасно подано два види теплоносії (ІЧВ 3800 Вт/м^2 та конвективне 60°C).

При досягненні досліджуваним зразком температури 50°C на 20-ій хвилині експерименту, один із теплоносіїв (ІЧВ 3800 Вт/м^2) було вимкнено. При цьому спостерігається різке зниження температури матеріалу до 39°C із подальшим поступовим нагрівом. Комбіноване сушіння (криві 3,3') триває 110 хв та при цьому відбувається інтенсифікація процесу сушіння у 1,4 рази у порівнянні із режимом 60°C . Швидкість сушіння при конвективному режимі 60°C становить $2,0 \text{ \% / хв}$, при ІЧВ 3800 Вт/м^2 – $1,8 \text{ \% / хв}$, при комбінованому $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$ є найбільшою – 3 \% / хв (рис. 3.27) [169].

Було проведено порівняльну характеристику зміни вологості культивованих грибів Шийтаке (рис. 3.28) при комбінованому інфрачервоно-конвективному $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$ (крива 1,1') та двостадійному $100/60^{\circ}\text{C}$ (крива

2,2') режимах сушіння. Застосування ІЧВ-лампи на початку процесу дало змогу зменшити тривалість сушіння, як було вказано вище.

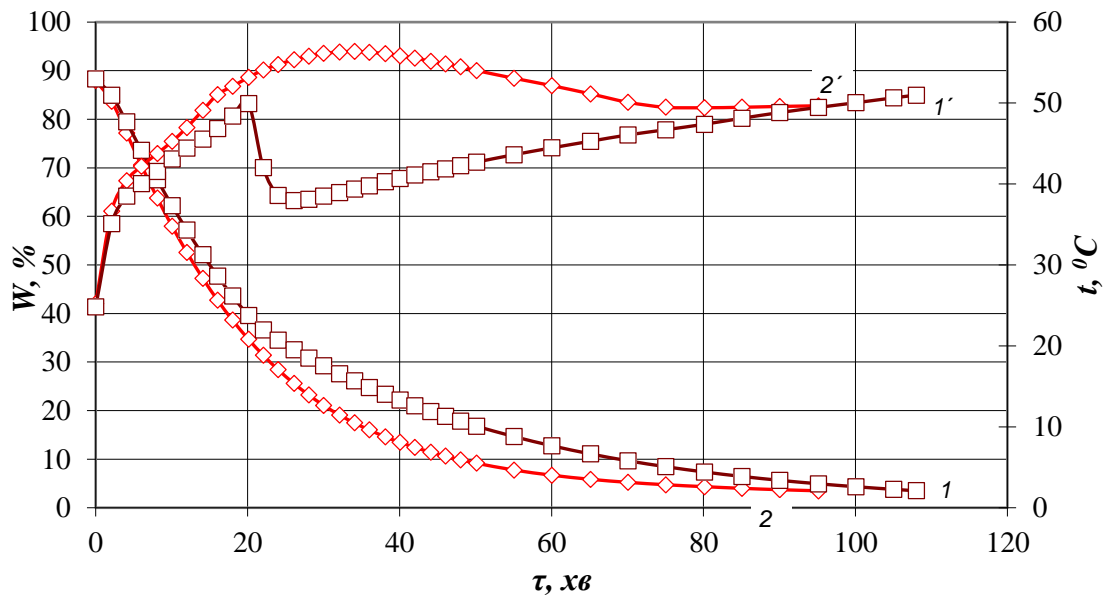


Рис. 3.28. Порівняльна характеристика зміни вологості культивованих грибів шиїтаке в ефективних режимах сушіння

$\delta = 10$ мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:

1,1' - 3800 Вт/м²+60°C; 2,2' - $100/60$ °C

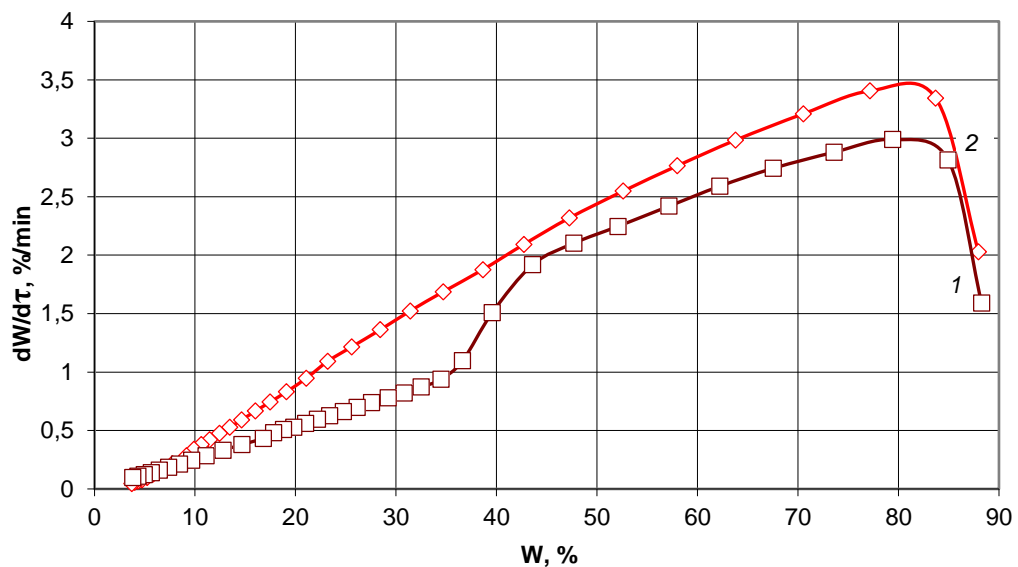


Рис. 3.29. Порівняльна характеристика швидкості сушіння культивованих грибів шиїтаке в ефективних режимах сушіння

$\delta = 10$ мм, $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:

1 - 3800 Вт/м²+60°C; 2 - $100/60$ °C

Крива 2,2' (рис. 3.28) показує характеристику ступеневого сушіння у порівнянні із комбінованим, з чого видно, що на початку процесу $t_{\text{менл}}$ становила 100 °С, далі при досягненні $t_{\text{мам}}$ 50 °С (на 20 хв), було зменшено $t_{\text{менл}}$ до 60 °С, проте $t_{\text{мам}}$ продовжує зростати по інерції до 53 °С, оскільки зниження $t_{\text{менл}}$ відбувається через певний проміжок часу поступово. Далі $t_{\text{мам}}$ із 35 хв починає поступово знижуватись до досягнення 48 °С на 75 хв, а далі зростає до 50 °С. Швидкість сушіння при комбінованому способі становить 3 %/хв та для ступеневого 3,5 %/хв (рис. 3.29).

Ці два режими є найбільш ефективними, різниця між ними в часі складає 8-10 хв та різниця у швидкості становить 0,5 %/хв із перевагою для ступеневого режиму (рис. 3.29). Це відбувається, тому що температура матеріалу під час сушіння комбінованим методом знижується різко і до 40 °С, а при ступеновому – повільно та не нижче 50 °С.

Тривалість сушіння грибів шийтаке інших дослідників, яка була описана в статті [72, 173] становить при 70 °С - 190 хв, а при 30 °С – 1400 хв. Тривалість представленого нами методу комбінованого сушіння становить 110 хв., а при двохстадійному – 97 хв.

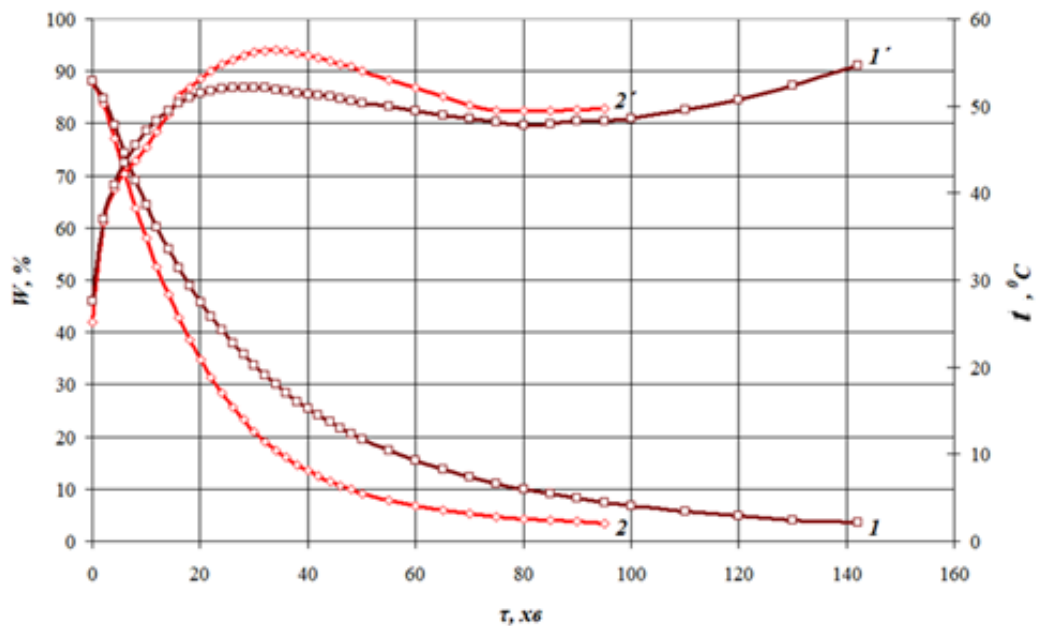


Рис. 3.30. Вплив температури теплоносія в ефективному режимі 100/60°С від виду грибів на тривалість сушіння $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:

1,1' - ерінги; 2,2' – шийтаке

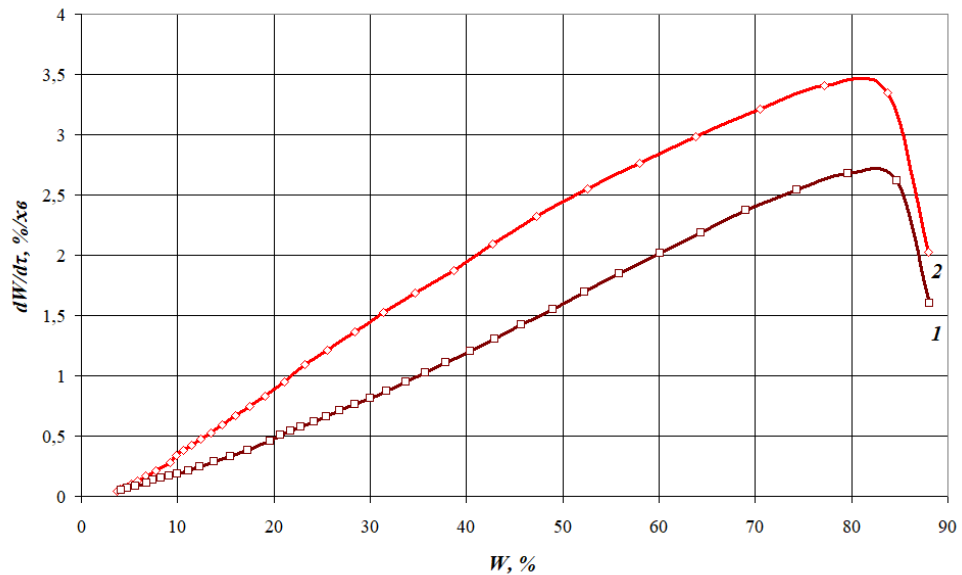


Рис. 3.31. Вплив температури теплоносія в ефективному режимі 100/60°C від виду грибів на швидкість сушіння $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:
1,1' - ерінги; 2,2' – шиїтаке

На рис. 3.30 та 3.31 представлено порівняльну характеристику культивованих грибів шиїтаке та ерінги при конвективному двоступеневому режимі. Як видно, криві сушіння мають схожий характер, однак різну тривалість в залежності від сорту грибів. Ерінги зневоднюються в 1,4 рази довше, ніж шиїтаке. Швидкість зневоднення для грибів ерінги становить 3,5 %/хв, а для шиїтаке – 2,7 %/хв.



Рис. 3.32. Шиїтаке після сушіння



Рис. 3.33. Порошок із шиїтаке після сушіння

На рис. 3.32 - 3.33 показано культивовані гриби шіїтаке після сушіння на конвективному стенді при ефективних режимах. Як видно, гриби мають світлий колір, аромат та смак сушених грибів.

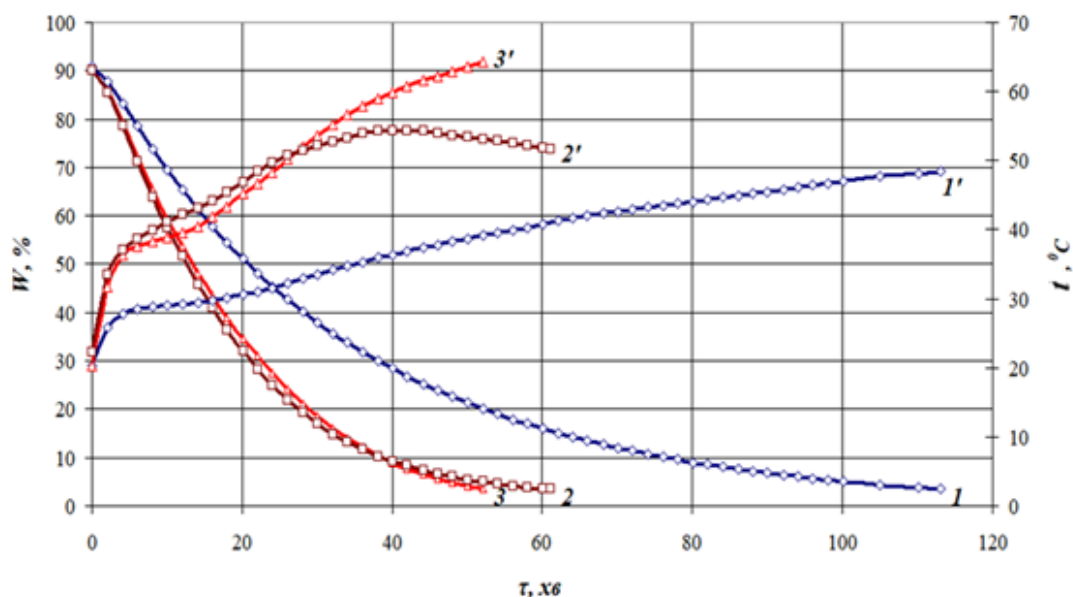


Рис. 3.34. Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння та температуру нагрівання грибів Гливи $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.:
1,1' - 60°C; 2,2' – 100/60°C; 3,3' - 100 °C

Вплив температури теплоносія на тривалість сушіння культивованих грибів глива звичайна (*Pleurotus ostreatus*) при швидкості 3 м/с та температурі теплоносія 60°C, 100°C та двостадійному 100/60°C представлено на рис. 3.34 [174]. Як видно, тривалість при двоступеневому режимі 100/60°C (крива 2,2') має тривалість, наближену до режиму 100°C (крива 3,3') та відбувається у 1,9 рази швидше у порівнянні із режимом 60°C (крива 1,1'). При цьому температура матеріалу за весь період зневоднення при двоступеневому режимі не перевищує 55 °C.

Як видно на рис. 3.35, найвища швидкість сушіння є 3,7%/хв для режиму 100 °C (крива 3), для двоступеневого – 3,5 %/хв (крива 2), а для режиму 60 °C – 2,45 %/хв (крива 1). Тобто, швидкість сушіння при двоступеневому режимі є вищою у 1,4 р. у порівнянні із режимом 60 °C.

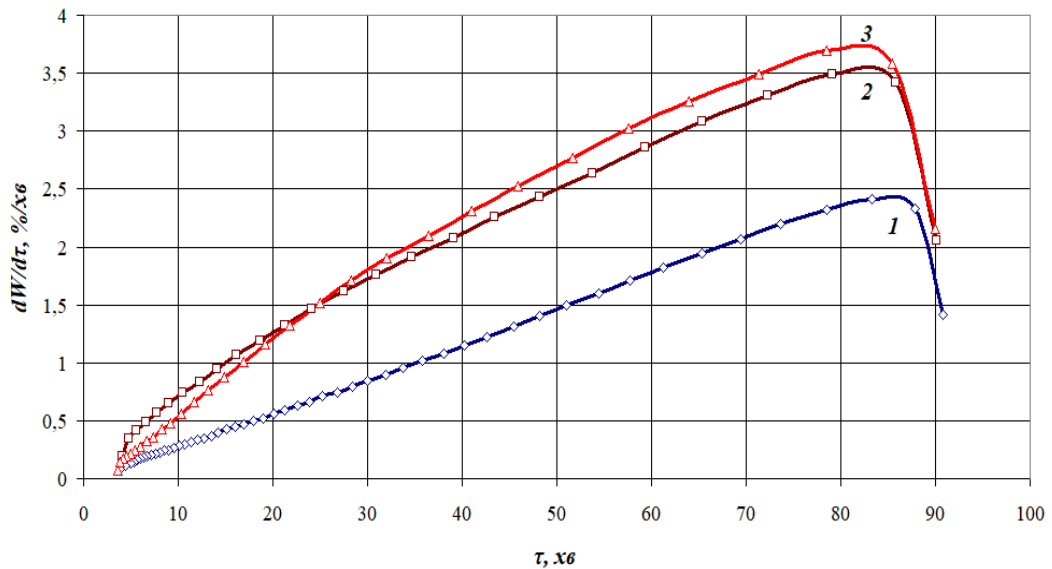


Рис. 3.35. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння грибів

Гливи $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:

1 - 60°C ; 2 – $100/60^{\circ}\text{C}$; 3 - 100°C

На рис. 3.36 та 3.37 представлено кінетичні криві сушіння гливи звичайної при інфрачервоному випромінюванні 3800 Вт/м²; при конвективному 60°C ; при комбінованому 3800 Вт/м²+ 60°C ; та при експериментальному комбінованому 3800 Вт/м² + $100/60^{\circ}\text{C}$, де поєднували інфрачервоне випромінювання та двоступеневий режим.

Найдовша тривалість сушіння культивованих грибів глива звичайна становить 195 хв при сушінні інфрачервоним випромінюванням з потужністю лампи 3800 Вт/м² (крива 1, 1'), при 60°C – 118 хв (крива 2, 2').

Якщо звернути увагу на криву 4,4' (рис. 3.36), варто зазначити, що в даному випадку для комбінованого режиму застосовували поєднання інфрачервоного випромінювання та конвективного двоступеневого $100/60^{\circ}\text{C}$. як показує крива 4,4', тривалість сушіння збігається із комбінованим режимом 3800 Вт/м² + 60°C , однак швидкість сушіння (рис. 3.37) для інфрачервоного-двоступеневого є найбільшою 3800 Вт/м² + $100/60^{\circ}\text{C}$ та становить $5,1$ %/хв., а для комбінованого інфрачервоно-конвективного 3800 Вт/м² + 60°C – $3,5$ %/хв.

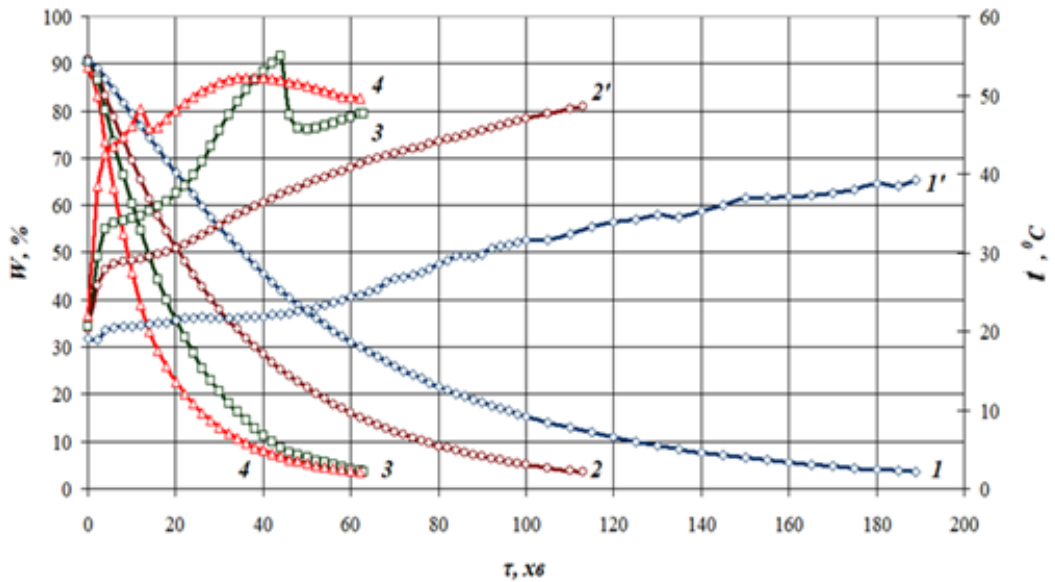


Рис. 3.36. Порівняльна характеристика різних режимів сушіння:

грибів Гливи $V = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:

1,1' – 3800 Вт/м²; 2,2' – 60 °С; 3,3' - 3800 Вт/м²+ 60 °С;

4,4' - 3800 Вт/м²+ $100/60$ °С

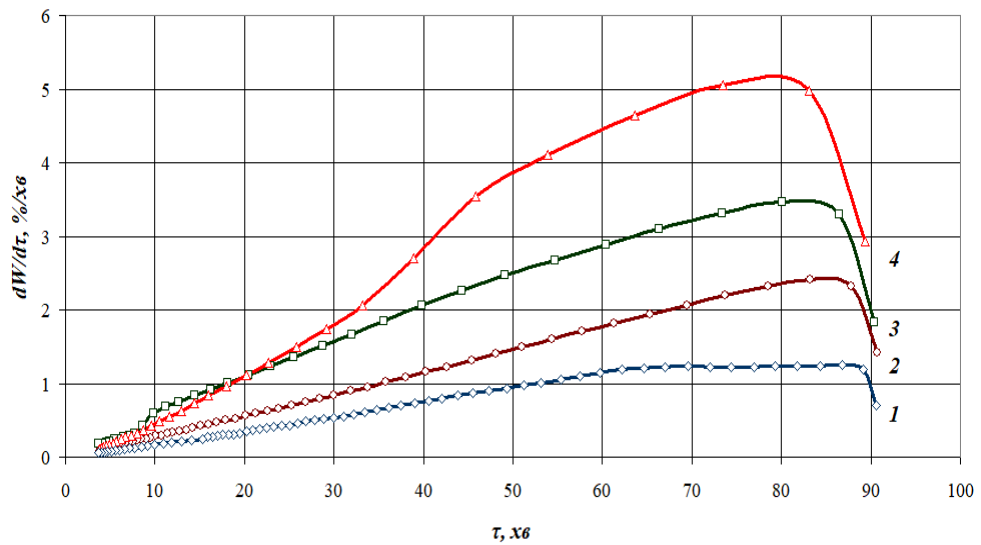


Рис. 3.37. Порівняльна характеристика швидкості різних режимів

сушіння грибів Гливи $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п:

1 - 3800 Вт/м²; 2 - 60 °С; 3 - 3800 Вт/м² + 60 °С; 4 - 3800 Вт/м² + $100/60$ °С

Для комбінованих режимів (криві 3,3' та 4,4') тривалість сушіння є найкоротшою – 62-64 хв та швидкість для цих режимів є найвищою (рис. 3.39).



Рис. 3.38. Глива звичайна після сушіння (*Pleurotus ostreatus*)

На рисунку 3.38 зображено зразок гливи звичайної після сушіння ефективним інфрачервоно-конвективним методом $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$. Органолептичні показники відповідають даному сушеному продукту.

Було експериментально визначено тривалість та швидкість сушіння культивованих грибів печериця звичайна за конвективного двоступеневого способу зневоднення (рис. 3.39, 3.40).

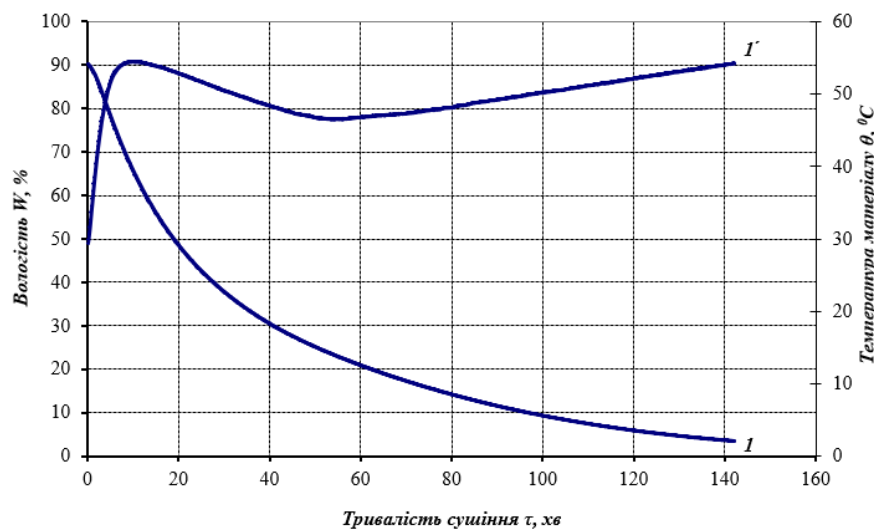


Рис. 3.39. Вплив температури теплоносія при конвекції на тривалість сушіння грибів Печериця $20 \times 5 \times 5 \text{ мм}$, $v = 3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$: 1,1' – $100/60^\circ\text{C}$

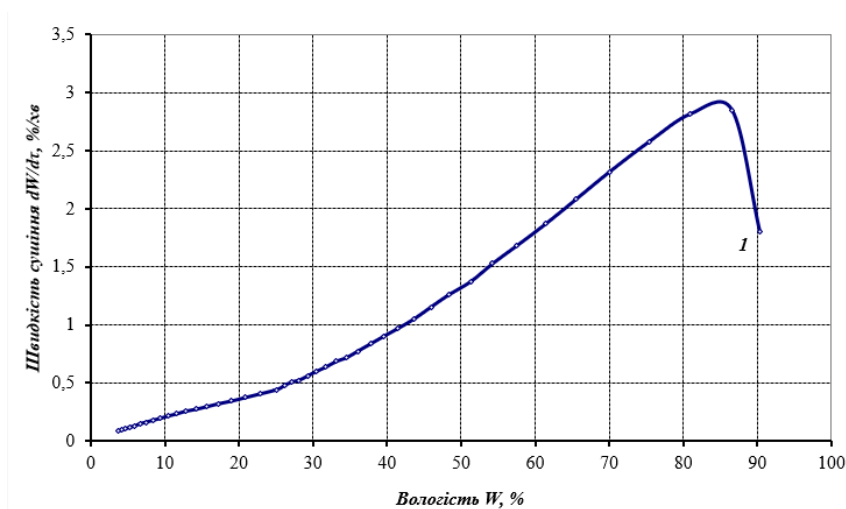


Рис. 3.40. Вплив температури теплоносія при конвекції на швидкість сушіння грибів Печериця $20 \times 5 \times 5 \text{ мм}$, $v = 3 \text{ м/с}$, $d=10 \text{ г/кг с.п.}$: 1 – $100/60^\circ\text{C}$

На рис. 3.41 представлено порівняльну характеристику тривалості сушіння культивованих грибів при запропонованих ефективних режимах зневоднення. Не дивлячись на майже однакову початкову вологість, тривалість процесу для всіх грибів різна. Найшвидше піддаються зневодненню культивовані гриби глива звичайна 62 та 64 хв для конвективного двоступеневого та комбінованого інфрачервоно-конвективного режимів відповідно. На другому місці шиїтаке із тривалістю 97 хв та 115 хв. Гриби ерінги мають найдовшу тривалість 145 хв та 160 хв при ефективних режимах у порівнянні з іншими культивованими грибами. Це залежить від хімічного складу кожного виду грибів, умов їх вирощування та зберігання тощо.

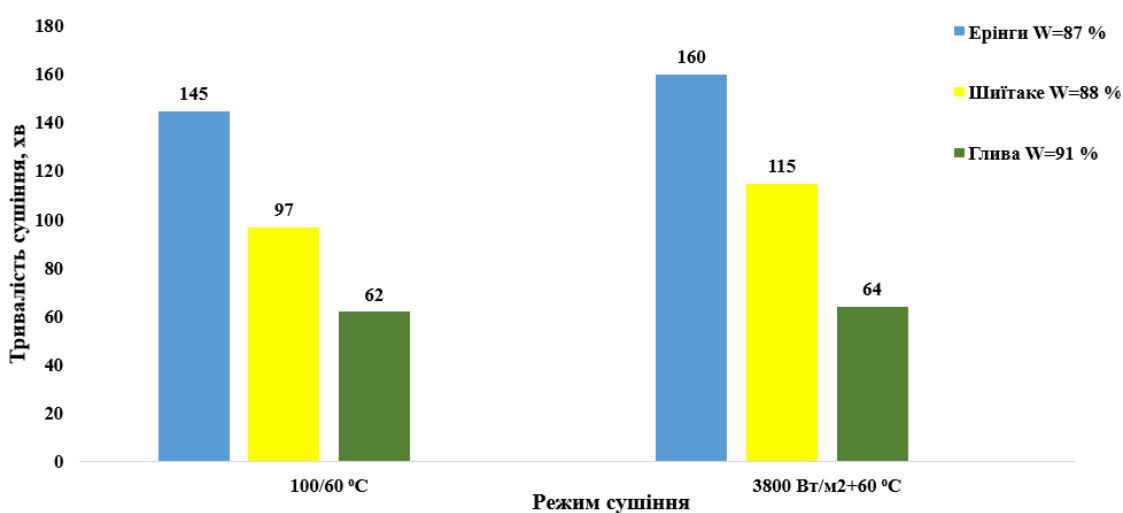


Рис. 3.41. Порівняльна характеристика тривалості сушіння культивованих грибів при ефективних режимах зневоднення

3.4. Підготовка м'ясного гранульованого продукту та сушіння на конвективному сушильному стенді

На основі проведених експериментальних досліджень кінетики сушіння культивованих грибів та м'ясної сировини було розроблено сушений гранульований м'ясний продукт з підвищеним вмістом білку. Цей продукт вміщує в себе як білкововмісну сировину рослинного так і тваринного походження. Нам вдалося об'єднати ці інгредієнти таким чином, щоб утворився смачний корисний продукт із високим вмістом білку [161, 175, 176].

Поєднання м'яса із рослинною сировиною дає можливість запобігти окисленню жирів, при цьому покращуються органолептичні показники та збільшується харчова цінність продукту під час зберігання.

Одержані сушені комбіновані гранули м'яса з грибами і рослинною сировиною чудово набухають та відновлюються під час його використання.

Завдяки низькій температурі сушіння білки м'яса не руйнуються, тому немає твердості. Такий продукт підходить для застосування у рецептурі продуктів швидкого приготування.

Спосіб одержання сушеного м'ясного гранульованого продукту здійснюється наступним чином. Гриби, моркву, селеру інспектують, миють, очищають та нарізають на шматочки 3 x 4 см. Заливають холодною водою. Доводять до кипіння, проварюють 1,5 - 2 хв. Забирають з овочевого відвару, охолоджують. Шматочки м'ясної сировини вагою 120 - 350 г очищують від жиру та плівки, нарізають на шматочки 4 x 10 см, занурюють в овочевий відвар у співвідношенні 1:2, варять протягом 10 - 12 хв та виймають з окропу, охолоджують, змішують м'ясо, гриби та рослинну сировину у такому співвідношенні компонентів: 60 % відвареної курячої грудки, 20% грибів, 10% моркви і 10% селери, одержану суміш пропускають через вовчок (м'ясорубку) та формують гранули, розміром 5-7 мм, які сушать за температури матеріалу 55 - 56 °С до кінцевої вологості 11-12 % та охолоджують [161].

За рахунок такого співвідношення та оптимальної температури зневоднення, підвищується відновлюваність сушеного продукту, при цьому для його відновлювання можна застосовувати воду температурою 45 – 95 °С, що дає ширший діапазон у їх використанні.

Одержані сушені гранули м'яса з грибами та рослинною сировиною мають відмінні органолептичні та технологічні показники, що забезпечує їх широке використання як самостійного продукту, а також як добавка до харчових концентратів.

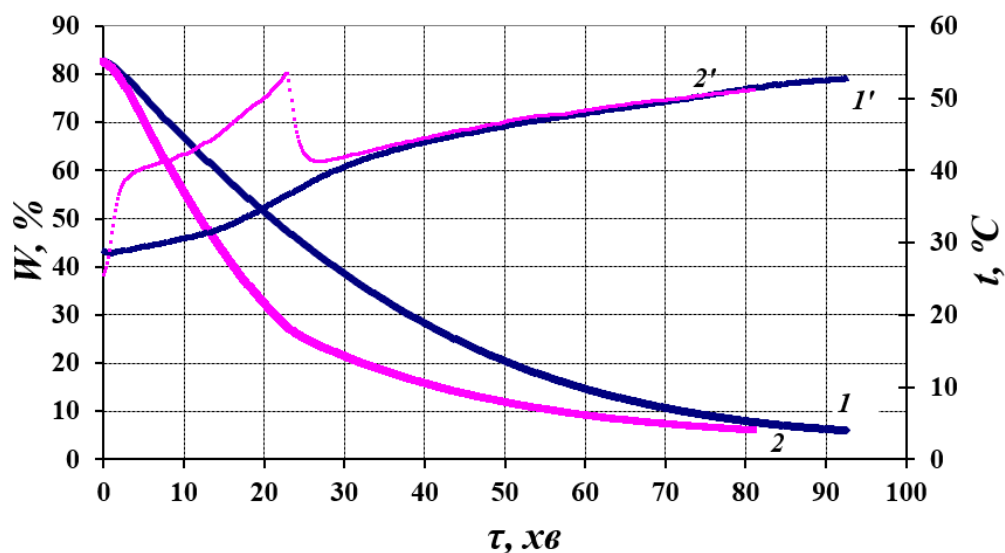


Рис. 3.42. Зміна вологості білкововмісного продукту (м'ясо 60 %, гриби 20 %, селера 10 %, морква 10 %) в залежності від режиму зневоднення:
1, 1' – 55 °С; 2, 2' - 3800 Вт/м²+ 55 °С

На рис. 3.42. показана зміна вологості гранульованого м'ясного продукту (м'ясо, гриби, селера, морква) в залежності від режиму зневоднення. Як видно, криві мають характер схожий до кривих сушіння мяса, оскільки у складі гранульованого продукту найбільше м'яса та тривалість при комбінованому інфрачервоно-конвективному способі становить 83 хв.

3.5. Визначення теплофізичних властивостей культивованих грибів на диференціальному мікрокалориметрі ДМКИ-01

3.5.1. Визначення теплоти випаровування з тканин плодового тіла культивованих грибів

Розробка теплотехнології сушіння грибів потребує, в свою чергу, глибокого вивчення механізму та енергетики процесу їх зневоднення, який має певні особливості та відмінності порівняно із зневодненням рослинної сировини чи продукції тваринництва. Витрати теплоти на випаровування води з гриба печериці звичайної в процесі конвективно-кондуктивного сушіння було визначено за допомогою диференціального мікрокалориметра випаровування ДМКИ-01, що поєднує в собі можливості калориметрії та

термогравіметрії, який було розроблено в Інституті технічної теплофізики НАН України саме для такого роду досліджень [177].

Для експерименту використали тонкий (товщиною ~ 1 мм) зріз тканин плодового тіла гриба печериця звичайна діаметром до 40 мм. Сушіння проводили при температурах 40 - 80°C, швидкості повітря 0,8 см/с та його вологовмісті 10 г/кг. Реєстрація теплового потоку і зміни маси зразка в процесі сушіння здійснювалась безперервно до моменту досягнення зразком рівноважної вологості. Масу сухих речовин визначали шляхом досушування зразків до постійної маси при температурі 105°C [141]. Отримані під час сушіння значення питомих витрат теплоти на випаровування були представлені у вигляді залежності від поточного значення відносної вологості зразків (рис. 3.43) [178].

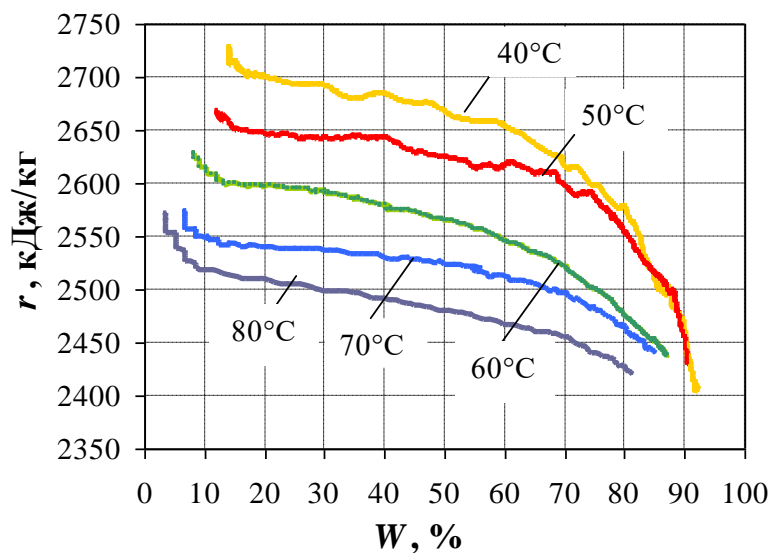
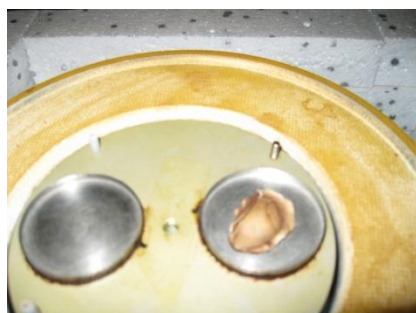


Рис. 3.43. Залежність питомих затрат теплоти на випаровування води з тканин плодового тіла гриба печериці звичайної від їх відносної вологості під час сушіння при різних температурах

Як бачимо з рисунку, експериментально визначена величина питомих витрат теплоти на випаровування тільки на самому початку сушіння більш-менш наближується до табличного значення теплоти випаровування води з вільної поверхні (2406, 2382, 2358, 2333 та 2308 кДж/кг при 40, 50, 60, 70 та

80°C відповідно, згідно довідникових даних). Момент самого початку випаровування не вдається зафіксувати через накладання процесу прогріву зразків до температури сушіння на процес випаровування з них вологи. Проте, майже відразу після прогрівання зразків спостерігається зростання витрат теплоти на випаровування води з тканин гриба печериці звичайної, їх загальний приріст у порівнянні з табличним значенням для випаровування чистої води досягає 11 % до моменту досягнення тканинами гігроскопічної вологості.



а) 40 С



б) 50 С



в) 60 С



г) 70 С



д) 80 С

Рис. 3.44. Вигляд зразків тканин печериці після сушіння в калориметрі при різних температурах

Сушіння за межею гігроскопічної вологості тканин гриба призводить до більш значного та більш різкого збільшення питомих витрат теплоти на випаровування води. Отримані результати дозволяють стверджувати, що при зневодненні тканин гриба печериці звичайної істотно зростання енерговитрат на зневоднення відбувається вже на початкових етапах сушіння; досягає 11 % перевищення над табличним значенням для випаровування води з вільної поверхні до моменту досягнення тканинами гігроскопічної вологості та різко збільшується при спробах сушіння за межу їх гігроскопічної вологості.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що при зневодненні тканин гриба «Печериця» істотно зростання енерговитрат на зневоднення відбувається вже на початкових етапах сушіння; досягає 11% перевищення понад табличним значенням для випаровування води з вільної поверхні до моменту досягнення тканинами гігроскопічної вологості та різко збільшується при спробах сушіння за межу їх гігроскопічної вологості.

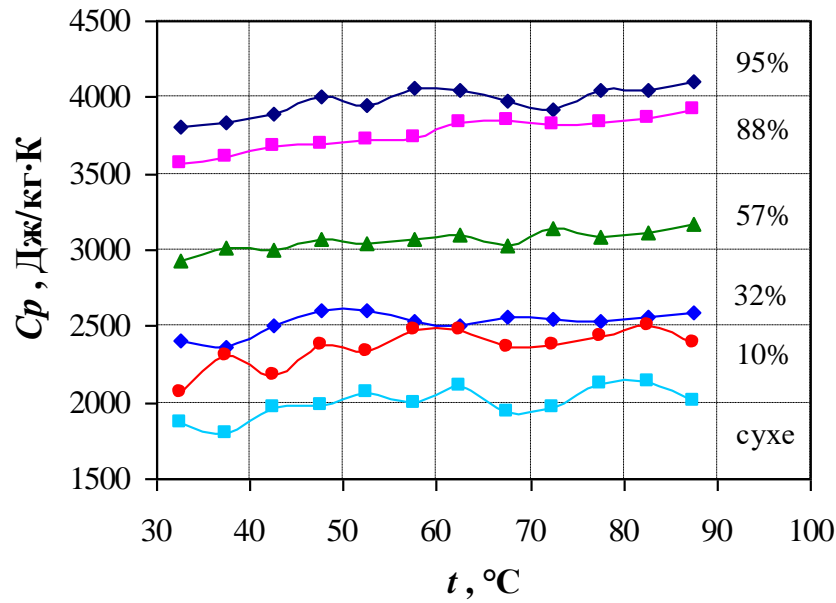
3.5.2. Визначення теплоємності тканин плодового тіла культивованих грибів

Теплоємність тканин плодового тіла гриба Печериця з вологістю $W = 0 - 95$ % відн. було визначено в діапазоні $t = 32,5 - 87,5^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.45) [179].

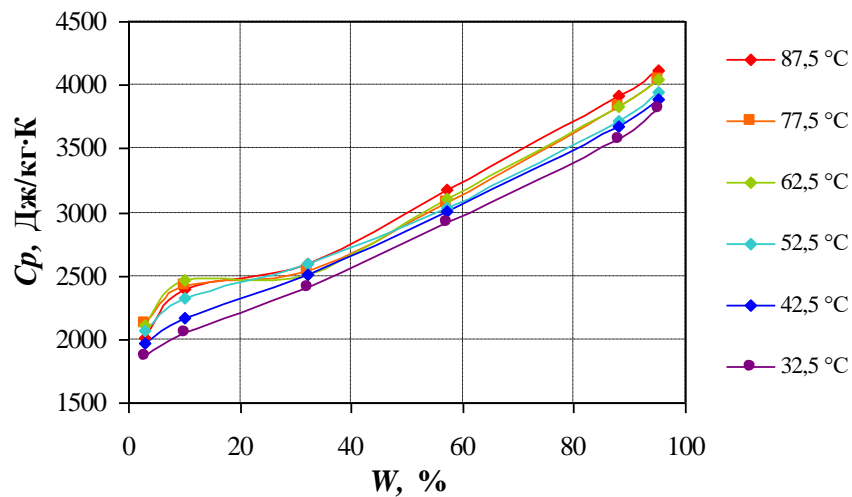
На рис. 3.45.б представлено отримане експериментально сімейство кривих зміни теплоємності тканин плодового тіла гриба Печериця зі зміною їх вологості $C=f(W)$ при різній температурі зразків. Як бачимо, їх можна апроксимувати лінійними рівняннями загального вигляду (табл. 3.1):

$$C_t(W) = a_t + b_t \cdot W, \text{ Дж/кг К} \quad (3.1)$$

де: a_t та b_t – коефіцієнти апроксимації.



a)



б)

Рис. 3.45. Залежність теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця від температури при різній вологості зразків (а) та від вологості зразків при різній температурі (б)

При виведенні формули був зглажений ендотермічний пік у діапазоні низьких вологостей гриба ($W < 30\%$ відн.), обумовлений, імовірно, витратами теплоти на деградацію білкових структур гриба при зневодненні. Саме молекули води утворюють структуру білків в тканинах гриба, без води білки хаотичні.

Таблиця 3.1.

Апроксимація залежностей теплоємності плодового тіла гриба Печериця від їх вологості при різній температурі

Вологість гриба $W = 95 \dots 0$ % відн.			
Температура гриба t , °C	Формула теплоємності $C_t(W)$, Дж/кг К	Коефіцієнти апроксимації	
		a_t	b_t
32,5	$C = 1836,1 + 20,054 \cdot W$	1836,1	20,054
42,5	$C = 1895,9 + 20,446 \cdot W$	1895,9	20,446
52,5	$C = 1919,5 + 20,699 \cdot W$	1919,5	20,699
62,5	$C = 1836,1 + 21,833 \cdot W$	1912,3	21,833
77,5	$C = 1912,3 + 21,592 \cdot W$	1931,3	21,592
87,5	$C = 1960,0 + 22,170 \cdot W$	1960,0	22,170

Оскільки в попередніх експериментальних дослідженнях [61, 63, 66, 67, 180, 181] не було виведено загального рівняння для визначення теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця в залежності як від температури, так і від вологості гриба, робота була продовжена. Було зроблено лінійну апроксимацію залежності коефіцієнтів a_t та b_t від температури гриба:

$$a(t) = 1,6569 + 0,0020418 \cdot t \quad (3.2)$$

$$b(t) = 0,014877 + 0,0001969 \cdot t \quad (3.3)$$

Після підставлення отриманих формул (2) та (3) у формулу (1) отримаємо узагальнену формулу для визначення теплоємності плодового тіла гриба Печериця при зміні його температури та вологості в діапазонах $t = 32,5 \dots 87,5$ °C та $W = 95 \dots 0$ % відн.:

$$C_p(W, t) = a(t) + b(t)W = 1801,9 + 18,876W + 1,8124t + 0,0381tW, \text{ Дж/кг К} \quad (3.4)$$

Порівняння отриманих експериментальних даних зі значеннями теплоємності, які отримані за формулою (4) наведені на рис. 3.46, а похибки між цими даними – у таблиці 3.2.

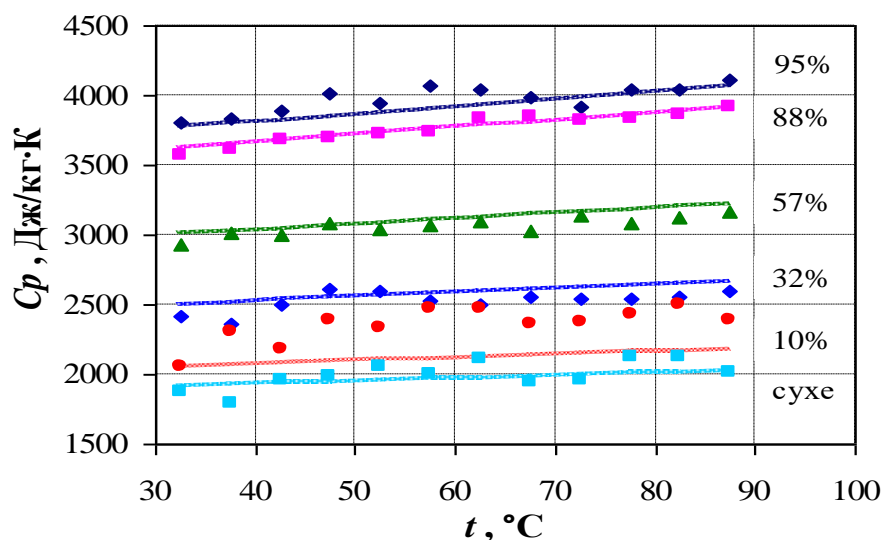


Рис. 3.46. Порівняння отриманих експериментальних даних зі значеннями теплоємності, які отримані за формулою (4)

Як бачимо, значення теплоємності, вираховані за формулою (3.4) достатньо добре (з середньою похибкою 2,12 %) співпадають з отриманими експериментальними даними. Окрім вологості гриба $W = 10\%$ відн., при якій імовірно, відбулася деградація білкових структур гриба.

Практика сушіння природної харчової сировини вказує на складну залежність витрат теплоти на випаровування вологи від вологовмісту матеріалу. Це пов'язано з тим, що спочатку, зазвичай видалається вільна вода, потім починає видалятися зв'язана.

З початком видалення зв'язаної води сушіння ускладнюється, а енерговитрати збільшуються [182]. В тканинах гриба міститься до 95% води. Одна частина цієї води є вільною та має властивості, схожі з властивостями чистої води.

Інша частина міцно зв'язана з біополімерами м'якоті та розчинними речовинами клітинного соку. Метою нашої роботи стало вивчення закономірностей видалення зв'язаної води з тканин гриба печериця звичайна при сушінні.

Таблиця 3.2.

Значення теплоємності гриба Печериця (у кДж/кг·К) за експериментальними (E) та розрахунковими (F) даними і похибка між ними (Δ)

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Вологість гриба $W, \% \text{ відн.}$								
	95			88			57		
	E	F	$\Delta, \%$	E	F	$\Delta, \%$	E	F	$\Delta, \%$
32,5	3,81	3,77	1,06	3,57	3,63	1,62	2,93	3,01	2,72
37,5	3,84	3,80	1,08	3,62	3,66	1,15	3,01	3,03	0,57
42,5	3,89	3,83	1,74	3,68	3,68	0,08	3,01	3,05	1,37
47,5	4,01	3,85	3,94	3,70	3,71	0,35	3,08	3,07	0,35
52,5	3,95	3,88	1,76	3,72	3,73	0,45	3,04	3,09	1,49
57,5	4,06	3,91	3,83	3,73	3,76	0,69	3,07	3,11	1,14
62,5	4,04	3,93	2,65	3,84	3,79	1,33	3,10	3,13	0,75
67,5	3,98	3,96	0,46	3,85	3,81	1,01	3,03	3,15	3,85
72,5	3,92	3,99	1,75	3,82	3,84	0,33	3,14	3,17	0,91
77,5	4,04	4,02	0,71	3,84	3,86	0,66	3,09	3,19	3,29
82,5	4,05	4,04	0,10	3,87	3,89	0,59	3,12	3,21	2,79
87,5	4,11	4,07	0,95	3,92	3,91	0,10	3,17	3,23	1,75
Температура $t, ^\circ\text{C}$	Вологість гриба $W, \% \text{ відн.}$								
	32			сухе (~ 3)					
	E	F	$\Delta, \%$	E	F	$\Delta, \%$	E	F	$\Delta, \%$
32,5	2,41	2,50	3,89	1,87	1,92	2,62			
37,5	2,36	2,52	6,76	1,80	1,93	6,98			
42,5	2,51	2,53	1,18	1,96	1,94	1,16			
47,5	2,61	2,55	2,12	1,99	1,95	1,85			
52,5	2,60	2,57	1,28	2,06	1,96	4,95			
57,5	2,53	2,58	2,12	1,99	1,97	1,25			
62,5	2,51	2,60	3,57	2,11	1,98	6,30			
67,5	2,56	2,61	1,93	1,94	1,99	2,63			
72,5	2,55	2,63	3,03	1,96	2,00	1,91			
77,5	2,54	2,64	3,97	2,13	2,01	5,56			
82,5	2,56	2,66	3,75	2,13	2,02	5,30			

3.6. Зміна стану води в тканинах культивованих грибів під час сушіння

Зміну стану води у зразках тканин гриба печериця звичайна було досліджено експериментально за допомогою серійного диференціального скануючого мікрокалориметра ДСМ-2М за методом [183, 184, 185].

Дослідження проводили на зрізах тканин товщиною $\sim 1,5$ мм і діаметром 4 мм. Для досягнення необхідного спектру вологості зразки попередньо конвективно підсушували в потоці повітря швидкістю 3 м/с з температурою 60 °С. Зразки герметично закупорювали в спеціальний алюмінієвий контейнер та розміщували у робочу комірку теплового блоку де охолоджували до -150 °С зі швидкістю 64 К/хв. Після встановлення температурної рівноваги в калориметричних комірках і витримці при цій температурі протягом 2 хв контейнер з зразком нагрівали до кімнатної температури зі швидкістю 4 К/хв. Одночасно реєстрували процеси, що відбуваються в матеріалі, за допомогою автоматизованої системи збору та обробки інформації «Water-5» [145].

Вологість зразків визначали після досліджень шляхом досушування до сухого стану у сушильній шафі при 105 °С.

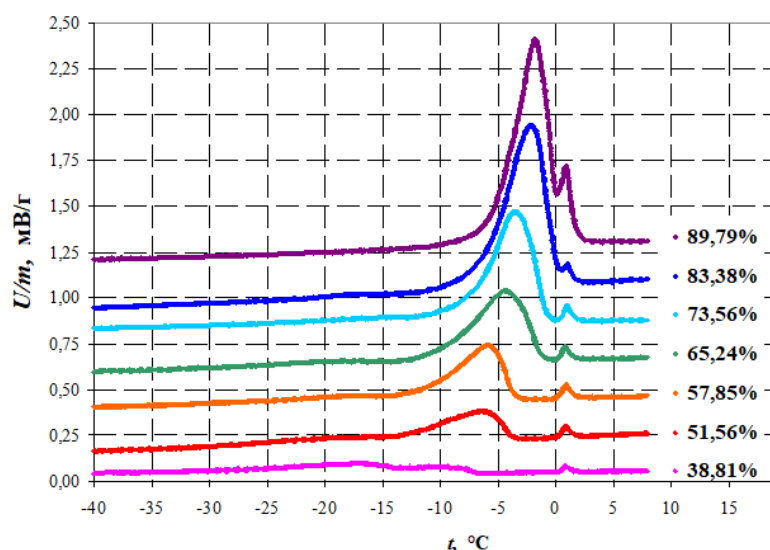


Рис. 3.47. ДСК-криві нагрівання тканин плодового тіла гриба печериця різної вологості

Вивчення стану води за методом, описаним у [145, 185] засноване на властивості зв'язаної води не зазнавати фазового переходу першого роду при охолодженні нижче 0 °С. Якщо систему, що містить як вільну, так і зв'язану воду, піддати в калориметрі охолодженню і подальшому нагріванню, то на кривій нагрівання відображається ендотермічний пік плавлення тільки вільної води, кількість якої можна визначити за площею піку (рис. 3.47).

Кількість незамерзаючої води, що по визначенню є зв'язаною, обчислювали як різницю між загальним вмістом води в зразку і масою замерзаючої води. Подальші розрахунки кількості зв'язаної води у зразках тканин гриба різної вологості показали, що в процесі зневоднення відбувається її зменшення, одночасно зі зменшенням кількості вільної води (рис. 3.48). Тобто, незважаючи на перерозподіл фракційного складу води на користь зв'язаної під час сушіння, її питомий вміст також зменшується.

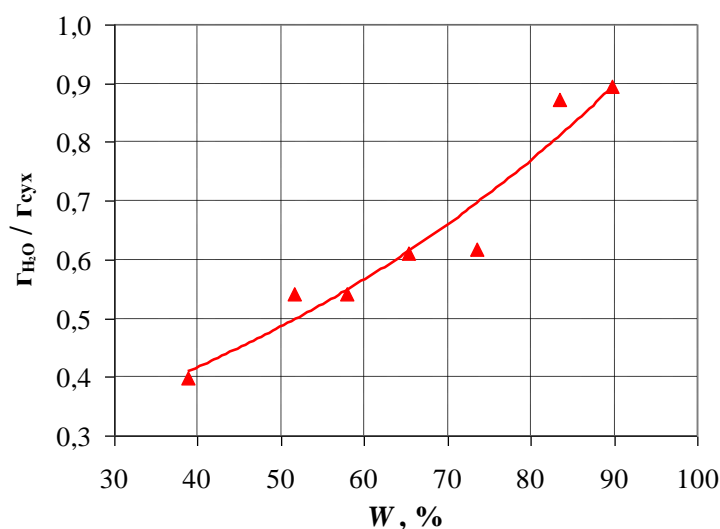


Рис. 3.48. Зміна питомої кількості зв'язаної води у тканинах плодового тіла гриба Печериця звичайна при зміні вологості тканин

Отримані результати дозволяють стверджувати, що при зневодненні досліджених тканин плодового тіла гриба «Печериця» істотне зростання енерговитрат настає вже на початковому етапі сушіння [183, 184].

3.7. Дослідження тепломасообмінних процесів при сушінні білкововмісної сировини, зміни критерію оптимізації сушіння

Однією із основних характеристик кінетики процесу зневоднення є критерій оптимізації сушіння (Rb), яке визначає відношення кількості теплоти, витраченої на нагрівання матеріалу та на випаровування значної вологи за нескінченно малий проміжок часу [169]:

$$Rb = b \frac{\bar{c}}{r} = \frac{\bar{c}}{r} \left(\frac{d\bar{t}}{dW} \right) \quad (3.5)$$

де Rb – критерій оптимізації сушіння, W – вологість матеріалу, %.

$b \frac{c}{r}$ – інтегральна характеристика кінетики процесу сушіння.

$\frac{d\bar{t}}{dW}$ - зміна середньої температури висушуваного матеріалу на одиницю зміни її середньої вологості за нескінченно малий проміжок часу, її називають температурним коефіцієнтом сушіння.

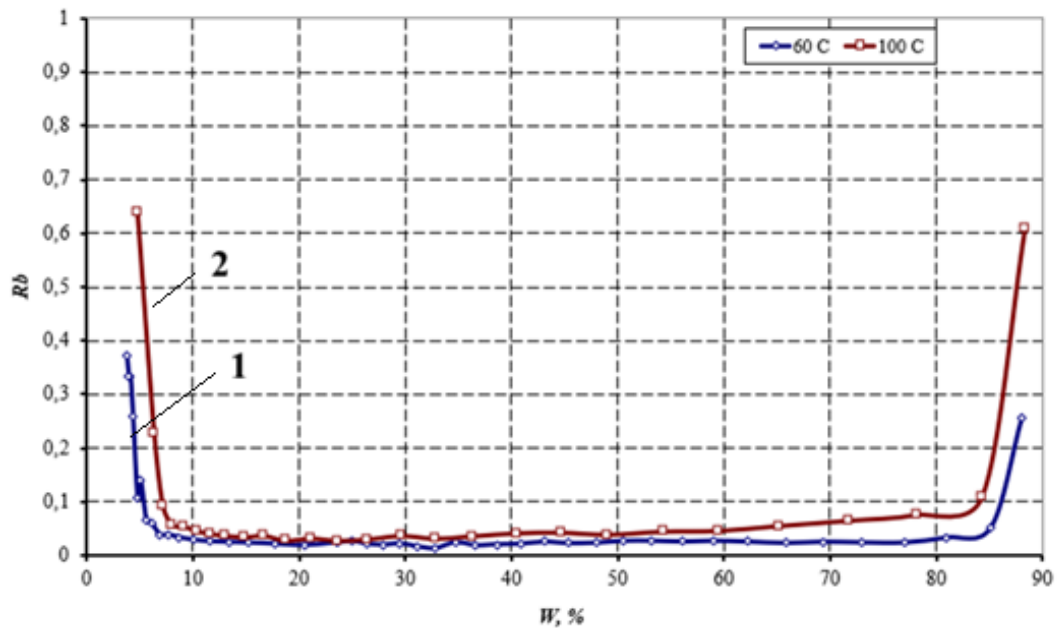


Рис. 3.49. Зміна критерію оптимізації сушіння шийтаке від температури теплоносія при $\delta = 10$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п.:

1 – 60 °C ; 2 – 100 °C

Ефективність процесу сушіння визначається критерієм оптимізації сушіння, який визначає відношення кількості теплоти, витраченої від нагрівання матеріалу до випаровування значної вологи за нескінченно малий проміжок часу.

З рис. 3.49 видно, що число критерію оптимізації сушіння Rb залежить від температури теплоносія та вологовмісту. Характер зміни критерію оптимізації сушіння доводить ефективність впровадження ступеневих режимів і свідчить про те, що теплота корисно витрачається на видалення вологи.

На рис. 3.49 зображено зміну критерію оптимізації сушіння (Rb) від температури теплоносія для культивованих грибів шийтаке. На початку процесу сушіння до вологості 84 % відбувається прогрівання матеріалу зі зменшенням його вологовмісту, при цьому критерій оптимізації сушіння (Rb) зменшується.

В період зміни вологості культивованих грибів шийтаке від 84 % до 10 % значення критерію оптимізації Rb мінімальне. В цей час більша частина теплоти витрачається на видалення вологи з матеріалу. Після точки вологості 10 % значення Rb різко збільшується, а значить більша частина теплоти витрачається на нагрівання матеріалу, що призводить до додаткових енергетичних витрат на процес та погіршення якості сушеного матеріалу. Характер зміни критерію оптимізації сушіння Rb доводить ефективність впровадження ступеневих режимів сушіння.

Величина критерію оптимізації Rb залежить від температурного коефіцієнту сушіння, питомої теплоємності вологого матеріалу та питомої теплоти випаровування, а відповідно від форми зв'язку вологи з матеріалом. Отже, немає сенсу підтримувати високу температуру теплоносія в останньому періоді процесу зневоднення.

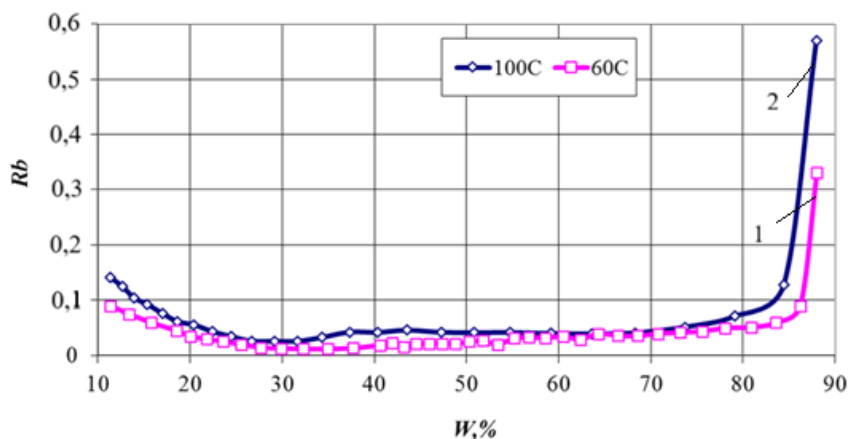


Рис. 3.50. Зміна критерію оптимізації сушіння Rb культивованих грибів ерінги від температури теплоносія при $\delta = 10$ мм, $V = 3$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п.:

1 – 60°C ; 2 – 100°C

На рис. 3.50 представлено зміну критерію оптимізації сушіння Rb культивованих грибів ерінги від температури теплоносія. Як видно з рисунку, криві мають схожий характер як і для грибів шийтаке.

3.8. Розрахунок тривалості та швидкості процесів сушіння білкововмісної сировини

Проводимо побудову кривої кінетики сушіння грибів Ерінги при температурі теплоносія 60°C в координатах $W - N_{max} \tau$, для визначення характеру процесу сушіння (рис. 3.51)

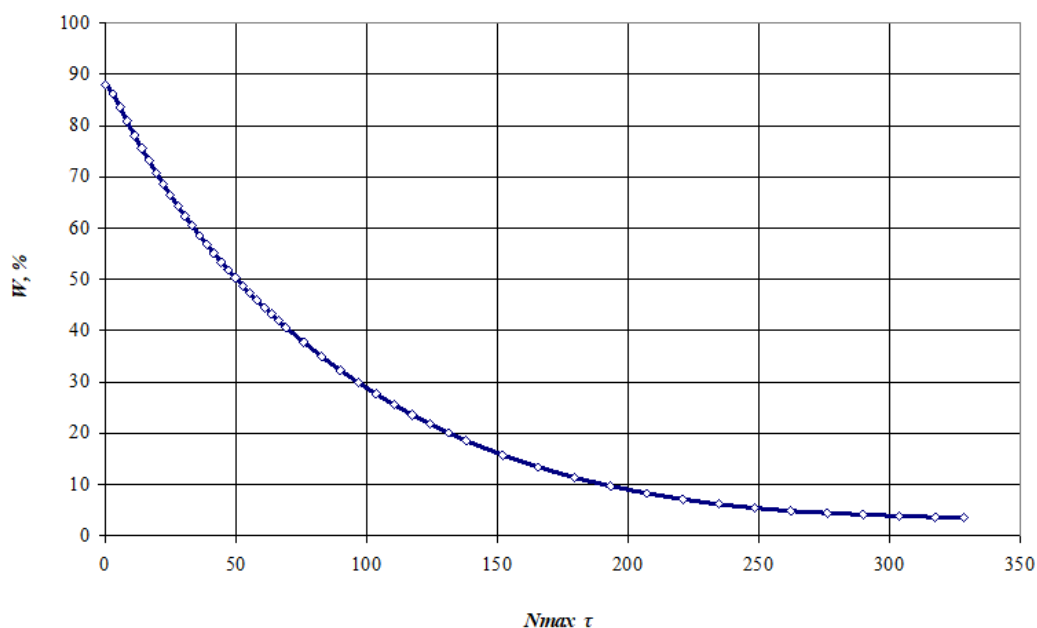


Рис. 3.51. Крива кінетики сушіння культивованих грибів Ерінги в координатах $W - N_{max} \tau$, при: $t = 60^{\circ}\text{C}$ $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.

Із кривої кінетики сушіння проводимо побудову кривої швидкості сушіння із визначення критичних точок (рис. 3.52). На кривих знаходиться два періоди, другий період ділиться на дві або три частини, виявлені критичні точки K_1, K_2, K_3 і K_4 . Відмінність виявляється лише в кількісному відношенні.

При математичному описанні кінетики вологообміну при сушінні в другому періоді, у зв'язку з викладеним, обов'язково повинні враховуватися величини емпіричних коефіцієнтів, обумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти, як правило, визначаються безпосередньо, з досліду по сушінню даного матеріалу.

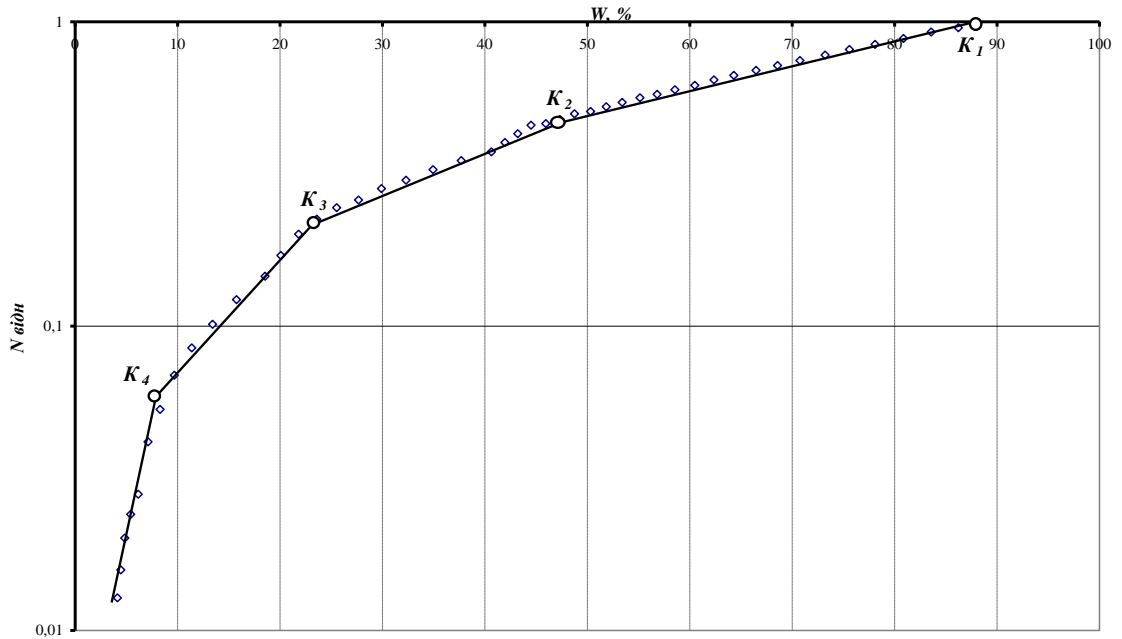


Рис. 3.52. Крива відносної швидкості сушіння культивованих грибів Ерінги при: $t = 60^{\circ}\text{C}$ $v = 3$ м/с, $d=10$ г/кг с.п.

Так як перший період сушіння відсутній, розглядаємо рівняння для другої періоду сушіння.

Другий період сушіння починається при всіх режимах в W_{K_1} і часу τ , рівного тривалості першого періоду сушіння.

Рівняння для першої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_1} - W_p) - K_1 \tau_1 \quad (3.6)$$

$$W_{K_1} \geq W \geq W_{K_2}$$

де K_1 – коефіцієнт сушіння 1-ої частини другого періоду;

τ_1 – час, який відраховується від початку 1-ої частини другого періоду.

Рівняння для другої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_2} - W_p) - K_2 \tau_2 \quad (3.7)$$

$$W_{K_2} \geq W \geq W_{K_3}$$

де K_2 – коефіцієнт сушіння 2-ої частини другого періоду;

τ_2 – час, який відраховується від початку 2-ї частини другого періоду.

Рівняння для третьої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{K_3} - W_p) - K_3 \tau_3 \quad (3.8)$$

$$W_{K_3} \geq W \geq W_{K_4}$$

де K_3 – коефіцієнт сушіння 3-ої частини другого періоду;

τ_3 – час, який відраховується від початку 3-ї частини другого періоду.

Рівняння для четвертої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(W_{K_3} - Wp) - K_4 \tau_4 \quad (3.9)$$

$$W_{K_4} \geq W \geq W_K$$

де K_4 – коефіцієнт сушіння 4-ої частини другого періоду;

τ_4 – час, який відраховується від початку 4-ї частини другого періоду.

Величина Wp являє собою рівноважну вологість матеріалу. Величина W_K визначає кінцеву вологість висушуваного матеріалу.

Відносні коефіцієнти сушіння легко визначаються з дослідної кривої за наступним виразом:

$$\chi_1 = \frac{\lg(W_{K_1} - Wp) - \lg(W_{K_2} - Wp)}{N \max \tau_1} \quad (3.10)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg(W_{K_2} - Wp) - \lg(W_{K_3} - Wp)}{N \max \tau_2} \quad (3.11)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg(W_{K_3} - Wp) - \lg(W_{K_4} - Wp)}{N \max \tau_3} \quad (3.12)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg(W_{K_4} - Wp) - \lg(W_K - Wp)}{N \max \tau_4} \quad (3.13)$$

Проводимо відповідні розрахунки відносних коефіцієнтів сушіння за формулами 3.10 – 3.13:

$$\chi_1 = \frac{\lg W_{K_1} - \lg W_{K_2}}{N \tau_1} = \frac{\lg 83,57 - \lg 47,32}{1,38 * 40} = 0,0045$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W_{K_2} - \lg W_{K_3}}{N \tau_2} = \frac{\lg 47,32 - \lg 23,59}{1,38 * 45} = 0,0048$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W_{K_3} - \lg W_{K_4}}{N \tau_3} = \frac{\lg 23,59 - 9,28}{1,38 * 65} = 0,0045$$

$$\chi_4 = \frac{\lg W_{K_4} - \lg W_K}{N\tau_4} = \frac{\lg 9,28 - \lg 4,12}{1,38 * 70} = 0,0036$$

Коефіцієнти K_1 , K_2 і K_3 – називають коефіцієнтами сушіння, чисельно рівне тангенсам кутів нахилу відрізків прямих до вісі τ в напівлогарифмічному анаморфозі. Величина цих коефіцієнтів залежить від роду вологого матеріалу, його властивостей, режиму і методу сушіння.

$$K_1 = \chi_1 N \quad (3.14)$$

$$K_2 = \chi_2 N \quad (3.15)$$

$$K_3 = \chi_3 N \quad (3.16)$$

$$K_4 = \chi_4 N \quad (3.17)$$

Проводимо розрахунки коефіцієнтів сушіння за формулами 3.14 – 3.17:

$$K_1 = \chi_1 N = 0,0044 * 1,38 = 0,0061$$

$$K_2 = \chi_2 N = 0,0048 * 1,38 = 0,0067$$

$$K_3 = \chi_3 N = 0,0045 * 1,38 = 0,0062$$

$$K_4 = \chi_4 N = 0,0036 * 1,38 = 0,005$$

Загальна тривалість процесу сушіння τ_T (без врахування періоду прогріву) складається з тривалості сушіння в першому періоді τ_1 , в 1-й τ_2 , 2-й τ_3 і 3-й τ_4 частинах другого періоду:

$$\tau_T = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \quad (3.18)$$

Загальна тривалість сушіння грибів Ерінги із врахуванням 4-х періодів сушіння становить:

$$\begin{aligned} \tau_T = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{\chi_1} \lg \frac{W_{K_1}}{W_{K_2}} + \frac{1}{\chi_2} \lg \frac{W_{K_2}}{W_{K_3}} + \frac{1}{\chi_3} \lg \frac{W_{K_3}}{W_{K_4}} + \lg \frac{W_{K_4}}{W_K} \right) = \frac{1}{1,38} \left(\frac{1}{0,0044} \lg \frac{83,57}{47,32} + \right. \\ \left. + \frac{1}{0,0048} \lg \frac{47,32}{23,59} + \frac{1}{0,0045} \lg \frac{23,59}{9,28} + \frac{1}{0,0036} \lg \frac{9,28}{4,12} \right) = 221 \text{ хв} \end{aligned} \quad (3.19)$$

На графіку представленому на рис. 3.14 тривалість процесу сушіння становить 240 хв, що більше на 19 хв за розрахункову, або похибка складає 8,5%.

3.9. Чисельне моделювання процесу тепломасопереносу при сушінні білкововмісної сировини

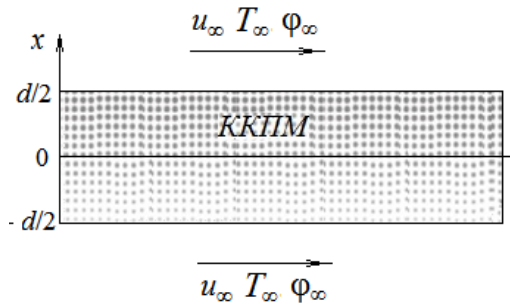


Рис. 3.53. Схема до фізичної моделі процесу конвективного сушіння ККПМ

Розроблена фізична та математична модель процесу сушіння сировини (колоїдних капілярно-пористих матеріалів, або ККПМ).

Колоїдні капілярно-пористі матеріали - це складні, дисперсні, гетерогенні матеріали, що мають тонку капілярну структуру (радіуси пор < 0,01 мм) і здатні до значної усадки та зміни об'єму при видаленні вологи. На відміну від звичайних пористих тіл, їхня структура еластична, а зв'язок вологи з матеріалом має адсорбційний характер. Колоїдні капілярно-пористі тіла характеризуються високим вмістом адсорбційно зв'язаної вологи, тому їх сушіння є енергоємним процесом.

Процес конвективного сушіння відбувається наступним чином: сировина, що знаходиться на піддоні, обдувається потоком теплоносія. З теплоносієм контактує зовнішня поверхня матеріалу, що висушується (рис. 3.53).

Розрахункові дослідження процесу тепломасопереносу в колоїдному капілярно-пористому матеріалі, що відбувається при конвекційному сушінні, виконуються шляхом чисельного розв'язання системи рівнянь, до якої входять:

- рівняння переносу вологи

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \text{div}(a_m \cdot \text{grad}(U)) + \text{div}(a_m \delta_i \cdot \text{grad}(T)) \quad (3.20)$$

- рівняння переносу енергії

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(T)) + r\varepsilon \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (3.21)$$

де U , $\text{кг}/\text{м}^3$ - питомий вологовміст матеріалу (сумарна маса рідкої води та водяної пари в одиниці об'єму матеріалу); T , К - температура; τ , с - час; a_m , $\text{м}^2/\text{с}$ - коефіцієнт дифузії води в капілярно-пористому матеріалі; δ_t , $\text{кг}/(\text{м}^3\text{К})$ - термоградієнтний коефіцієнт; c , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ - ефективна теплоємність матеріалу; ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$ - ефективна густина матеріалу; λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ - ефективна теплопровідність матеріалу; r , $\text{Дж}/\text{кг}$ - питома теплота випаровування; ε - коефіцієнт фазового перетворення, який характеризує відношення потоку водяної пари до сумарного потоку рідкої води та потоку пари. Його величина змінюється в межах від 0 до 1.

Чисельні дослідження виконуються для випадку конвекційного сушіння зразка ККПМ. Даний процес передбачає підведення теплоти конвекцією від розігрітого повітряного потоку до матеріалу, що висушується. Зразок матеріалу, що має форму прямокутного паралелепіпеда, розміщується в сушильній камері, у яку подається розігрітий теплоносій.

Задача тепломасопереносу розглядається в наближеній одновимірній постановці. Вважається, що тепломасообмін відбувається переважно в напрямку осі Ox (рис. 3.53), що перпендикулярний до поверхні зразка. Значення $x=0$ відповідає площині симетрії, а $x=d/2$ – поверхні матеріалу. Процес вважається симетричним відносно площини симетрії прямокутного зразка. Для випадку відносно малої товщини зразка d , а також при невисоких градієнтах температури, переносом води термодифузиею можна знехтувати.

Граничні умови до рівнянь (3.20), (3.21) на поверхні тепломасообміну мають вигляд:

$$-a_m \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=d/2} = \beta(C_{v,w} - C_{v,\infty}) ; \quad (3.22)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=d/2} = \alpha(T_w - T_\infty) + r(1 - \varepsilon_w)\beta(C_{v,w} - C_{v,\infty}) ; \quad (3.23)$$

де $C_{v,w}$ - відносна концентрація водяної пари в теплоносії біля поверхні тепломасообміну; $C_{v,\infty}$ - відносна концентрація водяної пари в теплоносії на значній відстані від поверхні; T_w - температура поверхні тепломасообміну; T_∞ -

температура теплоносія на значній відстані від поверхні; α , Вт/(м²К) - коефіцієнт тепловіддачі; β , кг/(м²с) - коефіцієнт масовіддачі.

Граничні умови на площині симетрії мають вигляд:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 ; \quad (3.24)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 . \quad (3.25)$$

Умова (3.22) встановлює рівність між сумарним потоком рідкої та пароподібної вологи, що надходить до поверхні з середини матеріалу, та потоком, що видаляється з поверхні матеріалу та надходить до теплоносія. В правій частині виразу (3.22) міститься різниця між відносною концентрацією водяної пари у повітрі біля поверхні тепломасообміну ($C_{v,w}$) та відносною концентрацією водяної пари в теплоносії на значній відстані від цієї поверхні ($C_{v,\infty}$). Величина $C_{v,\infty}$ має бути відомою з початкових умов задачі, так само як і температура теплоносія T_∞ . Величина $C_{v,w}$ визначається в ході розв'язання задачі в залежності від вологісного стану поверхні матеріалу. У випадку, коли вологовміст матеріалу біля поверхні масообміну перевищує величину максимального гігроскопічного вологовмісту, концентрація водяної пари визначається з умов для насиченої пари, що відповідають температурі цієї поверхні. Якщо вологовміст матеріалу біля поверхні менший за максимальне гігроскопічне значення, концентрація водяної пари визначається з ізотерми сорбції за величинами вологовмісту матеріалу біля поверхні та температури цієї поверхні.

Ізотерми сорбції зазвичай представляються у вигляді експериментально визначеної залежності рівноважної концентрації рідини у зразку W від відносної вологості повітря $\varphi = p_v/p_{v,s}$. Для її застосування при розв'язанні системи рівнянь (20), (21) цю залежність доцільно перебудувати у вигляді залежності рівноважного питомого вологовмісту матеріалу U від відносної концентрації водяної пари у повітрі $C_{v,w} = \rho_{v,w}/(\rho_{v,w} + \rho_{a,w})$. Для цього за величиною питомого вологовмісту на поверхні U_w визначається відносна

концентрація вологи у матеріалі W_w , що розраховується як відношення маси вологи до всієї маси вологого матеріалу:

$$W_w = \frac{U_w}{U_w + m_c/V}, \quad (3.26)$$

де m_c - маса сухого матеріалу; V - об'єм зразка.

За значеннями W_w та температури поверхні T_w по ізотермі сорбції визначається відповідна величина відносної вологості повітря φ . Далі відповідне значення відносної концентрації водяної пари в повітрі розраховується за формулою:

$$C_{v,w} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p_0}{\varphi p_{v,s}(T_w)} - 1 \right) \frac{R_v}{R_a}}, \quad (3.27)$$

де p_0 - тиск у пароповітряній суміші, p_v - парціальний тиск водяної пари, $p_{v,s}$ парціальний тиск насиченої водяної пари при температурі T_w , R_v ; R_a - газові сталі для водяної пари та сухого повітря відповідно.

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тепломасообміну визначається з відповідного рівняння подібності, що враховує режим течії теплоносія. У випадку, коли горизонтальний плоский зразок омивається турбулентним повітряним потоком, для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі можна скористатися рівнянням:

$$Nu_l = 0,037 Re_l^{0,8} Pr^{0,43} (Pr_a / Pr_w)^{0,25}, \quad (3.28)$$

де $Nu_l = \alpha l / \lambda_a$ - осереднене по поверхні теплообміну довжиною l число Нуссельта, $Re = u_\infty l / \nu_a$ - число Рейнольдса; $Pr = \nu_a / a_a$ - число Прандтля для повітря, u_∞ - швидкість незбуреного повітряного потоку; ν_a - кінематичний коефіцієнт в'язкості для повітря.

Коефіцієнт масовіддачі β можна за аналогією між теплопереносом та масопереносом визначити з наближеного співвідношення

$$\beta \approx \frac{\alpha}{C_a} \quad (3.29)$$

На відміну від граничних умов теплообміну третього роду на поверхні сухого матеріалу, граничні умови (3.23) для вологого матеріалу враховують теплоту випаровування рідкої вологи з поверхні. Ця теплота визначається другою складовою, що входить у праву частину виразу (3.23). Коефіцієнт фазового перетворення ε_w на поверхні тепломасообміну, що входить до граничної умови (3.23), визначає співвідношення між потоком водяної пари, що надходить до поверхні з середини зразка, до сумарного потоку пари та рідкої вологи. Якщо поверхня перезволожена, як це в ряді випадків має місце на початковій стадії сушіння, коефіцієнт ε_w можна прийняти рівним нулю. Це означає, що водяна пара утворюється лише на самій поверхні тепломасообміну і не надходить до поверхні з середини зразка. На заключній стадії сушіння, коли поверхня майже висушена, а випаровування здійснюється в глибинних шарах зразка, коефіцієнт ε_w матиме значення, близьке до одиниці. Це означає, що до поверхні тепломасообміну волога з середини зразка надходить лише у вигляді водяної пари. В цьому випадку фазового перетворення на самій поверхні не відбувається.

В першому наближенні можна прийняти $\varepsilon_w=0$, коли відносна вологість матеріалу біля поверхні тепломасообміну перевищує максимальне гігроскопічне значення, яке відповідає $\varphi=100\%$ і температурі поверхні матеріалу. Якщо відносна вологість матеріалу біля поверхні менша за максимальну гігроскопічну вологість, можна припустити, що значення $\varepsilon_w \sim 1$.

Початковими умовами для рівнянь перенесення теплоти і вологи є вихідні розподіли температури T та питомого вологовмісту U . Для розв'язання задачі задаються також швидкість u_∞ , температура T_∞ та відносна вологість теплоносія φ_∞ . Для чисельного розв'язання системи рівнянь (3.20), (3.21) з граничними умовами (3.22) - (3.25) застосовується метод скінчених різниць.

Для його використання розрахункова область $0 \leq x \leq d/2$ розподіляється на m кроків довжиною $\Delta x = d/(2m)$. Всередині кожного кроку визначаються розрахункові вузли, у яких записуються дискретні аналоги диференціальних рівнянь (3.20), (3.21).

Таким чином будується різницева розрахункова сітка. Граничні умови (3.22) - (3.25) також представляються в скінчено-різницевій формі.

Система різницевих рівнянь складається за неявною часовою схемою і розв'язується методом прогонки з застосуванням ітерацій. Коефіцієнти дифузії a_m , теплопровідності λ , теплоємності c , а також густина ρ і теплота випаровування r зазвичай залежать від вологовмісту та температури матеріалу, тобто від невідомих величин, що входять до цих рівнянь. Тому значення цих коефіцієнтів визначаються за величинами вологовмісту матеріалу і температури, що відносяться до попереднього часового кроку. Надалі значення цих коефіцієнтів уточнюються.

За наведеним методом виконується чисельне моделювання процесу конвекційного сушіння зразка культивованих грибів товщиною $d = 10$ мм. Швидкість повітряного потоку в сушильній камері $u_\infty = 3$ м/с, його температура $T_\infty = 60^\circ\text{C}$. Значення d для теплоносія складає 10 г/кг с.п.

Початкова маса зразка $m_0 = 35,1$ г. Його початкова температура $T_0 = 28,5^\circ\text{C}$. Маса сухого матеріалу $m_c = 4,35$ г. Теплофізичні властивості культивованих грибів, а також криві сорбції визначено експериментально.

За наведеними вихідними даними крім розрахункових досліджень проведено також експериментальні дослідження з метою порівняння їх результатів.

Для виконання розрахунків будується різницева сітка, що містить $m=100$ кроків на половині товщини зразка $d/2$. Крок за часом складає $\Delta\tau=1$ с. В результаті чисельного моделювання одержано розподіли по товщині зразка температури (рис. 3.54) в різні моменти часу.

Як видно з рис. 3.54, найбільш інтенсивна зміна у часі температури відбувається на поверхні тепломасообміну ($x=5$ мм). Зміну у часі температури матеріалу наведено на рис. 3.55.

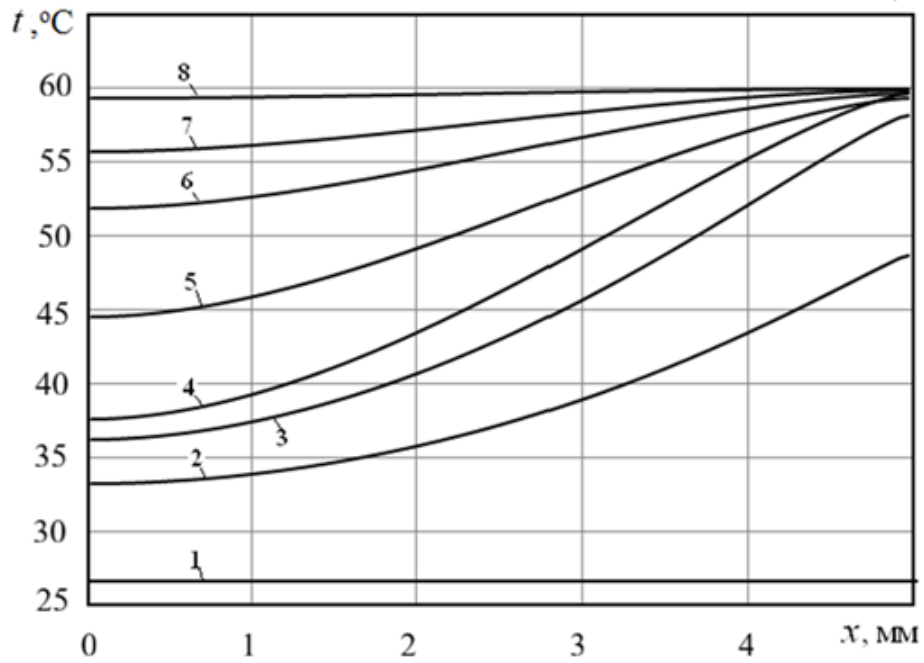


Рис. 3.54. Розподіл температури по товщині зразка в різні моменти часу при сушінні грибів ерінги:

- 1 – початковий; 2 – $\tau=10$ хв;
 3 – 20 хв; 4 – 30 хв; 5 – 40 хв; 6 – 50 хв; 7 – 60 хв; 8 – 90 хв

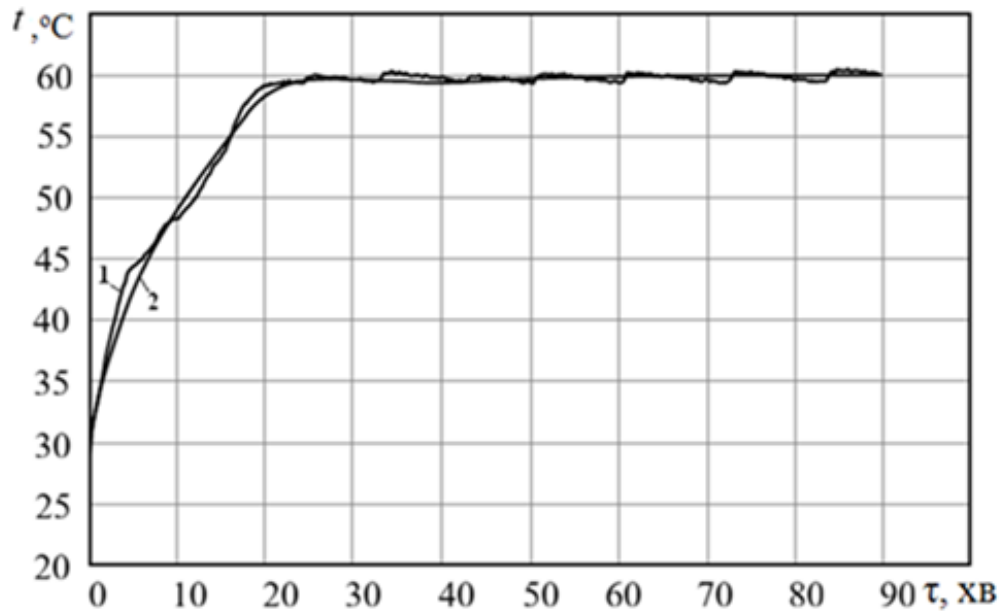


Рис. 3.55. Зміна у часі температури грибів ерінги:

- 1 – експеримент; 2 – розрахунок за моделлю

На рис. 3.55 наведено також порівняння результатів розрахунків за наведеною моделлю (крива 2) з результатами експерименту (крива 1). Як видно з цього рисунку, збіг результатів розрахунків осередненої температури з результатами експерименту достатньо задовільний. З рисунку також видно, що найбільш інтенсивна зміна температури відбувається протягом перших 20 хвилин. Найбільш інтенсивна зміна вологовмісту матеріалу відбувається протягом перших 30 хвилин.

За визначеною величиною питомого вологовмісту розраховується також зміна у часі сумарної маси води у досліджуваному зразку $m_w(\tau)$.

$$m_w = F \cdot \int_0^{d/2} U(x) dx \quad (3.30)$$

На рис. 3.56 наведено залежність цієї величини від часу (крива 1) та зміну у часі сумарної маси води у досліджуваному зразку, що отримана з експериментальних досліджень (крива 2). Як видно з порівняння цих кривих, на початковій стадії сушіння (протягом 40 хв) маса води в зразку, що одержана з розрахунків, більша, ніж та, що визначена з експерименту. На наступній стадії сушіння розрахункове значення маси води практично збігається з експериментальним значенням.

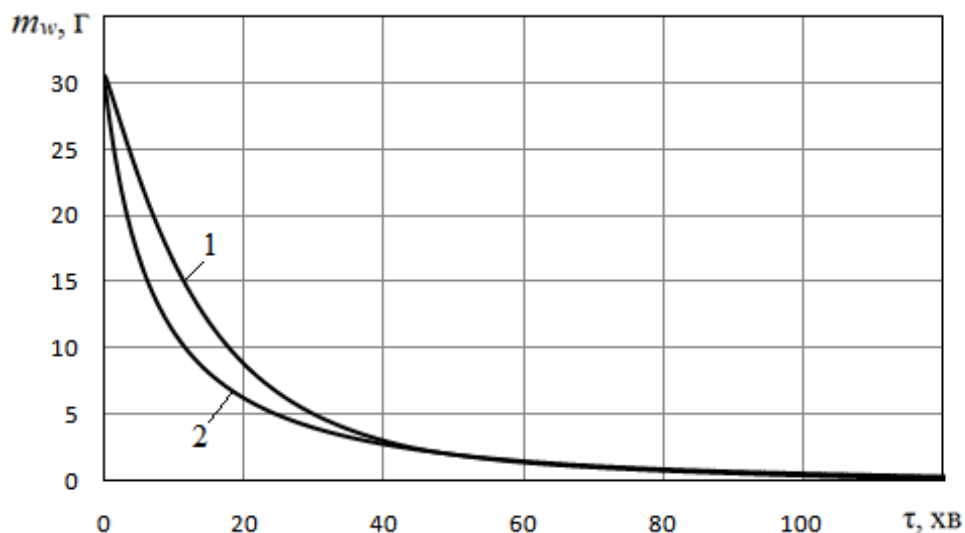


Рис. 3.56. Зміна у часі маси води у зразку, що досліджується:

1 – розрахунок за моделлю; 2 – експеримент

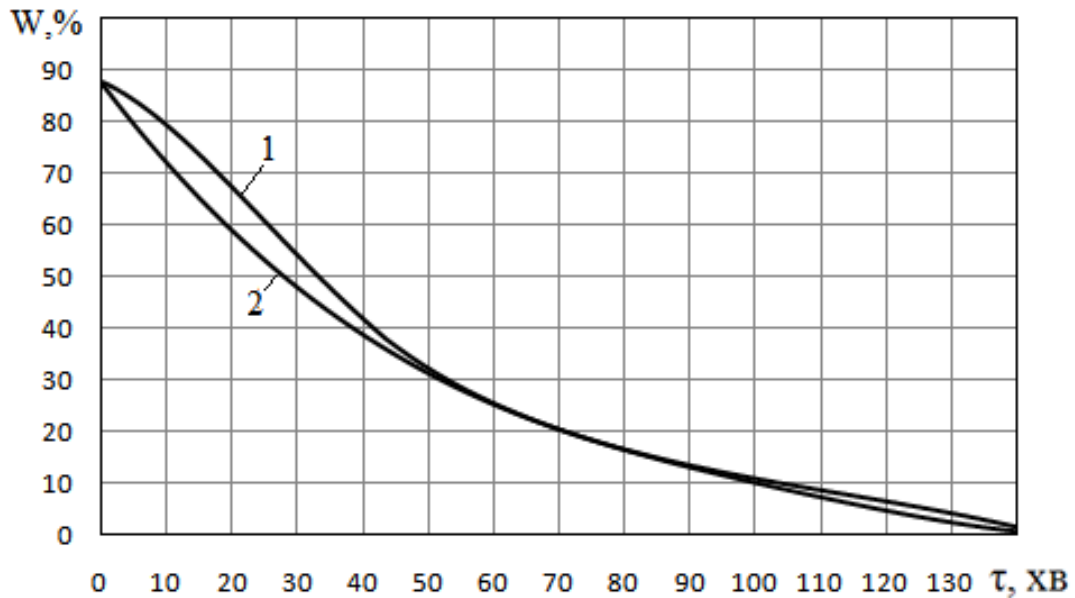


Рис. 3.57. Зміна у часі відносної концентрації вологи у зразку:

1 – розрахунок за моделлю;

2 – експеримент

Визначається також зміна у часі відносної концентрації вологи у зразку

$W(\tau)$:

$$W = \frac{m_w}{m_w + m_c} \quad (3.31)$$

Зміну у часі значень цієї величини, що отримані з розрахунків та з експерименту, представлено на рис. 3.57.

З порівняння розрахункових та експериментальних даних випливає, що за даною чисельною моделлю процес сушіння на початковій стадії протікає дещо повільніше, ніж це випливає з експерименту. Надалі інтенсивність висушування матеріалу, що визначається з розрахунків, виявляється практично однаковою, з тією, що одержана з експерименту.

За результатами розрахункових досліджень визначається також швидкість конвекційного сушіння досліджуваного зразку $\frac{dm_w}{d\tau}$. Залежність цієї величини від часу наведено на рис. 3.58. Як видно рисунку, на початковій стадії сушіння швидкість цього процесу зростає. Найбільша швидкість

сушіння зразка $dm_w/d\tau = 1,6$ г/хв спостерігається на початковій стадії сушіння. Далі швидкість сушіння починає спадати.

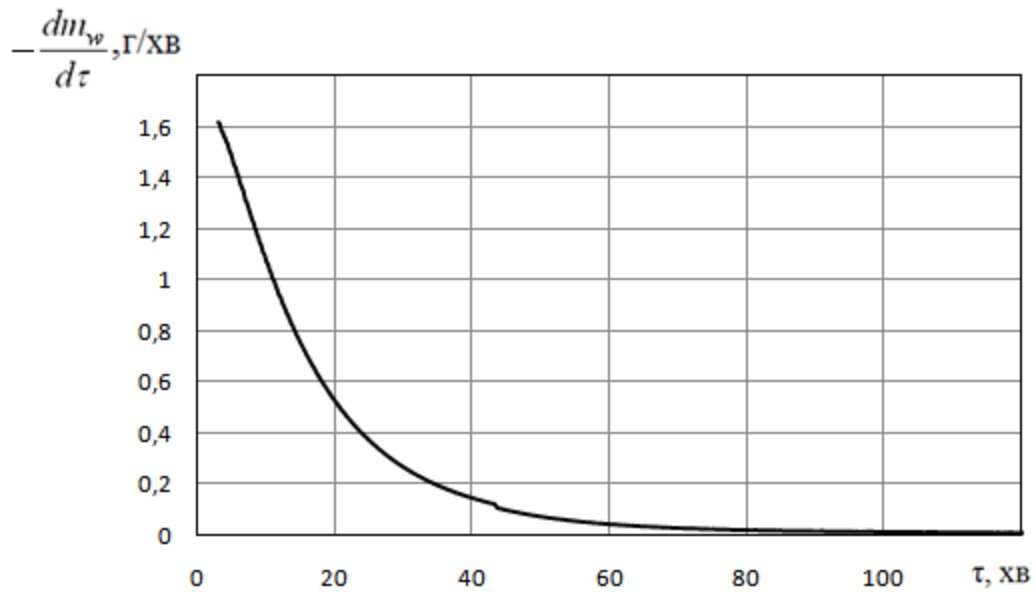


Рис. 3.58. Залежність від часу швидкості сушіння зразка

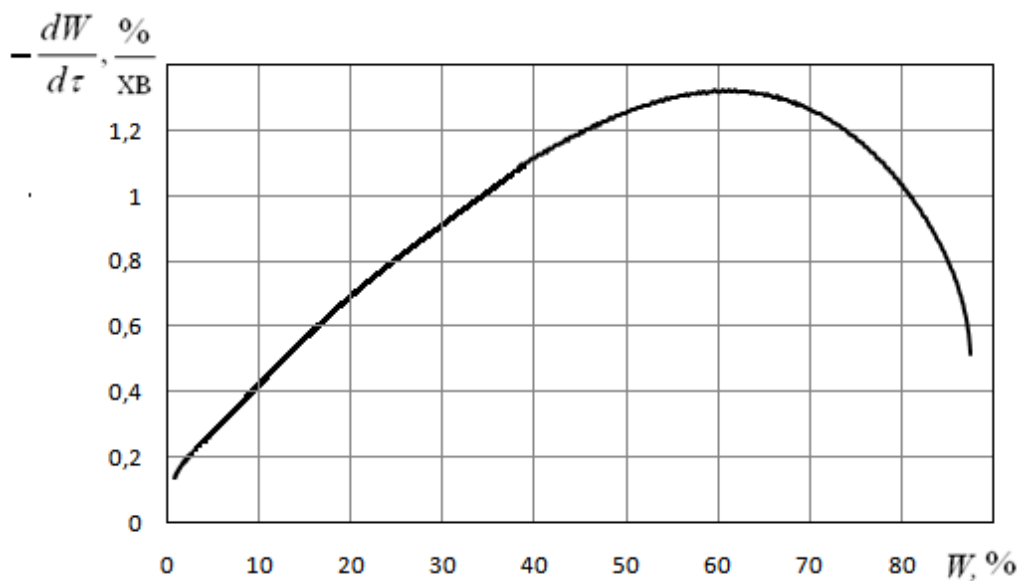


Рис. 3.59. Залежність від вологовмісту швидкості сушіння зразка

Даний характер зміни у часі швидкості сушіння пояснюється тим, що, як випливає з залежності (3.22), густина потоку маси з поверхні зразка зростає зі збільшенням відносної концентрації водяної пари $C_{v,w}$ біля цієї поверхні. Ця величина збільшується з ростом температури поверхні t_w та зменшується зі зниженням відносної концентрації вологи на поверхні W_w .

Оскільки в процесі конвекційного сушіння водночас зростає температура поверхні і зменшується її вологовміст, величина $C_{v,w}$ залежатиме від того, який саме з цих двох параметрів суттєвіше на неї впливає в даний момент часу. Таким чином, від початку сушіння величина $C_{v,w}$ зростає і при $W=60\%$ набуває максимального значення, а далі з часом починає спадати.

Порівняння результатів чисельного моделювання процесів конвекційного сушіння зразка ККПМ з експериментальними результатами показало їх достатньо задовільне якісне узгодження. Водночас спостерігається певна розбіжність у кількісних показниках даних результатів. Отже, розглянута розрахункова модель може бути використана для наближеного визначення характеристик процесу сушіння білкововмісної сировини, зокрема часу.

3.10. Висновки до третього розділу

1. Розроблено та обгрунтовано попередню підготовку білкововмісної сировини до сушіння, яка в подальшому дозволить зменшити енерговитрати.
2. Досліджено процеси сушіння білкововмісної сировини та підібрано ефективні режимні параметри, які дозволяють зменшити тривалість процесу у 1,5 – 1,7 р. у порівнянні з термолабільним режимом 60 °С.
3. Розрахований критерій оптимізації сушіння підтверджує ефективність розроблених режимів;
4. Вперше визначено теплоту випаровування та теплоємність культивованих грибів, які показали складність випаровування у порівнянні з випаровуванням чистої води;
5. Виконане чисельне моделювання колоїдних капілярно-пористих матеріалів, що показує достатньо якісне узгодження теоретичних розрахунків та експериментальних результатів.

Основні результати досліджень опубліковані в працях [155, 156, 157, 161, 162, 163, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 174, 175, 176, 178, 179, 183, 184, 186].

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ БІЛКОВОВМІСНОЇ СИРОВИНИ НА ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВІЙ КАМЕРНІЙ СУШАРЦІ З КОМБІНОВАНИМ НАГРІВОМ ТЕПЛОНОСІЯ

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблена дослідно-промислова камерна сушарка (рис. 4.1), яка складається із сушильної камери (1) в яку заїжджають два візки (5,7). Корпус, в свою чергу, поділяється на внутрішній та зовнішній [96].

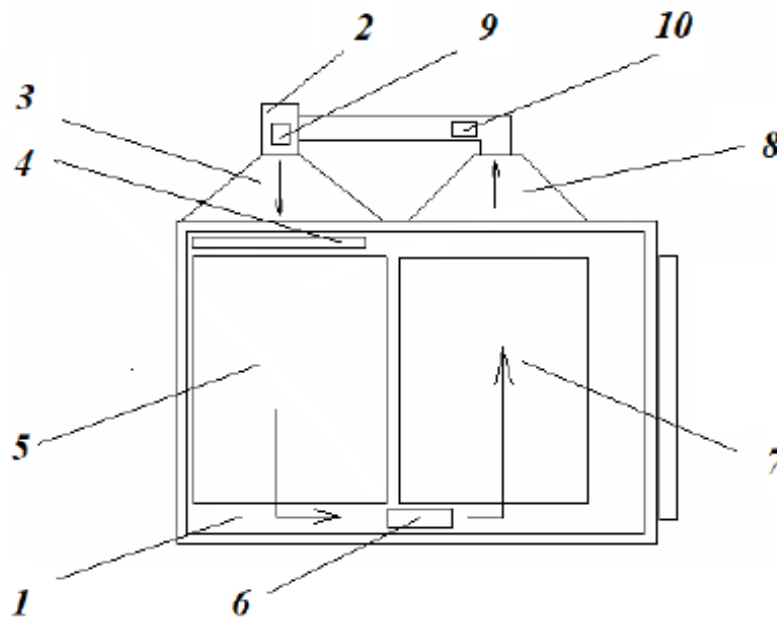


Рис. 4.1. Схема камерної сушарки:

1 – камера, 2 – відцентровий вентилятор, 3 – дифузorz, 4 – перша батарея нагрівальних елементів, 5 – перший візок, 6 – друга батарея нагрівальних елементів, 7 – другий візок, 8 – конфузorz, 9 – шибер, 10 – компенсуючий шибер [96]

Сушильна камера (1) ізольована базальтовою ватою, товщина шару якої коливається від 0,2 до 0,35 м. Встановлений вентилятор відцентрового типу (2) (продуктивність 4000 м. куб/год., робочий тиск 360 Па) на вході в сушильну камеру. Для нагріву теплоносія встановлені електричні товстоплівкові нагрівальні елементи (4,6) загальною потужністю 42 кВт. Кабелі, котрі

живлять нагрівальні елементи всередині камери, використали негорючого типу НГ із температурним допуском + 110 °С. Для роботи камерної сушарки передбачені автоматичні пристрої для регулювання: температури теплоносія (реле температури ТК - 6); час роботи (реле часу Т - 2); швидкість руху теплоносія (частотний регулятор).

В середині камери (1) також розміщені три реле для вимірювання вологи та температури РКВТ – 2/16. Вони розміщені на вході в сушарку теплового агента, між візками та на виході із сушарки теплоносія. Для регулювання викиду відпрацьованого теплоагенту в камерній сушарці передбачені шибер (9) та компенсаційний шибер (10) для підводу свіжого повітря [96].

Для збільшення ефективності всередині камери (рис. 5.1) змонтовані нагрівальні елементи, відповідно до руху теплового агента, нагрівальні елементи встановлені перед візками по всій їх висоті та розміщені навпроти піддонів. Відцентровий вентилятор (2) нагнітає повітря через дифузор (3) до першої батареї нагрівальних елементів (4), де воно нагрівається і потрапляє на перший візок (5). Після того як тепловий агент проходить перший візок, він насичується випареною вологою із матеріалу, та його температура знижується. Після першого візка тепловий агент потрапляє на другу батарею нагрівальних елементів (6), де догрівається та проходить другий візок (7) ще більше насичуючись випареною вологою із матеріалу, і його температура знижується. Після другого візка тепловий агент насичений вологою через конфузор (8) потрапляє до вентилятора (2) який нагнітає його знову в камеру, але перед цим через шибер (9) певна кількість відпрацьованого теплоносія виводиться за межі сушарки, через компенсуючий шибер (10), завдяки зоні розрідження, частково всмоктується свіже повітря. Таким чином сушильна установка працює з частковою рециркуляцією теплоносія. Якщо шибери (9,10) зачинені, то сушарка працює з повною рециркуляцією теплоносія. Нагрівальний елемент (рис. 4.2), який використаний в тунельній сушарці в кількості 42 шт [96].

Нагрівальні елементи розміщені на протилежних стінках тунельної сушарки по 21 шт. (рис. 4.3). Кількість нагрівальних елементів 21 + 21 шт., потужність кожного елемента 1 кВт, відстань між елементами 60 мм [96]. На рис. 4.4 представлено зовнішній вигляд дослідно-промислової камерної сушарки.



Рис. 4.2. Товстоплівковий нагрівальний елемент тип якого використаний в тунельній сушарці HE 385x75x3мм; U-220 В; P-1000 Вт [96]

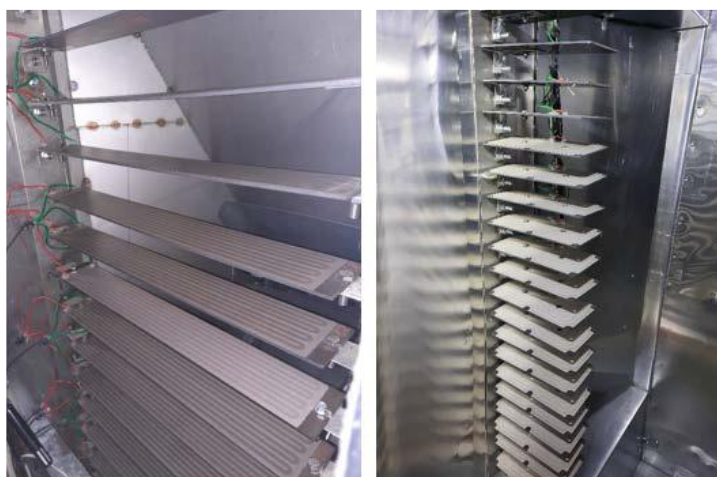


Рис. 4.3. Товстоплівкові нагрівальні елементи встановлені в тунельній сушарці [96]



Рис. 4.4. Енергоефективна камерна сушарка для сушіння рослинної сировини:

а – вигляд спереду, б – шафа керування, в – вигляд з візками [96]

Технічна характеристика дослідно-промислової камерної сушарки представлена в таблиці 4.1. Продуктивність по вологій сировині становить 100 кг, температура теплоносія може варіюватись в межах від 50 до 100 °С, також в сушарці передбачено розташування інфрачервоних ламп, що дозволяє сушити сировину комбінованим інфрачервоно-конвективним способом. Загальна потужність установки становить 43,5 кВт, а загальна площа сушіння становить 20 м².

Таблиця. 4.1.

Технічна характеристика дослідно-промислової камерної сушарки

Продуктивність по вологій сировині, кг	100
Температура сушіння матеріалу, °С	50 – 100
Швидкість руху теплоносія, м/с	1 - 5
Загальна потужність установки, кВт	43,5
Продуктивність вентилятора, м ³ /год.	3000
Тиск вентилятора, Па	380
Кількість візків в установці, шт.	2
Кількість піддонів на візку, шт.	20
Загальна площа сушіння, м ²	20
Габаритні розміри сушарки, м	1,43x1,87x1,79

Процес зневоднення відбувається таким чином: сировина проходить підготовку до сушіння та викладається моношаром на піддони, які завантажуються на візки, а ті в свою чергу поступають в сушарку. Після цього сушарка закривається ролетою. Шибери ставимо в положення «закрито». Задаємо на реде часу і температури необхідні режими зневоднення і вмикаємо сушарку. При цьому температура в камері за повної рециркуляції теплоносія швидко зростає та досягається необхідне значення. Після цього шибери переводять в робоче положення «відкрито».

4.1. Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини

тваринного походження з м'яса курятини, свинини, та яловичини

Характер процесу сушіння найбільш точно описується кривими тривалості та швидкості сушіння. На рис. 4.5 представлені криві сушіння подрібненої м'ясної сировини при наступних параметрах сушіння: температури теплоносія $t = 60$ °С, швидкості руху теплоносія $V = 3$ м/с, товщина матеріалу $\delta = 5$ мм, вологовміст повітря $d = 10$ кг/г с.п [191].

Процес триває 300 хв. Крива 1,1' показує режим сушіння без зміни напрямку потоку, а 2,2' - зі зміною напрямку потоку теплоносія. Як видно, температура матеріалу зростає поступово протягом всього процесу для обох режимів (криві 1',2'). Криві 1,2 вказують на зміну вологості матеріалу. Як видно з рис. 3, після зміни напрямку потоку теплоносія на 120 хв (крива 2), видалення вологи у випадку зміни потоку теплоносія стає більш інтенсивним, починаючи із 150 хв експерименту. Тобто, вологість матеріалу при режимі без зміни потоку теплоносія становить 18 % на 300-ій хв., а при режимі зі зміною напрямку потоку - цю ж вологість досліджуваній зразок має вже на 250 хв.

Кінцева температура нагрівання м'яса при сушінні без зміни напрямку потоку сушильного агента становить $57,7$ °С, із зміною напрямку потоку $59,3$ °С. Інтенсивність процесу сушіння в камерній сушарці обмежено температурою нагрівання продукту, тому сушіння проводиться при низьких температурних параметрах теплоносія, яка не повинна перевищувати 60 °С. Тому для прискорення процесу сушіння вибрано зміни напрямку потоку сушильного агента.

Даний спосіб дозволяє зменшити тривалість сушіння на 50 хв, або на 20 %, що також підтверджено даними, отриманими раніше [192]. Найбільш доцільно, провести зміну напрямку на 120 хв або через 2 години, в області зниження видалення вологи з матеріалу.

Були отримані криві сушіння та швидкості сушіння на енергоефективній камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія. Криві швидкості сушіння (рис. 4.6) показують зміну вологи матеріалу за одиницю часу (dW/dt).

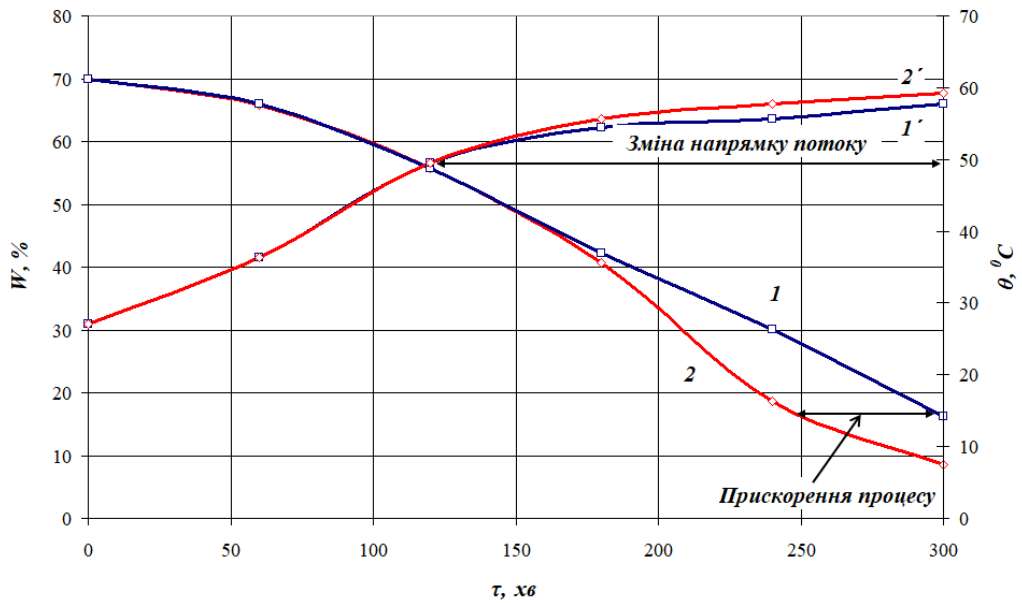


Рис. 4.5. Криві сушіння подрібненої м'ясної сировини на дослідно-промисловій камерній сушарці при $t = 60^{\circ}\text{C}$, $V = 3 \text{ м/с}$, $\delta = 5 \text{ мм}$, $d = 10 \text{ кг/г с.п.}$:

- 1 – без зміни напрямку потоку; 2 – із зміною напрямку потоку;
- 1' – температура в середині матеріалу без зміни напрямку потоку;
- 2' – температура в середині матеріалу із зміною напрямку потоку

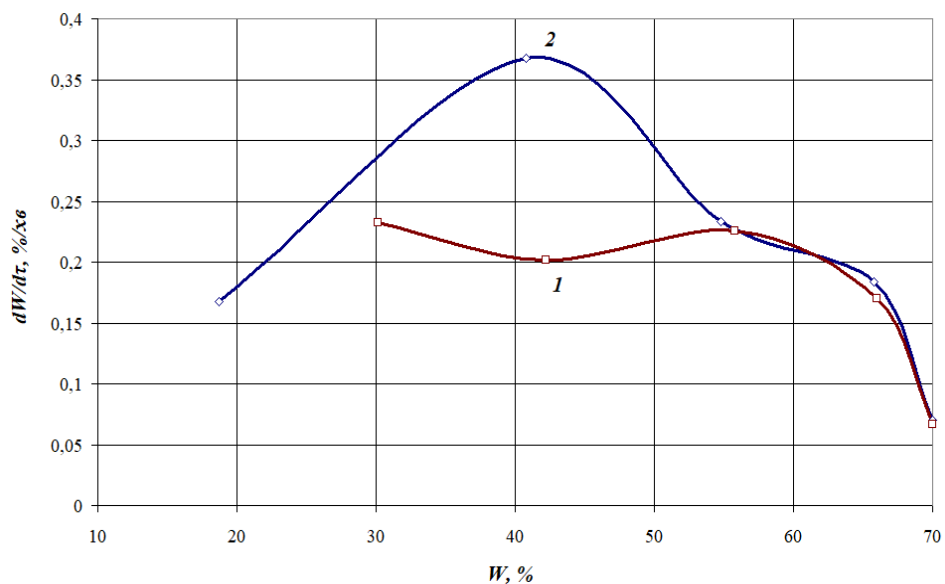


Рис. 4.6. Криві швидкості сушіння подрібненого м'яса курятини в енергоефективній камерній сушарці при $t = 60^{\circ}\text{C}$, $V = 3 \text{ м/с}$, $\delta = 5 \text{ мм}$, $d = 10 \text{ кг/г с.п.}$:

- 1 – без зміни напрямку потоку; 2 – із зміною напрямку потоку

Як видно з рисунку, максимальна швидкість сушіння без зміни напрямку потоку сушильного агента складає 0,22 %/хв. (крива 1), а із зміною – 0,37 %/хв. (крива 2). Отже, максимальна швидкість сушіння зі зміною потоку теплоносія є в 1,68 раз вища.

4.2. Дослідження кінетики сушіння білкововмісної сировини з культивованих грибів

З метою підвищення інтенсифікації процесу зневоднення культивованих грибів на дослідно-промисловій установці було застосовано конвективний 60 °С та комбінований спосіб сушіння 3800 Вт/м²+60 °С, який раніше був досліджений на експериментальному сушильному стенді.

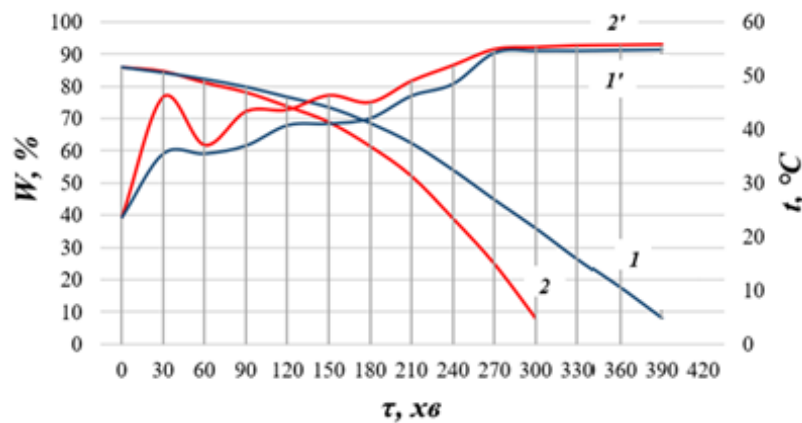


Рис. 4.7. Зміна вологості та температури культивованих грибів печериця звичайна в залежності від способу сушіння на дослідно-промисловій сушарці:

1,1' – 60 °С, 2, 2' – 3800 Вт/м²+60 °С

На рис. 4.7 представлено зміну вологості та температури культивованих грибів печереця звичайна в залежності від способу сушіння на дослідно-промисловій установці. Як видно з температурної кривої 1', за сушіння конвективним способом 60 °С, на початку процесу відбувається прогрівання матеріалу. Випаровування вологи в першому періоді змінюється по прямій лінії. Після цього швидкість випаровування вологи починає зменшуватися і починається другий період процесу сушіння. За комбінованого способу зневоднення 3800 Вт/м²+60 °С (крива 2'), на початку процесу сушіння, коли подається теплота від двох енергоносіїв, спостерігається різке зростання

температури матеріалу до 46 °С. Так відбувається протягом перших 30 хв експерименту. Після цього теплоносії інфрачервоного випромінювання вимикали і далі процес продовжувався за конвективного сушіння 60 °С. Відповідно, температура матеріалу при цьому різко знижувалась, а далі поступово збільшувалась до кінця процесу. Однак, як видно з рисунку при комбінованому способі температура матеріалу весь процес була вищою у порівнянні із конвективним способом.

Як видно з кривих 1,2 зміна вологості відбувається на початку процесу однаковою, проте після 45 хв експерименту спостерігається, що випаровування вологи матеріалу відбувається інтенсивніше при комбінованому способі і так триває до кінця процесу. Відповідно, за 300 хв експерименту за конвективного способу матеріал досягнув позначки вологості 35 %, а за комбінованого до 8 %. Для досягнення вологості матеріалу 8 % при температурі теплоносія 60 °С тривалість процесу становить 390 хв, що на 90 хв довше, ніж при комбінованому 3800 Вт/м²+60 °С.

4.3. Розрахунок витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи в залежності від температури

На рис. 4.8 представлена діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу при режимі сушіння $t = 55$ °С культивованих грибів печериця звичайна. Процес сушіння культивованих грибів на дослідно-промисловій камерній сушарці становить 300 хв. На початку процесу сушіння відбувається інтенсивне випаровування вологи. Наприклад, за перші 30 хв експерименту було випарено 2,332 кг вологи, через наступні 30 – ще 2,213 кг вологи.

Із діаграми видно, що на початку процесу перші 30 хв спостерігаємо високі енергетичні витрати на нагрів матеріалу. Далі, по мірі прогрівання, витрати енергії зменшуються (на 90 хв) майже вдвічі. Це говорить про те, що матеріал прогрівся і почала випаровуватись волога. На даному етапі ми маємо найбільш енергоефективний показник. З 90 хв по 240 хв спостерігаємо більш-менш рівномірну витрату енергії, яка незначно зростає, а випаровування вологи в цей час зменшується. З 240 хв бачимо різке зростання витрат енергії

при мінімальному випаровуванні вологи. Це триває до 300 хв. При цьому енергія витрачається на нагрів матеріалу. Процес сушіння необхідно зупиняти.

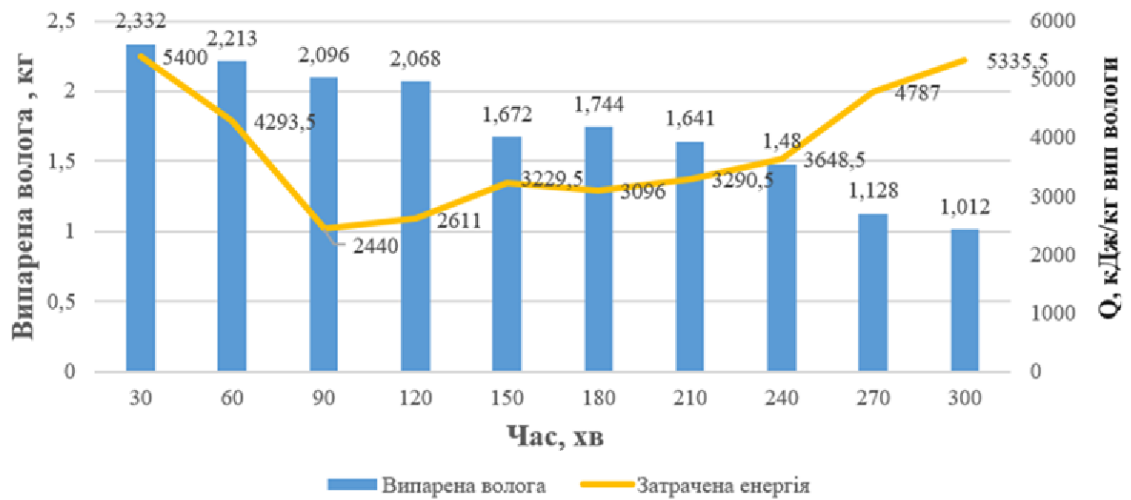


Рис. 4.8. Діаграма погодинних витрат енергії на випарену вологу при комбінованому інфрачервоно-конвективному способі сушіння $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60 \text{ }^\circ\text{C}$

Визначення енергетичних витрат на випаровування 1 кг вологи

$$E_y = \frac{E_{\text{вик}} \cdot 3600}{m_v}, \text{ кДж/кг вип. вологи} \quad (4.1)$$

де E_y – кількість затраченої енергії на 1 кг випареної вологи, кДж/кг вип. вологи

де $E_{\text{вик}}$ – кількість використаної енергії, кВт

m_v - маса випареної вологи, кг

Середні витрати енергії на випаровування 1 кг вологи становить 3800 кДж.

Оцінка якості сушарки оцінюється за її енергетичним к.к.д., який визначається співвідношенням корисної енергії до всієї витраченої на процес [96]:

$$\eta = \frac{q_{\text{кор}}}{q_{\text{витр}}} \quad (4.2)$$

Для будь якої сушильної установки використаною теплотою потрібно вважати тільки ту теплоту, яка затрачена на випарення вологи. Ця теплота (кДж/кг с.г.), віднесена до 1 кг сухого газу (повітря), записується у вигляді:

$$q_{\text{кор}} = r \frac{d_2 - d_1}{1000} \quad (4.3)$$

де: r – питома теплота пароутворення; вона приймається по середній температурі матеріалу:

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (4.4)$$

Якщо матеріал висушується до низької вологості, враховується також величина Δt – витрата енергії на подолання зв'язку вологи з матеріалом.

Витрачена теплота для конвективних сушарок являє собою телоту, що приймає 1 кг газу в калорифері:

$$Q_{\text{випр}} = c_p (t_1 - t_0) \quad (4.5)$$

Якщо рахувати на 1 кг випареної вологи, тоді:

$$\eta = \frac{r}{q_{\text{калориф}}}, \text{ або } \eta = \frac{r + \Delta r}{q_{\text{калориф}}} \quad (4.6)$$

де: r – питома теплота пароутворення, 2400 кДж/кг для вільної вологи, +10% для зв'язаної що становить 2640 кДж/кг;

$q_{\text{калориф}}$ – витрачена енергія, кДж/кг.

Застосувавши формулу 4.5, був розрахований коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) сушарки під час сушіння культивованих грибів.

$$\eta = \frac{r}{q_{\text{калориф}}} = \frac{2640}{3800} * 100 = 69 \%$$

4.4. Висновки до четвертого розділу

1. Досліджено кінетику сушіння м'яса та культивованих грибів на дослідно-промисловій камерній сушарці, що дозволяє зменшити енерговитрати на 25 %.

2. Визначено енергетичні витрати на процес зневоднення культивованих грибів, які в середньому становлять 3800 кДж/кг на 1 кг випареної вологи.

3. Розраховано коефіцієнт корисної дії сушарки при сушінні культивованих грибів, який становить 69 %.

Основні результати досліджень опубліковані в працях [191].

РОЗДІЛ 5.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДИСПЕРГУВАННЯ, ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА АДСОРБЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІЛКОВОВМІСНОЇ СИРОВИНИ

5.1. Дослідження процесів диспергування білкововмісної сировини рослинного походження

Як відомо, основою клітинної оболонки культивованих грибів є хітин, часто в комплексі з глюканами та іншими полісахаридами. Клітинна оболонка відповідає за жорсткість, захист та підтримку форми клітини. Хітинова стінка є відмінною рисою грибів, що відрізняє їх від рослин (целюлоза) та бактерій (муреїн) [193].

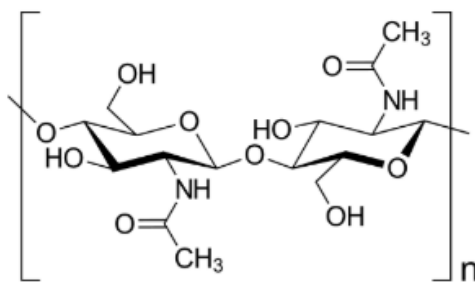


Рис. 5.1. Хімічна формула хітину [193]

Хітін (хімічна назва: полі-N-ацетил-D-глюкозо-2-амін) - азотовмісний полісахарид, який хімічно дуже схожий з целюлозою, лише замість гідроксила (—ОН) на кожному кільці (мономері) із 6 атомів Карбону розташована аміногрупа, в якій один з двох атомів Гідрогену заміщений на ацетильну групу (рис. 5.1) [193].

Організм людини немає ферменту хітиназа, який би руйнував та перетравлював цю хітинову оболонку при споживанні грибів. Тому для отримання повноцінного засвоєння організмом людини, гриби для харчування обов'язково мають бути подрібненими.

Будь-який сухий матеріал за необхідності може бути подрібнений до потрібного розміру. Твердий матеріал можливо зруйнувати і подрібнити до частинок бажаного розміру роздавлюванням, розколюванням, розламуванням, різанням, розпилюванням, стиранням, ударом та різноманвтними

комбінаціями цих способів. Подрібнення шляхом розколювання чи розламування відбувається під дією на тіло зосереджених навантажень. При цьому виникають місцеві напруги, які призводять до поділення тіла на частини. Подрібнювачі, які діють за принципом розколювання і розламування, ефективні при великому і середньому подрібненні. Це шокові, конусні та зубовалкові дробарки. В подрібнювачах роздавлюючої дії руйнація матеріалу відбувається при роздавлюванні між двома робочими поверхнями. До числа подрібнювачів роздавлюючої дії відносяться гладко-валкові дробарки, а також роликово-кільцеві вертикальні та горизонтальні млини. У подрібнювачів стрипуючо-роздавлюючої дії ефект досягається за рахунок стискування матеріалу між стискальними поверхнями й одночасно повороту однієї з поверхонь щодо іншої. Інакше кажучи, для одержання ефекту подрібнення витертої поверхні повинні у відповідних точках мати різницю лінійних швидкостей руху. Сюди відносяться жорна, бігуни, катково-тарільчасті, кулекільцеві і бісерні млини. У подрібнювачах ударного способу подрібнення матеріалу відбувається внаслідок дії ударних навантажень. Ці навантаження виникають при падінні мелючих тіл на матеріал, зіткнення швидколетючого матеріалу з нерухомою поверхнею, зіткнення матеріалу та мелючих тіл в польоті, зіткнення в польоті самих частинок одна з іншою. До подрібнювачів ударного способу дії відносяться молоткові, відцентрові, відцентрово-кульові, барабанні, пневматичні та струминні млини [194].

Аналіз млинів та методів подрібнення попередніми дослідженнями науковців показав, що для подрібнення сушеної сировини найбільш придатні млини ударного способу дії, які випускаються в Україні і достатньо продуктивні.

Харчові порошки отримуються внаслідок диспергування (подрібнення) сухого матеріалу та складаються із суміші частинок різного розміру. Розділення на різні фракції за величиною частинок відбувається з метою відділення порошкової частини, що застосовуються на харчові цілі. Харчова фракція відповідає дисперсності $< 0,5$ мм. Використання порошоків для

харчової та фармацевтичної промисловості потребує їх розділення на фракції $< 0,16$ мм, $< 0,25$ мм та інші [194].

Дослідження процесу подрібнення білкововмісної сировини рослинного походження одразу після сушіння проводили на молотковій дробарці та на лабораторному подрібнювачі, зовнішній вигляд яких представлений у другому розділі. Після подрібнення було проведено ситовий аналіз, результати якого представлені на рис. 5.2. Сепарація подрібненої суміші культивованих грибів відбувалася на комплекті сит, зібраних у послідовності 1,0; 0,63; 0,4; 0,315; 0,25; 0,16; 0,1, менше 0,1 мм та за допомогою установки для дослідження дисперсного складу рослинної сировини.

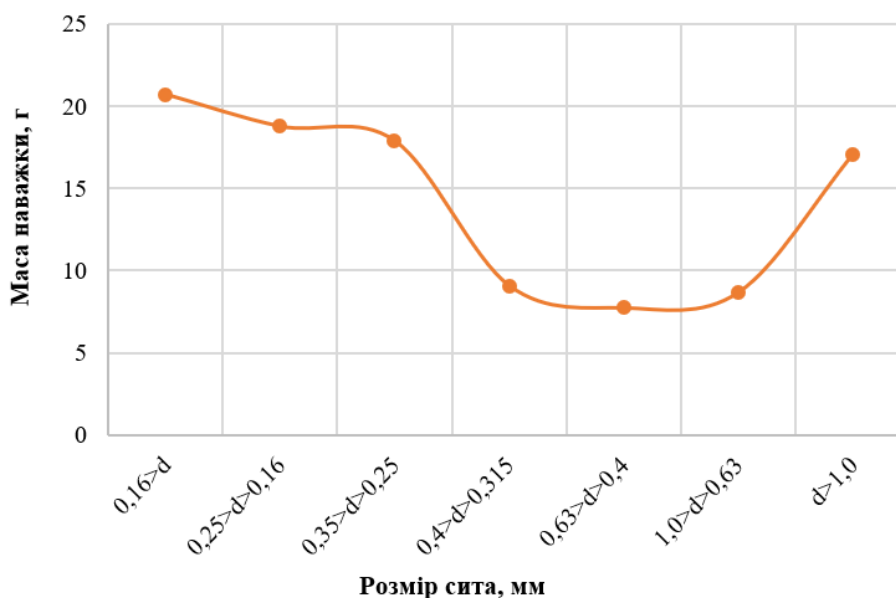


Рис. 5.2. Дослідження диспергування білкововмісної сировини рослинного походження після сушарки

Для аналізу відбирали 100 г досліджуваного зразка. При розгляді кривої розподілення фракції після молоткової дробарки спостерігається наступне. Найбільший вихід матеріалу 20,7 % є при фракції $d > 0,16$ мм, найменший 7,8 % - для фракції $0,63 > d > 0,4$ мм. Майже однаковий вихід матеріалу для фракцій з розміром сита від 0,4 до 0,63 мм із значенням від 8,7 % до 9,1 %.

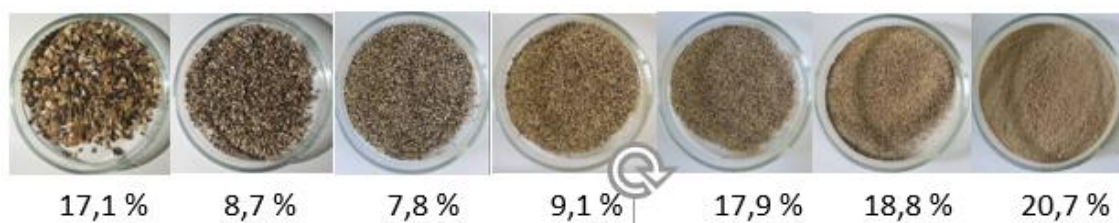


Рис. 5.3. Фото фракцій білкововмісної сировини рослинного походження з діаметром (d) сита від 1,0 до 0,1 мм

На рис. 5.3 представлено фотографії культивованих грибів печериця звичайна після розділення на фракції від розміру сит 1,0; 0,63; 0,4; 0,315; 0,25; 0,16; 0,1; < 0,1 мм (зліва направо). Як видно, порошок має нормальну сипучість, не комкується та має вигляд сушеного грибного порошку.

5.2. Визначення якісних характеристик білкововмісної сировини після сушіння

Основними характеристиками, які дозволяють об'єктивно оцінити правильність підібраних режимів зневоднення, якість висушеного продукту вважаються залишкова вологість матеріалу, регідратаційні властивості, збереження біологічно активних речовин, хімічний склад, колірність тощо.

Вплив режимних параметрів при зневодненні, особливо температури теплоносія впливає на досліджуваний матеріал та може повністю або частково призводити до втрати біологічно активних речовин в залежності від методу сушіння.

Таблиця 5.1.

Хімічний склад порошку печериць на 100 г с.р.

Показник	Порошок печериць
Волога, %	8,26
Білок, %	24,34
Жир, %	3,21
Вуглеводи, %	45,07
у т.ч. клітковина, %	9,22
Зола, %	9,90
Енергетична цінність, ккал	347,41

Таблиця 5.2.

Функціонально-технологічні властивості порошку печериць

Рослинна сировина	pH 1 % розчину, од.	Набухання, см ³ /г	Рівень гідратації	Водоутримуюча здатність, %	Жирутримуюча здатність, %
Порошок печериць	6,6	26,0	1,0:4,5	330,0	215,0

Хімічний склад порошку з культивованих грибів печериця звичайна, отриманого на дослідно-промисловій камерній сушарці, представлено у таблиці 5.1, а функціонально-технологічні властивості - у таблиці 5.2.

Як видно з таблиці 5.1, вміст білку у висушеному грибному порошку становить 24,34 %, жирів – 3,21 %, вуглеводів – 45,07 %. Вологість зразків становила 8,26 %. З таблиці 5.2 видно, що pH грибного порошку має нейтральний показник та становить 6,6, показник набухання 26 см³/г, а рівень гідратації 1,0:4,5.

Показник ВУЗ (водоутримуюча здатність) визначається у харчових порошках, які містять велику кількість білку. Водоутримуюча здатність обумовлена фізико-хімічними властивостями білків, що продукують збільшення поглинання води при дисоціації субодиниці молекули білку при її розвертанні [101].

Показник водоутримуючої здатності грибного порошку з печериць, висушеного на дослідно-промисловій камерній сушарці є на високому рівні та становить 330 %.

Для висушеної сільськогосподарської продукції регідратаційні характеристики часто використовуються як індекс структурної якості. Ці характеристики значною мірою залежать від умов сушіння, що застосовувалися [169].

Температура зневоднення впливає на стан білків та їх структуру у продуктах харчування. Процеси деструкції залежать від техноогічних

факторів, зокрема температура, тиск, наявність ферментів, присутність деяких компонентів у активній формі та інше. Типовим прикладом деконструованих білкових речовин є в залежності від температури дезагрегація колагену, а також руйнування білкового компоненту в реакції меланоїдиноутворення. При високих температурах, особливо в процесі смаження, випічки, білкові речовини здатні реагувати з цукровими речовинами із утворенням цукроамінних комплексів [164, 165].

Ще однією властивістю продуктів, що містять білки в значній кількості, є здатність до додаткової гідратації. Відповідно, до таких продуктів належать м'ясо, риба, яйця. Продукти, в складі яких присутня значна кількість вологи і мало білків, містять останні в повністю гідратованому стані, не здатними на додаткову гідратацію. До цих продуктів відносяться молоко (співвідношення вільної і зв'язаної води 87:3), більшість овочів, фруктів [164, 165].

Коефіцієнт регідратації (набухання) – це здатність продукту поглинати воду чи інші рідини. Продукт збільшується в об'ємі, але не розчиняється. Цей показник є вирішальним параметром, особливо при розробці сухих продуктів швидкого приготування [164, 165].

При регідратації високомолекулярної речовини розчинник проникає в його глибину. Цьому допомагає нещільна структура висушених або недостатньо зневоднених білкових речовин, яка складається із нитковидних та вигнутих макромолекул, що конформаційно сплетені разом. Молекули води проникають в глибину, заповнюють простір між макромолекулами, рухаючи їх один від одного та послабляючи міжмолекулярну взаємодію. В утворені щілини проникають нові молекули води, в результаті чого збільшується об'єм і маса зразку. Так, наприклад, при набуханні желатину, його об'єм збільшується в 14 разів [164, 165].

При гідратації білкових речовин розрізняють неорганічне та органічне набухання. Неорганічне набухання призводить до утворення розчинів, коли під дією розчинника молекули білка відриваються один від одного та переходять в розчин. Органічне набухання не закінчується розчиненням.

Більшість олігомерних білків набухають обмежено, так вони з'єднані на рівні четвертинної структури ковалентними зв'язками. Ковалентні зв'язки не руйнуються при гідратації та утримують свою структуру, що і робить набухання олігомерів обмеженим [164, 165].

Згідно принципу Ле-Шательє, швидкість набухання білкових речовин у воді з підвищенням температури та тиску збільшується, а ступінь найбільшого набухання зменшується [164, 165].

Взаємодія води з сухими залишками харчових продуктів має принципове значення з точки зору як організації технологічного процесу, так і якості готової кулінарної продукції. Дійсно, кількість води в технологічному процесі та її стан являються ключовими факторами забезпечення якості.

Білкові речовини в чистому виді і у складі білкововмісних продуктів в технологічному процесі здатні перетворюватись в бажаному напрямку тільки при наявності певної стадії гідратації. Не дивлячись на те, що стан білку на кожному етапі, ступінь його нативності визначається відношенням до води, можна констатувати, що рекомендації по регідратації білкових систем мають загальний характер та мають бути проаналізовані в кожному випадку окремо. Дійсно, білок, який піддавали будь-якому впливу, що призводить до часткової або повної денатурації, змінює своє відношення до води та характеризується більш вираженими гідрофобними властивостями. Тому, якщо є необхідність в технологічному процесі керувати поняттями «гідратація» чи «гідромодуль», потрібно розуміти, що це не просте співвідношення води та сухого залишку в продукті, а їх функціональна взаємодія. Гідратацію необхідно розглядати паралельно з денатурацією білкових речовин, їх модифікацією та станом води у продукті [164, 165].

Гідратацією називається процес зв'язування води сухою речовиною чи структурою продукту. Процес гідратації відноситься до складних колоїдних процесів. У відношенні сухих речовин, в тому числі білкових, коректно оперувати поняттям ступінь гідратації. Під ступенем гідратації слід розуміти,

наскільки реалізована здатність сухої речовини продукту переводити воду із структурно вільного стану у стан структурно зв'язаний [164, 165].

Гідратація білкових речовин може проходити при безпосередньому контакті білку чи білкововмісного продукту з водою, за рахунок адсорбції атмосферної або технологічної пароподібної вологи, чи за рахунок різного роду масопереносів, що виникають у технологічному процесі [164, 165].

Основними речовинами протоплазми клітини, які зв'язують воду за допомогою водневих зв'язків є білки, в поліпептидному ланцюгу яких знаходяться гідрофільні групи CO, NH₂, NH, ON, CON. Під час сушіння сировини білки частково денатурують та коагулюють, в результаті чого можлива колоїдна незворотність сушених продуктів. Взаємодія води з висушеним м'ясом має важливе значення в подальшому його використанні в продуктах швидкого приготування. Білкові речовини, у білкововмісних продуктах, в технологічному процесі приготування можуть мати важливе значення лише при наявності певної кількості води, яка йде на їх відновлення. Як правило, продукти з високим вмістом білку в значній кількості здатні до додаткової гідратації, оскільки вони можуть зв'язувати воду в значно більшій кількості, ніж вона фізично присутня в продукті. До таких продуктів відноситься м'ясо, риба, яйця. Продукти, в складі яких наявна значна кількість вологи та мало білків, останні повністю гідратовані та не здатні на додаткову гідратацію. До таких продуктів відносять молоко, більшість овочів та фруктів [164, 165].

Коефіцієнт регідrataції (K_p) показує відносне збільшення маси продукту після набухання і визначає здатність до відновлення початкових якостей матеріалу при зневодненні за методикою, яка представлена в другому розділі.

Тому важливим етапом є дослідження регідrataційних властивостей сушеного м'яса, культивованих грибів отриманого при різних способах його підготовки та режимах сушіння [195].

Відповідно після сушіння білкововмісної сировини тваринного походження визначали коефіцієнт регідrataції та відновлюваність для м'яса

свинини (рис. 5.4 та 5.5) та яловичини (рис. 5.6, 5.7). Досліджуючи м'ясо свинини визначали якісні показники для гранул та кубиків. При дослідженні коефіцієнту регідратації температура витримки становила 45 °С та 90°С. Як видно з рис. 5.4, зразки гранул мають коефіцієнт регідратації значно вищий, ніж для кубиків і становить від 3,2 до 4,2 при температурі витримки 45 °С, та від 3,7 до 4,7 при 90°С. Для кубиків найнижчий показник коефіцієнту регідратації є при температурі витримки 45 °С та способу зневоднення 55 °С та 80 °С – 2,3. Найвищий показник – 2,9 для комбінованого способу та при температурі витримки 90°С.

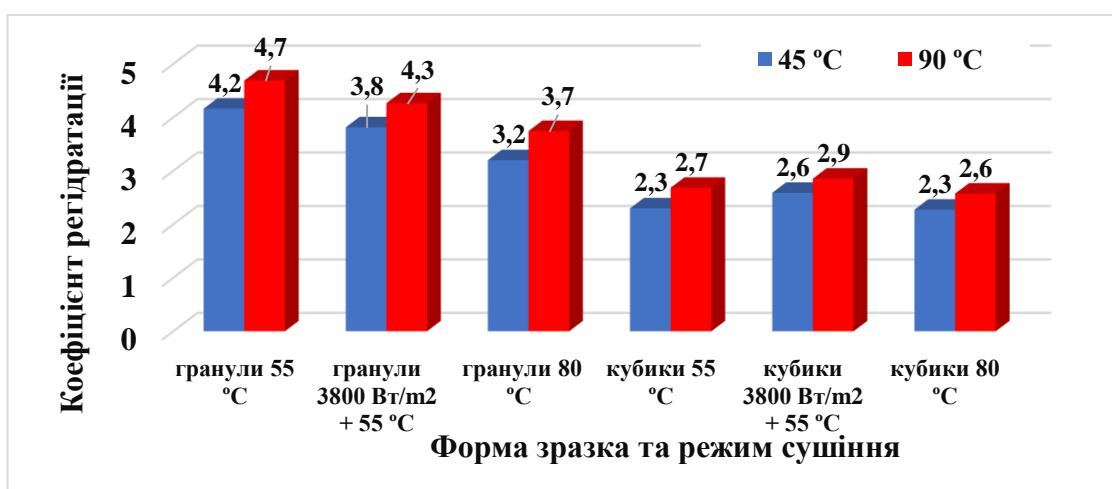


Рис. 5.4. Коефіцієнт регідратації м'яса свинини при температурі витримки 45 °С та 90 °С

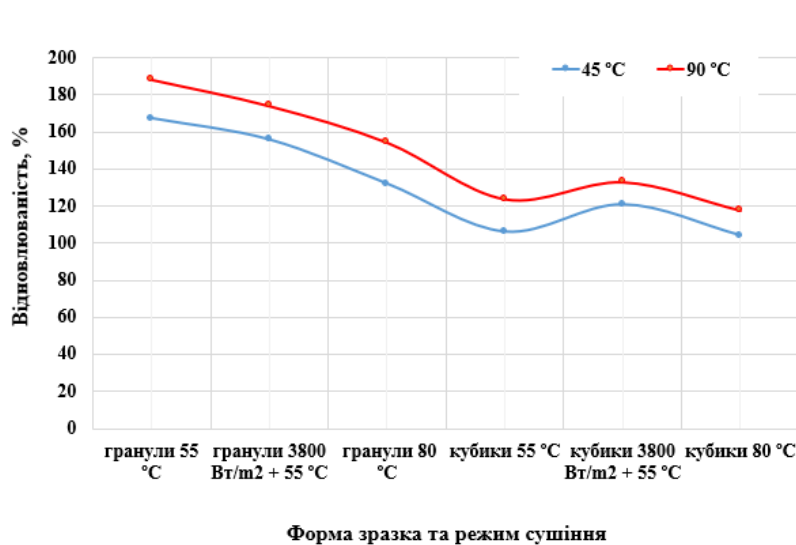


Рис. 5.5. Відновлюваність м'яса свинини при температурі витримки 45 °С та 90 °С

Відповідно, на рис. 5.5 спостерігаємо відновлюваність м'яса свинини при температурі витримки 45°C та 90°C. Як видно з рисунку, для гранул навіть при температурі витримки 45°C показник відновлюваності знаходиться в межах 130-170 %, а для кубиків – 100-120 %. За температури витримки 90 °C показник відновлюваності є ще вищим – 160-190 % для гранул, 120-130 % для кубиків.

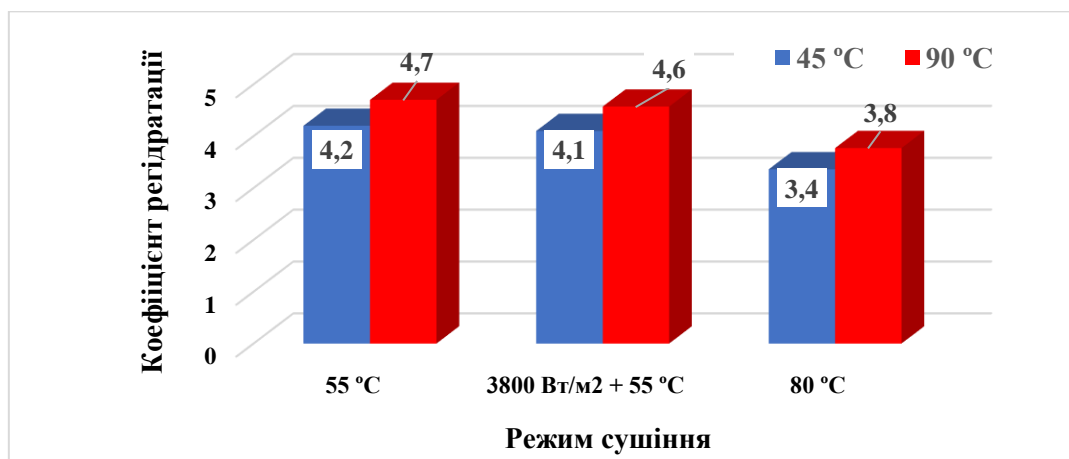


Рис. 5.6. Коефіцієнт регідрації м'яса яловичини при температурі витримки 45 °C та 90 °C

На рис. 5.6 та 5.7 представлено дослідження коефіцієнту регідрації та відновлюваності для м'яса яловичини у вигляді гранул, оскільки, як було визначено у третьому розділі, сушити м'ясну сировину у вигляді кубиків енергетично недоцільно.

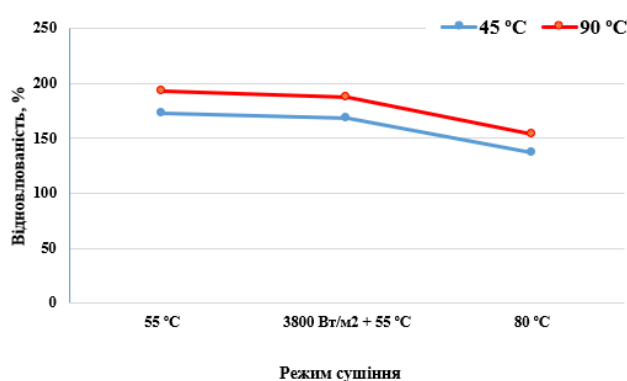


Рис. 5.7. Відновлюваність м'яса яловичини при температурі витримки 45 °C та 90 °C

Як видно, загальна тенденція спостерігається як і для м'яса свинини. Найбільший показник коефіцієнту регідрації для яловичини при температурі витримки 90 °C є 4,6 - 4,7, а також відновлюваність 185-195 %. Це свідчить про те, що розроблені режими зневоднення дозволяють зберегти якісні показники

білкововмісної сировини тваринного походження.

Дослідження з визначення коефіцієнту регідратації та відновлюваності показують можливість використання значно нижчих температур для відновлювання м'ясної сировини, що дає більш широкий діапазон для їх використання.

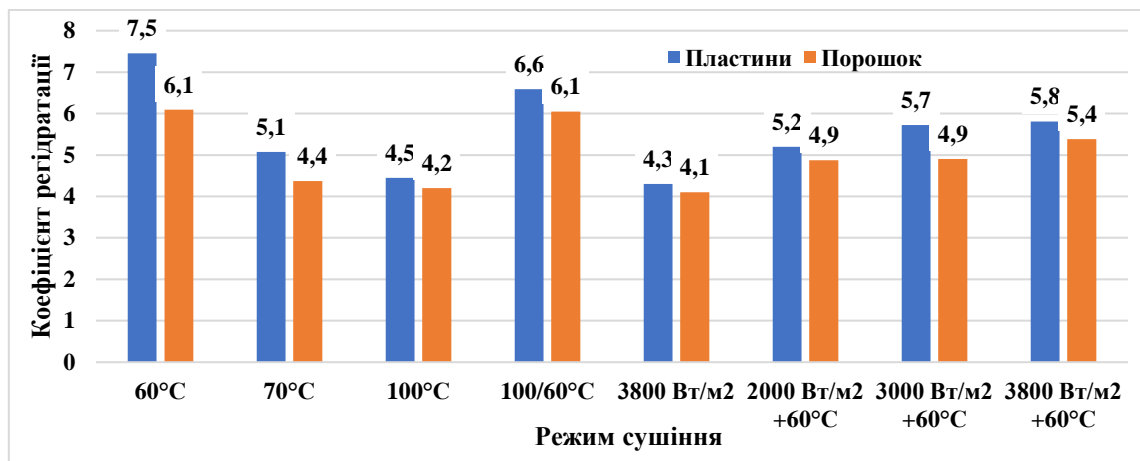


Рис. 5.8. Залежність коефіцієнту регідратації від режимів конвективного сушіння при температурі теплоносія 60 °С, 100 °С, 100/60 °С; при ІЧВ випромінюванні 3800 Вт/м² та при комбінованому методі інфрачервоно-конвективному 3800 Вт/м²+60°С культивованих грибів ерінги

На рис. 5.8. представлено залежність коефіцієнту регідратації від режимів сушіння. Досліджувався матеріал у вигляді пластин, які висушені на експериментальному стенді при різних температурних режимах теплоносія. Також з них були отримані зразки у вигляді порошку (рис. 5.4).

Найвище значення коефіцієнту регідратації – 7,5 - є для зразку (пластини), висушеного при температурі теплоносія 60°C. При температурі 100°C K_p зменшується на 40 % і є найнижчим. При сушінні грибів при інфрачервоному випромінюванні з потужністю лампи 3800 Вт/м² – K_p менше на 25 %. При ефективних конвективному двоступеневому та комбінованому режимах на 7-11 % та 5-7 % відповідно. Тобто, ці два режими не лише є енергоефективними, а й зберігають фізичні властивості матеріалу максимально.

Як видно з рисунку 5.8, коефіцієнт регідратації K_p зразків, які були представлені у вигляді пластини, для кожного режиму має на 9-12 % більше значення, ніж для зразків у вигляді порошків. На наш погляд, в шматочку структурний скелет фізично не порушується, а у порошкоподібному стані вже відбувається порушення скелету матеріалу, який стає мілкодисперним. Під час експерименту з порошку у воду виходять сухі речовини, тому нижча вага і відновлюваність, а в шматочку вони залишаються незмінними.

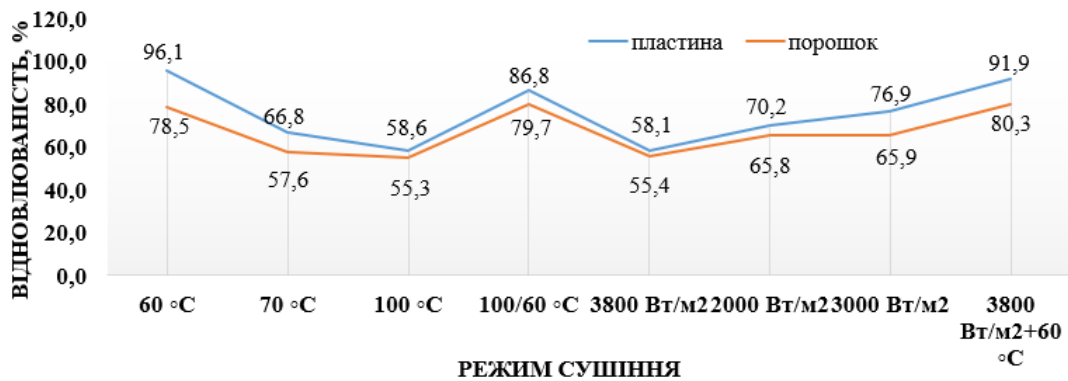


Рис. 5.9. Відновлюваність культивованих грибів ерінги у формі пластини та порошку після сушіння при різних режимах

На рис. 5.9 видно, що показник відновлюваності культивованих грибів ерінги є вищим для пластини, ніж для порошку для всіх представлених способів сушіння, так само як і коефіцієнт регідратації. Найвище значення відновлюваності є для режимів сушіння 60°C, комбінованого та конвективного двоступеневого, а найнижчий – для 100 °C та для сушіння інфрачервоним випромінюванням з потужністю лампи 3800 Вт/м².

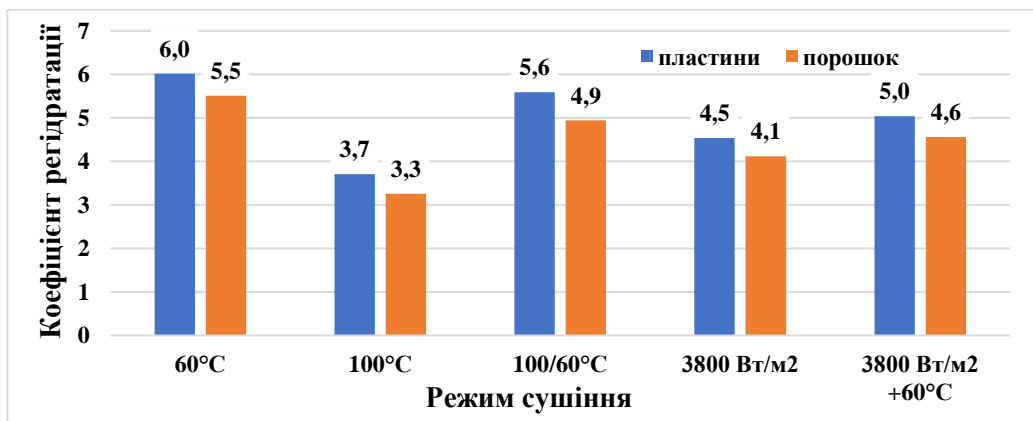


Рис. 5.10. Залежність коефіцієнту регідратації від режимів сушіння культивованих грибів шіітаке

На рис. 5.10 представлено коефіцієнт регідратації та на рис. 5.11 відновлюваність для культивованих грибів шіїтаке. Найвищий показник є для режимів: термолабільного 60 °С, комбінованого 3800 Вт/м²+60°С та конвективного двоступеневого 100/60 °С.

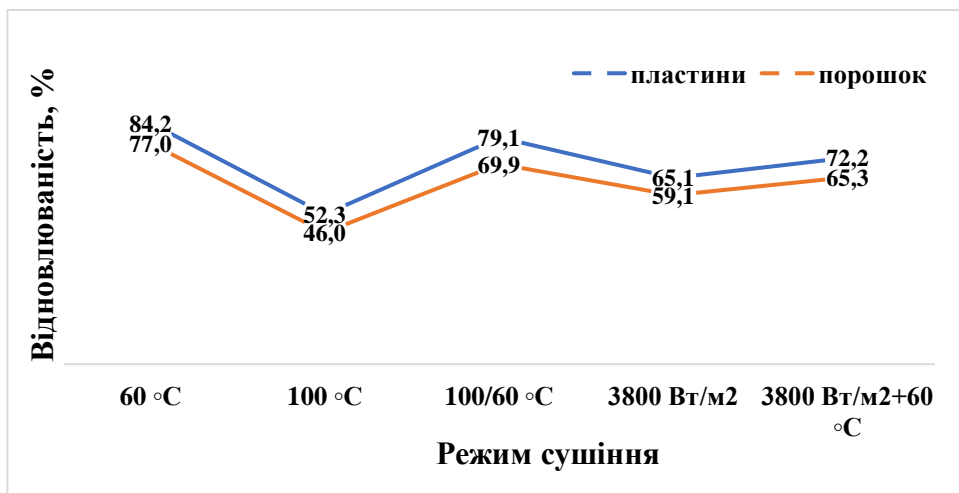


Рис. 5.11. Відновлюваність культивованих грибів шіїтаке у формі пластини та порошку після сушіння при різних режимах

Відновлюваність культивованих грибів шіїтаке у формі пластини при сушінні 60°С має найвище значення та становить 84,2 %, для комбінованого 3800 Вт/м² + 60 °С – 79,1 % та конвективного двоступеневого 100/60 °С – 72,2 %.

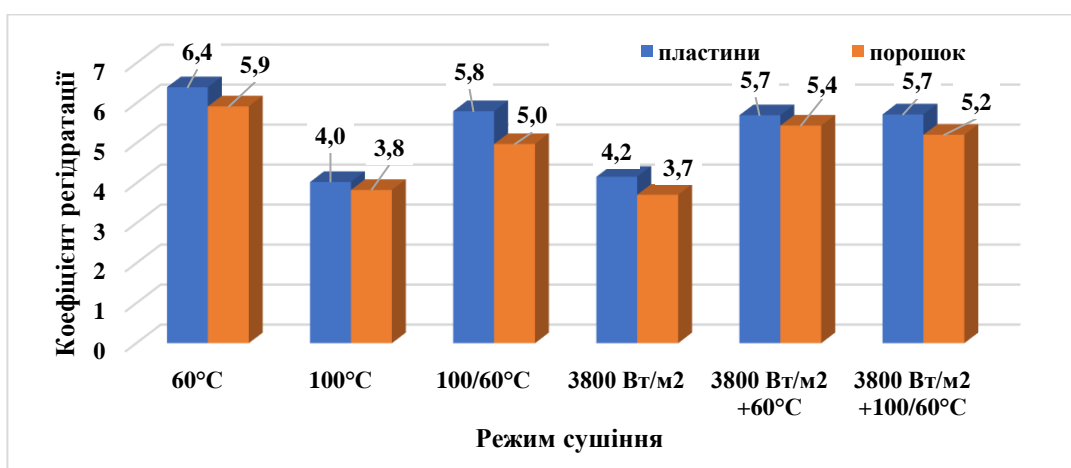


Рис. 5.12. Залежність коефіцієнту регідратації від режимів сушіння культивованих грибів глива звичайна

Схожа ситуація спостерігається і для культивованих грибів глива звичайна (рис. 5.12, 5.13). Отже, варто зазначити, що показники відновлюваності сухих досліджуваних зразків культивованих грибів показують найбільш оптимальні режими зневоднення з точки зору якості продукту.

Як описано в [43], коефіцієнт регідратації для грибів шийтаке при мікрохвильовому сушінні, мікрохвильовому-інфрачервоному випромінюванню 100 Вт та 200 Вт за різного абсолютного тиску від 18.66 кПа до 50.65 кПа становить від 2,7 (при 50,65 кПа) до 4,7 (при 18,66 кПа). Порівнюючи ці літературні дані з отриманими даними при наших дослідженнях, слід відмітити, що коефіцієнт регідратації при запропонованих нами способах зневоднення є значно вищими та становить від 3,7 при зневодненні інфрачервоном випромінюванням та до 6,4 при конвективному 60 °С.

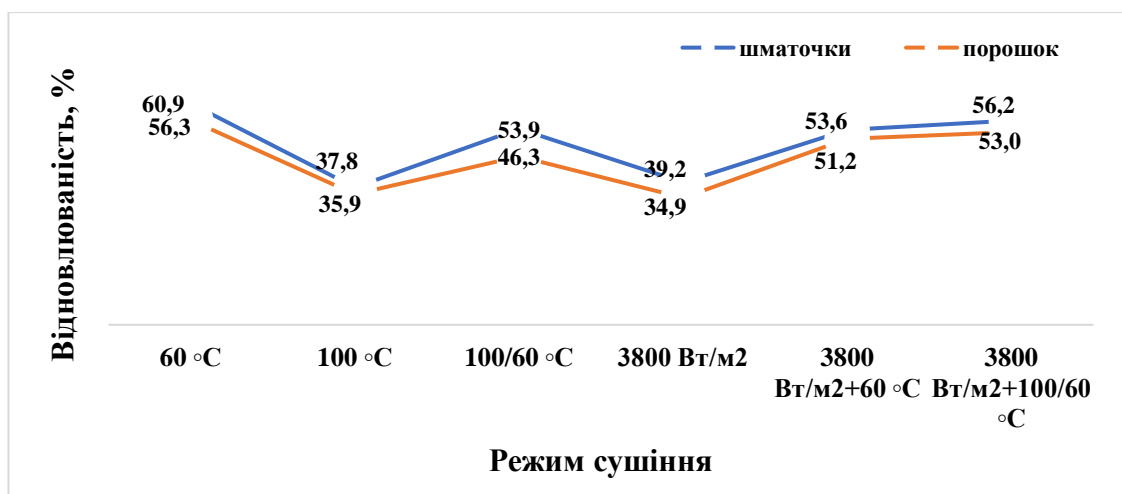


Рис. 5.13. Відновлюваність культивованих грибів глива звичайна у формі пластинок та порошку після сушіння при різних режимах

5.3. Дослідження процесів адсорбції білкововмісної сировини рослинного походження

Рівноважний вологовміст має важливе значення для розробки теплотехнологій отримання сухих білкововмісних харчових продуктів, що

визначає кінцевий вологовміст при сушінні, а також умови зберігання [188, 189, 190, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202].

Рівноважний вологовміст – це вміст вологи, при якому матеріал не набирає і не втрачає вологу. Значення рівноважної вологості залежать від відносної вологості і температури повітря, що контактує з матеріалом. Швидкість, з якою це відбувається, залежить від властивостей матеріалу, відношення площі поверхні до об'єму об'єкта та швидкості транспортування вологи. Рівноважний вологовміст є одним з основних показників при зберіганні, від якого залежить кінцева вологість та енергетична вартість процесу зневоднення. Це є важливим показником з точки зору енерговитрат на процес зневоднення.

Сухі продукти адсорбують з навколишнього середовища на зовнішній і внутрішній сильно розвиненій поверхні, оскільки їх поверхня має вільну енергію. Адсорбція на поверхні твердого дисперсного тіла йде мимовільно і до тих пір, поки не встановиться динамічний рівноважний стан цієї термодинамічної системи [203].

Через різноманітність форм зв'язку вологи з дисперсними матеріалами, аналітична будова ізотерм сорбції дисперсних матеріалів ускладнена. Поки рівняння ізотерми сорбції виведено аналітично, тільки для ізотерм Ленгмюра капілярно-пористих тіл. Тому ми, як і більшість дослідників, вибрали емпіричний шлях визначення рівноважної вологості [203].

Дослідження з визначення сорбційних властивостей культивованих грибів ерінги, шиїтаке, глива звичайна після сушіння при конвективному 60 °С, інфрачервоному 3800 Вт/м² комбінованому 3800 Вт/м²+60 °С, конвективному двоступеневому 100/60 °С способами було визначено за методикою, представленою у другому розділі.

Були отримані ізотерми сорбції $W_p^c = f(\varphi)$ у інтервалі відносної вологості повітря та криві кінетики сорбції $W^c = f(\tau)$, оскільки у схемі експерименту передбачена також можливість фіксування зміни вологості зразків у часі [102].

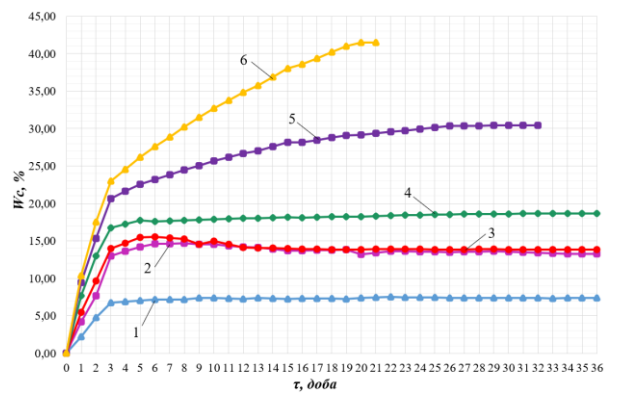
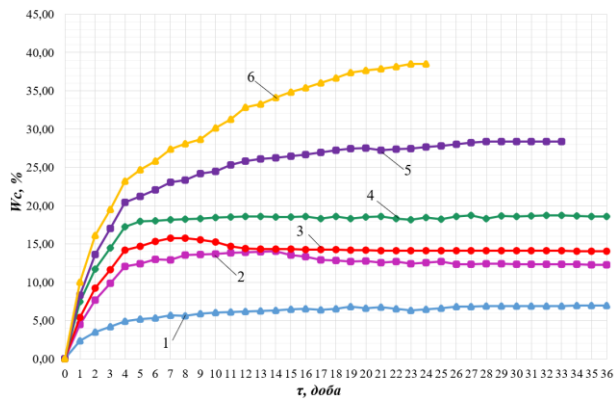


Рис. 5.14. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами ерінги при конвективному сушінні

Рис. 5.15. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами ерінги при інфрачервоному сушінні

$$t = 60^{\circ}\text{C}, V = 3 \text{ м/с}$$

$$3800 \text{ Вт/м}^2, V = 3 \text{ м/с}$$

1 – $\varphi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\varphi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\varphi=0.6$, $\rho=1.29$; 4 – $\varphi=0.7$, $\rho=1.24$;

5 – $\varphi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\varphi=0.9$, $\rho=1.13$

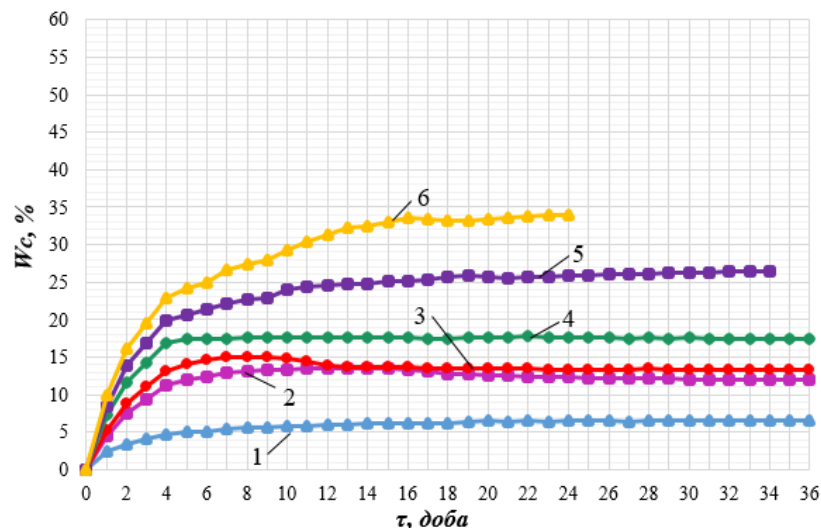


Рис. 5.16. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами ерінги при конвективному двоступеневому сушінні $t = 100/60^{\circ}\text{C}$, $V = 3 \text{ м/с}$:

1 – $\varphi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\varphi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\varphi=0.6$, $\rho=1.29$;

4 – $\varphi=0.7$, $\rho=1.24$; 5 – $\varphi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\varphi=0.9$, $\rho=1.13$

На рис. 5.14 та 5.15 представлено кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами ерінги при конвективному сушінні $t=60^{\circ}\text{C}$ та при інфрачервоному сушінні 3800 Вт/м^2 . Як видно, рівноважний стан при $\varphi = 0,4$ за 60°C встановлюється на 18 день, а при $\varphi = 0,6$ на 12 день.

На рис. 5.16. представлені кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами ерінги при конвективному двоступеневому сушінні за режимними параметрами теплоносія $t = 100/60^{\circ}\text{C}$.

Експеримент тривав 36 днів. Як видно, рівноважний стан для ерінгів при $\varphi = 0,4 - 0,6$ встановлюється на 17-18 день. При $\varphi = 0,6$ крива до 8 дня експерименту зростає, а далі до 17 дня незначно знижується та виходить на рівноважний стан. При $\varphi = 0,7$, рівноважний стан встановлюється на 5 день, а при $\varphi = 0,8$ та $\varphi = 0,9$ вологість зразка зростає протягом всього часу і на 34 та 24 день зразок вкривається пліснявою відповідно.

При комбінованому інфрачервоно-конвективному сушінні $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$, $V = 3 \text{ м/с}$, як видно з рис. 5.17, для ерінгів рівноважний стан при $\varphi = 0,4 - 0,6$ встановлюється на 11 - 12 день, при $\varphi = 0,7$ – на 28 день, при $\varphi = 0,8$ вологість зростає до 28 дня і далі зразок вкривається пліснявою, а при $\varphi = 0,9$ – зразки пліснявлюють на 21 день.

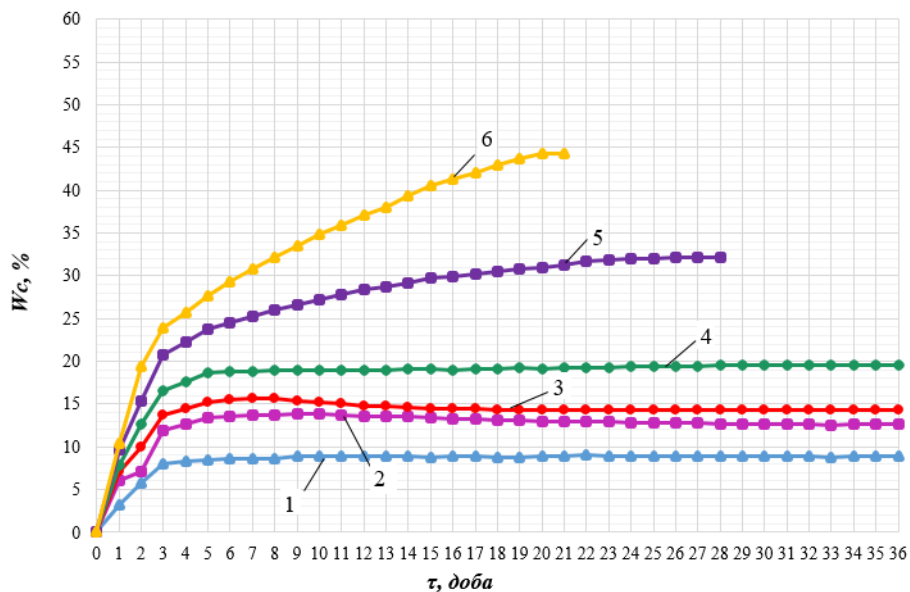


Рис. 5.17. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами ерінги при комбінованому інфрачервоно-конвективному сушінні

$3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$, $v = 3 \text{ м/с}$:

1 – $\varphi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\varphi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\varphi=0.6$, $\rho=1.29$;

4 – $\varphi=0.7$, $\rho=1.24$; 5 – $\varphi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\varphi=0.9$, $\rho=1.13$

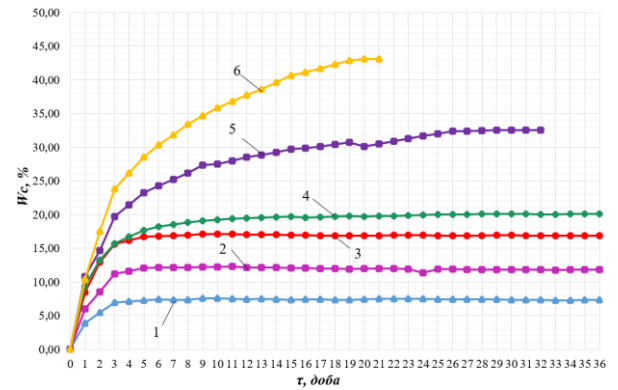
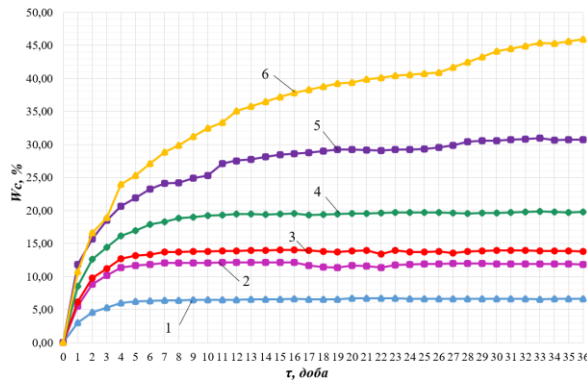


Рис. 5.18. Кінетичні криві адсорбції
водяної пари над грибами шиїтаке
при конвективному сушінні $t = 60^{\circ}\text{C}$,
 $V = 3 \text{ м/с}$:

Рис. 5.19. Кінетичні криві адсорбції
водяної пари над грибами шиїтаке
при інфрачервоному сушінні 3800
 Вт/м^2 , $V = 3 \text{ м/с}$:

1 – $\varphi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\varphi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\varphi=0.6$, $\rho=1.29$; 4 – $\varphi=0.7$, $\rho=1.24$;
5 – $\varphi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\varphi=0.9$, $\rho=1.13$

На рис. 5.18 та рис. 5.19. представлені кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами шиїтаке конвективному сушінні $t = 60^{\circ}\text{C}$ та при інфрачервоному сушінні 3800 Вт/м^2 . Спостерігаємо, що рівноважний стан встановлюється при $\varphi = 0,4 - 0,6$ встановлюється на 6 - 8 день, при $\varphi = 0,7$ – на 9 день, при $\varphi = 0,8$ та $\varphi = 0,9$ вологість для зразка 60°C зростає до кінця експерименту, а зразок 3800 Вт/м^2 на 32 день вкривається пліснявою, а при $\varphi = 0,9$ – зразки пліснявіють на 21 день.

На рис. 5.20. зображено кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами шиїтаке при конвективному двоступеневому сушінні $t = 100/60^{\circ}\text{C}$, $v = 3 \text{ м/с}$. При $\varphi = 0,4 - 0,6$ рівноважний стан для шиїтаке встановлюється на 7-8 день, при $\varphi = 0,7$ – на 20 день, при $\varphi = 0,8$ – на 28 день, а $\varphi = 0,9$ вологість зразків продовжує зростати до кінця експерименту. Видно, що жоден із зразків не взявся пліснявою протягом усього часу.

З рис. 5.21 видно, що для культивованих грибів шиїтаке рівноважний стан при $\varphi = 0,4 - 0,5$ встановлюється на 6 день, при $\varphi = 0,6$ – на 12 день з подальшими невеликими коливаннями, при $\varphi = 0,7$ вологість зростає до 22 дня, а при $\varphi = 0,8$ та $0,9$ – зразки пліснявіють на 32 і 21 день відповідно.

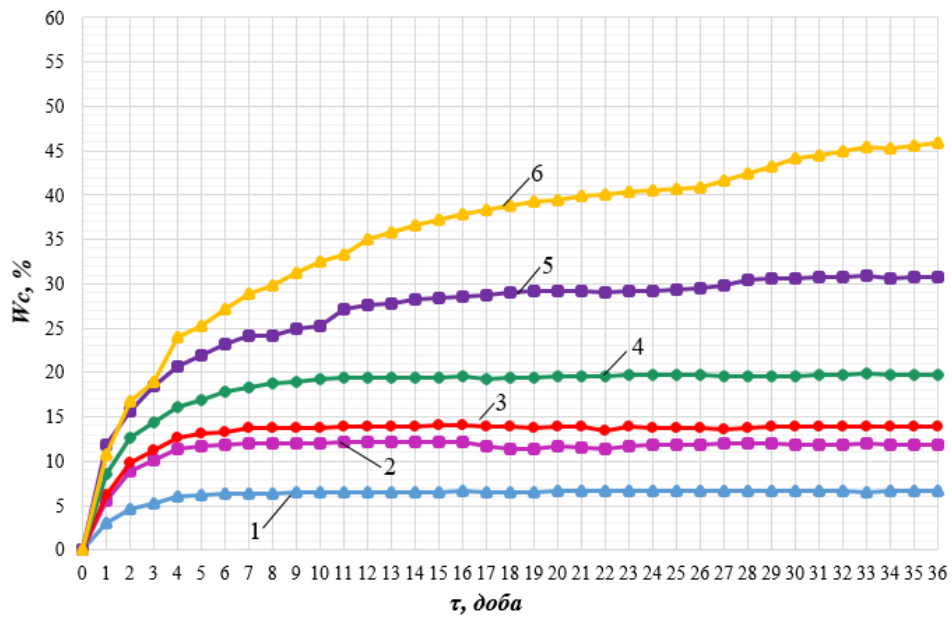


Рис. 5.20. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами шиїтаке при конвективному двоступеневому сушінні $t = 100/60^{\circ}\text{C}$, $V = 3$ м/с:

1 – $\varphi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\varphi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\varphi=0.6$, $\rho=1.29$;
 4 – $\varphi=0.7$, $\rho=1.24$; 5 – $\varphi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\varphi=0.9$, $\rho=1.13$

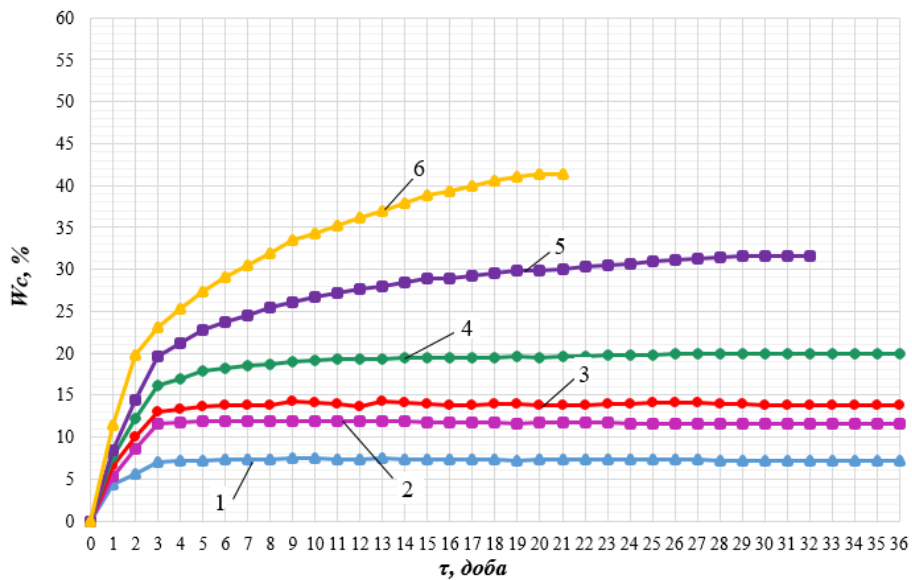


Рис. 5.21. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами шиїтаке при комбінованому інфрачервоно-конвективному сушінні

$3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$, $V = 3$ м/с:

1 – $\varphi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\varphi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\varphi=0.6$, $\rho=1.29$; 4 – $\varphi=0.7$, $\rho=1.24$; 5 –
 $\varphi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\varphi=0.9$, $\rho=1.13$

На рис 5.22 та рис 5.23 представлено кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами гливи при конвективному сушінні 60°C та при

інфрачервоному сушінні 3800Вт/м^2 . При значенні $\phi = 0,8$ та $0,9$ досліджувані зразки пліснявіють на 33 і 28 день та на 24 і 19 день відповідно.

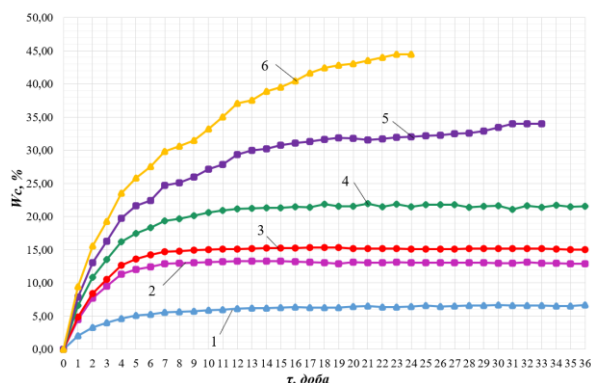


Рис. 5.22. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами гливи при конвективному сушінні 60°C , $v = 3$

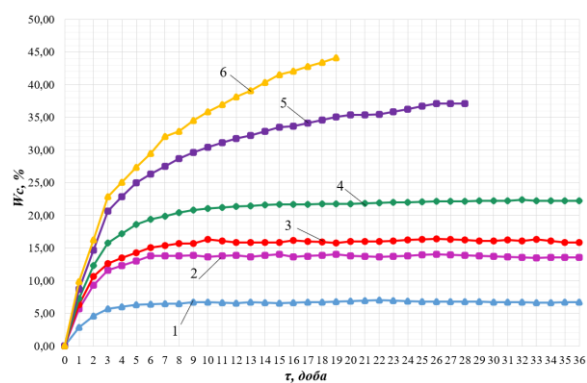


Рис. 5.23. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами гливи при інфрачервоному сушінні 3800Вт/м^2 ,

$v = 3$

$v = 3$ м/с

1 – $\phi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\phi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\phi=0.6$, $\rho=1.29$;
4 – $\phi=0.7$, $\rho=1.24$; 5 – $\phi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\phi=0.9$, $\rho=1.13$

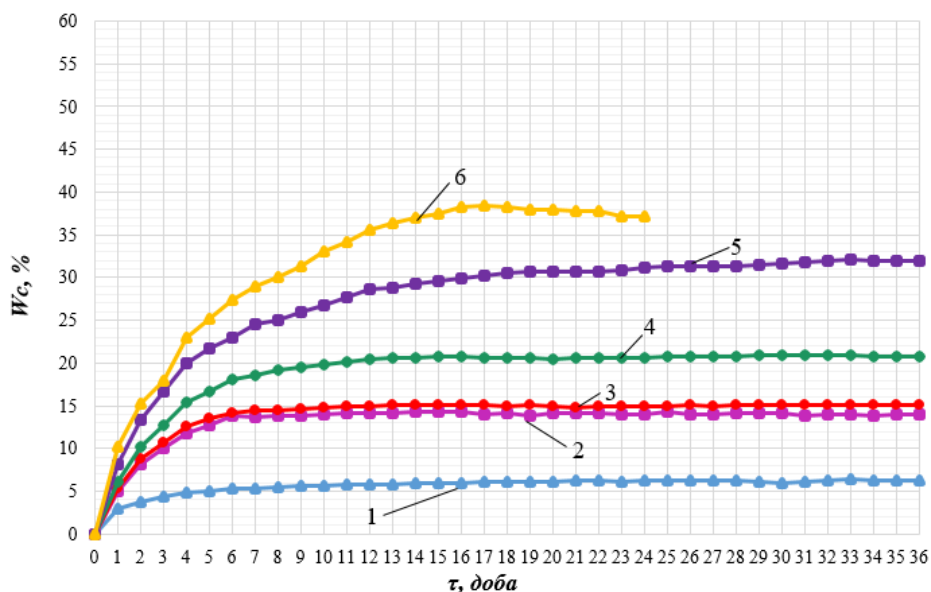


Рис. 5.24. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами гливи при конвективному двоступеневому сушінні $t = 100/60^\circ\text{C}$, $v = 3$ м/с:

1 – $\phi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\phi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\phi=0.6$, $\rho=1.29$;
4 – $\phi=0.7$, $\rho=1.24$; 5 – $\phi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\phi=0.9$, $\rho=1.13$

На рис. 5.24 представлено результати експериментів для культивованих грибів глива звичайна при конвективному двоступеневому сушінні

$t = 100/60^{\circ}\text{C}$. Загальна тенденція спостерігається і для цих зразків. Рівноважний стан при $\varphi = 0,4 - 0,6$ встановлюється на 8-9 день, при $\varphi = 0,7$ – на 12 день, при $\varphi = 0,8$ вологість зростає до кінця експерименту, а при $\varphi = 0,9$ – зразки пліснявіють на 24 день.

На рис. 5.25 представлено кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами глива звичайна при комбінованому інфрачервоно-конвективному сушінні $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$. Спостерігаємо, що для гливи звичайної рівноважний стан при $\varphi = 0,4 - 0,6$ встановлюється на 10 день, при $\varphi = 0,7$ – на 14 день з подальшими невеликими коливаннями, а при $\varphi = 0,8$ та $0,9$ – зразки пліснявіють на 32 і 19 день відповідно.

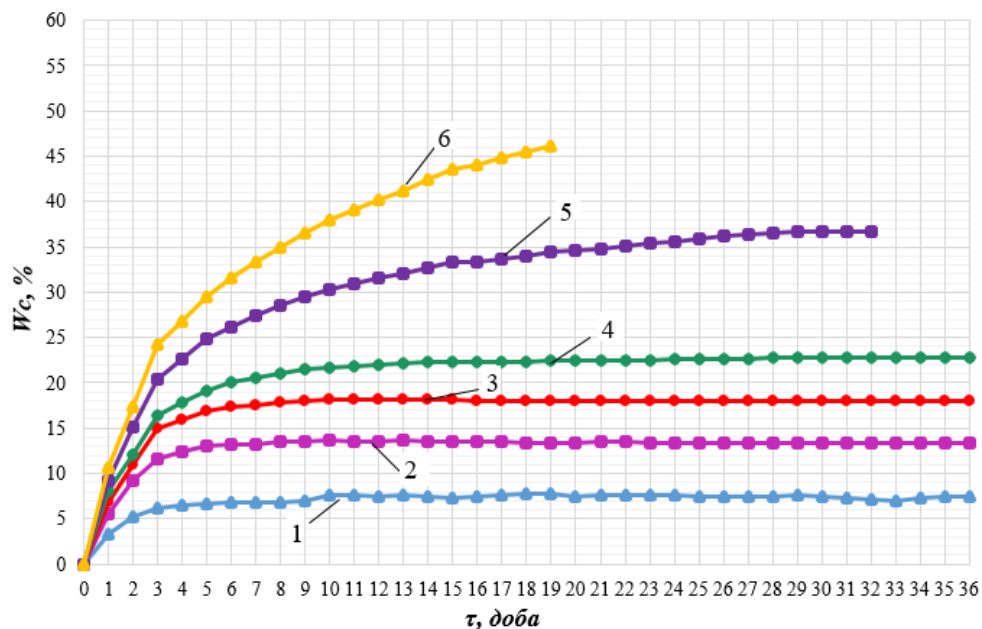


Рис. 5.25. Кінетичні криві адсорбції водяної пари над грибами глива звичайна при комбінованому інфрачервоно-конвективному сушінні $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$, $v = 3 \text{ м/с}$:

- 1 – $\varphi=0.4$, $\rho=1.37$; 2 – $\varphi=0.5$, $\rho=1.33$; 3 – $\varphi=0.6$, $\rho=1.29$;
 4 – $\varphi=0.7$, $\rho=1.24$; 5 – $\varphi=0.8$, $\rho=1.2$; 6 – $\varphi=0.9$, $\rho=1.13$

На підставі експериментальних даних про рівноважний вологовміст були побудовані ізотерми адсорбції водяної пари функціональних порошків, які представлені на рис. 5.26 - 5.28.

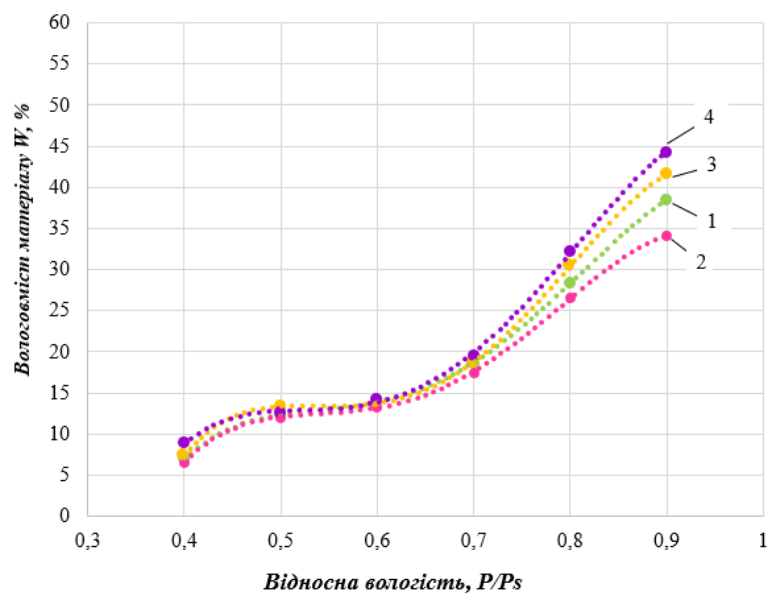


Рис. 5.26. Ізотерми адсорбції водяної пари грибів ерінги:

1 – конвективний 60°C,

2 – конвективний двоступеневий 100/60°C,

3 –інфрачервоний 3800 Вт/м²,

4 – комбінований інфрачервоно-конвективний 3800 Вт/м² + 60°C

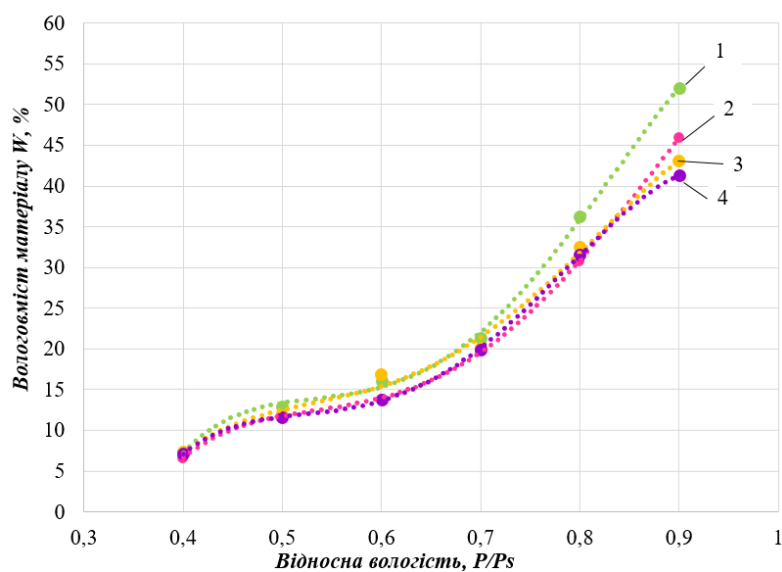


Рис. 5.27. Ізотерми адсорбції водяної пари грибів шиїтаке:

1 – конвективний 60°C,

2 – конвективний двоступеневий 100/60°C,

3 –інфрачервоний 3800 Вт/м²,

4 – комбінований інфрачервоно-конвективний 3800 Вт/м² + 60°C

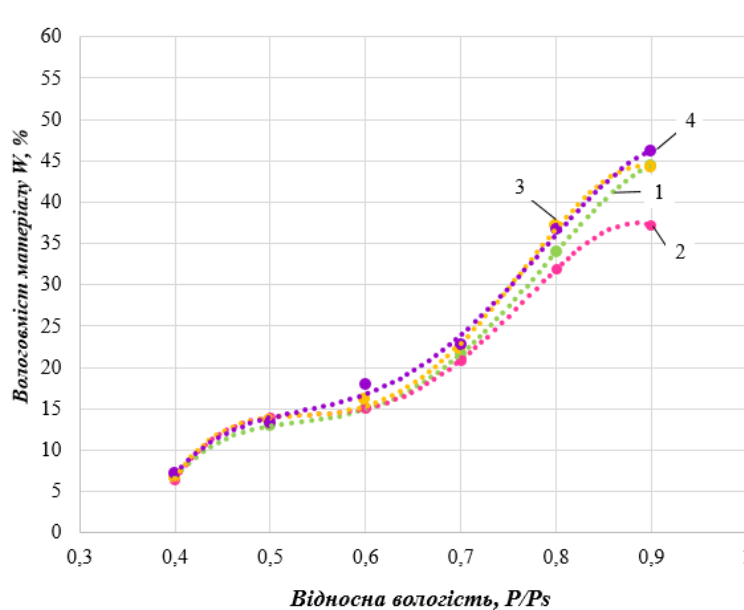


Рис. 5.28. Ізотерми адсорбції водяної пари грибів глива звичайна:

1 – конвективний 60°C,

2 – конвективний двоступеневий 100/60°C,

3 –інфрачервоний 3800 Вт/м²,

4 – комбінований інфрачервоно-конвективний 3800 Вт/м² + 60°C

Як видно з рисунків, рівноважна вологість для всіх досліджуваних грибів при значенні $\varphi=0.7$, $\varphi=0.8$, $\varphi=0.9$ є різною навіть при однакових режимах зневоднення. Наприклад, при зневодненні 60°C, рівноважна вологість для ерінгів становить 38 % (рис. 5.26), для шіїтаке 52 % (рис. 5.27), для гливи звичайної 44 % (рис. 5.28). Однак при значенні $\varphi=0.4$ рівноважна вологість для всіх культивованих грибів становить 6-8 %. При значенні $\varphi=0.5$ та $\varphi=0.6$ рівноважна вологість зразків незначно відрізняється.

Порівняння ізотерм адсорбції культивованих грибів (рис. 5.26 - 5.28), показує, що маючи однаковий характер цих ізотерм і однакові форми зв'язування води (адсорбційну, капілярну та осмотичну) в той же час суттєво відрізняються один від одного рівноважною вологістю. Що можна пояснити їх різним хімічним складом для кожного виду культивованих грибів.

В таблиці 5.3 наведені рівняння експериментальних та лінеаризованих ізотерм адсорбції культивованих грибів ерінги, шіїтаке та глива звичайна.

Таблиця 5.3.

Рівняння експериментальних ізотерм адсорбції

Матеріал	Рівняння експериментальних ізотерм	Рівняння лінеаризованих ізотерм
ерінги, 60°C	$W = -2341,5\varphi^4 + 6334,9\varphi^3 - 6158,5\varphi^2 + 2596,4\varphi - 391,77$	$W = 2,0603e^{3,247\varphi}$
ерінги, 100/60°C	$W = -2833,5\varphi^4 + 7542,8\varphi^3 - 7259,5\varphi^2 + 3033,5\varphi - 455,56$	$W = 2,1017e^{3,1167\varphi}$
ерінги, 3800 Вт/м ²	$W = -3610,8\varphi^4 + 9679,5\varphi^3 - 9349,9\varphi^2 + 3902,7\varphi - 584,79$	$W = 2,1344e^{3,2634\varphi}$
ерінги, 3800 Вт+60°C	$W = -2859\varphi^4 + 7606\varphi^3 - 7237,3\varphi^2 + 2968,6\varphi - 434,28$	$W = 2,3544e^{3,1959\varphi}$
шиїтаке, 60°C	$W = -2799,5\varphi^4 + 7647,3\varphi^3 - 7451,6\varphi^2 + 3135,9\varphi - 472,67$	$W = 1,7168e^{3,7657\varphi}$
шиїтаке, 100/60°C	$W = -1689,9\varphi^4 + 4769,8\varphi^3 - 4749,3\varphi^2 + 2039,9\varphi - 311,44$	$W = 1,6058e^{3,6886\varphi}$
шиїтаке, 3800 Вт/м ²	$W = -1812,2\varphi^4 + 4909,6\varphi^3 - 4749,4\varphi^2 + 2002\varphi - 301,55$	$W = 1,9622e^{3,4569\varphi}$
шиїтаке, 3800 Вт+60°C	$W = -2774,8\varphi^4 + 7275,9\varphi^3 - 6851,1\varphi^2 + 2797,1\varphi - 410,17$	$W = 1,8351e^{3,4775\varphi}$
глива, 60°C	$W = -3404,8\varphi^4 + 8991,2\varphi^3 - 8558,9\varphi^2 + 3537,4\varphi - 527,17$	$W = 1,7344e^{3,6519\varphi}$
глива, 100/60°C	$W = -4646,6\varphi^4 + 12125\varphi^3 - 11499\varphi^2 + 4743,9\varphi - 708,38$	$W = 2,0567e^{3,3281\varphi}$
глива, 3800 Вт/м ²	$W = -5128,6\varphi^4 + 13313\varphi^3 - 12523\varphi^2 + 5114,9\varphi - 756,53$	$W = 1,7967e^{3,6574\varphi}$
глива, 3800 Вт+60°C	$W = -3160,4\varphi^4 + 8328,4\varphi^3 - 7917,5\varphi^2 + 3279,5\varphi - 490,02$	$W = 1,956e^{3,586\varphi}$

На рис. 5.29 наведено порівняльну характеристику рівноважної вологості культивованих грибів ерінги, шиїтаке та глива звичайна при

оптимальній відносній вологості повітря 0,6. На рис. 5.29.а структуровано дані за режимами зневоднення, а на рис. 5.29.б – за видом культивованих грибів.

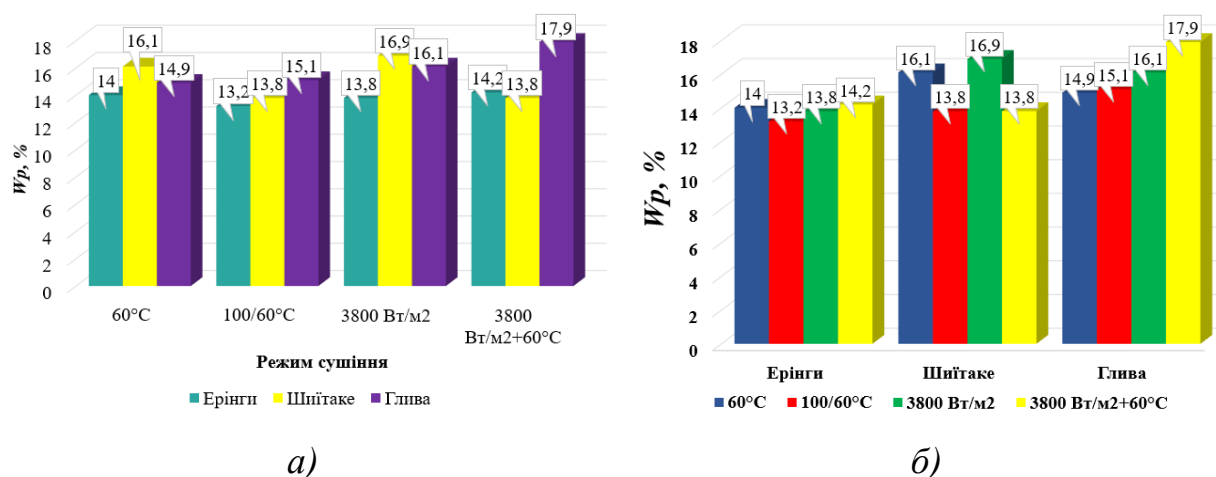


Рис. 5.29. Рівноважна вологість грибів за різних режимів сушіння при відносній вологості повітря 0,6

Як видно з рис. 5.29.а,б, найнижча рівноважна вологість є для зразку ерінги при конвективному двоступеневому способі зневоднення 100/60°C із значенням 13,2 %, а найвища – для зразку глива звичайна при комбінованому способі 3800 Вт+60°C із значенням 17,9 %.

При зберіганні порошоків з культивованих грибів з метою збереження їхніх технологічних властивостей рекомендується герметично їх запаковувати та підтримувати в приміщенні наступні умови: вологість повітря 60 – 70% при температурі 20 – 25 °С.

5.4. Дослідження активності води білковмісної сировини

Крім сорбційних властивостей було досліджено активність води для культивованих грибів та м'ясної сировини. Активність води (a_w) – це один із критичних показників при визначенні якості харчових продуктів; це показник вільної вологи в продукті, яка доступна для хімічних реакцій, росту і розвитку мікроорганізмів, який має значення в межах від 0 до 1,0 і є дуже важливим для харчової безпеки, впливає на термін зберігання продуктів, смак, текстуру тощо.

Вода у взаємодії з іншими макромолекулами харчових продуктів може викликати потемніння, окислення ліпідів і мікробне псування. У дослідженні

[43] спостерігалось пропорційне співвідношення між втратою води активністю води (a_w), який є більш вимірюваною величиною в грибах. Розробка та експериментування будь-якої техніки збереження харчових продуктів, наприклад сушіння, заморожування тощо, вимагає вимірювання активності води.

Слід зазначити, що висока a_w має високий ризик мікробної атаки. Вченими [49] було досліджено про високий $a_w = 0,99$ для свіжих грибів шиїтаке, що збігалось з високою частотою мікробних колоній (аеробні мезофіли, *Bacillus* sp, дріжджі та ін). Подібним чином, гриби з роздрібного ринку в Іспанії з високим a_w мали більшу кількість мікробів (104,4-109 КУО/г), що свідчить про те, що високий показник активності води a_w може зберігати гриби свіжими, але має тенденцію приваблювати мікроорганізми. Під час сушіння культивованих грибів висока температура спричинила зниження a_w , що пригнічує ріст мікробів і подальше псування грибів шиїтаке при подальшому зберіганню [49].

Досліджували зміну активності води a_w для сушених культивованих грибів у формі порошку та м'ясної сировини у формі гранул (табл. 5.2). Як видно з таблиці, показник активності води для досліджуваних зразків не перевищує 0,5, яка не перевищує норму для розвитку мікроорганізмів.

Як відомо [204, 205, 206, 207, 208, 209], показник активності води a_w має вплив на розвиток мікроорганізмів у харчових продуктах та визначено наступні межі для: бактерій $a_w = 0,75-0,98$; дріжджів $a_w = 0,62-0,90$; мікроміцетів $a_w = 0,6-0,88$. Отже, такі сушені продукти за нормованих умов зберігання не схильні до розвитку мікроорганізмів.

Відповідно, на зміну показника a_w за змін температур сушіння мають вплив саме структури сполук, в яких завдяки іонним, гідрофобним і водневим зв'язкам та Ван-дер-Ваальсовим силам відбувається взаємодія вологи продукту з вуглеводами та білком [209].

Значення показника активності води (табл. 5.4) для зразків культивованих грибів та м'яса знаходиться в діапазоні нижче 0,5, що свідчить про слабкий вплив жирних речовин, який практично не пов'язує воду [209].

Таблиця 5.4.

Показник активності води ($n=3$, $p \leq 0.05$)

№ п/п	Найменування	Результати одичних вимірювань a_{wn}	Середнє значення a_w
1	м'ясна сировина	0,327 0,325 0,325	0,326
2	ерінги 3800 Вт/м ² +60°C	0,422 0,424 0,421	0,422
3	ерінги 100/60°C	0,459 0,461 0,460	0,460
4	шиїтаке 100/60°C	0,457 0,456 0,456	0,456
5	шиїтаке 3800 Вт/м ² +60°C	0,423 0,425 0,424	0,424
6	глива 3800 Вт/м ² +60°C	0,430 0,428 0,430	0,429
7	глива 100/60°C	0,469 0,466 0,468	0,468

Як видно з рисунку 5.30, з урахуванням наявної зв'язаної вологи ізотерма сорбції для області низького вмісту вологи в харчових продуктах показує властивості води в продукті [209].

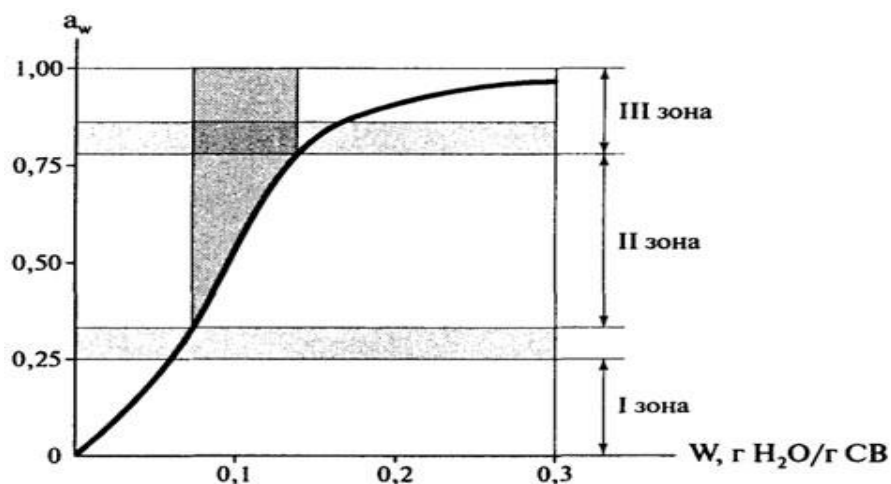


Рис. 5.30. Ізотерма сорбції води [209]

Зокрема, зона I ізотерми відповідає стану воді найбільше адсорбованою і найбільш нерухомою в харчових продуктах. Ця вода абсорбована, завдяки полярним H₂O-іон і H₂O-диполь взаємодіям. Ентальпія пароутворення цієї води вище, ніж у чистої води, яка не замерзає при -40°C. Така вода не може бути розчинником, міститись в продукті в значній кількості та впливати на структурні властивості твердої речовини. В даному випадку вода є частиною такого продукту [209].

Високий вміст вологи наприкінці зони I (межа зон I і II) відповідає моношару вологи. В цілому зона I - відповідає надзвичайно малій частині всієї вологи у високовологому харчовому продукті. Вода в зоні II складається з води зони I і доданої води (ресорбція) для отримання води, включеній в зону II. Ця волога утворює мультишар і взаємодіє з сусідніми молекулами через вода-вода-водневі зв'язки. Ентальпія пароутворення для мультишарової води більше, ніж для чистої води. Значна частина цієї води не замерзає при -40°C, як і вода, додана до харчового продукту із змістом вологи, відповідним межі зон I і II та зазвичай складає менше 5% від загальної вологи у високовологих харчових продуктах. Таким чином, волога сушених за різних умов грибів та

грудки курячої бере участь в процесі розчинення, діє як пластифікуючий агент і сприяє набуханню твердої матриці [209].

Стабільність харчових продуктів і активність води тісно пов'язані. На рис. 5.31 показано відношення між a_w і швидкістю реакцій, що відбуваються в харчових продуктах при температурі 25-45°C [209].

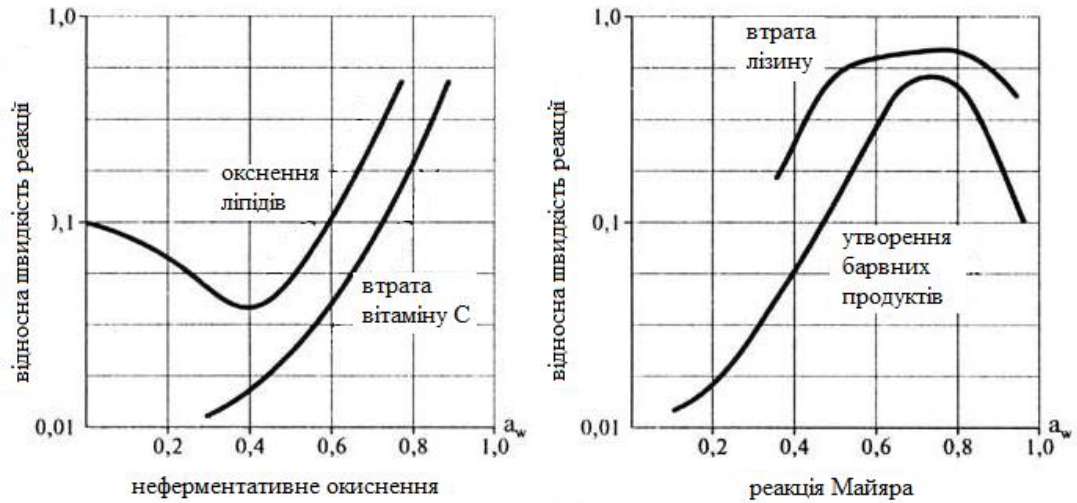


Рис. 5.31. Залежність стабільності харчових продуктів від активності води a_w [209]

Швидкість реакції і нахил кривих можуть змінюватися залежно від складу, фізичного стану, структури продукту, складу повітря (особливо присутність кисню), температури, ефекту гістерезису. У продуктах із низькою вологістю можуть відбуватися процеси окиснення жирів, неферментативне потемніння, втрата водорозчинних речовин (вітамінів), псування, що викликане дією ферментів продукту. Активність мікроорганізмів в даному випадку пригнічена. Для більшості хімічних реакцій (рис. 5.30) максимальна швидкість має місце в області a_w , і є мінімальною на межі зон I і II (0,2-0,4), окрім реакції окиснення ліпідів [209].

Окиснення ліпідів починається за низького значення a_w та із зростанням швидкості окиснення знижується до межі зон I і II на ізотермі, після чого зростає до межі зон II і III. Подальше зростання a_w сповільнює швидкість окиснення. Отже, при додаванні води до сухого продукту спочатку відбувається реакція взаємодії продукту з киснем повітря (зона I) і вода

продукту зв'язує гідропероксиди, взаємодіє з продуктами їх розпаду і перешкоджає окисненню. Крім того, така вода гідратує іони металів, які каталізують процес окиснення, гальмуючи їх активність [209].

5.4. Висновки до п'ятого розділу

1. Досліджено процеси диспергування культивованих грибів та виявлено, що при подрібненні на молотковій дробарці вихід харчової фракції становить 74,3 %, порошок не комкується, має задовільну сипучість та консистенцію.

2. Дослідження хімічного складу та функціонально-технологічних властивостей підтвердив збереження білку після сушіння за розробленими способами на рівні 24,34 % та високу водоутримуючу здатність білкововмісних порошоків з культивованих грибів, яка становить 330 %.

3. Досліджено сорбційні властивості білкововмісних порошоків та визначено рівноважну вологість і умови їх зберігання.

4. Визначено показник активності води для сушених культивованих грибів за різних параметрів сушіння та м'ясної сировини. Значення показника активності води знаходиться в межах до 0,5, що не перевищує норму розвитку мікроорганізмів. Розраховано коефіцієнти показника активності води та показано значний вплив проведення процесу сушіння на якість готового продукту - зразки культивованих грибів виявляють стабілізуючу здатність для харчових систем, що сприяє подовженню терміну зберігання харчових продуктів, вироблених з такими продуктами.

Основний зміст цього розділу опублікований у працях [188, 189, 190, 191, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202].

РОЗДІЛ 6.

ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЯ ОТРИМАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО М'ЯСА, ПОРОШКУ ІЗ КУЛЬТИВОВАНИХ ГРИБІВ, ГРАНУЛЬОВАНОГО М'ЯСНОГО ПРОДУКТУ ШВИДКОГО ПРИГОТУВАННЯ НА ОСНОВІ М'ЯСА, ГРИБІВ, МОРКВИ ТА СЕЛЕРИ

Розробка енергоефективної теплотехнології отримання сухих харчових продуктів є складним науково-інженерним процесом теоретичних та експериментальних досліджень підготовки сировини до сушіння, підбору енергоефективних способів зневоднення із дослідженням тепломасообміну, застосування ефективних способів подрібнення до необхідного розміру та дослідження хімічного складу із визначенням якісних характеристик сировини.

Розробка сучасних теплотехнологій повинна вирішувати проблему раціонального використання одночасно сировинних, паливних та енергетичних ресурсів. Оскільки це має як науковий, так і соціальний аспект, тому що при цьому формуються основи раціонального харчування і відповідно підвищується якість життя [194].

У першому та другому розділі даної роботи був проведений аналіз науково-патентної літератури, який показав напрямки, що визначають актуальність конкретних досліджень. При цьому виявлено, що є розроблено безліч теплотехнологій: ресурсозберігаюча технологія переробки плодово-ягідної сировини, теплотехнології отримання функціональних (антиоксидантних, фітоестрогенних, фолатовмісних та пребіотичних) порошоків з рослинної сировини, технологія отримання чипсів із фруктів та овочів, технологія виробництва сухого гідролізованого білкового продукту, теплотехнологія пайків швидкого приготування для гарячого харчування військовослужбовців, а також дослідження сушіння білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження при різних способах зневоднення. Однак, комплексна теплотехнологія переробки білкововмісної сировини

відсутня. При цьому отримання якісних білкововмісних порошків з культивованих грибів, м'ясої сировини та без додавання сторонніх домішок є актуальним завданням.

У третьому, четвертому та п'ятому розділі наведені теоретичні та експериментальні дослідження підготовки сировини та визначено оптимальні режими зневоднення, при яких максимально зберігаються біологічно активні речовини, досліджено теплофізичні, фізико-хімічні характеристики, хімічний склад та якісні показники досліджуваної сировини, а також процеси диспергування сушеної продукції та умови їх зберігання.

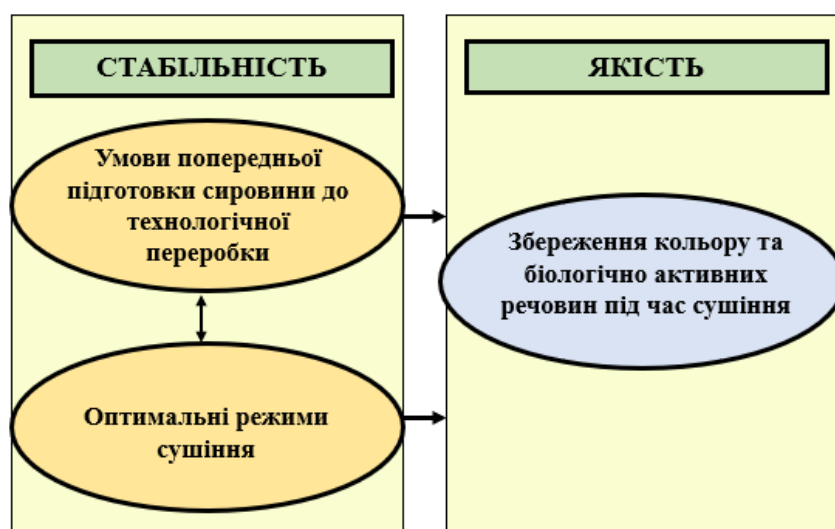


Рис. 6.1. Умови отримання якісного продукту

Основними умовами отримання якісного сухого продукту при розробці теплотехнології є підготовка сировини до технологічної переробки, оптимальні режими сушіння та збереження біологічно активних речовин (рис. 6.1).

В сучасних умовах життя людини з огляду , враховуючи постійне нервове напруження, швидкість розвитку суспільства та технологій висуваються нові вимоги до харчування: потреба в жирах зменшується, в білках збільшується. В раціоні ж харчування більшості населення переважають продукти із великим вмістом жиру, а не вітамінів та білку, який на відміну від жирів та вуглеводів не накопичується в організмі, а синтезується із продуктів розщеплення самого білка. При недостатньому поступанні білків із їжею в організмі

відбуваються процеси дезамінування, переамінування та синтезу. В результаті цих процесів організм людини ослаблюється, знижується його опір до інфекційних захворювань, працездатність та пам'ять. Тому необхідно це враховувати при розробці теплотехнологій [194].

6.1. Розробка енергоефективної теплотехнології отримання харчового гранульованого порошку із білковмісної сировини м'яса свинини, яловичини

Як було зазначено у другому розділі, основними сучасними способами переробки м'яса на сухий продукт є виготовлення слайсів, паличок та ін. Наразі, розробки технологій виробництва сухого м'яса для використання в рецептурах продуктів швидкого приготування відсутні. При додаванні сушеного м'яса до рецептур буде можливість підвищення вмісту білку в продукті, додатковими мікро- та макроелементами, з подальшим тривалим насиченням калоріями організму людини. То ж, розробка теплотехнології сушеного м'яса з метою застосування в рецептурі для продуктів швидкого приготування, матиме вплив як на енергетичну, так і на поживну цінність.

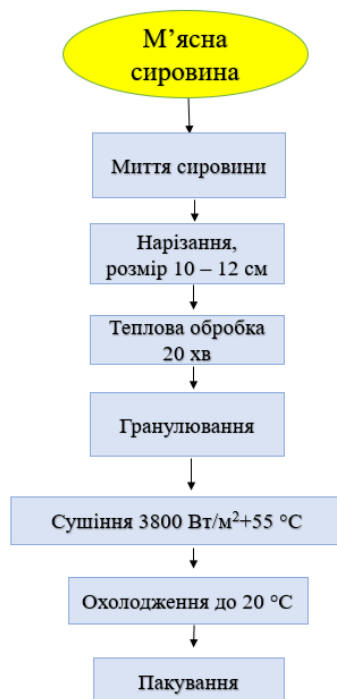


Рис. 6.2. Принципово-технологічна схема отримання гранульованого м'ясного порошку із м'яса свинини або яловичини

Розроблена принципово-технологічна схема отримання гранульованого м'ясного порошку з м'яса свинини або яловичини, яка зображена на рис. 6.2, яка включає в себе стадію миття сировини, нарізання на шматки 10-12 см, варіння протягом 20 хв, гранулювання з розміром 5 мм, сушіння за енергоефективним комбінованим способом $3800 \text{ Вт/м}^2 + 55 \text{ }^\circ\text{C}$, охолодження, пакування. У таблиці 6.1 представлені основні органолептичні показники сушеного гранульованого м'яса свинини/яловичини.

Таблиця 6.1.

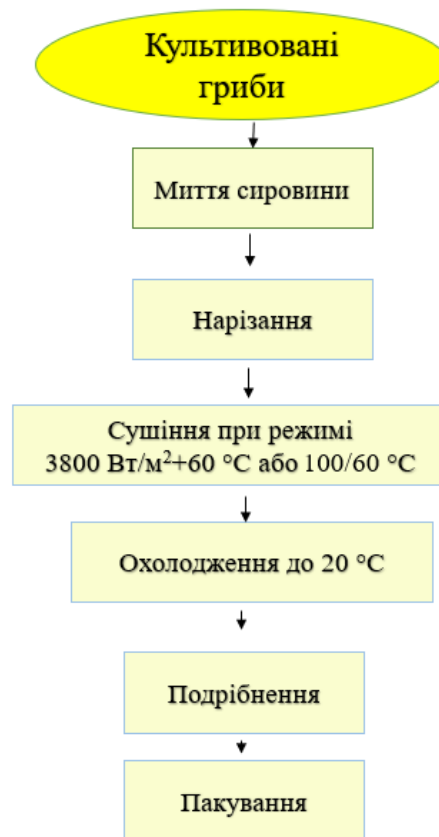
Органолептичні показники сушеного гранульованого м'яса свинини/яловичини

Показник	Характеристика продукту
Зовнішній вигляд	Однорідна гранулоподібна суміш, яка не містить сторонніх домішок
Дисперсність	Діаметр 5 мм
Колір	Світлий, властивий даній сушеній сировині
Аромат	Аромат сушеного м'яса, властивий даній сушеній сировині, без сторонніх запахів
Смак	Присмак сушеного м'яса, властивий даній сушеній сировині, без сторонніх смаків.

6.2. Технологія отримання харчового порошку із білкововмісної сировини культивованих грибів ерінги, шіїтаке, глива звичайна, печериця звичайна

Технологічний процес отримання харчового грибного порошку з культивованих грибів складається з кількох основних етапів: сировина, яка поступає на переробку інспектується, при цьому видаляються пошкоджені

частини, потім миється у ємності з водою, ще раз інспектується, відкидається на сито для зменшення вологи, після цього гриби нарізаються на пластини, після цього підготовлена сировина розкладається на піддони шаром висотою 2 см та направляється у камеру сушильної установки, де відбувається сушіння за енергоефективних способів конвективного двоступеневого $100/60^{\circ}\text{C}$ або комбінованого $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^{\circ}\text{C}$, охолодження, пакування (рис. 6.3).



6.3. Принципово-технологічна схема отримання грибного порошку із культивованих грибів ерінги або шіїтаке, або глива звичайна, або печериця звичайна

У таблиці 6.2. представлено основні органолептичні показники сушеного грибного порошку із культивованих грибів печериця звичайна. Отриманий грибний порошок за розробленою теплотехнологією має світлий колір, без сторонніх домішок, яскравий виражений смак і аромат сушених грибів, властивий даній сировині.

Таблиця 6.2.

Органолептичні показники сушеного грибного порошку із культивованих грибів печериця звичайна

Показник	Характеристика продукту
Зовнішній вигляд	Однорідний сипучий порошок, без сторонніх домішок
Дисперсність	$\leq 0,5$ мм
Колір	Світлий, властивий даній сушеній сировині
Аромат	Яскравий виражений аромат сухих грибів, властивий даній сушеній сировині, без сторонніх запахів
Смак	Присмак сушених грибів, властивий даній сушеній сировині, без сторонніх смаків.

6.3. Технологія отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту

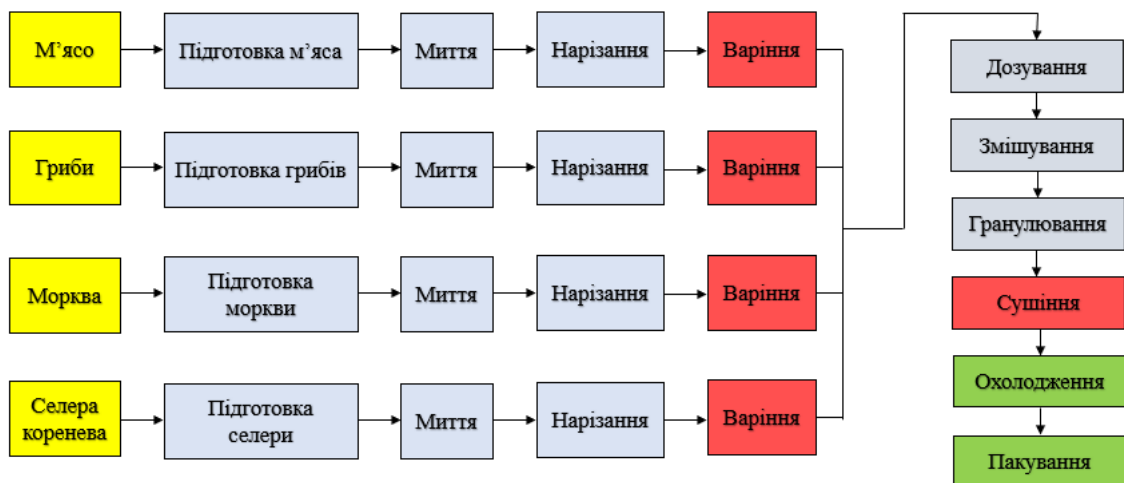


Рис. 6.4. Принципово-технологічна схема отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту

Принципово-технологічна схема отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту зображена на рис. 6.4, яка включає в себе підготовку м'ясної сировини (зачищення від плівки, жиру та прожилок), нарізання. Паралельно готують культивовані гриби, моркву та селеру, які попередньо миють, очищують від шкірки, нарізають на пластини 3 x 4 см, проварюють 1,5 – 2 хв, виймають з відвару та охолоджують, а в одержаний відвар у співвідношенні 2:1 кладуть шматочки 10x12 см м'ясної сировини. Відбувається теплова обробка протягом 20 хв, змішування всіх компонентів у співвідношенні відварене м'ясо 60 %, гриби 20 %, морква 10 %, селера 10 %, далі подрібнення на гранули. Після цього продукт направляється на сушіння при ефективному режимі до вологості 11 – 12 %.

Поєднання м'яса із рослинною сировиною дає можливість запобігти окисленню жирів, при цьому покращуються органолептичні показники та збільшується харчова цінність продукту під час зберігання.

Одержані сушені комбіновані гранули м'яса з грибами і рослинною сировиною чудово набухають та відновлюються під час його використання.

Завдяки низькій температурі сушіння м'ясо не оплавляється, тому не має твердості. Такий продукт підходить для застосування як самостіно так і у рецептурі продуктів швидкого приготування.

6.4. Обладнання по виготовленню білкововмісних порошків тваринного та рослинного походження

Для застосування розроблених теплотехнологій отримання гранульованого м'яса та грибного порошку, а також гранульованого м'ясного продукту були розроблені лінії виробництва, які складаються із різних ділянок: підготовки сировини до зневоднення, сушіння, охолодження, подрібнення, сепарації, пакування та складу готової продукції.

Апаратурно-технологічна схема виробництва м'яса представлена на рис. 6.5, де сировина поступає в бункер приймання сировини (1), далі зважується на вагах (2); транспортером елеваторним ТЕ (3); направляється на машину миючу барабанну (4), після цього конвеєр стрічковим (5) подається в машина

для нарізання сировини (6), де нарізається до необхідного розміру, далі подрібнена сировина направляєється у варильний котел (7) для теплової обробки протягом 20 хв, після цього охолоджується і подається на вовчок (8) для гранулоутворення, після цього подається на візок з піддонами (9), поступає в сушарку 2-х зонну на теплогенераторі ТФ2.02 (10); після цього охолоджується, зважується на ваги-дозатор (11), пакується на пакувальній машині (12) та подається на склад готової продукції.

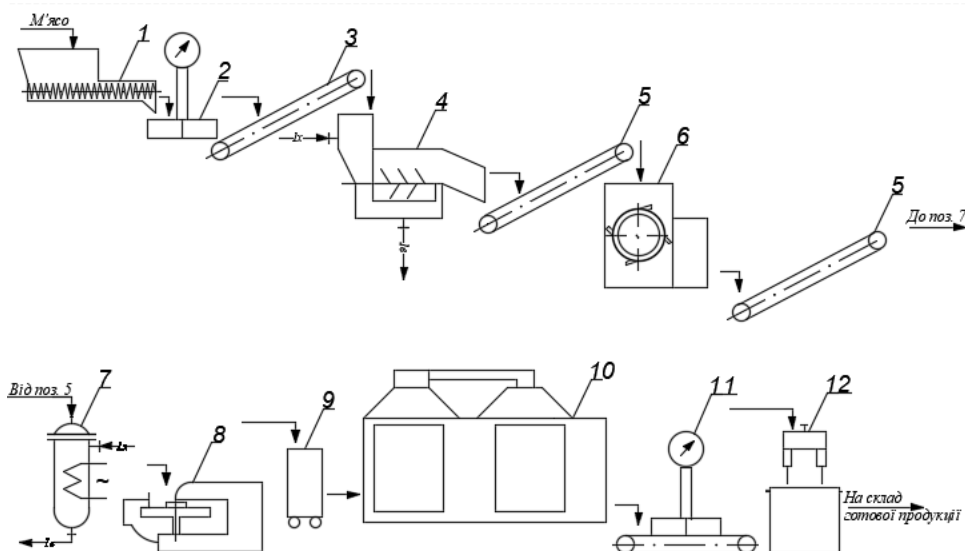


Рис. 6.5. Апаратурно-технологічна схема виробництва м'ясного гранульованого порошку:

1 – бункер приймання сировини; 2 – ваги; 3 – транспортер елеваторний ТЕ; 4 – машина миюча барабанна; 5 – конвеєр стрічковий; 6 – машина для нарізання сировини; 7- варильний котел; 8 – вовчок; 9 - візок з піддонами; 10 – сушарка 2-х зонна на теплогенераторі ТФ2.02; 11 – ваги-дозатор; 12 – пакувальна машина

На рис. 6.6 представлена апаратурно-технологічна схема виробництва грибного порошку, де культивовані гриби поступають в бункер приймання сировини (1), зважуються на вагах (2), далі транспортером елеваторним ТЕ (3) подається в машину миючу барабанну (4), після миття сировина проходить транспортер інспекційний ТСІ з магнітним сепаратором П-100 (5) і далі

конвеєром стрічковим (6) подається на машина для нарізання сировини (7) де подрібнюється на слайси, після чого сировина завантажується на візок з піддонами (8), який подається в сушарку 2-х зонну на теплогенераторі ТФ2.02 (9) де сушиться при енергоефективних режимах зневоднення, після цього сухий матеріал охолоджується та подається на молоткову дробарку (10) для подрібнення, далі поступає на ваги-дозатор (11) де зважується, після цього поступає на пакувальну машину (12) і йде на склад готової продукції.

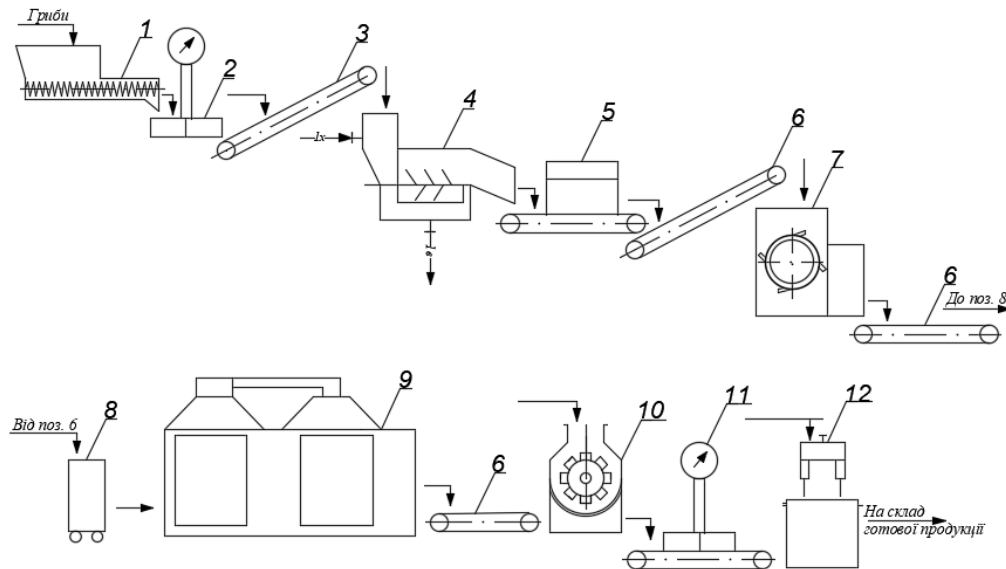


Рис. 6.6. Апаратурно-технологічна схема виробництва грибного порошку:

1 – бункер приймання сировини; 2 – ваги; 3 – транспортер елеваторний ТЕ; 4 – машина миюча барабанна; 5 – транспортер інспекційний ТСІ з магнітним сепаратором П-100; 6 – конвеєр стрічковий; 7- машина для нарізання сировини; 8 – візок з піддонами; 9 – сушарка 2-х зонна на теплогенераторі ТФ2.02; 10 – молоткова дробарка; 11 – ваги-дозатор; 12 – пакувальна машина

Апаратурно-технологічна схема виробництва сушеного гранульованого м'ясного продукту представлена на рис. 6.7, яка включає наступні стадії: культивовані гриби поступають в бункер приймання сировини (1), зважуються на вагах (2), далі транспортером елеваторним ТЕ (3) подається в машину

миючу барабанну (4), після миття сировина проходить транспортер інспекційний ТСІ з магнітним сепаратором П-100 (5) і далі конвеєром стрічковим (6) подається на машина для нарізання сировини (7) де подрібнюється на слайси, після цього подається стрічковим конвеєром (6) до варильного котла 7'.

Паралельно м'ясо поступає в бункер приймання сировини (1'), далі зважується на вагах (2'); транспортером елеваторним ТЕ (3'); направляється на машину миючу барабанну (4), після цього конвеєром стрічковим (5) подається в машину для нарізання сировини (6'), де нарізається до необхідного розміру.

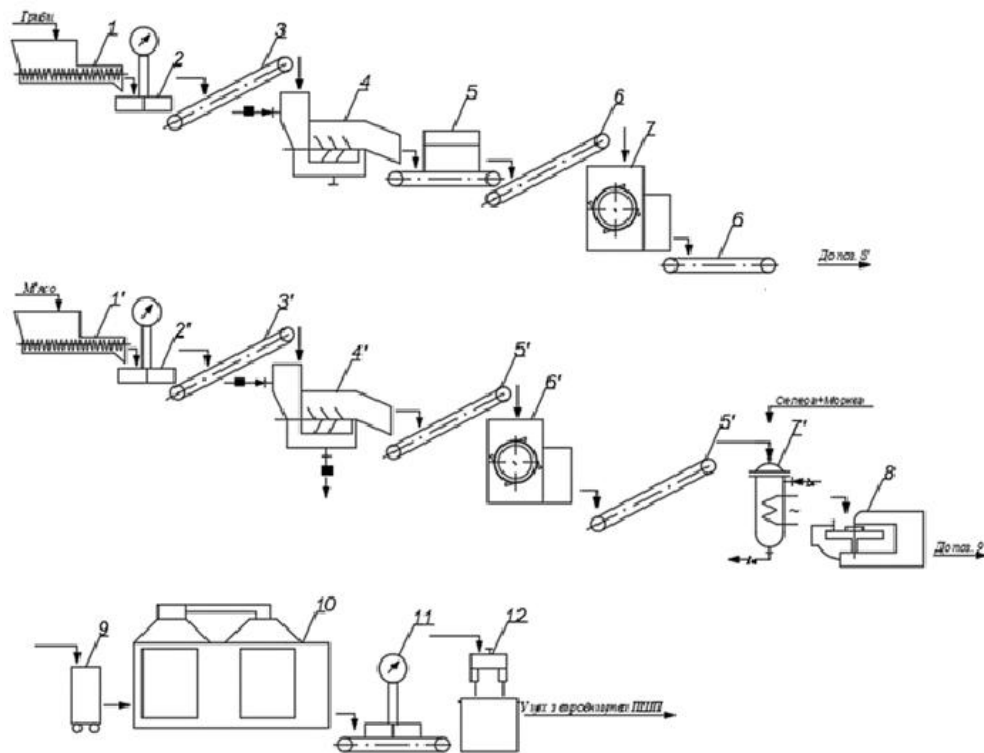


Рис. 6.7. Апаратурно-технологічна схема виробництва сушеного гранульованого м'ясного продукту:

- 1, 1' – бункер приймання сировини; 2, 2' – ваги; 3, 3' – транспортер елеваторний ТЕ; 4, 4' – машина миюча барабанна; 5 - транспортер інспекційний ТСІ з магнітним сепаратором П-100; 5' – конвеєр стрічковий; 6 – конвеєр стрічковий; 6' - машина для нарізання м'яса; 7- машина для нарізання грибів; 7' - варильний котел; 8 – вовчок; 9 - візок з піддонами; 10 – сушарка 2-х зонна на теплогенераторі ТФ2.02; 11 – ваги-дозатор; 12 – пакувальна машина

До варильного котла (7') подаються нарізані культивовані гриби, морква та селера, які попередньо миють, очищують від шкірки, нарізають на пластини 3 x 4 см. Всі три інгредієнти проварюють 1,5 – 2 хв, виймають з відвару та охолоджують, а в одержаний відвар у співвідношенні 1:2 кладуть шматочки 10 x 12 см м'ясної сировини. Відбувається теплова обробка протягом 20 хв, після цього змішування всіх компонентів у співвідношенні відварене м'ясо 60 %, гриби 20 %, морква 10 %, селера 10 %. Далі суміш поступає на вовчок (8), де подрібнюється на гранули. Після цього гранульований продукт направляється для завантаження на візки (9) та на сушіння при ефективному режимі в сушарку 2-х зонну на теплогенераторі ТФ2.02, після чого охолоджується на проходить ваги-дозатор (11), і запаковується у герметичні мішки на пакувальній машині (12) та поступає на склад готової продукції.

Таблиця 6.3.

Технічна характеристика обладнання технологічних ліній

Найменування показників	Показник
Виробництво по сировині, т/год	0,23 – 0,25
Виробництво по сухому продукту, т/год	0,04 – 0,45
Виробництво по харчовому порошку, т/год	0,028 – 0,035
Встановлена потужність, кВт	32 – 34
Потреба пари чи палива (газу), не більше, т/год (м ³ /год)	30
Маса лінії, т	16 – 18
Виробнича площа, м ²	320
Орієнтовна вартість, тис. дол. США	230

При розробці технологічної лінії виробництва сухих білкововмісних продуктів визначальним чинником продуктивності є потужність сушарки. Тому в таблиці 6.3 наведена технічна характеристика обладнання

технологічних ліній для сушіння білковомісної сировини. З таблиці видно, що виробництво по сировині становить 0,23-0,26 т/год, встановлена потужність 32-34 кВт та виробнича площа становить 320 м².

6.5. Техніко-економічне обґрунтування впровадження теплотехнології отримання натуральних сухих харчових продуктів з підвищеним вмістом білку

Техніко-економічні показники розраховуються від впровадження виробництва харчового порошку з культивованих грибів ерінги та печериці для камерної сушарки для малих фермерських господарств.

Розрахунок вартості сировини приведений в табл. 6.4.

Таблиця 6.4.

Витрати на сировину за асортиментом:

Асортимент	Витрата сировини на виробництво од. продукції, кг/кг	Вартість 1 кг сировини, грн/кг	Вартість сировини на од. продукції, грн/кг	Витрати на сировину, грн/т
Ерінги	1:8	80	640	6400000
Печериці	1:8	75	600	600000

Техніко-економічні показники технологічної лінії для отримання харчових порошків представлені в таблиці 6.5.

Розрахунок техніко-економічних показників на виробництво харчових порошків камерною сушаркою з комбінованим нагрівом теплоносія.

1. Розрахунок експлуатаційних витрат.

Експлуатаційні витрати V_i складаються з суми поточних витрат на енергоносії, амортизацію, техобслуговування, ремонт і заробітну плату і т.д.:

$$V = V_E + V_B + V_A + V_T + V_P + V_3 + V_{И} + V_C + V_M$$

де V_E – витрати електроенергії, грн./т.

V_B – витрати води, грн./т.

V_A – амортизаційні відрахування, грн./т.

$V_T + V_P$ – експлуатаційні витрати на ремонт і техобслуговування, грн./т.

V_3 – витрати на заробітну плату робітникам, грн./т.

$V_{И}$ – інші витрати, грн./т.

V_C – витрати на тару, грн./т.

V_M – витрати на транспортування порошку, грн./т.

Таблиця. 6.5.

Техніко-економічні показники технологічної лінії для отримання білкововмісних харчових порошоків

№ п/п	Назва показників	Одиниці виміру	Показники	
			1 варіант	2 варіант
1.	Продуктивність лінії : по сирому продукту порошку	кг	100	100
2.	Річне число роботи (1 зміна)	год/рік	1250	1250
3.	Витрата електроенергії	кВт/год	43,5	43,5
4.	Вартість електроенергії	грн.	8,40	8,40
5.	Витрати води	м ³ /день	0,07	0,07
6.	Вартість води	грн./м ³	30,39	30,39
7.	Кількість обслуговуючого персоналу	чол.	1	1
8.	Середня заробітна плата	грн.	30000	30000
9.	Орієнтовна вартість обладнання в лінії	тис. грн.	650000	650000

1.1. Витрати електроенергії визначаються кількістю спожитої електроенергії за годину, діючими тарифами та кількістю годин роботи:

$$V_E = P \cdot T_E \cdot \tau_p, \quad (6.1)$$

де P – сумарна споживана потужність електроустаткування, кВт/год.;

$T_E = 8,40$ – тариф за електроенергію, грн./кВт, для промисловості;

τ_p – кількість годин роботи в рік, год.;

1 варіант: $V_{E1} = 43,5 \cdot 8,4 \cdot 1250 / 3,125 = 146160$ грн./т

2 варіант: $V_{E2} = 43,5 \cdot 8,4 \cdot 1250 / 3,125 = 146160$ грн./т

1.2. Витрати води визначаються кількістю спожитої води за годину, діючими тарифами та кількістю годин роботи:

$$V_B = P \cdot T_B \cdot \tau_p, \quad (6.2)$$

де P – споживання води, м³/день.; $T_B = 30,39$ – тариф за воду, грн./м³;

τ_p – кількість днів роботи в рік, год.;

1 варіант: $V_{B1} = 0,07 \cdot 30,39 \cdot 250 = 379,87$ грн./т

2 варіант: $V_{B2} = 0,07 \cdot 30,39 \cdot 250 = 379,87$ грн./т.

1.3. Амортизаційні відрахування визначаються як відношення капітальних витрат до терміну служби устаткування:

$$V_A = \frac{K}{\tau} \quad (6.3)$$

де τ – термін служби устаткування. $\tau = 10$ років.

1 варіант: $V_{A1} = 650000 / 10 / 3,125 = 20800$ грн./т.

2 варіант: $V_{A1} = 650000 / 10 / 3,125 = 20800$ грн./т.

1.4. Поточні експлуатаційні витрати на ремонт і техобслуговування устаткування приймаємо рівними 1 % від вартості основного устаткування

$$V_T + V_P = 0,01 \cdot C_0, \quad (6.4)$$

1 варіант: $V_T + V_P = 0,01 \cdot 650000 / 3,125 = 2080$ грн./т.

2 варіант: $V_T + V_P = 0,01 \cdot 650000 / 3,125 = 2080$ грн./т.

1.5. Витрати на заробітну плату робітників.

1 варіант: $V_{з1} = 1 \cdot 30000 \cdot 12/3,125 = 115200$ грн./т.

2 варіант: $V_{з2} = 1 \cdot 30000 \cdot 12/3,125 = 115200$ грн./т.

Нарахування на заробітну плату у розмірі 38 %, що складає:

1 варіант: $V_{нз1} = 115200 \cdot 0,38 = 43776$ грн./кг.

2 варіант: $V_{нз2} = 115200 \cdot 0,38 = 43776$ грн./кг.

1.6. Інші витрати приймають у кількості 50 % від розміру заробітної плати:

1 варіант: $V_{и1} = 43776 \cdot 0,5 = 21888$ грн/кг.

2 варіант: $V_{и2} = 43776 \cdot 0,5 = 21888$ грн/кг.

1.7. Тара. Ємність одного об'єму сировини (мішка) – 10 кг.

Вартість тари вираховується необхідністю мішків на їх вартість (15 грн):

1 та 2 варіанти: $V_{с1} = 3125 \cdot 15 / 10 \cdot 3,125 = 187,5$ грн./т.

1.8. Транспортні витрати.

Відстань 100 км, вартість дизельного палива 58,50 грн./л. Витрата пального 7л/100 км.

Одна розвозка – 877,5 грн. Машина бере 4 тони.

Річні витрати складають:

1 та 2 варіанти: $V_{м1} = 7 \cdot 58,5/50 = 20475$ грн/т.

Розрахункова собівартість готової продукції зведена в табл. 6.6.

6. Економічний ефект отримання порошку з ерінгів:

$$E_1 = C \cdot P \cdot \Pi = 1011098,33 \cdot 3,125 = 947904,6797 \text{ грн.} \quad (6.5)$$

де С – собівартість порошку;

П – продуктивність лінії за рік, т.

Економічний ефект отримання порошку з печериці:

$$E_{1,2} = 971098,33 \cdot 3,125 = 1262427,82 \text{ грн}$$

Економічний ефект від введення рентабельності виробництва в розмірі 30 %:

Ерінги: $E_{\phi} = C * P * \Pi = 1011098,33 * 0,3 * 3,125 = 947\,904,68$ грн

Печериці: $E_{\Pi} = C * P * \Pi = 971098,33 * 0,3 * 3,125 = 910\,404,68$ грн

Термін окупності капітальних вкладень

$$T = \frac{K}{E}$$

Ерінги: $T = 6500000 / 947904,68 = 0,69$ р = 8,2 місяці;

Печериці: $T = 6500000 / 910404,68 = 0,71$ р = 8,5 місяців.

Таблиця 6.6.

Розрахункова собівартість готової продукції

№ п/п	Назва показників	Одиниці виміру	Показники	
			Ерінги	Печериці
1.	Сировина	грн./т.	640000	600000
2.	Електроенергія	грн./т.	146160	146160
3.	Вода	грн./т.	531,825	531,825
4.	Амортизаційні відрахування	грн./т.	20800	20800
5.	Експлуатація та ремонт	грн./т.	2080	2080
6.	Заробітна плата	грн./т.	115200	115200
7.	Нарахування	грн./т.	43776	43776
8.	Інші витрати	грн./т.	21888	21888
9.	Тара, упаковка	грн./т.	187,5	187,5
10.	Транспортні витрати	грн./т.	20475	20475
11.	Собівартість	грн./т.	1011098,33	971098,33
12.	Оптова ціна (рентабельність 30%)	грн./т.	1314427,82	1262427,82

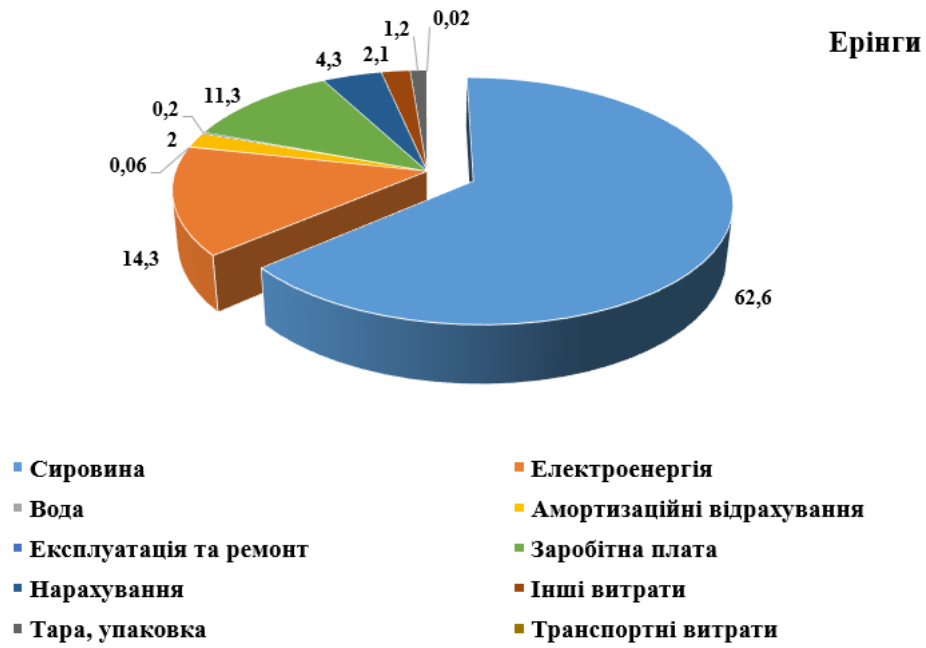


Рис. 6.8. Співвідношення витрат на виготовлення білкововмісного порошку з культивованих грибів ерінги

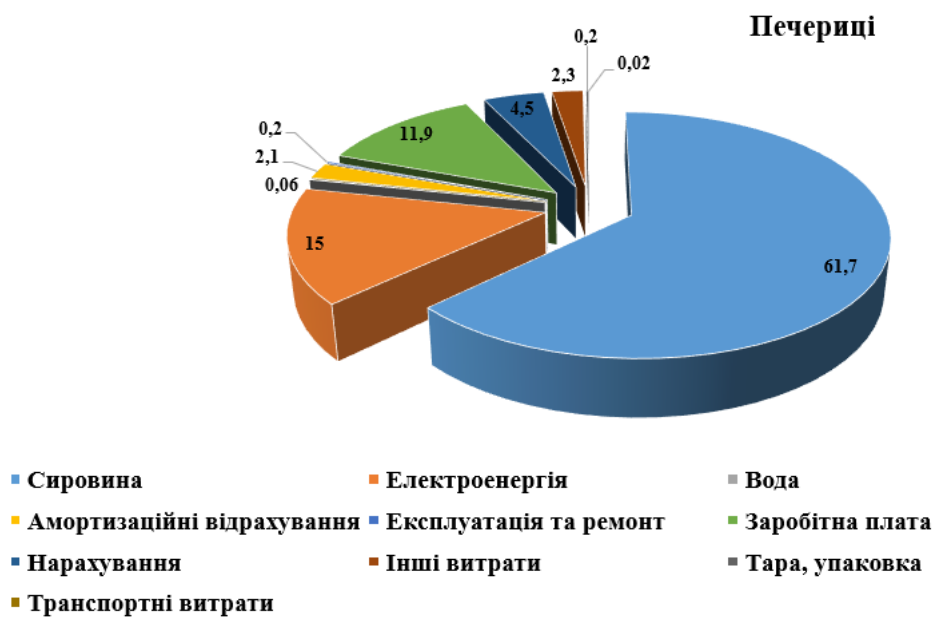


Рис. 6.9. Співвідношення витрат на виготовлення білкововмісного порошку з культивованих грибів печериця звичайна

Співвідношення витрат у відсотках на виготовлення білкововмісного порошку з культивованих грибів ерінги та печериця звичайна можна показати на діаграмах (рис. 6.8, 6.9). Основними статтями витрат є: на сировину 61,7-

62,6 %, на заробітну плату 11,3 – 11,9 %. Затрати електроенергії при цьому становлять 14,3 – 15 %.

Очікуваний загальний річний економічний ефект від впровадження теплотехнології отримання грибного порошку складає для культивованих грибів ерінги 947 904,68 грн, для культивованих грибів печериця звичайна 910 404,68 грн при терміні окупності 8,2 – 8,5 місяців відповідно.

6.6. Висновки до шостого розділу

1. Розроблено енергозберігаючі теплотехнології отримання гранульованого м'ясного та грибного порошоків, а також гранульованого м'ясного продукту, на які подані патенти на винахід.

2. Для промислового впровадження технології виробництва білкововмісних порошоків були розроблені промислово-технологічні лінії.

3. Практична реалізація запропонованої теплотехнології полягає у передачі результатів досліджень до Інституту продовольчих ресурсів НААН України та впровадження грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку.

Основний зміст цього розділу опублікований у працях [161, 175, 176].

ВИСНОВКИ

Результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили сформулювати принципи та методи інтенсифікації тепломасообмінних процесів під час сушіння білкововмісної сировини при виробництві сухих харчових продуктів з підвищеним вмістом білку. Наукове обґрунтування та реалізація процесів підготовки сировини, зневоднення та дослідження теплофізичних, сорбційних, регідратаційних властивостей, виконане чисельне моделювання процесу зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів надали можливість встановити оптимальні параметри та розробити нові технологічні схеми виробництва гранульованого м'ясного та грибного порошоків, а також гранульованого м'ясного продукту та довести їх енергоефективність. Ці дослідження дозволяють зробити загальні висновки по роботі:

1. Проаналізовано сучасний стан наукових та практичних розробок технологій переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження, який показав, що існує нагальна потреба у розробці ефективної теплотехнології отримання харчового білкововмісного продукту із максимальним збереженням біологічно активних речовин;

2. Розроблено попередню підготовку білкововмісної сировини тваринного походження до сушіння, а саме встановлено час гідротермічної обробки - 20 хв, яка в подальшому дозволить зменшити енерговитрати на процес сушіння;

3. Досліджено процеси зневоднення білкововмісних матеріалів тваринного та рослинного походження та розроблено ефективні режими - комбінований інфрачервоно-конвективний $3800 \text{ Вт/м}^2 + 55^\circ\text{C}$ для м'ясної сировини та комбінований інфрачервоно-конвективний $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$ і конвективний двоступеневий $100/60^\circ\text{C}$ для культивованих грибів, які дозволяють зменшити тривалість процесу в 1,5-1,7 рази у порівнянні із режимом 60°C ;

4. Досліджено форму матеріалу та визначено, що зневоднення м'ясної сировини у вигляді гранул з діаметром 5 мм відбувається у 1,8 рази швидше, ніж у вигляді кубиків 5x5x5 мм;

5. *Вперше* визначено теплоту випаровування культивованих грибів, та доведено, що при зневодненні тканин гриба печериця істотно зростання енерговитрат на зневоднення відбувається вже на початкових етапах сушіння, досягає 11% перевищення понад табличним значенням для випаровування води з вільної поверхні до моменту досягнення тканинами гігроскопічної вологості та різко збільшується при спробах сушіння за межу їх гігроскопічної вологості;

6. *Вперше* визначено теплоємність культивованих грибів в діапазоні температур 32,5 – 87,5°C. Отримано формули розрахунку теплоємності тканин плодового тіла гриба печериця зі зміною їх вологості при різній температурі зразків. Значення теплоємності, розраховані за формулою достатньо добре (з середньою похибкою 2,12 %) співпадають з отриманими експериментальними даними;

7. Досліджено залежність критерію оптимізації сушіння від температури теплоносія, що обґрунтовує ефективність вибраних режимів сушіння;

8. Розраховано тривалість та швидкість зневоднення білкововмісної сировини для оптимального режиму 60°C;

9. Виконане чисельне моделювання конвективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів показало, що у цілому порівняння результатів показало їх достатньо задовільне якісне узгодження. Розглянута розрахункова модель може використовуватися для наближеного визначення характеристик процесу сушіння сировини, зокрема часу, необхідного для сушіння;

10. Досліджено кінетику білкововмісної сировини на дослідно-промисловій камерній сушарці. Доведено, що зміна напрямку потоку

теплоносія на 120-ій хв дозволяє зменшити тривалість сушіння м'ясної сировини на 50 хв, або на 20 %.

11. Визначено, що при сушінні культивованих грибів на дослідно-промисловій камерній сушарці із застосуванням розробленого комбінованого інфрачервоно-конвективного способу $3800 \text{ Вт/м}^2 + 60^\circ\text{C}$, відбувається інтенсифікація процесу на 25 % у порівнянні із режимом 60°C .

12. Розраховано енерговитрати на дослідно-промисловій камерній сушарці з комбінованим нагрівом теплоносія, які в середньому становлять 3800 кДж/кг випареної вологи, що значно менше, ніж в існуючих сушальних установках;

13. Визначено відновлюваність білкововмісної сировини після сушіння, яка переважає в 4-5 разів цей показник для нативної сировини, що свідчить про високу якість при сушінні за розроблених режимів;

14. Досліджено процеси подрібнення та диспергування сухих матеріалів, в результаті чого отримано порошок з культивованих грибів із високим відсотком оптимальної фракції менше $0,5 \text{ мм}$;

15. *Вперше* визначені рівноважні вологості білкововмісних матеріалів, висушених при ефективних режимах, в результаті чого отримані оптимальні умови їх зберігання;

16. Розроблені теплотехнології переробки білкововмісної сировини тваринного та рослинного походження із отриманням якісного гранульованого м'ясного та грибного порошку;

17. *Вперше* розроблена теплотехнологія отримання сушеного гранульованого м'ясного продукту швидкого приготування з м'яса, грибів, моркви та селери, який є основою для продуктів харчування з метою використання в екстремальних умовах населення, військовослужбовців та спортсменів.

18. Результати дисертаційної роботи передані до науково-дослідницького Інституту продовольчих ресурсів НААН для впровадження грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою

розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку та використовуються у навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» для підготовки фахівців за спеціальністю «Галузеве машинобудування».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Xu, L., Fang, X., Wu, W., Chen, H., Mu, H., & Gao, H. (2019). Effects of high-temperature pre-drying on the quality of air-dried shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*). *Food chemistry*, 285, 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.179>
2. Wakchaure, G. C., Manikandan, K., Mani, I., & Shirur, M. (2010). Kinetics of thin layer drying of button mushroom. *Journal of Agricultural Engineering*, 47(4), 41-46.
3. Rhim, J. W., & Lee, J. H. (2011). Drying kinetics of whole and sliced shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*). *Food Science and Biotechnology*, 20(2), 419-427.
4. Doymaz, I. (2014). Drying kinetics and rehydration characteristics of convective hot-air dried white button mushroom slices. *Journal of Chemistry*, 2, 453175. <https://doi.org/10.1155/2014/453175>
5. Бурлака, Т.В. (2018). Інтенсифікація процесу сушіння культивованих грибів. [Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Національний університет харчових технологій]. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/60907362-aec5-47f8-852b-25e5e320b72c/content>
6. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu., Samoilenko, K. (2021). *Blending and drying of antioxidant raw materials*. Monograph. LLC “Tvory”, 107. ISBN 978-966-949-760-4. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/03/monografija2.1.pdf>
7. Slobodianiuk K.S., Samoilenko K.M. (2020). Research of heat and mass transfer during convective drying of colloid capillary-porous materials. *Integration of traditional and innovation processes of development of modern science*. Riga, Latvia. “Baltija Publishing”, 227-245. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-021-6-39>.
8. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., Самойленко, К.М. (2021). Комплексна енергоефективна теплотехнологія одержання антиоксидантного буряково-

томатного барвнику та насіння томатів. *Scientific Works*, 85(1), 34-42.
<https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i85.2239>

9. Petrova, Zh., Samoilenko, K., Vishnevsky, V. (2020). Processes of heat and mass transfer during drying of red beetroot. *Energy Engineering and Control Systems*, 6(2), 81 – 87. <https://doi.org/10.23939/jeecs2020.02.081>

10. Інститут технічної теплофізики НАН України. (2021). *Тематичний збірник статей у двох томах. Том 1.* (Ю. Снежкін & Р. Шапар, Ред.). Тропеа.

11. Снежкін, Ю.Ф., Петров, П.І. (2024). Вибір раціонального режиму сушіння м'яса курятини при його використанні в продуктах швидкого приготування. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 46(4), 51-59.
<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2024.6>.

12. Burfoot, D., Everis, L., Mulvey, L., Wood, A., Betts, R., (2010). Literature review on microbiological hazards associated with biltong and similar dried meat products. Food Standards Agency. Aviation House, 125 Kingsway, London WC2B 6NH.

13. Cherono, K. (2013). *Infrared drying of biltong: effect of pretreatment and drying conditions on the drying characteristics and product quality.* Literature review and project proposal. School of Engineering University of KwaZulu-Natal Pietermaritzburg, 43 p.

14. Harrison, J., Harrison, M. (2006). Fate of Escherichia coli O157:H7, Listeria monocytogenes, and Salmonella typhimurium during preparation and storage of beef jerky. *Journal of Food Protection*, 59. 1336–1338.

15. Heinke, W., Laing, E., Viljoen, C. (2000). Isolation and identification of yeasts associated with intermediate moisture meats. *Food technology and biotechnology*, 1(38), 69–75.

16. Ignasi, V., Meda, V., Panigrahi, S. (2006). Thin-layer drying characteristics of beef jerky. *North Central CSBE /ASABE inter sectional Meeting, Saskatoon*, 5–7.

17. Principles of Preservation of Shelf-Stable Dried Meat Products.FSRE Shelf-Stable (2005). 15, 156–170
<https://meathaccp.wisc.edu/validation/assets/Principles%20for%20preservation.pdf>

18. Quick guide on processing jerky and Compliance guideline for meat and poultry jerky produced by small and very small plants. Update compliance guideline. USDA. 2007. April.

19. Клименко, М.М., Віннікова, Л.Г., Береза, І.Г., Гончаров, Г.І., Пасічний, В.М., Баль-Прилипко, Л.В., Кишенько, І.І., Буша, О.О., & Ткаченко, К.Д. (2006). *Технологія м'яса та м'ясних продуктів*. Підручник під ред. М.М. Клименка. К.: Вища освіта. ISBN 966-8081-64-1.

20. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Слободянюк, К.С. (2022). *Тепломасообмінні процеси отримання комбінованих функціональних порошків*. Монографія. Тропеа.

21. Погожих, М. І., Євлаш, В.В., Нєміріч, О.В., Максименко, А.Є. (2013). Кінетика сушіння м'яса яловичини способом змішаного теплопідведення. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, 1(1), 79-84. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2013_1\(1\)__12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2013_1(1)__12)

22. Кос, В., Eren, I., & Ertekin, F. K. (2008). Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of food engineering*, 85(3), 340-349. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2007.07.030

23. Mediani, A., Hamezah, H. S., Jam, F. A., Mahadi, N. F., Chan, S. X. Y., Rohani, E. R., ... & Abas, F. (2022). A comprehensive review of drying meat products and the associated effects and changes. *Frontiers in nutrition*, 9, 1057366. doi: 10.3389/fnut.2022.1057366

24. Aksoy, A., Karasu, S., Akcicek, A., & Kayacan, S. (2019). Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat. *Foods*, 8(6), 216.
<https://doi.org/10.3390/foods8060216>

25. Liu, Y., Zhang, Z., & Hu, L. (2022). High efficient freeze-drying technology in food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(12), 3370-3388. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1865261>
26. Cumhuri, Ö., Şeker, M., & Sadıkoğlu, H. (2016). Freeze drying of turkey breast meat: Mathematical modeling and estimation of transport parameters. *Drying Technology*, 34(5), 584-594. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1064945>
27. Roobab, U., Chen, B. R., Madni, G. M., Guo, S. M., Zeng, X. A., Abdi, G., & Aadil, R. M. (2024). Enhancing chicken breast meat quality through ultrasonication: Physicochemical, palatability, and amino acid profiles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 104, 106824. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106824>
28. Aykın Dinçer, E. (2023). Dried meat products obtained by different methods from past to present. *Food Reviews International*, 39(5), 2457-2476. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1956944>
29. Harrison, J. A., & Harrison, M. A. (1996). Fate of Escherichia coli O157: H7, Listeria monocytogenes, and Salmonella typhimurium during preparation and storage of beef jerky. *Journal of food protection*, 59(12), 1336-1338.
30. Buege, D. R., Searls, G., & Ingham, S. C. (2006). Lethality of commercial whole-muscle beef jerky manufacturing processes against Salmonella serovars and Escherichia coli O157: H7. *Journal of food protection*, 69(9), 2091-2099.
31. Calicioglu, M., Sofos, J. N., Samelis, J., Kendall, P. A., & Smith, G. C. (2002). Destruction of acid-and non-adapted Listeria monocytogenes during drying and storage of beef jerky. *Food Microbiology*, 19(6), 545-559.
32. Speckhahn, A., Srzednicki, G., & Desai, D. K. (2010). Drying of beef in superheated steam. *Drying Technology*, 28(9), 1072-1082. [10.1080/07373937.2010.505547](https://doi.org/10.1080/07373937.2010.505547)
33. Mounir, S. (2015). Texturing of chicken breast meat as an innovative way to intensify drying: use of a coupled washing/diffusion CWD phenomenological model to enhance kinetics and functional properties. *Drying Technology*, 33(11), 1369-1381. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1030029>

34. Kurozawa, L. E., Morassi, A. G., Vanzo, A. A., Park, K. J., & Hubinger, M. D. (2009). Influence of spray drying conditions on physicochemical properties of chicken meat powder. *Drying Technology*, 27(11), 1248-1257.

<https://doi.org/10.1080/07373930903267187>

35. Hii, C. L., Itam, C. E., & Ong, S. P. (2014). Convective air drying of raw and cooked chicken meats. *Drying Technology*, 32(11), 1304-1309.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2014.924133>

36. Ajala, A. S., Ngoddy, P. O., & Olajide, J. O. (2012). Statistical modeling and simulation of drying cassava chips in tunnel dryer. *International Journal of Emerging Trend in Engineering and Development*, 7(2), 585-593.

37. Cáceres-Huambo, B.N. & Menegalli, F.C. (2009). Simulation and Optimization of Semicontinuous Industrial Tunnel Dryers for Fruits. *Drying Technology*, 27, 428–436.

38. Chou, S. K., Hawlader, M. N. A., & Chua, K. J. (1997). On the drying of food products in a tunnel dryer. *Drying technology*, 15(3-4), 857-880.

39. Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. D. (2002, August). Modelling, simulation and design of drying processes. In *Proceedings of the 13th International Drying Symposium*.

40. Скрипник, В. О., & Пономаренко, Б. Г. (2024). Результати визначення кінетики вологовмісту і температури в м'ясі за кондуктивного сушіння із стисненням. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*, (45), 85-94. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-4.12>

41. Одарченко, Д. М. (2014). Дослідження кріоскопічних властивостей культивованих грибів. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, 2, 331-336.

42. Інтернет-посилання: <https://media.market.us/mushroom-statistics/> .
Дата звернення 17.11.2025 р.

43. Subramaniam, S., Jiao, S., Zhang, Z., & Jing, P. (2021). Impact of post-harvest processing or thermal dehydration on physicochemical, nutritional and

sensory quality of shiitake mushrooms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3), 2560-2595. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12738>

44. Cheng, S., Ranran, L., Yang, H., Wang, S., Lin, R., & Tan, M. (2020). Characterisation of moisture migration of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) during storage and its relationship to quality deterioration. *International Journal of Food Science & Technology*, 55(5), 2132–2140. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14456>

45. Ares, G., Lareo, C., & Lema, P. (2007). Modified atmosphere packaging for postharvest storage of mushrooms. A review. *Fresh Produce*, 1(1), 32–40.

46. Aday, M. S. (2016). Application of electrolyzed water for improving postharvest quality of mushroom. *LWT-Food Science and Technology*, 68, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.014>

47. Diamantopoulou, P., & Philippoussis, A. (2015). Cultivated mushrooms: preservation and processing. *Handbook of Vegetable Preservation and Processing*, 495–525. <https://doi.org/10.1201/b19252-26>

48. Kim, K. M., Ko, J. A., Lee, J. S., Park, H. J., & Hanna, M. A. (2006). Effect of modified atmosphere packaging on the shelflife of coated, whole and sliced mushrooms. *LWT-Food Science and Technology*, 39(4), 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.02.015>

49. Kim, C., Narrea, T. J., Pao, S., Li, H., Jordan, K. L., Xu, Y., Stein, R.A., & Sismour, E. N. (2016). Evaluation of microbial loads on dried and fresh shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) as obtained from internet and local retail markets, respectively. *Food Safety*, 2016005. <https://doi.org/10.14252/foodsafetyfscj.2016005>

50. Lei, J., Li, B., Zhang, N., Yan, R., Guan, W., Brennan, C. S., Gao, H., & Peng, B. (2018). Effects of UV-C treatment on browning and the expression of polyphenol oxidase (PPO) genes in different tissues of *Agaricus bisporus* during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 139, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.11.022>

51. Quevedo, R., Diaz, O., Valencia, E., Pedreschi, F., Bastias, J. M., & Siche, R. (2016). Differences between the order model and the Weibull model in the

modeling of the enzymatic browning. *Food and Bioprocess Technology*, 9(11), 1961–1967. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1775-1>

52. Valverde, M. E., Hernandez-Perez, T., & Paredes-Lopez, O. (2015). Edible mushrooms: improving human health and promoting quality life. *International Journal of Microbiology*, 376-387. <https://doi.org/10.1155/2015/376387>

53. Combet, E., Henderson, J., Eastwood, D. C., & Burton, K. S. (2006). Eight-carbon volatiles in mushrooms and fungi: properties, analysis, and biosynthesis. *Mycoscience*, 47(6), 317–326. <https://doi.org/10.1007/s10267-006-0318-4>

54. Chung, I. M., Kim, S. Y., Han, J. G., Kong, W. S., Jung, M. Y., & Kim, S. H. (2020). Fatty acids and stable isotope ratios in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) indicate the origin of the cultivation substrate used: a preliminary case study in Korea. *Foods*, 9(9), 1210–1223. <https://doi.org/10.3390/foods9091210>

55. Thakur, M. (2018). Advances in post-harvest technology and value additions of edible mushrooms. *Indian Phytopathology*, 71(3), 303–315. <https://doi.org/10.1007/s42360-018-0060-9>

56. Jiang, W., Chen, Y., He, X., Hu, S., Li, S., & Liu, Y. (2018). A study of the tyramine/glucose Maillard reaction: Variables, characterization, cytotoxicity and preliminary application. *Food Chemistry*, 239, 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.085>

57. Wang, Q., Li, S., Han, X., Ni, Y., Zhao, D., & Hao, J. (2019). Quality evaluation and drying kinetics of shiitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave–assisted drying methods. *LWT-Food Science and Technology*, 107, 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.020>

58. Chen, X., Yu, J., Cui, H., Xia, S., Zhang, X., & Yang, B. (2018). Effect of temperature on flavor compounds and sensory characteristics of Maillard reaction products derived from mushroom hydrolysate. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 23(2), 247–266. <https://doi.org/10.3390/molecules23020247>.

59. Pei, F., Yang, W. J., Shi, Y., Sun, Y., Mariga, A. M., Zhao, L. Y., Fang, Y., Ma, N., An, X. X., & Hu, Q. H. (2014). Comparison of freeze-drying with three different combinations of drying methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices. *Food and Bioprocess Technology*, 7(3), 702–710. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1058-z>
60. Garcia-Segovia, P., Andres-Bello, A., & Martinez-Monzo, J. (2011). Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. *LWT-Food Science and Technology*, 44(2), 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.08.010>
61. Yang, W., Du, H., Mariga, A. M., Pei, F., Ma, N., & Hu, Q. (2017). Hot air drying process promotes lignification of *Lentinus edodes*. *LWT. Food Science and Technology*, 84, 726–732. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.06.039>
62. Kantrong, H., Tansakul, A., & Mittal, G. S. (2014). Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3594–3608. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0888-4>
63. Subramaniam, S., Wen, X. Y., Zhang, Z. T., & Jing, P. (2020). Changes in the morphometric, textural, and aromatic characteristics of shiitake mushrooms during combined humid-convective drying. *Drying Technology*, 2020, 1–12. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1760878>
64. Zhang, N., Chen, H., Zhang, Y., Ma, L., & Xu, X. (2013). Comparative studies on chemical parameters and antioxidant properties of stipes and caps of shiitake mushroom as affected by different drying methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(12), 3107–3113. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6151>
65. Bhatta, S., Janezic, T. S., & Ratti, C. (2020). Freeze-drying of plant based foods. *Foods*, 9(1), 87. <https://doi.org/10.3390/foods9010087>
66. Zhao, Y., Bi, J., Yi, J., Jin, X., Wu, X., & Zhou, M. (2019). Evaluation of sensory, textural, and nutritional attributes of shiitake mushrooms (*Lentinula*

edodes) as prepared by five types of drying methods. *Journal of Food Process Engineering*, 42(4), e13029. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13029>

67. Argyropoulos, D., Heindl, A., & Muller, J. (2011). Assessment of convection, hot-air combined with microwave-vacuum and freeze-drying methods for mushrooms with regard to product quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(2), 333–342. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02500.x>

68. Xu, J. G., & Duan, J. L. (2015). Effects of drying methods on physicochemical properties and antioxidant activity of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*). *Agriculture and Food Sciences Research*, 2 (2), 51–55.

69. Liu, Y., Luo, M., Liu, F., Feng, X., Ibrahim, S. A., Cheng, L., & Huang, W. (2020). Effects of freeze drying and hot-air drying on the physicochemical properties and bioactivities of polysaccharides from *Lentinula edodes*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.222>

70. Wray, D., & Ramaswamy, H. S. (2015). Novel concepts in microwave drying of foods. *Drying Technology*, 33(7), 769–783. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.985793>

71. Zhang, Z., Lv, G., Pan, H., Wu, Y., & Fan, L. (2009). Effects of different drying methods and extraction condition on antioxidant properties of shiitake (*Lentinus edodes*). *Food Science and Technology Research*, 15(5), 547–552. <https://doi.org/10.3136/fstr.15.547>

72. Tian, Y., Zhao, Y., Huang, J., Zeng, H., & Zheng, B. (2016). Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms. *Food Chemistry*, 197, 714–722. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.029>

73. Politowicz, J., Lech, K., Lipan, L., Figiel, A., & Carbonell-Barrachina, A. A. (2018). Volatile composition and sensory profile of shiitake mushrooms as affected by drying method. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1511–1521. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8622>

73. Kurata, D., Orikasa, T., Komuro, M., Sasaki, K., & Koide, S. (2020). Quality evaluation of shiitake mushrooms dried by vacuum microwave treatment. *Food Science and Technology Research*, 26(3), 339–350. <https://doi.org/10.3136/fstr.26.339>

74. Qi, L. L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., Meng, X. Y., & Chen, H. Z. (2014). Comparison of drying characteristics and quality of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) using different drying methods. *Drying Technology*, 32(15), 1751–1761. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.929588>

75. Shishir, M. R. I., Karim, N., Bao, T., Gowd, V., Ding, T., Sun, C., & Chen, W. (2019). Cold plasma pretreatment—A novel approach to improve the hot air drying characteristics, kinetic parameters, and nutritional attributes of shiitake mushroom. *Drying Technology*, 38(16), 2134–2150. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1683860>

76. Wang, H., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2014). Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*). *Drying Technology*, 32(15), 1791–1802. <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.947426>

77. Wang, H. J., An, D. S., Rhim, J. W., & Lee, D. S. (2015). A multifunctional biofilm used as an active insert in modified atmosphere packaging for fresh produce. *Packaging Technology and Science*, 28(12), 999–1010. <https://doi.org/10.1002/pts.2179>

78. Zhao, Y., Bi, J., Yi, J., Njoroge, D.M., Peng, J., & Hou, C. (2019). Comparison of dynamic water distribution and microstructure formation of shiitake mushrooms during hot air and far infrared radiation drying by low-field nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(6), 2826–2834. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9494>

79. Li, T., Lee, J. W., Luo, L., Kim, J., & Moon, B. (2018). Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on the quality preservation of *Pleurotus eryngii*. *Applied Biological Chemistry*, 61(3), 257–265. <https://doi.org/10.1007/s13765-018-0354-8>

80. Singh, P., Langowski, H. C., Wani, A. A., & Saengerlaub, S. (2010). Recent advances in extending the shelf life of fresh *Agaricus* mushrooms: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *90*(9), 1393-1402. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3971>
81. Liang, D., Lin, F., Yang, G., Yue, X., Zhang, Q., Zhang, Z., & Chen, H. (2015). Advantages of immersion freezing for quality preservation of litchi fruit during frozen storage. *LWT-Food Science and Technology*, *60* (2), 948-956. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.034>
82. Shim JB, Jo YJ, Choi MJ, Min SG, Yoo SM, Chun JY (2015) Potential combination of various freezing and thawing techniques applicable for frozen storage of mushroom (*Lentinula edodes*). *Food Eng Prog* *19*(3):218–225
83. Liu, H., Jiao, J., Tian, Y., Liu, J. A., Yuan, P., & Wu, X. (2022). Drying kinetics of *Pleurotus eryngii* slices during hot air drying. *Open Physics*, *20*(1), 265-273. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0029>
84. Yang, R. L., Li, Q., & Hu, Q. P. (2020). Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of *Pleurotus eryngii* as affected by different drying methods. *Scientific Reports*, *10*(1), 121. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56901-1>
85. Авдєєва, Л.Ю., Декуша. Г.В., Турчина, Т.Я, Макаренко, А.А. (2023). Використання різних способів сушіння в технологіях сухих грибних концентратів. *Теплофізика та теплоенергетика*, *45* (3), 37-48. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2023.5>
86. Guo, X.H., Xia, C.Y., Tan, Y.R., Chen, L., Ming, J. (2014). Mathematical modeling and effect of various hot-air drying on mushroom (*Lentinus edodes*). *Journal of Integrative Agriculture*, *13*(1), P. 207–216. [https://doi:10.1016/S2095-3119\(13\)60265-8](https://doi:10.1016/S2095-3119(13)60265-8)
87. Mujumdar, A.S. (2007). *Handbook of industrial drying*. Boca Raton: RC/Taylor and Francis.
88. Timm, T.G., Pasko, R.Z., da Gama Campos C.S., Helm C.V., Tavares L.B.B. (2019). Drying process of *Lentinula edodes*: Influence of temperature on β -

glucan content and adjustment of mathematical models. *Agricultural Sciences*, 43, p. 1–12. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943025719>.

89. Wang H. *Mid-Infrared Drying Shiitake Mushrooms and Its Hybrid Study*. Wuxi: Jiangnan University. 2014.

90. Солодко, Л.М., Штанько, О.А., Сімахіна, Г.О. (2013). Спосіб отримання функціонального продукту з їстівних грибів. Патент України на корисну модель № 83002. Державна служба інтелектуальної власності України. 27.08.2013, Бюл. № 16.

91. Salehi, F., Kashani Nejad, M., Sadeghi Mahoonak, A.R. and Ziyai Far, A. M. (2016). Drying of Button Mushroom by Infrared-Hot Air System. *Journal of food science and technology (Iran)*, 13(59), 151-159.

92. Турчина, Т. Я., Жукотський, Е. К., Костянець, Л. О., & Макаренко, А. А. (2019). Моделювання впливу β -циклодекстрину як структуруючої добавки на кінетику сушіння водної суспензії їстівного гриба шиїтаке. *Scientific Works*, 83(1). <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1434>

93. Турчина, Т. Я., Жукотський, Е. К., Декуша, Г. В., & Макаренко, А. А. (2020). Вплив структуруючої добавки на вихід грибного порошку при сушінні методом розпилювання. *Scientific Works*, 84 (2), 67-75.

94. Ястреба, Ю.А., Пасічний, В.М. (2010). Дослідження біологічної цінності порошкоподібного напівфабрикату з грибів глива звичайна. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького*, 12, 2(44) Частина 4. 124-128.

95. Бурлака, Т. В., Дубковецький, І. В., & Малежик, І. Ф. (2015). Дослідження сушіння культивованих грибів різними інфрачервоними випромінювачами. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 47 (2), 12-17.

96. Вишневський, В.М. (2023). Енергоефективна камерна сушарка з комбінованим нагрівом теплоносія. [Дис. доктора філософії, Інститут технічної теплофізики НАН України]. https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/05/dis_vyshnevskiyi.pdf.

97. Петрова, Ж.О. & Снежкін, Ю.Ф. (2018). *Енергоефективні теплотехнології переробки функціональної сировини*. Монографія. Київ: Наукова думка.

98. Nindo, C.I., Sun, T., Wang, S.W., Tang, J. & Powers, J.R., (2003). "Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus" (*Asparagus officinalis*, L.), *Lebensm. -Wiss u.-Technol*, 36, 507-516.

99. Sniezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Petrova Zh.O., Samoilenko K.M., Petrov A.I., Biriukov S.O. (2025). Energy-efficient low-temperature unit of condensation type for drying seed grain. *Енерготехнології та ресурсозбереження*, 82(1), 127-137. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.09>

100. Sniezhkin Yu., Paziuk V., Samoilenko K., Dakhnenko V., Biriukov S. (2025). Renewable energy sources in heat pumps for energy efficient low-temperature drying of seed grain. *Відновлювана енергетика*, 2, 173-181.

101. Слободянюк К.С. (2020). Інтенсифікація процесу сушіння фітоестрогенної сировини на основі сої. [Дис. к.т.н., Інститут технічної теплофізики НАН України]. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2020/01/disslobod.pdf>

102. Петрова Ж.О. (2013). Створення енергоефективних теплотехнологій виробництва функціональних харчових порошків. [Дис. доктора технічних наук, Інститут технічної теплофізики НАН України].

103. Петрова Ж.О., Слободянюк К.С. (2019). Розробка енергоефективного режиму сушіння фітоестрогенної рослинної сировини. *Наукові праці ОНАХТ*, 83(1), 85-91.

104. Sniezhkin, Y., Petrova, Zh., Samoilenko, K., Novikova, Y., Vyshnievska, T. (2025). Research of sorption of composites based on municipal solid waste and biomass. *Відновлювана енергетика*, 1(80), 159-167. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).159-167](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).159-167)

105. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Paziuk, V., Mykhailyk, V., Korinchevska, T., Samoilenko, K. (2023). *Technological aspects of producing refuse derived fuel*.

TEC031000 Power Resources / General Publishing monograph indexed *Scopus*
<https://doi.org/10.15587/978-617-8360-02-3.ch3> , p. 76-105

106. Petrova Z., Novikova Y., Petrov A., Samoilenko K., Golodryga M. (2025). Peat processing into composite fuel. *Paliva*, 17(1), 13-19. <https://doi.org/10.35933/paliva.2025.01.03>

107. Soumia Teniou, Abderrahmane Bensegueni, Brooks M. Hybertson, Bifeng Gao, Swapan K. Bose, Joe M. McCord, Benoît Chovelon, Chawki Bensouici, Ahc`ene Boumendjel, Isabelle Hininger-Favier (2022). Biodriven investigation of the wild edible mushroom *Pleurotus eryngii* revealing unique properties as functional food. *Journal of Functional Foods*. 89 (2022) 104965. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.104965>

108. Yang, R. L., Li, Q., & Hu, Q. P. (2020). Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of *Pleurotus eryngii* as affected by different drying methods. *Scientific Reports*, 10(1), 121. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56901-1>

109. Ba, D. M., Ssentongo, P., Beelman, R. B., Muscat, J., Gao, X., & Richie, J. P. (2021). Higher Mushroom Consumption Is Associated with Lower Risk of Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Advances in Nutrition*, 12(5), 1691–1704. <https://doi.org/10.1093/advances/nmab015>.

110. Guo, Y.; Chen, X.; Gong, P.; Wang, R.; Qi, Z.; Deng, Z.; Han, A.; Long, H.; Wang, J.; Yao, W.; et al. (2023). Advances in Postharvest Storage and Preservation Strategies for *Pleurotus eryngii*. *Foods*, 12, 1046, 2-19. <https://doi.org/10.3390/foods12051046>

111. Zhang, B., Li, Y., Zhang, F., Linhardt, R. J., Zeng, G., & Zhang, A. (2020). Extraction, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Pleurotus eryngii*: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1342-1347.

112. Guo, Y., Chen, X., Gong, P., Li, Z., Wu, Y., Zhang, J., ... & Chen, F. (2023). Advances in the mechanisms of polysaccharides in alleviating depression and its complications. *Phytomedicine*, *109*, 154566.

113. Guo, Y.; Chen, X.; Gong, P. (2021). Classification, structure and mechanism of antiviral polysaccharides derived from edible and medicinal fungus. *Int. J. Biol. Macromol.*, *183*, 1753–1773.

114. интернет-рес. https://uk.wikipedia.org/wiki/Плеврот_черепичастий

115. Martinez-Medina, G. A., Chávez-González, M. L., Verma, D. K., Prado-Barragán, L. A., Martínez-Hernández, J. L., Flores-Gallegos, A. C., ... & Aguilar, C. N. (2021). Bio-functional components in mushrooms, a health opportunity: Ergothionine and huitlacoche as recent trends. *Journal of Functional Foods*, *77*, 104326.

116. Ruthes, A. C., Smiderle, F. R., & Iacomini, M. (2016). Mushroom heteropolysaccharides: A review on their sources, structure and biological effects. *Carbohydrate Polymers*, *136*, 358–375.

117. Reddy, S. M. (2016). Diversity and applications of mushrooms. In B. Bahadur, M. Venkat Rajam, L. Sahijram, & K. Krishnamurthy (Eds.), *Plant biology and biotechnology* (pp. 231–261). Springer.

118. Kalařc, P. (2013). A review of chemical composition and nutritional value of wild-growing and cultivated mushrooms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *93*, 209–218.

119. Cheung, P. C. K. (2013). Mini-review on edible mushrooms as source of dietary fiber: Preparation and health benefits. *Food Science and Human Wellness*, *2*, 162–166.

120. Ghormade, V., Pathan, E. K., & Deshpande, M. V. (2017). Can fungi compete with marine sources for chitosan production. *International Journal of Biological Macromolecules*, *104*, 1415–1421.

121. Paudel, E., Boom, R. M., van Haaren, E., Siccama, J., & van der Sman, R. G. M. (2015). Effects of cellular structure and cell wall components on water holding capacity of mushrooms. *Journal of Food Engineering*, *187*, 106–113.

122. Nishihara, M., Watanabe, A., & Asada, Y. (2007). Isolation and characterization of the gene encoding a chitin synthase with a myosin motor-like domain from the edible basidiomycetous mushroom, *Lentinula edodes*, and its expression in the course of fruit-body formation. *Mycoscience*, *48*, 109–116.
123. Bonomi, F., & Iametti, S. (2018). Proteins. Foods. *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14544-5>.
124. Lin, J. W., Jia, J., Shen, Y. H., Zhong, M., Chen, L. J., Li, H. G., Ma, H., Guo, Z. F., Qi, M. F., Liu, L. X., & Li, T. L. (2013). Functional expression of FIP-5, a fungal immunomodulatory protein from the edible mushroom *Flammulina velutipes* in *Pichia pastoris* GS115. *Journal of Biotechnology*, *168*, 527–533.
125. Singh, B. P., & Passari, A. K. (2018). *Biology of Macrofungi*. Cham: Springer.
126. S´anchez, C. (2017b). Bioactives from mushroom and their application. In M. Puri (Ed.), *Food bioactives*, 23–57. Springer International Publishing AG.
127. Xu, X., Yan, H., Chen, J., & Zhang, X. (2011). Bioactive proteins from mushrooms. *Biotechnology Advances*, *29*, 667–674.
128. Singh, S. S., Wang, H., Chan, Y. S., Pan, W., Dan, X., Yin, C. M., Yin, C. M., Akkouh, O., & Ng, T. B. (2015). Lectins from edible mushrooms. *Molecules*, *20*, 446–469.
129. Kumar, S., Sharma, B., Bhadwal, P., Sharma, P., & Agnihotri, N. (2018). Lipids as nutraceuticals: A shift in paradigm. In A. M. Holban, & A. M. Grumezescu (Eds.), *Therapeutic foods*, 51–98. Academic Press.
130. Sande, D., de Oliveira, G. P., Moura, M. A. F., Martins, B. A., Lima, M. T. N. S., & Takahashi, J. A. (2019). Edible mushrooms as a ubiquitous source of essential fatty acids. *Food Research International*, *125* (108524).
131. Ma, G., Yang, W., Zhao, L., Pei, F., Fang, D., & Hu, Q. (2018). A critical review on the health promoting effects of mushrooms nutraceuticals. *Food Science and Human Wellness*, *7*, 125–133.

132. Rathore, H., Prasad, S., & Sharma, S. (2017). Mushroom nutraceuticals for improved nutrition and better human health: A review. *Pharma Nutrition*, 5, 35–46.
133. Roncero-Ramos, I., & Delgado-Andrade, C. (2017). The beneficial role of edible mushrooms in human health. *Current Opinion in Food Science*, 14, 122–128.
134. Valverde, M. E., Hernández-pérez, T., & Paredes-l'opez, O. (2015). Edible mushrooms: Improving human health and promoting quality life (pp. 1–14).
135. Khangwal, I., & Shukla, P. (2019). Potential prebiotics and their transmission mechanisms_Recent approaches. *Journal of Food and Drug Analysis*, 27, 649–656.
136. Mishra, K. K., Pal, R. S., Arunkumar, R., Chandrashekara, C., Jain, S. K., & Bhatt, J. C. (2013). Antioxidant properties of different edible mushroom species and increased bioconversion efficiency of *Pleurotus eryngii* using locally available casing materials. *Food Chemistry*, 138, 1557–1563.
137. Islam, T., Ganesan, K., & Xu, B. (2019). New insight into mycochemical profiles and antioxidant potential of edible and medicinal mushrooms: A review. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 21, 237–251.
138. Yildiz, O., Can, Z., Laghari, A. Q., Şahin, H., & Malkoç, M. (2015). Wild edible mushrooms as a natural source of phenolics and antioxidants. *Journal of Food Biochemistry*, 39, 148–154.
139. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., Петров, А.І., Новікова, Ю.П. (2024). *Теплотехнології переробки торфу на альтернативне паливо та добриво*. Про формат.
140. Ткаченко, С. Й., Співак, О. Ю. (2007). *Сушильні процеси та установки*. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ.
141. ДСТУ 7804:2015 «Продукти перероблення фруктів та овочів. Методи визначання сухих речовин або вологи».

142. ДСТУ ISO 11357-4:2010. Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Част. 4. Визначення питомої теплоємності. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 8 с.

143. Subramaniam, S., Jiao, S., Zhang, Z., & Jing, P. (2021). Impact of post-harvest processing or thermal dehydration on physiochemical, nutritional and sensory quality of shiitake mushrooms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3), 2560-2595. DOI: 10.1111/1541-4337.12738

144. Petrova, Zh., Samoilenko, K., Novikova, Yu., Petrov, P. (2022). Equilibrium humidity as one of important energy-efficiency indexes in drying of food powder materials of biological nature. *Energy Engineering and Control Systems*, 8(2), 90 – 97. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.090>

145. Дмитренко Н.В. (2016). Вплив стану води на теплофізичні властивості та процес сушіння рослинної сировини [Дис. канд. технічн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України]. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/10/disertacija-dmitrenko-nv.pdf>

146. Новікова Ю.П. (2023). Інтенсифікація зневоднення та горіння застарілих мулових відкладень [Дис. доктора філософії, Інститут технічної теплофізики НАН України]. https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2023/05/dis_novikova-.pdf

147. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>

148. Держспоживстандарт. (1996). Перетворювані термоелектричні. Загальні технічні умови (ДСТУ 2857-94).

149. Снежкін Ю.Ф., Декуша Л.В., Дубовікова Н.С., Грищенко Т.Г., Воробйов Л.Й., Боряк Л.А. (2008). Патент України № 84075 МПК G01 N25/26, G01 N25/28. Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів.

150. інт.-посилання https://uk.wikipedia.org/wiki/молоткова_дробарка

151. Пилипчук, М.І. Григор'єв, А.С., Шостак В.В. (2007). *Основи наукових досліджень*. Підручник. Київ, Знання.
152. Самойленко, К.М. (2019). Інтенсифікація тепломасообміну при купажуванні та сушінні антиоксидантної сировини. [Дис. канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України]. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/06/dis.pdf>
153. Капрельянц, Л.В. (2014). *Соеві продукти та інгредієнти: хімія, технологія, використання*. Монографія. Київ: ТЕС.
154. Посилання на інтернет джерело: <https://orthomol.life/uk/10-produkt%D1%96v-z-najvicshim-vm%D1%96stom-b%D1%96lka.html> (дата звернення 15 січня 2026 р.)
155. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., Samoilenko, K.M., Vishnevsky, V.M. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. *Енергетика та автоматика*. 6. 15-27. DOI 10.31548/energiya2020.06.015
156. Petrova, Zh., Slobodianiuk, K., Samoilenko, K., Vishnevsky, V., Grakov O. (2022). Research of the kinetics of the drying process of combined plant materials. *Наукові праці ОНТУ*, 86(1) 69-77. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2406>
157. Petrova, Zh., Paziuk, V., Samoilenko, K., Novikova, Yu., Slobodianiuk, K., Petrov, P. (2025). Drying of protein-carotene-containing raw materials based on carrot and fabaceae. *Journal of Chemistry and Technologies*, 2025, Vol. 33 No. 2, P. 401-417 <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.302324>.
158. Соя та її роль у довголітті людства. [URL:http://agrobusiness.com.ua/agro/ekspertna-dumka/item/8198-soia-ta-ii-rol-u-dovholittiliudstva.html](http://agrobusiness.com.ua/agro/ekspertna-dumka/item/8198-soia-ta-ii-rol-u-dovholittiliudstva.html).
159. Дробот, В.Б. (2001). Сучасний стан і перспективи використання продуктів переробки сої у хлібопекарській, макаронній, кондитерській та харчоконцентратній промисловості. *Наукові праці*. 21. 295 – 298.

160. Abdel-Naeem, H. H., Ebaid, E. M., Khalel, K. H., Imre, K., Morar, A., Herman, V., & El-Nawawi, F. A. (2022). Decontamination of chicken meat using dielectric barrier discharge cold plasma technology: The effect on microbial quality, physicochemical properties, topographical structure, and sensory attributes. *Lwt*, *165*, 113739. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113739>

161. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Самойленко, К.М., Вишнєвський, В.М., Петров, П.І. (2024). Спосіб одержання сушеного гранульованого м'ясного продукту (Заявка № а202405902). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1832897/>

162. Петрова, Ж.О., Кузнєцова, І.В., Самойленко, К.М., Петров, П.І., Маноха, Д.О. (2025). Переробка білкововмісної рослинної сировини на сухий продукт. *Продовольчі ресурси*, *13*(24), 33-44 <https://doi.org/10.31073/foodresources2025-24-03>.

163. Petrova, Zh., Samoilenko, K., Novikova, Yu., Petrov, P., Yurchak, O. (2025). The Influence of Dehydration Mode on the Duration of the Drying Process of Protein-Containing Raw Materials of Animal Origin. *5th International Scientific Conference Chemical Technology and Engineering*. (p. 389-394). Lviv, Ukraine.

164. Енциклопедія харчування (в десяти томах). Під ред. Л.З. Шильмана. Том 6. Харків, Мир книг, 2017.

165. Посилання на інтернет-джерело <https://studfile.net/preview/5184302/page:4/> (дата звернення 12.09. 2025 р.)

166. Петрова, Ж.О., Кузнєцова, І.В., & Самойленко, К.М. (2024). Зниження енергоємності процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів шляхом застосування комбінованих методів сушіння на прикладі *Pleurotus Eryngii*. *Продовольчі ресурси*, *11* (21), 141–148. <https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-14>

167. Petrova, Zh., Paziuk, V., Samoilenko, K. (2025). The influence of mode parameters on the drying duration of cultivated mushrooms. *Збірник тез доповідей*

XVI міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 11 – 12 листопада 2025 року, – К: Інститут технічної теплофізики НАН України. (с. 49).

168. Самойленко, К.М., Пазюк, В.М. (2023). Енергоефективність в процесах сушіння при переробці колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи. XIII Міжнародна онлайн конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 7 – 8 листопада 2023 р., 56.

169. Sniezhkin, Y., Petrova, Z., Bessarab, O., Samoilenko, K., Grakov, D., & Petrov, P. (2023). Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 12 (3). DOI: 10.24263/2304-974X-2023-12-3-10

170. Petrova, Zh. O., Samoilenko, K. M. (2024). *Convective drying of Shiitake mushrooms with a focus on functionality and naturalness. Responsible production and consumption: realization in new generations of food products: Scientific monograph*. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 266-282. ISBN 978-9934-26-445-0. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-11>

171. Самойленко, К.М. (2021). Сучасні методи сушіння грибів шиїтаке (*Lentinula edodes*). *Збірник тез доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”* (89-91) (06-08 грудня 2021 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

172. Petrova, Zh., Samoilenko, K., Novikova, Yu. (2025). Effect of heat carrier temperature during convective drying of cultivated shiitake mushrooms. The international conference food for life “Evolution of Sugar: Advanced Technologies for the Next Generation Bioeconomy”, April 16-17, 73-75.

173. Argyropoulos, D., Khan, M., Müller, J. (2010). Effect of drying temperature and pre-treatment on color and textural changes during convective air drying of *Boletus edulis* mushroom, *17th International Drying Symposium (IDS 2010)*, 1404-1409.

174. Petrova, Zh., Samoilenko, K. (2025). Research on convective drying of common oyster mushroom. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 50(4), 67-74. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.7>

175. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., Самойленко, К.М., Петров, А.І. (2024). Спосіб одержання харчового порошку з грибів шиїтаке. (Заявка № а202406176 від 24.12.2024 р.). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

176. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Самойленко, К.М., Петров, П.І. (2025). Спосіб одержання м'ясного продукту швидкого приготування. (Заявка № а202500756). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

177. Снежкін, Ю.Ф., Декуша, Л.В., Дубовікова, Н.С., Грищенко, Т.Г., Воробйов, Л.Й., Боряк Л.А. (2006). Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів. Патент України № 84075 МПК G01N 25/26, G01N25/28. Заявка № а200613266 від 15.12.2006.

178. Петрова, Ж., Дмитренко, Н., Самойленко, К. (2025). Теплота випаровування води із плодового тіла гриба печериці звичайної (*agaricus campestris* L.) при різних температурах. *Міжнародна науково-практична конференція ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ, присвячена 105-річчю від дня народження професора Драганова Бориса Харлампійовича, 19-20 листопада 2025 р.* с. 14-16.

179. Дмитренко, Н.В., Іванов, С.О., Самойленко, К.М. (2026). Вплив температури та зневоднення на питому теплоємність плодового тіла гриба печериця. *The 2nd International scientific and practical conference "Scientific development in a changing word"* (February 16-18, 2026) SPC "Sci-conf.com.ua", Lviv, Ukraine. 206-208. ISBN 978-966-8219-80-1

180. Rubina, T., & Aboltins, A. (2021). Drying characteristics of mushrooms. *Proceedings of the Engineering for Rural Development, Latvia University of Life Sciences and Technologies*, 20, 557-563.

181. Бурлака, Т.В. (2018). Інтенсифікація процесу сушіння культивованих грибів. [Дис. кан. техн. наук, 05.18.12, Національний університет харчових технологій].
<https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/60907362-aec5-47f8-852b-25e5e320b72c/content>

182. Дмитренко, Н.В., Дубовікова, Н.С., Снежкін, Ю.Ф., Михайлик, В.А., Декуша, Л.В., Воробйов, Л.Й. (2011). Вивчення впливу стану води в харчових рослинних матеріалах на теплоту випаровування. *Наукові праці ОНАХТ*, 40(2), 71-75.

183. Дмитренко, Н. В., Самойленко, К. М. (2026). Специфіка видалення зв'язаної води з тканин плодового тіла гриба печериця звичайна при сушінні. *The 4th International scientific and practical conference "European science and innovation congress"* (March 9-11, 2026) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 157-159.

184. Дмитренко, Н. В., Самойленко, К. М., Петрова, Ж. О. (2026). Вплив температури сушіння грибів на зовнішній вигляд готового продукту та енергозатрати на випаровування. *The 8th International scientific and practical conference "Science and education: synergy of innovation"*. Berlin, Germany, 166-168.

185. Сіматос Д., Фоур М., Бонжур І., Коуч М. (1980). Застосування диференціального термічного аналізу та диференціальної скануючої калориметрії при вивченні води в харчових продуктах. Вода в харчових продуктах. Під ред. Р.Б. Докуорта. *Харчова промисловість*, 156-170.

186. Давиденко, Б.В., Самойленко, К.М. (2024). Теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів як об'єктів сушіння. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(2), 42-51. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.5>

187. Dolinskiy A. A., Dorfman A. Sh., Davydenko B. V. Conjugate heat and mass transfer in continuous processes of convective drying. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991.V.34, № 11. P. 2883– 2889.

188. Petrova Zh., Samoilenko K., Novikova Yu., Petrov P., Vyshnevskyi V., Petrov A. (2024). Adsorption properties of fast-food products. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2024, 32 (4). 1030-1038 <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.302324>.

189. Petrova Zh., Samoilenko K. (2021). Adsorption Properties of Combined Vegetable Powders. *Energy Engineering and Control Systems 2021; Volume 7, Number 1* pp. 38 – 47. <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.01.038>.

190. Petrova Zh., Samoilenko K., Novikova Yu., Petrov P. (2022). Equilibrium humidity as one of important energy-efficiency indexes in drying of food powder materials of biological nature. *Energy Engineering and Control Systems*. 8 (2). 90 – 97. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.090>

191. Petrova Zh., Paziuk V., Samoilenko K., Vyshnevskyi V., Petrov P., Koval I. (2024). The energy-efficient chamber dryer for drying meat products. *Food Science and Technology*. 2024, 18 (4). <https://doi.org/10.15673/fst.v18i4.3142>.

192. Snezhkin, Yu.F, Petrova, Zh.O, Paziuk, V.M, Vyshnevskyi, V.M, Malaschyk, N.S. (2023). Energy-Efficient Chamber Dryer with Thick Alloy Heating Elements. *Energotehnologii i Resursosberezhenie*, 75(2), 85–95.

193. <https://uk.wikipedia.org/wiki/хітин>, дата звернення 14.02.2026 р.)

194. Снежкін, Ю. Ф., Петрова, Ж. О. (2007). *Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків*. Київ: Академперіодика.

195. Самойленко, К.М., Вишневіська, Т.А. (2025). Залежність коефіцієнту набухання від режимів сушіння м'яса свинини. *Збірник тез доповідей XVI міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 11 – 12 листопада 2025 року*, Інститут технічної теплофізики НАН України, 146.

196. Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М. (2021). Рівноважна вологість сухих продуктів швидкого приготування (горохово-морквяного супу-пюре).

Збірник тез доповідей XXIX всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів" 06 - 08 грудня 2021 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 30-33.

197. Petrova, Zh.O., Samoilenko, K.M., Novikova, Yu.P., Vyshnievska, T.A. (2022). Investigation of the adsorption properties of powder-form colloidal capillary-porous materials based carrot. *Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» 12-16 вересня 2022 р., 9-10.*

198. Петрова, Ж.О., Самойленко, К.М., Новікова, Ю.П., Граков, Д.П. (2022). Адсорбційні властивості сухих функціональних продуктів швидкого приготування. *Збірник тез: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні досягнення біотехнології», 23–24 вересня 2022 р., Національний авіаційний університет / ред. кол.: Гаркава К. Г. та ін. — Київ, 76-78. <https://doi.org/10.18372/2306-6407.1.17168>*

199. Petrova, Zh.O., Samoilenko, K.M., Novikova, Yu.P., Vyshnievska, T.A. (2022). Investigation of the adsorption properties of powder-form colloidal capillary-porous materials based carrot. *Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», 9-10.*

200. Самойленко, К.М. (2022). Адсорбційні властивості колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи. *Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (5-7 грудня 2022 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 95-97.*

201. Petrova, Zh., Novikova, Yu., Samoilenko, K., Petrov, P. (2023). Adsorption studies of functional quick cooking products on the example of borsch. *Theoretical and practical aspects of modern scientific research: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the III International Scientific*

and Practical Conference, Seoul, November 24, 2023. Seoul-Vinnytsia: Case Co., Ltd. & European Scientific Platform, 2023. UDC001 (08). ISBN 978-617-8126-69-8. ISBN 978-89-5764-769-1 (PDF). 84-85.

202. Petrova, Zh., Samoilenko, K., Slobodianiuk, K., Novikova, Yu. (2025). Adsorption research of pea puree soup. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC*, 143-145. DOI 10.36074/logos-04.04.2025.029.

203. Снежкін, Ю.Ф. (2025). *Теплофізичні і структурно-хімічні властивості сировини, тепломасообмінні процеси сушіння і отримання плодово-ягідних порошків*. Том 1. Тропеа. ISBN 978-617-8268-90-9.

204. Fennema, O. (1996). *Water and ice*. Food Chemistry. (ed. Owen Fennema. – Marcel Dekker), New York.

205. Levine, H., Slade, L., Karel, M. (1988). *Moisture Management in Food Systems*. Center for Professional Advancement. (PO Box H. East Brunswick, NJ08816, USA).

206. Scott, W.J. Mraz, E.M., Stewart, G.F. (eds.) (1957). Water relations of food spoilage microorganisms. In: *Advances in Food Research*, VII, Academic Press, New York, 83-127.

207. Rodel, W., Kress-Rogers, E. and Brimelow C.J.B. (eds.). (2001). Water activity and its measurement in food. In: *Instrumentation and Sensors for the Food Industry*, 2nd edition Woodhead, Cambridge, 453-483.

208. Leung, H. L. (1987). Influence of water activity on chemical reactivity. *Water activity: theory and application to food*. New York. Marcel Dekker, 27-53.

209. Schmidt, S. J. (2004). Water and solids mobility in foods. *Advances in Food and Nutritional Research*, Vol. 48. DOI: 10.1016/S1043-4526(04)48001-2.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати
дисертації

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав та у виданнях України, що індексовані в міжнародних наукометричних базах даних (*Scopus* та *Web of Science*):

1. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Bessarab, O., **Samoilenko, K.**, Grakov, D., & Petrov, P. (2023). Intensification of drying process of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) using combined methods of dehydration. *Ukrainian Food Journal*, 12 (3). 444-457. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-3-10>
2. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P., Vyshnievskyi, V., & Petrov, A. (2024). Adsorption properties of fast-food products. *Journal of Chemistry and Technologies*. 32(4). 1030-1038. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.302324>
3. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Vyshnevskyi, V., Petrov, P., & Koval I. (2024). The energy-efficient chamber dryer for drying meat products. *Food Science and Technology*. 18(4), 74-81. <https://doi.org/10.15673/fst.v18i4.3142>
4. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Slobodianiuk, K., Petrov, P. (2025). Drying of protein-carotene-containing raw materials based on carrot and fabaceae. *Journal of Chemistry and Technologies*, 33(2), 401-417 <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i4.302324>
5. Sniezhkin, Yu.F., Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O., **Samoilenko, K.M.**, Petrov, A.I., Biriukov, S.O. (2025). Energy-efficient low-temperature unit of condensation type for drying seed grain. *Energy Technologies & Resource Saving*, 82(1), 127-137. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2025.09>

6. Petrova, Z., Novikova, Y., Petrov, A., **Samoilenko, K.**, Golodryga, M. (2025). Peat processing into composite fuel. *Paliva*, 17(1), 13-19. <https://doi.org/10.35933/paliva.2025.01.03>

7. Sniezhkin, Y., Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Y., Vyshnievska, T. (2025). Research of sorption of composites based on municipal solid waste and biomass. *Vidnovluvana energetika*, 1(80), 159-167. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).159-167](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).159-167)

8. Sniezhkin, Yu., Paziuk, V., **Samoilenko, K.**, Dakhnenko, V., Biriukov, S. (2025). Renewable energy sources in heat pumps for energy efficient low-temperature drying of seed grain. *Vidnovluvana energetika*, 2, 173-181 [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\)173-181](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81)173-181)

Статті у наукових фахових виданнях України:

9. Petrova, Zh.O., Slobodianiuk, K.S., **Samoilenko, K.M.**, Vishnevsky, V.M. (2020). Universal modes of technological processing of colloid capillary-porous materials by convective drying method. *Енергетика та автоматика*, 6, 15-27. <https://doi.org/10.31548/energiya2020.06.015>

10. Petrova Zh., **Samoilenko K.**, Vishnevsky V. (2020). Processes of heat and mass transfer during drying of red beetroot. *Energy Engineering and Control Systems*, 6(2), 81 – 87. <https://doi.org/10.23939/jeecs2020.02.081>

11. Петрова, Ж.О., Пазюк, В.М., **Самойленко, К.М.** (2021). Комплексна енергоефективна теплотехнологія одержання антиоксидантного буряково-томатного барвнику та насіння томатів. *Scientific Works*, 85(1), 34-42. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i85.2239>

12. Petorva, Zh., **Samoilenko, K.** (2021). Adsorption Properties of Combined Vegetable Powders. *Energy Engineering and Control Systems*, 7(1), 38 – 47. <https://doi.org/10.23939/jeecs2021.01.038>

13. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P. (2022). Equilibrium humidity as one of important energy-efficiency indexes in drying of food powder materials of biological nature. *Energy Engineering and Control Systems*, 8(2), 90–97. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.090>.

14. Petrova, Zh., Slobodianiuk, K., **Samoilenko, K.**, Vishnevsky, V., Grakov O. (2022). Research of the kinetics of the drying process of combined plant materials. *Scientific Works*, 86(1), 69-77.

<https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2406>

15. Петрова, Ж. О., Кузнєцова, І. В., **Самойленко, К.М.** (2023). Зниження енергоємності процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів шляхом застосування комбінованих методів сушіння на прикладі *Pleurotus Eryngii*. *Продовольчі ресурси*, 11(21), 141-148.

<https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-14>

16. Давиденко, Б.В., **Самойленко, К.М.** (2024). Теоретичний та експериментальний аналіз кінетики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів як об'єктів сушіння. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(2), 42-

51. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.5>

17. Петрова, Ж.О., Кузнєцова, І.В., **Самойленко, К.М.**, Петров, П.І., Маноха, Д.О. (2025). Переробка білкововмісної рослинної сировини на сухий продукт. *Продовольчі ресурси*, 13(24), 33-44

<https://doi.org/10.31073/foodresources2025-24-03>

18. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.** (2025). Research on convective drying of common oyster mushroom. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 50(4), 67-74. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.7>

Монографії:

19. Petrova, Zh., Sniezhkin, Yu., **Samoilenko, K.** (2021). *Blending and drying of antioxidant raw materials*. Monograph. LLC "Tvory", 107. ISBN 978-966-949-760-4. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2021/03/monografija2.1.pdf>

20. Снежкін, Ю.Ф., Петрова, Ж.О., **Самойленко, К.М.**, Слободянюк, К.С. (2022). *Тепломасообмінні процеси отримання комбінованих функціональних порошків*. Монографія. Тропеа, 148. ISBN 978-617-789-60-4. <https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/09/monografija-teplomasoobminni-procesi-0.pdf>

Колективні монографії:

21. Slobodianiuk K.S., **Samoilenko K.M.** (2020). Research of heat and mass transfer during convective drying of colloid capillary-porous materials. *Integration of traditional and innovation processes of development of modern science*. Riga, Latvia. "Baltija Publishing", 227-245. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-021-6-39>

22. Sniezhkin, Yu., Petrova, Zh., Paziuk, V., Mykhailyk, V., Korinchevska, T., **Samoilenko, K.** (2023). Technological aspects of producing refuse derived fuel. TEC031000 Power Resources / General Publishing monograph indexed Scopus <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-02-3.ch3> , p. 76-105

23. Petrova, Zh. O., **Samoilenko, K. M.** (2024). Convective drying of Shiitake mushrooms with a focus on functionality and naturalness. *Responsible production and consumption: realization in new generations of food products: Scientific monograph*. Riga, Latvia. "Baltija Publishing", 266-282. ISBN 978-9934-26-445-0 <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-445-0-11>

Охоронні документи:

24. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., **Самойленко, К.М.**, Вишнівський, В.М., Петров, П.І. (2024). Спосіб одержання сушеного гранульованого м'ясного продукту (Заявка № а202405902). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

25. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., Пазюк, В.М., **Самойленко, К.М.**, Петров, А.І. (2024). Спосіб одержання харчового порошку з грибів шиїтаке. (Заявка № а202406176 від 24.12.2024 р.). Національний орган інтелектуальної власності державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

26. Петрова, Ж.О., Снежкін, Ю.Ф., **Самойленко, К.М.**, Петров, П.І. (2025). Спосіб одержання м'ясного продукту швидкого приготування. (Заявка № а202500756). Національний орган інтелектуальної власності державна

організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

27. **Самойленко, К.М.** (2021). Сучасні методи сушіння грибів шийтаке (*Lentinula edodes*). *Збірник тез доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" КПІ ім. Ігоря Сікорського*, 89-91.

28. Петрова ,Ж.О., **Самойленко, К.М.** (2021). Рівноважна вологість сухих продуктів швидкого приготування (горохово-морквяного супу-пюре). *Збірник тез доповідей XXIX всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів" КПІ ім. Ігоря Сікорського*, 30-33.

29. Petrova, Zh.O., **Samoilenko, K.M.**, Novikova, Yu.P., Vyshnievska, T.A. (2022). Investigation of the adsorption properties of powder-form colloidal capillary-porous materials based carrot. *Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»*, 9-10.

30. Петрова Ж.О., **Самойленко К.М.**, Новікова Ю.П., Граков Д.П. (2022). Адсорбційні властивості сухих функціональних продуктів швидкого приготування. *Збірник тез: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Новітні досягнення біотехнології» Національний авіаційний університет* 76-78. <https://doi.org/10.18372/2306-6407.1.17168>

31. **Самойленко, К.М.** (2022). Адсорбційні властивості колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи. *Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (5-7 грудня 2022 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського»*, 95-97.

32. Petrova, Zh., Novikova, Yu., **Samoilenko, K.**, Petrov, P. (2023). Adsorption studies of functional quick cooking products on the example of borsch. *Theoretical and practical aspects of modern scientific research: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Seoul-Vinnytsia: Case Co., Ltd. & European Scientific Platform, UDC001 (08)*. ISBN 978-617-8126-69-8. ISBN 978-89-5764-769-1 (PDF). 84-85.

33. **Самойленко, К.М.**, Пазюк, В.М. (2023). Енергоефективність в процесах сушіння при переробці колоїдних капілярно-пористих матеріалів біологічної природи. *XIII Міжнародна онлайн конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, 56.

34. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Slobodianiuk, K., Novikova, Yu. (2025). Adsorption research of pea puree soup. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 4 avril 2025. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC*, 143-145. <https://doi.org/10.36074/logos-04.04.2025.029>

35. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu. (2025). Effect of heat carrier temperature during convective drying of cultivated shiitake mushrooms. *The international conference food for life “Evolution of Sugar: Advanced Technologies for the Next Generation Bioeconomy”*, 73-75.

36. Petrova, Zh., **Samoilenko, K.**, Novikova, Yu., Petrov, P., Yurchak, O. (2025). The Influence of Dehydration Mode on the Duration of the Drying Process of Protein-Containing Raw Materials of Animal Origin. *5th International Scientific Conference Chemical Technology and Engineering*. Lviv, Ukraine, 389-394.

37. Petrova, Zh., Paziuk, V., **Samoilenko, K.** (2025). The influence of mode parameters on the drying duration of cultivated mushrooms. *Збірник тез доповідей XVI міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» Інститут технічної теплофізики НАН України*, 49.

38. **Самойленко, К.М.**, Вишнівська, Т.А. (2025). Залежність коефіцієнту набухання від режимів сушіння м'яса свинини. *Збірник тез доповідей XVI міжнародної онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*. Інститут технічної теплофізики НАН України, 146.

39. Петрова, Ж., Дмитренко, Н., **Самойленко, К.** (2025). Теплота випаровування води із плодового тіла гриба печериці звичайної (*agaricus campestris*) при різних температурах. *Міжнародна науково-практична конференція Проблеми сучасної теплоенергетики, присвячена 105-річчю від дня народження професора Драганова Бориса Харлампійовича*, 14-16.

40. Дмитренко, Н.В., Іванов, С.О., **Самойленко, К.М.** (2026). Вплив температури та зневоднення на питому теплоємність плодового тіла гриба печериця. *The 2nd International scientific and practical conference “Scientific development in a changing world” SPC “Sci-conf.com.ua”*, Lviv, Ukraine. 206-208. ISBN 978-966-8219-80-1

41. Дмитренко, Н.В., **Самойленко, К.М.** (2026). Специфіка видалення зв'язаної води з тканин плодового тіла гриба печериця звичайна при сушінні. *The 4th International scientific and practical conference “European science and innovation congress” Barca Academy Publishing*, Barcelona, Spain. 157-159.

Апробація результатів досліджень. Основні положення роботи викладено та обговорено на конференціях різного рівня:

1. XXI міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ”Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, 2021, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
2. XXIX всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ”Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів” КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, 2021, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM).
3. XIX Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2022, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM).

4. VI Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні досягнення біотехнології» (Київ, 2022, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
5. XXIII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих. вчених ”Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” (Київ, 2022, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
6. Theoretical and practical aspects of modern scientific research: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, (Seoul-Vinnitsia, 2023, форма участі –дист. доп. ZOOM).
7. XIII Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (2023, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
8. Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VIII conférence scientifique et pratique internationale. (Paris-Vinnitsia, 2025, форма участі –дистанційна доповідь).
9. The international conference food for life “Evolution of Sugar: Advanced Technologies for the Next Generation Bioeconomy”(Київ, 2025, форма участі – дистанційна доповідь у ZOOM)
10. 5th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering» (Lviv, 2025, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
11. XVI міжнародній онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ, 2025, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
12. XVI міжнародній онлайн конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (Київ, 2025, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
13. Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики» (Київ, 2025, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
14. The 2nd International scientific and practical conference “Scientific development in a changing word” SPC “Sci-conf.com.ua” (Lviv, 2025, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).
15. 4th International scientific and practical conference “European science and innovation congress” (Barcelona, 2026, форма участі –дистанційна доповідь у ZOOM).

Сканкопії заявок на патент на винахід України

27.01.26, 21:09

Детальна інформація по об'єкту

a202405902

Головна / Заявка № a202405902

Заявка на винахід

Бібліографічні дані

Формула

Опис

Опублікований опис

Реферат (UA)

Реферат (RU)

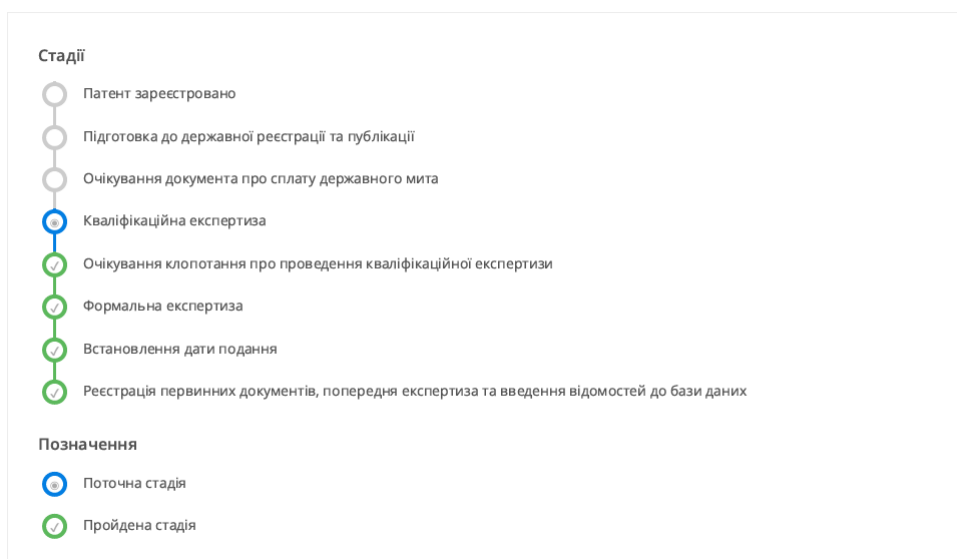
Реферат (EN)

Стан діловодства

Сповіднення

Активација
Перейдіть до
активувати V

Стан діловодства



☰ Документи				
#	Дата реєстрації	Дата відправки	Назва документа	Реєстраційний номер
1	12.12.2024		[K51] Опис винаходу (KM)	24/ЗА/Вх№12681
2	12.12.2024		[K50] Формула винаходу (KM)	24/ЗА/Вх№12682
3	12.12.2024		[K52] Реферат	24/ЗА/Вх№12683

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1832897/>

#	Дата реєстрації	Дата відправки	Назва документа	Реєстраційний номер
4	12.12.2024		[К71] Заява на видачу патенту на винахід (КМ)	24/3А/Вх№12680
5	12.12.2024		[Е11] Лист	24/3А/Вх№12684
6	12.12.2024		[Е21] Документ, що підтверджує неприбутковість особи	24/3А/Вх№12685
7	18.12.2024	23.12.2024	[В1] Повідомлення щодо встановлення дати подання заявки на винахід (корисну модель) <i>Трекінг-номер відправлення (Укрпошта): 0610217397114</i>	25098/3А/24
8	14.01.2025		[Е32] Документ, що підтверджує сплату збору	Вх-857-Е/2025
9	14.01.2025		[АО-19] Електронний лист	Вх-857-Е/2025
10	21.01.2025	24.01.2025	[В4] Повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід (корисну модель) <i>Трекінг-номер відправлення (Укрпошта): 0601000048058</i>	1464/3А/25
11	15.05.2025	21.05.2025	[В18] Попередній висновок (запит) формальної експертизи <i>Трекінг-номер відправлення (Укрпошта): 0601000360639</i>	9893/3А/25
12	26.06.2025		[К71] Заява на видачу патенту на винахід (КМ)	Вх-14964-Е/2025
13	26.06.2025		[К71] Заява на видачу патенту на винахід (КМ)	Вх-14964-Е/2025
14	26.06.2025		[АО-19] Електронний лист	Вх-14964-Е/2025
15	12.09.2025	24.09.2025	[В6] Повідомлення про завершення формальної експертизи за заявкою на винахід	18747/3А/25
16	20.10.2025		[К1] Клопотання про проведення кваліфікаційної експертизи на винахід	Вх-26398-Е/2025
17	20.10.2025		[АО-19] Електронний лист	Вх-26398-Е/2025
18	29.10.2025	03.11.2025	[В43] Повідомлення щодо заяви про проведення кваліфікаційної експертизи	22521/3А/25

Збори

#	Код збору	Початок очікування	Планова дата отримання	Фактична дата отримання	Планова сума сплати	Назва документа
1	10100	12.12.2024	12.02.2025	10.12.2024	192 УАН	За подання заявки (міжнародної заявки) на винахід (корисну модель), формула якого містить не більш як 3 пункти
2	11600	12.12.2024	13.12.2027	10.10.2025	720 УАН	За проведення кваліфікаційної експертизи заявки на винахід

Платежі (зараховані)

#	Сума сплати	Номер платежу	Дата отримання	Назва платежу
1	192 УАН	03/12/2024	10.12.2024	Платіжне доручення
2	720 УАН	09/10/2025	10.10.2025	Електронний платіжний документ

Заявка на винахід

Бібліографічні дані

Формула

Опис

Опублікований опис

Реферат (UA)

Реферат (RU)

Реферат (EN)

Стан діловодства

Сповіщення

Стан діловодства

Стадії

- Патент зареєстровано
- Підготовка до державної реєстрації та публікації
- Очікування документа про сплату державного мита
- Кваліфікаційна експертиза
- Очікування клопотання про проведення кваліфікаційної експертизи
- Формальна експертиза
- Встановлення дати подання
- Реєстрація первинних документів, попередня експертиза та введення відомостей до бази даних

Позначення

- Поточна стадія
- Пройдена стадія

☰ Документи				
#	Дата реєстрації	Дата відправки	Назва документа	Реєстраційний номер
1	20.02.2025		[K51] Опис винаходу (KM)	25/ЗА/Вх№1509
2	20.02.2025		[K50] Формула винаходу (KM)	25/ЗА/Вх№1510
3	20.02.2025		[K52] Реферат	25/ЗА/Вх№1511
4	20.02.2025		[E1] Платіжне доручення	25/ЗА/Вх№1514
5	20.02.2025		[K71] Заява на видачу патенту на винахід (KM)	25/ЗА/Вх№1507

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1843240/>

1/3

#	Дата реєстрації	Дата відправки	Назва документа	Реєстраційний номер
6	20.02.2025		[E11] Лист	25/3A/Bx№1512
7	20.02.2025		[E11] Лист	25/3A/Bx№1513
8	20.02.2025		[E21] Документ, що підтверджує неприбутковість особи	25/3A/Bx№1508
9	25.02.2025	26.02.2025	[B4] Повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід (корисну модель) Трекінг-номер відправлення (Укрпошта): 0601000135228	3947/3A/25
10	19.08.2025	22.08.2025	[B18] Попередній висновок (запит) формальної експертизи Трекінг-номер відправлення (Укрпошта): 0601000881612	16624/3A/25
11	23.09.2025		[K71] Заява на видачу патенту на винахід (КМ)	Bx-23869-E/2025
12	23.09.2025		[AO-19] Електронний лист	Bx-23869-E/2025
13	21.10.2025		[K71] Заява на видачу патенту на винахід (КМ)	Bx-26690-E/2025
14	21.10.2025		[AO-19] Електронний лист	Bx-26690-E/2025
15	05.11.2025	07.11.2025	[B6] Повідомлення про завершення формальної експертизи за заявою на винахід	22974/3A/25
16	09.12.2025		[K1] Клопотання про проведення кваліфікаційної експертизи на винахід	Bx-31688-E/2025
17	09.12.2025		[E32] Документ, що підтверджує сплату збору	Bx-31688-E/2025
18	09.12.2025		[AO-19] Електронний лист	Bx-31688-E/2025
19	18.12.2025	24.12.2025	[B43] Повідомлення щодо заяви про проведення кваліфікаційної експертизи	26895/3A/25

Збори

#	Код збору	Початок очікування	Планова дата отримання	Фактична дата отримання	Планова сума сплати	Назва документа
1	10100	20.02.2025	21.04.2025	13.12.2024	192 UAH	За подання заявки (міжнародної заявки) на винахід (корисну модель), формула якого містить не більш як 3 пункти
2	11600	20.02.2025	21.02.2028	04.12.2025	720 UAH	За проведення кваліфікаційної експертизи заявки на винахід

Платежі (зараховані)

#	Сума сплати	Номер платежу	Дата отримання	Назва платежу
1	192 UAH	10/12/2024	13.12.2024	Платіжне доручення
2	720 UAH	03/12/2025	04.12.2025	Електронний платіжний документ



Спеціальна інформаційна система УКРНОІВІ (СІС).

Заявка на винахід

- Бібліографічні дані
- Формула
- Опис
- Огублюваний опис
- Реферат (UA)
- Реферат (RU)
- Реферат (EN)
- Стан діловодства**
- Словіщення

Стан діловодства



Документи

#	Дата реєстрації	Дата відправки	Назва документа	Реєстраційний номер
1	24.12.2024		[K51] Опис винаходу (KM)	24/3A/Вх№ 13146
2	24.12.2024		[K50] Формула винаходу (KM)	24/3A/Вх№ 13148
3	24.12.2024		[K52] Реферат	24/3A/Вх№ 13147
4	24.12.2024		[K71] Заява на видачу патенту на винахід (KM)	24/3A/Вх№ 13143
5	24.12.2024		[E11] Лист	24/3A/Вх№ 13144

#	Дата реєстрації	Дата вхідних коштів	Назва документа	Реєстраційний номер
6	24.12.2024		[E21] Документ, що підтверджує наявність особи	24/3A/01/61-13145
7	27.12.2024	13.01.2025	[B1] По відомленні щодо встановлення дати подання заявки на вибори (користуючись)	25/3A/03/24
			Траекторія номерів/дирекції (Міжрегіональ): 0501000010630	
8	24.02.2025	26.02.2025	[B1a] По відомленні щодо сплати збору за подання заявки на вибори (користуючись)	3906/3A/25
			Траекторія номерів/дирекції (Міжрегіональ): 0501000010630	
9	11.03.2025		[E22] Документ, що підтверджує сплату збору	Ів-5709-02025
10	11.03.2025		[AO-49] Бюлетень виборів	Ів-5709-02025
11	13.03.2025	14.03.2025	[B4] По відомленні про встановлення дати подання заявки на вибори (користуючись)	5057/3A/25
			Траекторія номерів/дирекції (Міжрегіональ): 05010000134812	
12	10.04.2025	14.04.2025	[B18] По переданні копій (запит) формальної експертизи	7116/3A/25
			Траекторія номерів/дирекції (Міжрегіональ): 0501000068926	
13	29.04.2025		[E23] Відповідь на запит	Ів-9788-02025
14	29.04.2025		[AO-49] Бюлетень виборів	Ів-9788-02025
15	01.05.2025	05.05.2025	[B6] По відомленні про завершення формальної експертизи за заявкою на вибори	8778/3A/25
16	16.06.2025	18.06.2025	[B17] По відомленні про проведення кваліфікаційної експертизи за заявкою на вибори	12343/3A/25
			Траекторія номерів/дирекції (Міжрегіональ): 05010000623485	
17	17.06.2025		[B4] Кваліфікація	Ів-44081-02025
18	17.06.2025		[B1] Копія станції про проведення кваліфікаційної експертизи на вибори	Ів-44081-02025
19	17.06.2025		[AO-49] Бюлетень виборів	Ів-44081-02025
20	01.07.2025	11.07.2025	[B10] По відомленні щодо заявки про проведення кваліфікаційної експертизи	13417/3A/25
21	24.12.2025		[E1] Платіве доручення	Ів-74730/2025
22	24.12.2025		[E1] Платіве доручення	Ів-74730/2025
23	24.12.2025		[E20] Квиток на проїзд в/перезаряджувачем збору	Ів-74730/2025
24	30.12.2025		[E5] Довідка про проведення збору	26/3A/01/61-422
25	30.12.2025		[E5] Довідка про проведення збору	26/3A/01/61-454

Збори

#	Код збору	Початок і очікування	Планова дата отримання	Фактична дата отримання	Планова сума оплати	Назва документа
1	10100	24.12.2024	24.02.2025	05.12.2024	192 UAH	За подання заявки (включно доїздом) на вибори (за рішенням суду), формули якого містяться в білети з пункту
2	11600	24.12.2024	24.12.2027	05.06.2025	720 UAH	За проведення кваліфікаційної експертизи за заявкою на вибори

Платежі (за рахунки)

#	Сума плате	Номер платежу	Дата отримання	Назва платежу
1	192 UAH	0312/2024	05, 12, 2024	Платіж на доручення
2	720 UAH	0306/2025	05, 06, 2025	Платіж на доручення



Спеціально інформаций на системі УКРІСІПІ (СІС).

Сервіс створено для пошуку відомостей про об'єкти промислової власності.

МЕНЮ

- Простий пошук >
- Розширений пошук >
- Пошук по словцям нею >
- Бюлетень >
- Допомога >
- Зворотні зв'язок >

СЕРВІС

- Отримати оригінал документа >
- API >
- Реєстр патентних пов'язок >
- Сплата зборів >

СТАТИСТИКА

Дата актуалізації: 01.04.2025 22:00
Кількість документів: 1,3 мільйонів

Акти впровадження результатів досліджень

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
 Директор Інституту продовольчих ресурсів
 НААН України, член-кореспондент НААН
 України
 Любомир ХОМІЧАК
 2025 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор Інституту
 технічної теплофізики НАН України,
 академік НАН України
 Юрій СНЕЖКІН
 2025 р.

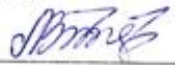
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів наукової роботи

Даний акт складено про апробацію в рецептурі м'ясних продуктів, зокрема у ковбасних виробках, грибного порошку, теплотехнологія отримання якого виконана в рамках наукової роботи Інституту технічної теплофізики НАН України.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Впровадження застосування грибного порошку у технологію отримання ковбасних виробів з метою розширення асортименту харчових продуктів із підвищеним вмістом білку рослинного походження.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Напрацьовано і виготовлено дослідно-промислову партію ковбасних виробів із додаванням грибного порошку. 2. Апробовано додавання грибного порошку до ковбасних виробів з оптимальним відсотковим співвідношенням. В результаті отримано харчовий продукт із підвищеним вмістом рослинного білку з задовільними органолептичними характеристиками: смак та аромат сушених грибів, більш ніжна консистенція, світлий колір продукту. 3. Додавання грибного порошку до м'ясних виробів, зокрема ковбасних, задовільно впливає на збільшення асортименту харчових продуктів, що містять у своєму складі білок рослинного походження.


Від Інституту продовольчих ресурсів НААН
 України

к.т.н.



 Любов ВОЙЦЕХІВСЬКА

Від Інституту технічної теплофізики
 НАН України

д.т.н., професор, чл.-кор. НАН України


 Жанна ПЕТРОВА

к.т.н., старший дослідник


 Катерина САМОЙЛЕНКО

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор Інституту технічної
теплофізики НАН України,

академік НАН України



Юрій ШНЄЖКІН

«10» жовтня 2026 р.

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

В.о. декана факультету
автоматизації, промислової
інженерії та екології НТУУ «КПІ
ім. І.Сікорського»,

з.ч.б. 2026



Олена ІВАНЕНКО

2026 р.

АКТ

Ми, які нижче підписалися, представники від Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри «Машини і апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв» (МАХНВ) к.т.н., доцент Степанюк А.Р., д.т.н., професор Корнієнко Я.М., та від ІТТФ НАН України, гол.н.с., член-кореспондент НАН України, д.т.н., професор Петрова Ж.О., пр.н.с., к.т.н., с.д. Самоїленко К.М., склали даний акт про те, що у навчальному процесі підготовки фахівців використовуються наукові результати дисертаційної роботи «Наукові засади створення енергоефективних теплотехнологій отримання білкововмісних продуктів».


Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі під час проведення лекційних, практичних та лабораторних занять з дисциплін:

1. Здобувачам першого рівня (бакалаврського) за спеціальністю «Галузеве машинобудування», спеціалізація «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної технології»:
 - «Процеси та обладнання хімічної технології»,
 - Під час курсового проектування та дипломного проектування.
2. Здобувачам другого рівня (магістерського) за спеціальністю «G11 Машинобудування (G11.03 Технологічні машини та обладнання)», спеціалізація «Інжиніринг інноваційного галузевого обладнання»:
 - Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання,
 - Під час курсового проектування та виконання магістерської дисертації.

Впровадження результатів за дисертаційною роботою дозволить студентам отримати, поглибити, систематизувати та закріпити досвід з теоретичних та експериментальних досліджень тепломасообмінних процесів під час конвективного сушіння білкововмісних колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

Від ІТТФ НАН України

гол. наук. співр.,
член-кореспондент НАН України,
д.т.н., професор

 Жанна ПЕТРОВА

пр. наук. співр., к.т.н., ст. доц.

 Катерина САМОЙЛЕНКО

Від НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського»

Зав. каф. МАХНВ, к.т.н., доцент

 Андрій СТЕПАНЮК