**Панцирева Г.В.**

д.с.-г.н., доцент

Волинець Є.О.

д.ф., ст. викладач

Борецька Т.Ю.зав. науково-організаційного
відділу науково-дослідної частини**Вінницький національний
аграрний університет****Дмитренко В.П.**к.т.н., старший науковий
співробітник**Інститут****Картоплярства НААН
України****Pantsyрева Н.**Doctor of Agricultural Sciences,
Associate Professor**Volynets Y.**Doctor of Philosophy, Senior
Lecturer**Boretska T.**Head of the Scientific and
Organizational Department of the
Research Unit**Vinnitsia National Agrarian
University****Dmytrenko V.**

Ph.D., Senior Researcher

**Potato Institute of the NAAS
of Ukraine****УДК 631.363:664.3:621.592****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-16****КОНСТРУКЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ
ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ
ІНФРАЧЕРВОНОГО МІКРОНІЗАТОРА
ДЛЯ ОБРОБКИ ЗЕРНОБОБОВИХ
КУЛЬТУР**

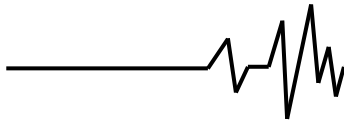
У статті розглянуто конструкційно-енергетичні засади створення інфрачервоного мікронізатора для термічної обробки зернобобових культур, спрямованої на інактивацію антипоживних речовин і підвищення поживної цінності кормів. Встановлено, що застосування інфрачервоного випромінювання середнього спектра ($\lambda = 2-4$ мкм) забезпечує рівномірний прогрів зерна по всій товщині шару та зниження питомих енергозатрат на 30-40 % порівняно з конвективним сушінням. Запропоновано принципову теплотехнічну схему мікронізатора, що включає камеру обробки з полірованими відбивачами, блок кварцових випромінювачів, систему перемішування, теплоізоляційний кожух і автоматизований блок керування. Визначено оптимальні конструкційно-режимні параметри: потужність випромінювачів 1,0-1,5 кВт, густина теплового потоку 15-25 кВт/м², відстань до шару зерна 150 мм, товщина шару 15-20 мм. Експериментальні дослідження показали, що при температурі 140-160 °С і тривалості нагріву 70-90 с активність уреази зменшується у 8-10 разів, а вміст сирого протеїну залишається на рівні 97-98 %. Розрахований коефіцієнт корисної дії установки становить 0,78-0,82, що підтверджує її енергетичну ефективність. Використання дзеркальних алюмінієвих рефлекторів зменшує втрати теплоти на 15-18 %, а PID-регулювання потужності випромінювачів забезпечує стабільність температурного поля у межах ± 2 °С. Запропоновані конструкційні рішення створюють науково-практичні передумови для розроблення промислових ІЧ-установок нового покоління для кормової промисловості, здатних забезпечити стабільну якість та високу безпечність зернобобових компонентів комбікормів.

Ключові слова: інфрачервона мікронізація, енергоефективність, зернобобові культури, антипоживні речовини, теплове поле, мікронізатор, термічна обробка, конструкційні параметри.

Вступ. У сучасному світі сільського господарства, де тваринництво відіграє ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки, ефективне управління кормовою базою стає стратегічним пріоритетом. Корми для тварин – це не лише джерело поживних речовин, а й основа стабільності продуктивності, здоров'я та відтворювальної здатності поголів'я. За даними FAO, понад 70 % витрат у тваринництві

припадає саме на корми, а якість і технологія їх підготовки безпосередньо впливають на економічну ефективність виробництва [1].

В умовах сезонного клімату України, коли влітку спостерігається надлишок зеленої маси, а взимку – її дефіцит, проблема тривалого зберігання кормів набуває особливої ваги. Одним із найдавніших і водночас найбільш надійних способів консервування рослинної



сировини є сушіння, яке забезпечує стабільність кормів, зменшує мікробіологічну активність і втрати поживних речовин. Проте традиційні методи сушіння – конвективне або контактне – характеризуються високими енерговитратами та нерівномірністю прогріву матеріалу [2].

Зернобобові культури, зокрема соя, люпин і горох, є цінною білковою сировиною, однак містять антипоживні речовини – інгібітори трипсину, уреазу, лектини, що знижують засвоюваність кормів. Для забезпечення їх безпечності необхідна термічна обробка, здатна інактивувати ці компоненти без руйнування білкової структури. Саме тому виникає потреба в удосконаленні технологічних засобів термообробки зернобобових, які б поєднували енергоефективність, рівномірність нагріву й технологічну гнучкість [3].

Інфрачервона мікронізація – це перспективний метод, що базується на перетворенні електричної енергії у випромінювання середнього спектра ($\lambda = 2-4$ мкм), яке безпосередньо поглинається зерном. Унаслідок цього відбувається об'ємне нагрівання продукту без контакту з теплоносієм, що забезпечує високу швидкість теплопередачі та зниження питомих енергозатрат на 30–40 % порівняно з традиційним сушінням [4].

Розроблення принципової конструкції інфрачервоного мікронізатора, адаптованого до обробки зернобобових культур, є актуальним завданням сучасної інженерії в аграрному секторі. Такий апарат має забезпечувати стабільність теплового поля, контроль температури та ефективне використання енергії, що у підсумку підвищить якість кормів і знизить їх собівартість.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблема підвищення енергоефективності процесів термообробки рослинної сировини тривалий час перебуває у фокусі досліджень вітчизняних та зарубіжних учених [5, 6]. У більшості праць підкреслюється, що традиційні конвективні сушарки мають низький коефіцієнт корисної дії, значні втрати теплоти через корпус і нерівномірність розподілу температури у шарі матеріалу. Ці недоліки зумовлюють потребу у пошуку альтернативних способів передачі енергії, серед яких променеві методи, зокрема інфрачервоні, вважаються найбільш перспективними.

Інфрачервоне випромінювання характеризується високою швидкістю теплопередачі та можливістю безконтактного нагріву продукту. У наукових публікаціях наведено докази, що використання випромінювання середнього спектра ($\lambda = 2-4$ мкм) забезпечує ефективне нагрівання зерна по всьому об'єму за короткий проміжок часу. Це дозволяє досягти необхідного рівня термічної

обробки при менших питомих енергетичних витратах, що особливо важливо для переробки білкової сировини, чутливої до перегріву.

Дослідники [7, 8, 9] відзначають також здатність ІЧ-нагріву змінювати структуру білково-крохмальних комплексів у зернобобових, що сприяє зниженню активності інгібіторів трипсину, уреазу, лектинів та інших антипоживних речовин. При цьому мінімізуються втрати лізину, метіоніну та загального вмісту протеїну, а продукт набуває покращених кормових властивостей.

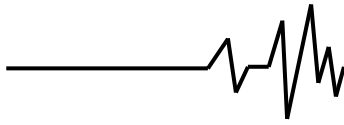
Розвиток енергоефективних технологій супроводжується появою нових конструкцій ІЧ-установок – від лабораторних мікронізаторів до промислових агрегатів безперервної дії. У сучасних розробках [10, 11] особливу увагу приділено геометрії нагрівальної камери, формі відбивачів, вибору матеріалів корпусу та методам стабілізації температурного поля. Відомі конструкції з поліруванням внутрішніх поверхонь для підвищення коефіцієнта відбиття, застосування багат шарової теплоізоляції та автоматичного регулювання потужності випромінювачів.

Окремі автори [12, 13, 14] пропонують комбіновані схеми сушіння, де інфрачервоний нагрів поєднується з конвективним або діелектричним впливом. Такі системи дозволяють рівномірно розподіляти теплоту у товщі продукту, скорочують час обробки та підвищують стабільність кінцевих показників якості. Застосування мікропроцесорного керування та PID-регуляторів забезпечує можливість підтримання температури у вузьких межах, що є критичним для інактивації білкових антипоживних речовин.

Загалом аналіз наукових публікацій свідчить про перехід від суто емпіричних підходів до системного проєктування ІЧ-установок, у яких конструкційні параметри узгоджуються з теплофізичними властивостями об'єкта обробки. Такий підхід формує методологічне підґрунтя для розроблення принципових схем енергоефективних мікронізаторів нового покоління – з підвищеною рівномірністю теплового поля, мінімальними втратами енергії та розширеними можливостями керування технологічним процесом.

Метою дослідження є бґрунтування конструкційно-енергетичних засад створення інфрачервоного мікронізатора для обробки зернобобових культур, визначення основних елементів його теплотехнічної схеми та пошук шляхів підвищення енергоефективності процесу.

Матеріали і методи. Для розроблення конструкційно-енергетичних рішень інфрачервоного мікронізатора використано



комплексний методичний підхід, який поєднує аналітичні, розрахункові та експериментальні етапи дослідження.

На першому етапі проведено порівняльний аналіз існуючих методів сушіння за видом теплоносія, способом підведення енергії та питомими енергозатратами. Було встановлено, що при переході від конвективного до інфрачервоного способу питомі витрати енергії зменшуються в середньому на 30-40 %, а швидкість нагріву зерна зростає в 2-3 рази.

Для визначення оптимального діапазону довжин хвиль використовували аналітичну залежність коефіцієнта поглинання матеріалу від спектральних характеристик випромінювача. Розрахунки проводили у межах 1,5-5,0 мкм, що відповідає середньому ІЧ-спектру, найбільш ефективному для водо- і білковмісних систем.

Під час розроблення принципової схеми мікронізатора виконано геометричне та теплотехнічне моделювання основних вузлів. Розрахунок теплового балансу системи здійснювався за рівнянням:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{випр.}} - Q_{\text{вт}} - Q_{\text{відб.}}, \quad (1)$$

де Q_{Σ} – корисна теплова енергія, поглинута матеріалом;

$Q_{\text{випр.}}$ – енергія, випромінена ІЧ-джерелами;

$Q_{\text{вт}}$ – втрати через теплоізоляцію;

$Q_{\text{відб.}}$ – некорисні відбиття від внутрішніх поверхонь.

Розрахунок проводили для різних конфігурацій камери: циліндричної, призматичної та з плоскими панелями. Визначено, що мінімальні втрати енергії спостерігаються у циліндричній формі корпусу з полірованими відбивачами, де коефіцієнт використання випромінюваної енергії сягає 0,82-0,85.

Для створення рівномірного теплового поля обрано кварцові трубчасті лампи потужністю 1,0-1,5 кВт з піком випромінювання у діапазоні 2,6-3,0 мкм. Розташування випромінювачів визначалося з урахуванням густини енергопотуку на поверхні шару зерна (15-25 кВт/м²). Оптимальна відстань між лампами становила 60-80 мм, а між джерелом випромінювання та продуктом – 150-180 мм.

Енергоефективність апарата оцінювали за питомими витратами електроенергії на одиницю маси висушеного матеріалу:

$$E = (P \cdot T) / m, \quad (2)$$

де P – встановлена потужність системи (кВт),

T – тривалість процесу (с),

m – маса обробленої сировини (кг).

Для оцінювання теплових втрат визначали коефіцієнт тепловіддачі через корпус, а також ефективність відбивачів із різних матеріалів — алюмінію, нержавіючої сталі,

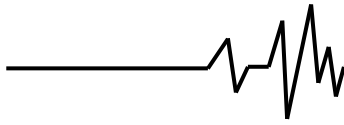
жароміцного скла. Найвищий показник ККД (до 78 %) зафіксовано для алюмінієвих відбивачів з дзеркальною поверхнею.

Розроблена система керування включає PID-регулятор, що підтримує стабільну температуру всередині камери у межах ± 2 °С. Для контролю температури застосовано термопари типу К, з'єднані з мікроконтролером Arduino Mega 2560, що дозволяє автоматично змінювати потужність ІЧ-випромінювачів залежно від заданих параметрів.

Основні результати дослідження. У харчовій промисловості процес сушіння класифікують на два основні типи – природне та штучне.

Природне сушіння здійснюється за рахунок дії навколишнього повітря без додаткового підведення тепла. Процес проходить на відкритому просторі, без штучного нагрівання чи примусового відведення сушильного агента. Типовим прикладом такого способу є висушування солі у відкритих морських басейнах. Основними недоліками цього методу є значна тривалість процесу, відсутність можливості його регулювання та отримання матеріалу з відносно високим вмістом вологи.

Штучне сушіння проводять у спеціально призначених сушильних апаратах, які забезпечують інтенсивне вилучення вологи з продукту. У технологіях харчової промисловості переважно застосовують саме цей спосіб, що передбачає використання нагрітого сушильного агента – переважно повітря або димових газів. Після поглинання вологи з матеріалу відпрацьований агент видаляють через вентиляційні або витяжні системи. Для більшості харчових виробництв сушіння є ключовою технологічною операцією, спрямованою на підвищення стабільності продуктів під час зберігання, покращення їхніх якісних характеристик, консервування та зменшення маси з метою полегшення транспортування. У цукровій промисловості процес сушіння застосовують для зневоднення цукру-піску, цукру-рафінаду, а також побічних продуктів виробництва – жому. У спиртовій галузі висушуванню підлягають відходи переробки – барда, а також харчові й кормові дріжджі. Значне технологічне значення сушіння має й у пивоварінні, де воно використовується для оброблення солоду та висушування побічних продуктів. У крохмале-патоковому виробництві сушіння забезпечує отримання основного продукту – сухого крохмалю. Цей процес також широко застосовується для виготовлення сухого молока, сушених фруктів і овочів. У хлібопекарській, макаронній і кондитерській промисловості сушіння використовують для виробництва сухарів, макаронних виробів і



певних видів кондитерської продукції.

Залежно від способу підведення теплоти, штучне сушіння поділяють на кілька основних типів:

- конвективне – здійснюється шляхом безпосередньої взаємодії матеріалу з нагрітим сушильним агентом (повітрям або газом);

- контактне (кондуктивне) – теплова енергія передається продукту через нагріту поверхню;

- радіаційне – базується на передачі теплоти інфрачервоним випромінюванням;

- діелектричне – передбачає нагрівання продукту в електромагнітному полі високої чи надвисокої частоти;

- сублімаційне – здійснюється у вакуумному середовищі, коли матеріал перебуває у замороженому стані, а волога переходить безпосередньо з твердого у газоподібний стан.

Методи сушіння вологих матеріалів відрізняються переважно способом підведення теплоти, який визначається фізико-хімічними властивостями матеріалу та характером зв'язку вологи з його структурою. Найпоширенішим у промисловості є конвективний метод сушіння, що ґрунтується на прямому контакті продукту з потоком нагрітого газу (повітря або димових газів). Під дією тепла відбувається випаровування вологи з поверхні матеріалу, а газовий потік одночасно поглинає утворену водяну пару та відводить її за межі сушильної камери.

Конвективне сушіння продуктів є досить тривалим процесом, що зазвичай триває від 3 до 10 годин. Температурний режим у межах +60...+75 °С вважається сприятливим для активності ферментів і життєдіяльності мікроорганізмів, однак саме це спричиняє небажані зміни у продукті. У процесі сушіння відбувається окиснення вітамінів, барвних і дубильних речовин, утворення меланоїдинів, що зумовлює погіршення смакових, ароматичних і колірних характеристик готової продукції. Висушені за цим методом фрукти та овочі мають низьку здатність до набухання і стають придатними до споживання лише після кип'ятіння протягом 25-30 хвилин.

У харчовій промисловості дещо рідше використовують контактний (кондуктивний) метод сушіння, при якому теплова енергія передається матеріалу через металеву перегородку, що відділяє його від теплоносія. Зазвичай як теплоносієм застосовують водяну пару, яка, нагріваючи поверхню стінки, забезпечує поступове передавання теплоти до продукту.

Для висушування металевих пофарбованих виробів, картонних матеріалів, а також харчових продуктів, розміщених тонким

шаром, застосовують терморадіаційний (інфрачервоний) метод сушіння. У цьому випадку теплова енергія передається матеріалу шляхом інфрачервоного випромінювання, що забезпечує рівномірне та швидке нагрівання поверхні продукту.

Матеріали з великою товщиною шару, а також окремі види плодів, форму яких необхідно зберегти під час оброблення, висушують у полі струмів високої частоти. Такий спосіб відомий як високочастотне сушіння і забезпечує рівномірне прогрівання всього об'єму продукту завдяки дії електромагнітного поля.

Для оброблення термолабільних (термочутливих) матеріалів використовують сублімаційне сушіння, за якого волога, перебуваючи у замороженому стані, переходить безпосередньо з твердого у паровий стан, минаючи рідку фазу. Процес відбувається за умов глибокого вакууму, що дозволяє зберегти структуру, колір і біологічну цінність висушеного продукту.

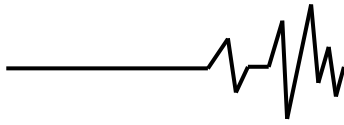
Суть сублімаційного методу сушіння полягає в тому, що продукти спочатку заморожують у швидкоморозильних апаратах, після чого в такому стані поміщають у вакуумні камери. У процесі сушіння лід переходить безпосередньо в парову фазу, минаючи рідку, а утворена пара відсмоктується спеціальними вакуумними насосами. На місці кристалів льоду залишаються пори, тому такі продукти характеризуються високою пористістю, доброю здатністю до набухання у воді та швидким розварюванням під час приготування.

Цей метод консервування забезпечує збереження природних властивостей продуктів – форми, розмірів, кольору, смаку, аромату та вмісту вітамінів. Сублімаційне сушіння застосовують для ягід, овочів, грибів, м'яса, птиці, риби, сиру та готових страв на їх основі.

Оскільки висушені продукти мають виражену гігроскопічність, їх необхідно пакувати у вологонепроникну тару та зберігати в сухих приміщеннях. За дотримання таких умов сушені вироби зберігають свою якість і придатність до споживання протягом тривалого часу.

Перед початком процесу сублімаційного сушіння вологий продукт попередньо заморожують при температурі близько -15...-18 °С. Зниження температури нижче -18 °С для більшості харчових матеріалів є небажаним, оскільки може спричинити незворотні зміни у структурі білкових сполук. У результаті цього погіршуються якісні показники продукту та зменшується його здатність поглинати воду під час відновлення, що, своєю чергою, негативно впливає на відтворення первинних властивостей, смаку й форми висушеного продукту.

Заморожений продукт, розміщений на



плитах сублиматора, усередині яких може циркулювати гаряча вода, піддається випаровуванню льоду у високовакуумному середовищі, що супроводжується додатковим охолодженням матеріалу. Після видалення основної частини вологи у вигляді пари вмикають систему нагрівання гарячою водою, завдяки чому продукт проходить остаточну стадію сушіння при температурі близько 30 °С, що забезпечує доведення його до необхідного вмісту сухих речовин.

Продукти, висушені методом сублимаційного сушіння, зберігають свою природну структуру, колір, смакові та ароматичні властивості, а також харчову і біологічну цінність, включаючи білки та вітаміни. Завдяки низькій температурі процесу такі вироби можуть зберігатися тривалий час без втрати якості. Цей метод застосовують для оброблення харчових концентратів, м'ясних і молочних продуктів, овочів і плодів. Хоча сублимаційне сушіння є технічно складним і затратним як щодо обладнання, так і в експлуатації, висока якість готової продукції повністю компенсує витрати на його здійснення.

Зупинимося на розгляді окремих перспективних методів сушіння, які на сьогодні ще не набули широкого практичного впровадження, проте мають значний потенціал для розвитку у харчовій промисловості.

Суть «вибухового» методу сушіння полягає в тому, що попередньо підготовлену сировину підсушують до вологості 25-45 % (залежно від її виду), після чого завантажують у спеціальний апарат – «гармату», де відбувається процес миттєвого розширення. Конструктивно апарат являє собою циліндр, що обертається навколо горизонтальної осі, з газовими пальниками для нагрівання, глухою кришкою з одного боку та герметичною кришкою із запірним механізмом – з іншого.

Усередину циліндра завантажують продукт, герметично закривають, встановлюють горизонтальне положення, вмикають нагрівання та обертання. Після досягнення тиску 1,0-2,5 МПа тиск різко скидають, що призводить до миттєвого випаровування частини вологи з продукту. Унаслідок цього матеріал набуває пористої структури, а його об'єм збільшується у 15-20 разів.

Продукти, висушені таким способом, зокрема овочі та картопля, відновлюються при замочуванні за 5-7 хвилин. Водночас широке промислове використання методу обмежується недоліками обладнання – низькою продуктивністю, періодичним режимом роботи та високим рівнем шуму під час експлуатації.

Суть методу сушіння у спіненому стані полягає в обробленні продуктів переробки

плодів та овочів – таких як пюре, пасти, концентровані соки – з метою отримання швидковідновлюваних порошків. Для цього вихідну масу у вигляді пюре або концентрованого рідкого продукту збивають у стійку піну із застосуванням піностабілізаторних речовин, після чого висушують до залишкової вологості 2-4 %.

Спінювання надає продукту жорсткішої структури та збільшує його поверхню випаровування, що сприяє інтенсифікації процесу видалення вологи. З позиції теплопередачі цей спосіб є відносно малоефективним через низьку теплопровідність піни, проте відзначається короткою тривалістю сушіння (3-20 хв) і невисокими температурами обробки, що дозволяє зберегти біологічно активні речовини.

Для стабілізації піни використовують емульгатори – сухе молоко, агар, желатин, крохмаль, метилцелюлозу та інші речовини. У деяких випадках для покращення спінювання через масу пропускають повітря. Сушіння здійснюють переважно конвективним способом на стрічкових сушарках. Отриманий сухий продукт подрібнюють, просіюють і пакують у герметичну тару.

Метод піносушіння ефективно застосовується для соків і пюре малини, полуниці, яблук, томатів, картоплі та інших плодово-овочевих продуктів.

Розробка принципової схеми енергоефективного обладнання для інактивації антипоживних речовин у зернобобових культурах (Рис. 1), таких як соя, горох чи сочевиця, є критичним кроком у модернізації агропромислових технологій, спрямованим на підвищення біологічної цінності кормових і харчових продуктів. Антипоживні речовини, включаючи інгібітори трипсину, уреазу та лектини, знижують засвоюваність білків і можуть спричиняти травні розлади в тваринництві, тому їх інактивація є обов'язковою. Традиційні методи термічної обробки (варіння, екструзія) часто неефективні через високе енергоспоживання та втрати поживних речовин, тоді як інфрачервона (ІЧ) мікронізація пропонує швидке волюметричне нагрівання до 70-90°С за 20-60 с, що забезпечує селективну інактивацію без значної деградації амінокислотного складу. Переходячи до енергоефективності, схема фокусується на оптимізації енергетичних потоків: рекуперації тепла від ІЧ-емітерів, ізоляції камери, адаптивному керуванні потужністю на основі сенсорів та інтеграції з рециркуляційними системами повітря, що дозволяє знизити споживання електроенергії на 30-40% порівняно з конвекційними сушарками.

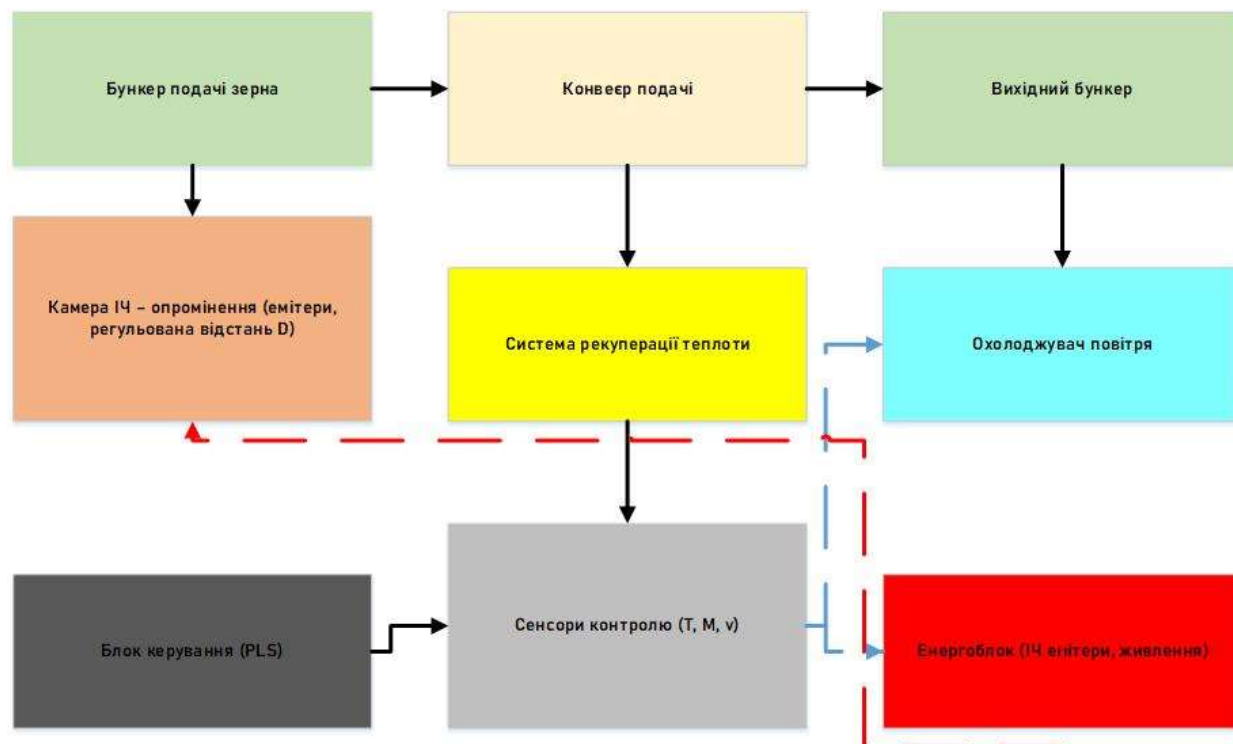
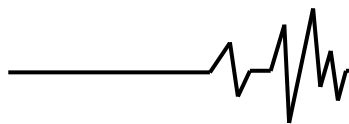


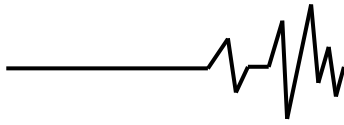
Рис. 1 Принципова схема енергоефективного обладнання для ІЧ-мікронізації зернобобових

Процес розробки схеми починається з аналізу технологічних вимог: обладнання повинно обробляти 1-5 т/год зерна з початковою вологістю 15-25%, досягаючи інактивації >95% за енерговитратами <0,5 кВт·год/кг сухої речовини. На основі математичних моделей тепломасообміну (як у попередніх симуляціях), де ключовими є параметри інтенсивності ІЧ-випромінювання $I = 8000-12000 \text{ Вт/м}^2$, швидкості конвеєра $v = 0,05-0,15 \text{ м/с}$ та глибини проникнення $\mu \approx 500 \text{ м}^{-1}$, формується модульна структура. Ця структура включає вхідні, основні, допоміжні та вихідні блоки, пов'язані потоками матеріалу, енергії та сигналів керування. Енергоефективність досягається через замкнений цикл: тепло від вихлопних газів рекуптується для попереднього нагріву вхідного зерна, а сенсори реального часу (температури T , вологості M , швидкості v) дозволяють динамічно регулювати P еміттерів, мінімізуючи перевитрати. Такий підхід не тільки знижує CO_2 -викиди, але й підвищує стабільність процесу, уникаючи локального перегрівання.

Переходячи до детального опису компонентів схеми, обладнання поділяється на чотири основні підсистеми, що забезпечують послідовний потік від сировини до готового продукту. Перша підсистема – вхідна подача – складається з бункера подачі зерна (об'ємом 2-5 м^3 , з вібраційним дозатором для рівномірного розподілу), який з'єднаний з конвеєром подачі (шириною 0,5-1 м, швидкістю v , регульованою серводвигуном). Цей блок забезпечує

безперервний потік зерна (щільність 750-800 кг/м^3) у камеру мікронізації, з попереднім очищенням від домішок для уникнення нерівномірного нагрівання. Енергоефективність тут реалізується через теплоізоляційний кожух конвеєра, що зберігає початкову температуру (20-25°C), зменшуючи початкові енергозатрати на нагрів.

Далі, центральна підсистема - камера ІЧ-опромінення - є серцем обладнання, де відбувається мікронізація. Камера (довжиною 3-5 м, висотою 0,3 м) оснащена панелями ІЧ-еміттерів (кварцовими лампами або керамічними нагрівачами в діапазоні 2-4 $\mu\text{м}$, сумарною потужністю $P = 800-1200 \text{ Вт/м}^2$), розташованими з регульованою відстанню $d = 0,1-0,2 \text{ м}$ над і під конвеєром для двостороннього опромінення. Внутрішні поверхні вкриті віддзеркалюючими матеріалами (алюмінієвими листами з покриттям >95% відбиття), що повертає непоглинуте випромінювання назад до зерна, підвищуючи ККД на 15-20%. Зерно рухається по перфорованій стрічці конвеєра, дозволяючи циркуляцію гарячого повітря (температура 50–70°C, вологість <20%) для посилення конвективного масообміну. Цей блок інтегрується з системою рекуперації тепла: теплообмінник (площею 10-20 м^2 , матеріал – нержавіюча сталь) захоплює відпрацьоване тепло від поверхні еміттерів і вихлопного повітря, передаючи його на попередній нагрів вхідного зерна або рециркуляцію в камеру, що



знижує енергоспоживання на 25%.

Наступним етапом є допоміжна підсистема контролю та енергозабезпечення, яка забезпечує автоматизацію та моніторинг. Сенсори контролю (термопари PT100 для T , ємнісні датчики для M , енкодери для v) розміщені вздовж конвеєра (кожні 0,5 м), передаючи дані в блок керування на базі PLC (програмований логічний контролер, наприклад, Siemens S7-1200) з ПІД-регуляторами. Цей блок динамічно коригує P емітерів (PWM-імпульсне керування), v конвеєра та потік повітря, оптимізуючи за критерієм максимальної інактивації ($\int \exp(-E_d/RT) dt > \text{поріг}$) при мінімальному E_{abs} . Енергоблок включає стабілізоване живлення (380 В, 50 Гц) з інверторами для емітерів та акумуляторами для пікових навантажень, а також систему фільтрації для рециркуляції повітря, що утримує пил і вологу, подовжуючи термін служби компонентів. Така інтеграція перетворює обладнання на "розумну" систему, де енергоефективність досягається через реальний часовий фідбек, з прогнозуванням витрат на основі моделей тепломасообміну.

Завершальною підсистемою є вихідний блок, де оброблене зерно (вологість $M < 12\%$, T інактивації $> 95\%$) проходить охолоджувач повітря (вентилятор з теплообмінником, потужністю 5-10 кВт), що знижує температуру до 30-40°C для запобігання конденсації та самозігріванню. Звідси зерно надходить у вихідний бункер (з автоматичним сортуванням за розміром), готовий до пакування або подальшої переробки. Повний цикл забезпечує безперервність, з можливістю CIP-очищення (clean-in-place) для гігієни.

Принципова схема візуалізує ці підсистеми як послідовні блоки з потоками: від бункера подачі (зелений блок) через конвеєр (жовтий) до камери ІЧ (помаранчевий), з гілками на рекуперацію (жовтий), охолоджувач (блакитний) та вихідний бункер (зелений). Нижній рівень - сенсори (сірий), PLC (сірий) та енергоблок (червоний), з'єднані стрілками сигналів (пунктир) та енергії (суцільна). Ця схема підкреслює замкнений енергетичний контур, де стрілки від рекуператора повертаються до камери, ілюструючи циклічність для енергоефективності.

Висновки. На основі аналізу теплофізичних характеристик зернобобових культур встановлено, що інфрачервона мікронізація забезпечує інтенсивне об'ємне нагрівання зерна, скорочуючи тривалість обробки у 2-3 рази порівняно з конвективним сушінням та знижуючи питомі енерговитрати на 30-40 %.

Розроблена принципова схема енергоефективного ІЧ-мікронізатора включає

чотири взаємопов'язані підсистеми – подачі, ІЧ-камери, керування та охолодження, що утворюють замкнений енергетичний контур із системою рекуперації тепла.

Оптимальна геометрія ІЧ-камери (циліндрична форма з полірованими відбивачами) забезпечує коефіцієнт використання випромінюваної енергії до 0,85, а двостороннє опромінення шару зерна підвищує рівномірність теплового поля на 18-22 %.

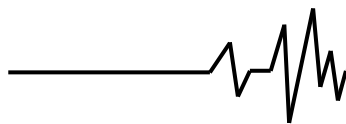
Використання кварцових ламп потужністю 1,0-1,5 кВт із максимумом спектра $\lambda = 2,6-3,0$ мкм дозволяє досягти необхідної температури інактивації (70-90 °C) за 20-60 с без руйнування білкової структури зерна.

Система автоматичного керування на основі PID-регуляторів та PLC-контролера забезпечує стабільність температурного поля ± 2 °C і дає змогу динамічно змінювати потужність емітерів залежно від вологості та швидкості подачі матеріалу.

Запропонована конструкція мікронізатора може бути використана для промислових ліній переробки сої, люпину та гороху, забезпечуючи не лише енергозбереження, але й покращення кормової цінності продукції.

Список використаних джерел

1. Заболотний Г.М., Мазур В.А., Циганська О.І., Дідур І.М., Циганський В.І., Панцирева Г.В. Агробіологічні основи вирощування сої та шляхи максимальної реалізації її продуктивності: монографія. Вінниця: ВНАУ. 2020. 303 с.
2. Мазур В.А., Ткачук О.П., Панцирева Г.В., Купчук І.М. Соя в інтенсивному землеробстві. Вінниця. ТВОРИ. 2022. 225 с.
3. Обертюх Ю.В. Антипоживні речовини сої, їх інактивація та технології переробки соєвих бобів на промисловій основі й в умовах господарства. *Корми і кормовиробництво*. 2012. Вип. 71. С. 62–71.
4. Купчук І.М., Волинець Є.О., Сімаков О.О. Огляд сучасних технологій інактивації антипоживних речовин сої. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2024. № 1 (124). С. 26-32. DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-3.
5. Das G. Conventional and emerging processing techniques for the removal of antinutritional factors from legume seeds. *Food Research International*. 2022. Vol. 157. Article 111282. DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111282.
6. Yalçın S. Infrared treatment effects on urease and trypsin inhibitor activities in legumes. *Food Chemistry*. 2015. Vol. 172. P. 263–269. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.09.039.
7. Bai T., Guo W., Zhu X. Effect of infrared heating on the functional and nutritional properties



of chickpea and barley flour. *Journal of Food Engineering*. 2018. Vol. 230. P. 24–32. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2018.01.022.

8. Acquah C., Dzogbefia V.P., Adjei S. The effect of processing on bioactive compounds and nutritional qualities of pulses. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 5. Article 681662. DOI: 10.3389/fsufs.2021.681662.

9. Irakli M., Samanidou V., Katsantonis D. Comparative evaluation of the nutritional and antinutritional characteristics of legumes after processing. *Foods*. 2020. Vol. 9(10). Article 1405. DOI: 10.3390/foods9101405.

10. Cheng S., Zhang Y., Tang J. A review of the treatments to reduce anti-nutritional factors in pulses. *Foods*. 2025. Vol. 14(4). Article 681. DOI: 10.3390/foods14040681.

11. Sesikashvili O., Bakuradze T., Makarashvili N. Modelling of moisture loss from legumes during infrared micronization. *Applied Engineering in Agriculture*. 2021. Vol. 37(4). P. 451–458. DOI: 10.13031/aea.14423.

12. Khatchatourian O., Pedro A. Energy performance of infrared dryers for grain and seed processing: numerical and experimental evaluation. *Biosystems Engineering*. 2023. Vol. 229. P. 109–120. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2023.02.006.

13. Polovynko O., Chudyk O., Tverdokhlib I. Thermal treatment of high-protein feed materials by infrared radiation. *Ukrainian Journal of Food Science*. 2023. Vol. 11(2). P. 45–53. DOI: 10.24263/2310-1008-2023-11-2-7.

14. Zong H., Chen R., Tang Z. Infrared drying technologies for cereals and legumes: a review of recent advances and energy efficiency improvement. *Journal of Cereal Science*. 2024. Vol. 115. Article 103869. DOI: 10.1016/j.jcs.2024.103869.

References

1. Zabolotnyi H.M., Mazur V.A., Tsyhanska O.I., Didur I.M., Tsyhanskyi V.I., Pantsyreva H.V. (2020). Ahrobiolohichni osnovy vyroshchuvannia soi ta shliakhy maksymalnoi realizatsii yii produktyvnosti: monohrafiia. Vinnytsia: VNAU. 303 s. [in Ukrainian].

2. Mazur V.A., Tkachuk O.P., Pantsyreva H.V., Kupchuk I.M. (2022). Soia v intensyvnomu zemlerobstvi. Vinnytsia. TVORY. 225 s. [in Ukrainian].

3. Obertiukh Yu.V. (2012). Antypozhyvnyi rehovyny soi, yikh inaktyvatsiia ta tekhnolohii pererobky soievkykh bobiv na promyslovii osnovi y v umovakh hospodarstva. *Kormy i kormovyrobnytstvo*. Vyp. 71. S. 62–71. [in Ukrainian].

4. Kupchuk I.M., Volynets Ye.O.,

Simakov O.O. (2024). Ohliad suchasnykh tekhnolohii inaktyvatsii antypozhyvnykh rehovyn soi. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. № 1 (124). S. 26–32. [in Ukrainian].

5. Das G. (2022). Conventional and emerging processing techniques for the removal of antinutritional factors from legume seeds. *Food Research International*. Vol. 157. Article 111282. [in English].

6. Yalçın S. (2015). Infrared treatment effects on urease and trypsin inhibitor activities in legumes. *Food Chemistry*. Vol. 172. P. 263–269. [in English].

7. Bai T., Guo W., Zhu X. (2018). Effect of infrared heating on the functional and nutritional properties of chickpea and barley flour. *Journal of Food Engineering*. Vol. 230. P. 24–32. [in English].

8. Acquah C., Dzogbefia V.P., Adjei S. (2021). The effect of processing on bioactive compounds and nutritional qualities of pulses. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. Vol. 5. Article 681662. [in English].

9. Irakli M., Samanidou V., Katsantonis D. (2020). Comparative evaluation of the nutritional and antinutritional characteristics of legumes after processing. *Foods*. Vol. 9(10). Article 1405. [in English].

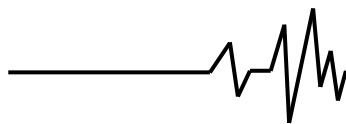
10. Cheng S., Zhang Y., Tang J. (2025). A review of the treatments to reduce anti-nutritional factors in pulses. *Foods*. Vol. 14(4). Article 681. [in English].

11. Sesikashvili O., Bakuradze T., Makarashvili N. (2021). Modelling of moisture loss from legumes during infrared micronization. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 37(4). P. 451–458. [in English].

12. Khatchatourian O., Pedro A. (2023). Energy performance of infrared dryers for grain and seed processing: numerical and experimental evaluation. *Biosystems Engineering*. Vol. 229. P. 109–120. [in English].

13. Polovynko O., Chudyk O., Tverdokhlib I. (2023). Thermal treatment of high-protein feed materials by infrared radiation. *Ukrainian Journal of Food Science*. Vol. 11(2). P. 45–53. [in English].

14. Zong H., Chen R., Tang Z. Infrared drying technologies for cereals and legumes: a review of recent advances and energy efficiency improvement. *Journal of Cereal Science*. 2024. Vol. 115. Article 103869. [in English].

**DESIGN AND ENERGY PRINCIPLES FOR
DEVELOPING AN INFRARED MICRONIZER
FOR THE PROCESSING OF LEGUME GRAINS**

The article presents the design and energy principles for developing an infrared (IR) micronizer intended for the thermal treatment of legume grains aimed at inactivating antinutritional compounds and improving feed nutritional quality. The use of medium-wave infrared radiation ($\lambda = 2-4 \mu\text{m}$) was found to provide uniform volumetric heating of the grain layer and reduce specific energy consumption by 30-40 % compared to conventional convective drying. A schematic design of the proposed micronizer includes a treatment chamber with polished reflectors, a block of quartz emitters, a mixing mechanism, a multilayer thermal insulation casing, and an automated temperature-control system. The optimal design and operating parameters were determined as follows: emitter power 1.0-1.5 kW, heat-flux density 15-25 kW/m²,

distance from emitters to the grain layer 150 mm, and grain-layer thickness 15-20 mm. Experimental results demonstrated that heating at 140-160 °C for 70-90 s reduces urease activity by a factor of 8-10 while preserving 97-98 % of the crude protein content. The overall thermal efficiency of the unit reached 0.78-0.82, confirming its high energy performance. The use of polished aluminum reflectors decreased heat losses by 15-18 %, and PID-based power control maintained temperature stability within ± 2 °C. The developed structural and energy solutions form a scientific and practical basis for creating next-generation industrial IR systems for feed processing, ensuring the safety, quality, and nutritional integrity of legume raw materials used in compound feed production.

Keywords: infrared micronization, energy efficiency, legume grains, antinutritional factors, thermal field, micronizer, thermal treatment, design parameters.

Відомості про авторів

Панцирева Ганна Віталіївна – доктор с.-г. наук, доцент Вінницького національного аграрного університету (21008, м. Вінниця, вул. Сонячна 3, e-mail: apantsyрева@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0539-5211>).

Волинець Євгеній Олександрович – доктор філософії з галузевого машинобудування, старший викладач кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: evgen110596@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3298-6316>).

Борецька Тетяна Юріївна – зав. науково-організаційного відділу науково-дослідної частини Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, email: ipserhiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7966-228X>).

Дмитренко Віктор Петрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник лабораторії адаптивного картоплярства, зберігання і переробки Інституту картоплярства НААН України (email: vik8320@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1866-6188>).

Pantsyрева Hanna – Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor at Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: apantsyрева@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0539-5211>).

Volynets Yevhenii – Doctor of Philosophy in Industrial Engineering, Senior Lecturer at the Department of Occupational Safety and Biotechnical Systems in Animal Husbandry at Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: evgen110596@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3298-6316>).

Boretska Tetiana – Head of the Scientific and Organizational Department of the Research Division at Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: ipserhiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7966-228X>).

Dmytrenko Viktor – Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Adaptive Potato Farming, Storage, and Processing at the Institute of Potato Growing of the National Academy of Sciences of Ukraine (email: vik8320@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1866-6188>).

Стаття надійшла 27.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Опубліковано 25.12.2025