



УДК 66.047.59

DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-1

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ АКТИВНИМ ВЕНТИЛЮВАННЯМ ПРОДУКТІВ ФРАКЦІЙНОЇ ПЕРЕРОБКИ БОБОВИХ ТРАВ В КОНВЕКТИВНІЙ СТРІЧКОВІЙ СУШАРЦІ

Калетнік Григорій Миколайович, академік НААН України, д.е.н., професор
Яропуд Віталій Миколайович, к.т.н., доцент
Полєвода Юрій Алікович, к.т.н., доцент
Вінницький національний аграрний університет

Grygorii Kaletnik, Academician of NAAS of Ukraine, Doctor of Economic Sciences, Professor
Vitalii Yaropud, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Yurii Polevoda, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Vinnytsia National Agrarian University

Процес видалення вологи з рослинної сільськогосподарської сировини є різноманітним, проте енергозатратним етапом виробництва, незалежно від застосованих методів та способів сушіння. Для прогнозування енергозатрат та проектування сушильного обладнання, аналіз та узагальнення кінетики та динаміки сушіння рослинної сировини є актуальною задачею.

За результатами проведених досліджень теоретично обґрунтована технологічна і конструктивно-технологічна схема конвективної стрічкової сушарки продуктів фракційної переробки бобових трав. Сушарка виконана у вигляді камери з горизонтальними стрічковими транспортерами, в середині яких розташовані калорифери з нагрітим паром, а у верхній частині камери розміщені відцентрові вентилятори.

За допомогою програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ проведена симуляція технологічного процесу сушіння в розробленій сушарці. Отримано візуалізації розподілу швидкості потоку частинок продуктів фракційної переробки бобових трав і потоку повітря в області конвективної стрічкової сушарки у вигляді скалярних і векторних даних. Також був визначений розподіл температури потоку повітря в області конвективної стрічкової сушарки у скалярному вигляді, що дозволило виявити його вплив на температуру частинок люцерни, що рухаються по стрічкових транспортерах.

Отримані результати чисельного моделювання підтвердили аналітичні розрахунки. Проте, для більш повної оцінки та оптимізації параметрів сушарки, рекомендується провести додаткові експериментальні дослідження процесу сушіння продуктів фракційної переробки бобових трав і перевірити емпіричним шляхом раціональні конструктивно-технологічні параметри конвективної стрічкової сушарки.

Ключові слова: *продукти фракційної переробки бобових трав, люцерна, сушіння, конструктивно-технологічна схема, конвективна сушарка, моделювання, симуляція, параметри.*

Рис. 7. Літ. 22.

1. Постановка проблеми

Якщо Україна має у подальшому прагнути до власного високорозвинутого сільського господарства, то вона повинна дбати й про власне високоефективне сільськогосподарське машинобудування. Світовий досвід показує, що наша країна не може бути якимось винятком з цієї концепції. Але для того, щоб у майбутньому сільськогосподарська техніка України вийшла на рівень, який цілком відповідатиме рівню світових зразків і міжнародним вимогам якості, стандартизації і сертифікації, передусім необхідні: перш за все міцна загальнодержавна підтримка і реальне й конкретне об'єднання зусиль вчених, конструкторів, випробувачів і виробників, спрямованих на вирішення пріоритетних комплексних проектів зі створення новітньої техніки з використанням елементів автоматизації та комп'ютеризації щодо контролю та управління її роботою на основі використання сучасної елементної бази шляхом міжнародної кооперації, а нормативно-правова база повинна бути такою, щоб виробляти в Україні власну сільськогосподарську техніку було вигідно [1].

У сільськогосподарській галузі важливим завданням є забезпечення повноцінної годівлі



сільськогосподарських тварин. Для досягнення цієї мети використання доступної та економічно вигідної місцевої рослинної сировини є раціональним підходом [2]. У цьому контексті кормові трави, такі як люцерна, конюшина, буркун та еспарцет, є важливим джерелом рослинного білка, каротину та вітамінів, дозволяючи замінити дорогі білкові сировини, такі як соєвий шрот та рибне борошно [3].

Зокрема, посівна люцерна (*Medicago sativa* L.) відзначається особливо високим вмістом білку (17–19 %) та каротину (до 200 мг/кг) у своїх листках і стеблах [4]. Однак, серед недоліків люцерни як кормової сировини є висока вологість при збиранні (від 50 % до 80 %), що ускладнює процес тривалого зберігання [3]. Відтак, зазвичай листостеблову масу люцерни сушать до вологості 7–15 %, але традиційний метод природного сушіння для отримання сіна зараз стає менш популярним через тривалість процесу та невисоку продуктивність [5].

Замість цього, на сьогодні все більше використовується інтенсивна технологія сушіння, яка включає змивання листостеблової маси люцерни, високотемпературне конвективне сушіння та гранулювання [6]. Однак, при цьому виникає проблема втрати каротину та вітамінів через високі температури [7], що також є характерним для конвективного сушіння інших рослин. Крім того, через низьку теплопровідність зелених рослин, включаючи люцерну, конвективне сушіння потребує багато часу, що негативно впливає на збереження каротину та інших харчових речовин [8].

На завершальному етапі сушіння, коли вологість рослинної сировини значно знижується, її теплопровідність і електропровідність ще більше зменшуються, що призводить до збільшення енерговитрат на процес.

Тому, щоб вирішити проблему збалансованої та ефективної годівлі сільськогосподарських тварин, важливо знайти оптимальні методи сушіння продуктів фракційної переробки бобових трав (зокрема, люцерни) та інших рослин, які дозволять зберегти важливі поживні речовини.

У дослідженнях [9] для сушіння люцерни використовувались такі методи: сушіння в полі до 50 % сухої речовини з подальшим завершенням сушіння у провітрюваному приміщенні; сушіння в польових умовах без перевертання; сушіння з одним перевертанням та сушіння з двома перевертаннями. Серед них найбільш ефективним виявився спосіб сушіння з перевертаннями.

У дослідженнях [10, 11] також розглянуто різноманітні засоби для сушіння люцерни. Їх можна розділити на такі групи за конструктивним виконанням: камерні, барабанні, тунельні, шахтові і стрічкові сушарки. Найбільший інтерес представляють стрічкові сушарки, оскільки вони працюють неперервно, що забезпечує ефективність сушіння в загальній технологічній лінії переробки люцерни на корми.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Зелена маса люцерни – це органічний матеріал, який містить значну кількість вологи, що зосереджена в клітинах. Процес видалення вологи з рослинної сировини є різноманітним, але енергозатратним етапом виробництва, незалежно від застосованих методів та способів сушіння. Для прогнозування енергозатрат та проектування сушильного обладнання, аналіз та узагальнення кінетики та динаміки сушіння рослинної сировини є актуальною задачею [12].

В літературі зустрічаються аналізи, фізичні та математичні моделі гідродинаміки та кінетики процесів фільтраційного сушіння рослинної сировини. Наприклад, в дослідженні [13] були знайдені коефіцієнти тепловіддачі та запропоновані рівняння для їх розрахунку під час сушіння подрібнених стебел соняшника, а також визначений коефіцієнт дифузії рідини з пористого тіла стебел соняшника у роботі [14]. В іншому дослідженні [15] представлена фізична модель та узагальнення гідродинамічних процесів під час сушіння бавовняного волокна. Експериментальним шляхом було встановлено, що температура теплового агента впливає на величину дифузійного, теплового і гідродинамічного пограничних шарів під час фільтраційного сушіння лущеного березового шпону [16] та кукурудзяної барди [17]. Варто зазначити, що всі згадані матеріали рослинного походження містять як вільну, так і зв'язану вологу, і на кінетичних кривих сушіння спостерігається як період постійної, так і період спадаючої швидкості сушіння, при чому період спадаючої швидкості є обмежувачим етапом.

У статті [18] розглядається вплив різних факторів на кінетику процесу сушіння ячменю і доведено, що температура теплоносія має вирішальний вплив на швидкість сушіння. У зв'язку з цим автори [19] рекомендують проводити сушіння за двоступеневого режиму з метою підвищення інтенсивності прогрівання матеріалу та досягнення енергоефективного процесу сушіння. У статті [20]



запропоновано математичну модель для розрахунків високотемпературних процесів сушіння рослинної біомаси. У цій роботі виведено рівняння кінетики сушіння та динаміку руху теплоносія. Відзначаються автори [18] та [19] за їх вагомий внесок у дослідження процесів сушіння рослинних матеріалів та розвиток математичних моделей, що сприяють більш ефективному та енергозберігаючому сушінню біомаси.

Враховуючи вищезазначене, важливо продовжувати дослідження процесу сушіння продуктів фракційної переробки бобових трав (наприклад, зеленої маси люцерни) у розробленій конвективній сушарці.

3. Мета досліджень

Метою досліджень є обґрунтування технологічних параметрів і конструктивно-технологічної схеми конвективної стрічкової сушарки шляхом чисельного моделювання процесу сушіння активним вентиляванням продуктів фракційної переробки бобових трав.

4. Матеріали і методи досліджень

Технологічна схема конвективної стрічкової сушарки зображена на рис. 1. В процесі сушіння продукту волога видаляється шляхом передачі теплоти з продукту до повітря, яке діє як теплоносій, і використовується повітря з початковою температурою $t_0 = 17,6 \text{ }^\circ\text{C}$ та відносною вологістю $\phi_0 = 78 \%$.

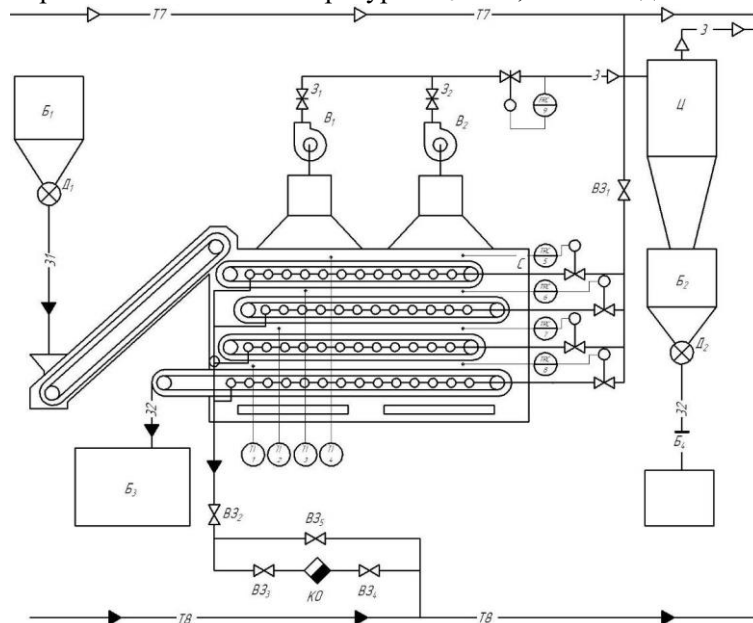


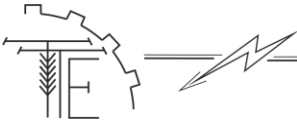
Рис. 1. Технологічна схема конвективної стрічкової сушарки

С – сушильна камера; *Ц* – циклон; *В₁₋₂* – вентилятор; *Б₁₋₄* – бункер; *Д₁₋₂* – дозатор; *КО* – конденсатовідвідник; *ВЗ₁₋₅* – вентиль запірний; *З₁₋₂* – засуви; *З₁₋₃* – вихідний продукт; *32* – висушений продукт; *3-3* – повітря; *Т_{7-Т₇}* – пар; *Т_{8-Т₈}* – конденсат; *TRC* – автоматичне регулювання температури; *FRC* – автоматичне регулювання витрат

Початковий вологий продукт фракційної переробки бобових трав, який у цьому випадку є люцерною, має вологість $W_n = 50 \%$ і температуру $\theta_1 = 17,6 \text{ }^\circ\text{C}$, і надходить до сушильної камери *С* через похилий транспортер. У сушильній камері продукт транспортується на стрічках. При цьому повітря, що підготовлене до сушіння, відцентровими вентиляторами *В₁* і *В₂* нагнітається в сушильну камеру з початковою температурою $t_0 = 17,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

Завдяки калориферам, розташованим між робочою і холостою гілками стрічок, повітря підігрівається поступово за рахунок конденсації нагріваючої пари, яка має температуру $t_{тп} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ при тиску $P_{тп} = 0,4 \text{ МПа}$. Продукт сушиться до досягнення вологості $W_k = 7 \%$. Після процесу сушіння висушений продукт направляється у бункер *Б₃*. Відпрацьоване повітря, яке вже збагачене вологою та містить дрібні частинки, проходить крізь циклон *ЦН-15*, де очищається від цих частинок та видаляється в атмосферу. Після циклону висушений продукт надходить у бункер *Б₂*.

На рис. 2 зображено схему конвективної стрічкової сушарки, яка складається з камери, обладнаної металевими щитами і дверима. Всередині сушарки розміщено п'ять пар барабанів



діаметром 246 мм, кожна з яких має нержавіючу металеву сітчасту дротяну стрічку. Кожна пара барабанів складається з ведучого та натяжного барабанів, і на них встановлені скребки для очищення від налиплих продукту. Під кутом 40° до горизонту знаходиться похилий конвеєр, який використовується для завантаження продукту в сушарку.

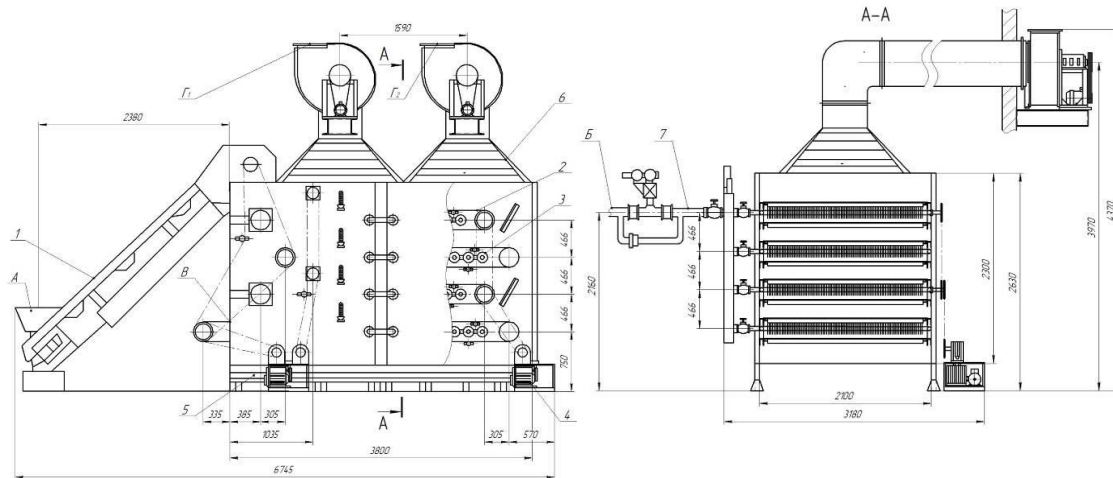


Рис. 2. Конструктивна схема конвективної стрічкової сушарки

1 – похилий стрічковий транспортер; 2 – стрічковий конвеєр; 3 – калориферна батарея; 4 – привод; 5 – станина; 6 – витяжний пристрій; 7 – паропровід; А – вхід вологого матеріалу; В – вхід пару; В – вихід сухого матеріалу; Г_{1,2} – вихід відпрацьованого повітря

Простір між гілками кожного конвеєра використовується для розміщення секцій парових калориферів, до яких подається пара під тиском 0,4 МПа. Витяжний пристрій складається з двох камер та двох вентиляторів, які можуть регулювати продуктивність за допомогою клапана, що знаходиться у верхній частині витяжної камери. Повітря для сушіння забирається з приміщення через рухомі штори в нижній частині сушарки.

Процес сушіння починається з того, що продукт подається на верхню робочу стрічку сушарки за допомогою похилого конвеєра. Потім він послідовно переходить на другу, третю і такі стрічки, проходячи п'ять послідовних стрічок у сушарці. Під час проходження через стрічки, продукт зустрічає нагріте повітря з калориферів, яке поглинає вологу, після чого виводиться із сушарки. Приблизно на четвертій стрічці передбачений лоток для вивантаження продукту або для подальшого переміщення на наступний конвеєр.

Для перевірки ефективності запропонованої конструктивно-технологічної схеми конвективної сушарки та валідності проведених аналітичних розрахунків, виконана симуляція процесу сушіння у програмному пакеті Simcenter STAR-CCM+, використовуючи метод DEM (Discrete Element Method).

Метод DEM – це числовий метод моделювання, який використовується для аналізу руху та взаємодії частинок. Зазвичай цей метод застосовується для вивчення поведінки гранульованих матеріалів, таких як піски, каміння та зерна, а також для аналізу процесів, які відбуваються у різних галузях, наприклад, у нафтогазовій промисловості, харчовій, аграрній та фармацевтичній галузях. Метод DEM моделює рух твердих тіл, які взаємодіють між собою через контактні сили. Кожна частинка представлена окремо, і враховується взаємодія між ними, така як удари, тертя та зчеплення. Параметри взаємодії визначаються для кожної пари частинок, на основі яких обчислюється рух кожної частинки. Метод DEM також враховує взаємодію частинок з навколишнім середовищем, таким як повітря або рідина. Використання методу DEM дозволяє аналізувати поведінку гранульованих матеріалів та інших типів дискретних систем, і є потужним інструментом для вдосконалення ефективності та точності проектування процесів, пов'язаних з перемішуванням, перенесенням та сортуванням гранульованих матеріалів.

У даній симуляції створена 2D-модель області сушарки зі стрічковими конвеєрами, які переміщуються в горизонтальній площині. З використанням генератора поверхневої сітки і генератора багатограничних комірок з опорним значенням лінійного розміру 0,01 м згенеровано об'ємну сітку для області конвективної сушарки (рис. 3).

Далі у симуляції обираємо певні фізичні моделі. Вибрані моделі включають двовимірну модель,



нестационарну неявну модель, математичну модель однокомпонентного газу (повітря), модель ідеального газу (повітря), модель турбулентного потоку повітря, к-ε модель турбулентності повітря, ізотермічне рівняння енергії рідини, усереднене рівняння Нав'є-Стокса залежно від числа Рейнольдса, модель роздільної течії, методи градієнта і границь, Лагранжеву модель багатофазового середовища, модель багатофазної взаємодії, модель дискретних елементів (DEM) та поле сили тяжіння [19-21].

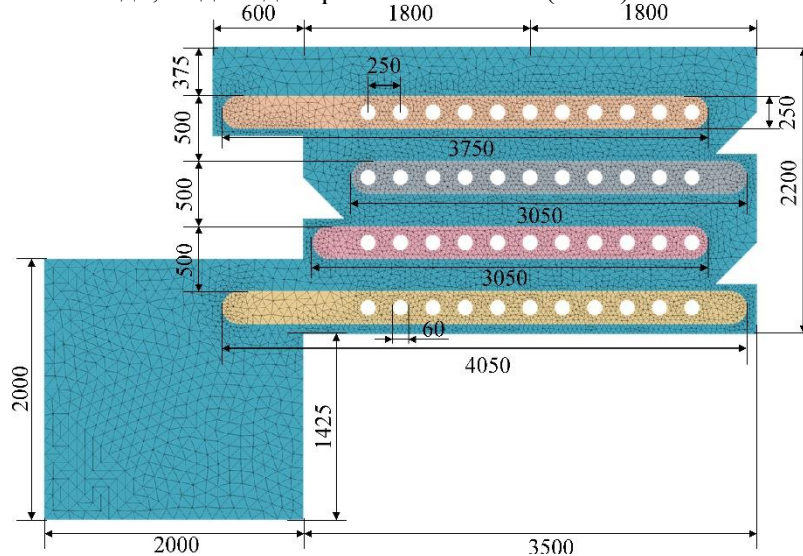


Рис. 3. Сітка області сушарки зі стрічковими конвеєрами

Продукти фракційної переробки бобових трав (люцерна) представлені у вигляді Лагранжевої фази відповідно до таких моделей: постійної щільності, сили градієнта тиску, сили опору частинок, циліндричних частинок, однокомпонентних твердих частинок, частинок DEM. Люцерна мала такі фізико-механічні властивості: коефіцієнт Пуассона – 0,25; модуль Юнга – 0,4 МПа; щільність – 500 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,41; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,35; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,35; коефіцієнт опору кочення – 0,25. За геометричні розміри люцерни прийняті такі характеристики: середнє значення ефективного діаметра – $D = 0,01$ м; середнє значення довжини – $L = 0,08$ м; мінімальне значення довжини – $L_{\min} = 0,05$ м; максимальне значення ефективного довжини – $L_{\max} = 0,10$ м; стандартне відхилення – $\sigma_L = 0,02$ м. Розподіл довжини люцерни підпорядковується нормальному розподілу.

Взаємодія між частинками люцерни підпорядковувалася моделі контактної взаємодії Герца-Мінділіна [22]: коефіцієнт тертя спокою – 0,41; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,35; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,35.

За властивості середовища були прийняті такі параметри: середовище – повітря; динамічна в'язкість – $1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – $9,8$ м/с²; тиск – 101325 Па. Температура вхідного потоку повітря – 60 °С, температура навколишнього середовища – 20 °С.

Завантаження продуктів фракційної переробки бобових трав здійснюється верхнім стрічковим транспортером на основі функції інжектування Лагранжевої фази із такими параметрами: ймовірність появи частинок – 0,8, початкова швидкість частинок – 0 м/с, завантаження люцерни $Q = 81,77$ кг/год. Швидкість руху стрічок – 0,11 м/с. Параметри потоку повітря відповідали попереднім аналітичним розрахункам. Граничні умови для симуляції такі. Взаємодія між частинками люцерни і стінками конвективної сушарки підпорядковувалася моделі контактної взаємодії Герца-Мінділіна: коефіцієнт тертя спокою – 0,41; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,35; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,35. Поверхня стрічки є не прозорою для частинок люцерни і прозорою для потоку повітря. Загальний час симуляції – 600 с. Кількість ітерацій – 10. Крок за часом симуляції – 0,01 с.

5. Виклад основного матеріалу

За результатами симуляції отримана візуалізація розподілу швидкості потоку повітря в області конвективної стрічкової сушарки у векторному і скалярному вигляді (рис. 4).

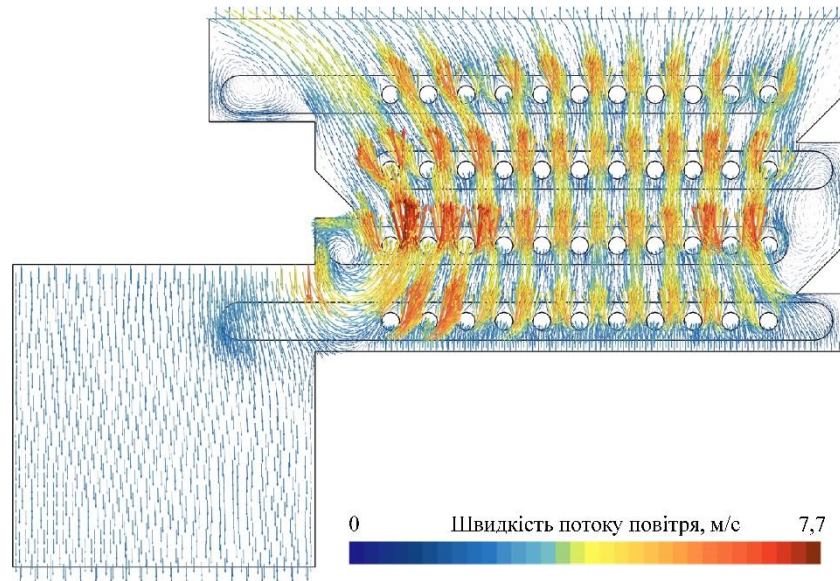
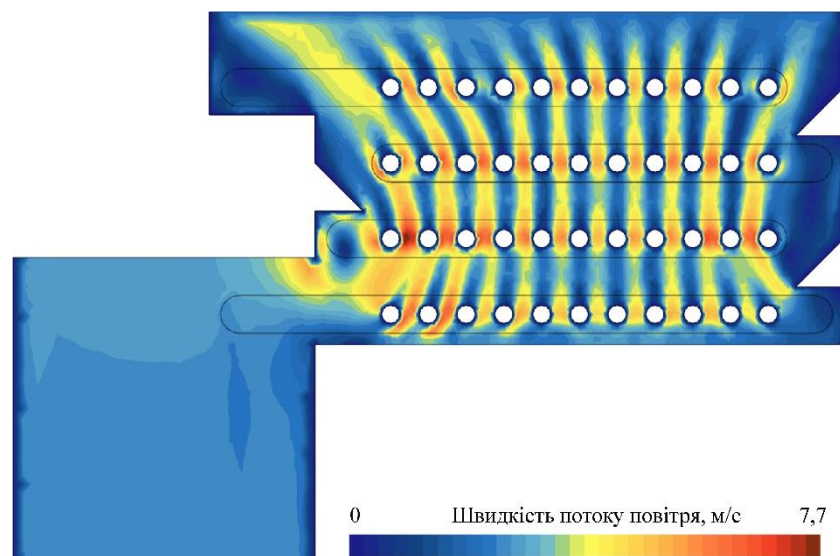
*a**б*

Рис. 4. Візуалізація розподілу швидкості потоку повітря в області конвективної стрічкової сушарки у векторному (а) і скалярному (б) вигляді

З рис. 4 видно, що потік повітря огинає калорифери. При цьому швидкість потоку збільшується з 1,8 м/с на вході до 7,7 м/с в проміжках між трубами калорифера.

В процесі руху швидкість переміщення люцерни по стрічковим транспортерам також змінюється. Відповідна візуалізація наведена на рис. 5. На стрічці частинки люцерни рухаються із рівномірною швидкістю – 0,11 м/с, а в процесі вивантаження їх зі стрічок швидкість збільшується під дією прискорення вільного падіння.

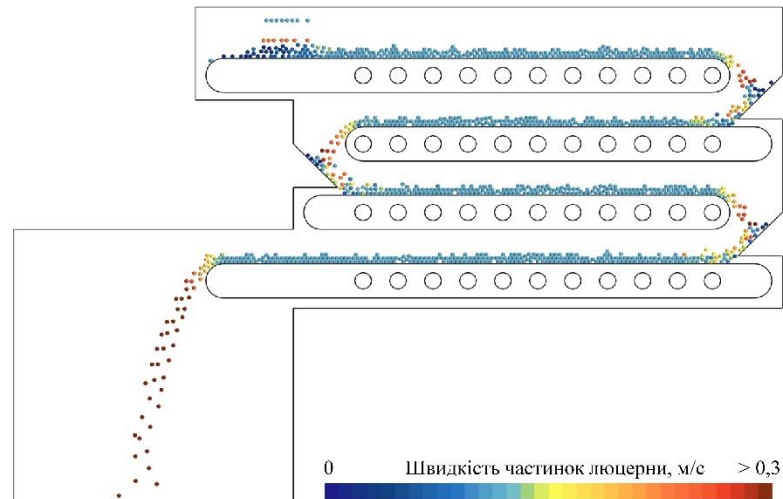


Рис. 5. Візуалізація розподілу швидкості потоку частинок люцерни в області конвективної стрічкової сушарки у скалярному вигляді

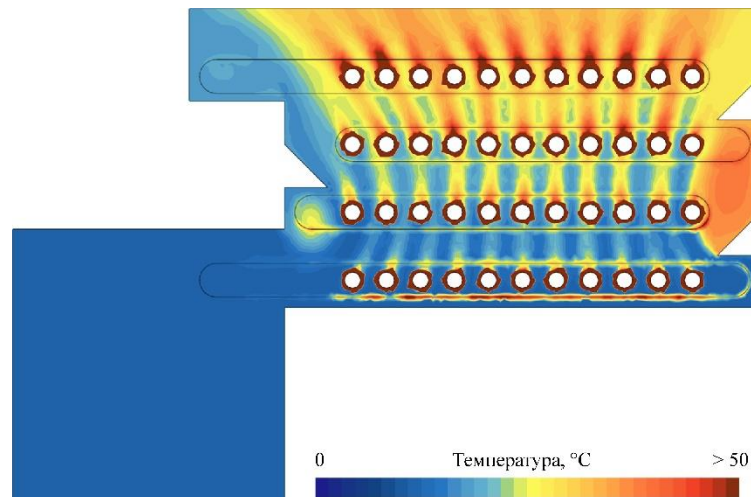


Рис. 6. Візуалізація розподілу температури потоку повітря в області конвективної стрічкової сушарки у скалярному вигляді

Розглянемо візуалізацію процесу тепломасопереносу повітря під час його нагрівання калориферами (рис. 6). З рис. 6 видно, що потік повітря поступово нагрівається при проходженні через кожен рівень калориферів. Тому люцерна на верхній стрічці буде мати більшу температуру ніж на нижній. Це підтверджується рис. 7.

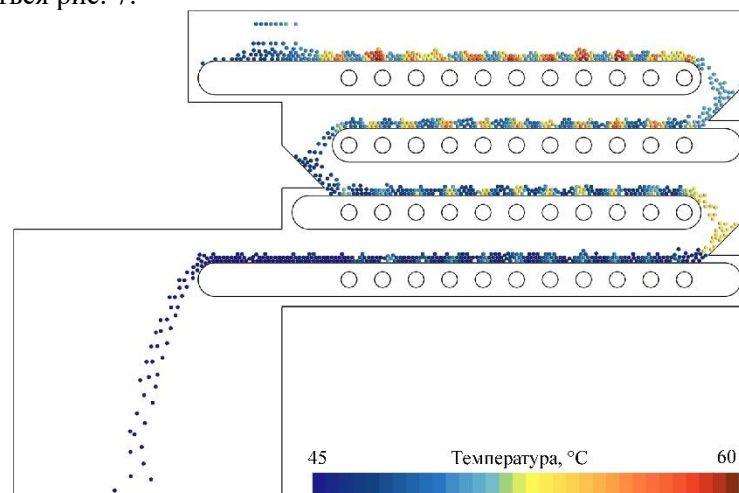


Рис. 7. Візуалізація розподілу температури потоку частинок люцерни в області конвективної стрічкової сушарки у скалярному вигляді



Представлені результати чисельного моделювання підтверджують аналітичні розрахунки. Однак в подальшому слід провести експериментальні дослідження процесу сушіння люцерни і перевірити емпіричним шляхом раціональні конструктивно-технологічні параметри конвективної стрічкової сушарки.

6. Висновки

1. За результатами проведених досліджень теоретично обґрунтована технологічна і конструктивно-технологічна схема конвективної сушарки продуктів фракційної переробки бобових трав. Сушарка виконана у вигляді камери з горизонтальними стрічковими транспортерами, в середині яких розташовані калорифери з нагрітим паром, а у верхній частині камери розміщені відцентрові вентилятори.

2. За допомогою програмного пакету Simcenter STAR-CCM+ проведена симуляція технологічного процесу сушіння в розробленій конвективній сушарці. Отримано візуалізації розподілу швидкості потоку частинок люцерни і потоку повітря в області конвективної стрічкової сушарки у вигляді скалярних і векторних даних. Також був визначений розподіл температури потоку повітря в області конвективної стрічкової сушарки у скалярному вигляді, що дозволило виявити його вплив на температуру частинок люцерни, що рухаються по стрічкових транспортерах.

3. Отримані результати чисельного моделювання підтвердили аналітичні розрахунки. Проте, для більш повної оцінки та оптимізації параметрів конвективної сушарки, рекомендується провести додаткові експериментальні дослідження процесу сушіння люцерни і перевірити емпіричним шляхом раціональні конструктивно-технологічні параметри конвективної стрічкової сушарки.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г., Адамчук В., Булгаков В., Кравчук В. Про концепцію сучасного розвитку вітчизняної сільськогосподарської техніки. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. 2014. Вип. 18. С. 19–28.
2. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. *Дніпро: ЛІРА*. 2022. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0.
3. Elgersma A., Soegaard K., Jensen S. K. Vitamin contents in forage herbs. *Aspects of Applied Biology*. 2012. Vol. 115. P. 75–80.
4. Xianzhe Z., Lan Y., Jianying W., Hangfei D. Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2 (3). P. 76–82. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082
5. Mulle C. J. C., Cruywage C. W., Du Toi F. J., Both J. A. The drying rate and chemical composition of field and artificially dried lucerne hay. *South African Journal of Animal Science*. 2008. Vol. 38 (4). P. 350–354.
6. Gallego A., Hospido A., Moreira M. T., Feijoo G. Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011. Vol. 55 (11). P. 1005–1012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.010
7. Adapa P. K., Schoenau G. J., Tabil L. G., Arinze E. A., Singh A. K., Dalai A. K. Customized and value-added high quality alfalfa products: a new concept. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2007. Vol. 9. P. 1–28.
8. Farhang A., Hosinpour A., Darvishi H., Khoshtaghaza M. H., Tavakolli Hashtjin T. Accelerated drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) by microwave dryer. *Global Veterinaria*. 2010. Vol. 5 (3). P. 158–163.
9. Neres M. A., Castagnara D. D., Mesquita E. E., Zambom M. A., Souza L. C., Rabello de Oliveira P. S., Jobim C. C. Production of alfalfa hay under different drying methods. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2010. Vol. 39 (8). P. 1676–1683. DOI: 10.1590/S1516-35982010000800008
10. Kic P. Effect of different air velocities on convective thin-layer drying of alfalfa for livestock feeding. *Agronomy Research*. 2017. Vol. 15 (3). P. 737–744.
11. Spirin A., Kupchuk I., Tverdokhlib I., Polievoda Y., Kovalova K., Dmytrenko V. Substantiation of modes of drying alfalfa pulp by active ventilation in a laboratory electric dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (5). P. 11–15. doi:10.15199/48.2022.05.02



12. Гузьова І. О., Атаманюк В. М. Динаміка процесів сушіння рослинної сировини в періоді спадаючої швидкості. *Chemistry and Technologies*. 2022. № 30 (3). С. 419–430. DOI: 10.15421/jchemtech.v30i3.259694
13. Kindzera D., Hosovskyi R., Atamanyuk, V., Symak, D. Heat transfer process during filtration drying of grinded sunflower biomass. *Chemistry and Chemical Technology*. 2021. Vol. 15 (1). P. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht15.01.11>
14. Hosovskyi R., Kindzera D., Atamanyuk V. Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry and Chemical Technology*. 2016. Vol. 10 (4). P. 460–463. DOI: 10.23939/chcht10.04.459
15. Atamanyuk V., Gnativ Z., Kinzera D., Khusanov A., Kaldybaeva B. Hydrodynamics of cotton filtration drying. *Chemistry and Chemical Technology*. 2020. Vol. 14 (3). P. 426–432. DOI: 10.23939/chcht14.03.426
16. Mykychak B., Biley P., Kindzera D. External heat-and-mass transfer during drying of packed birch peeled veneer. *Chemistry and Chemical Technology*. 2013. Vol. 7 (2). P. 191–195. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.23508
17. Ivashchuk O. S., Atamanyuk V. M., Gnativ Z. Ya., Chyzhovych R. A. Zhrebetskyi R. R. Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillers tillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2021. Vol. 4. P. 58–65. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-137-4-58-65
18. Snezhkin Y. F., Paziuk V. M., Petrova Z. O., Tokarchuk O. A. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 61 (2). P. 183–192. DOI: 10.35633/inmateh-61-20
19. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Результати чисельного моделювання геотермального охолодження у вентиляційній системі тваринницьких приміщень. *Вібрації в техніці і технологіях*. 2022. № 3 (106). С. 5–12.
20. Калетнік Г. М., Яропуд В. М. Симуляція процесу тепломасообміну теплообмінника побічно-випарного типу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 1 (116). С. 4–15.
21. Яропуд В. М., Шаргородський С. А., Луц П. М., Лавренюк П. П. Симуляція процесу сушіння волоських горіхів у конвективній сушарці. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 3 (118). С. 101–109.
22. Yaropud V., Honcharuk I., Datsiuk D., Aliiev E. The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*. 2022. Vol. XXXIII (1). P. 199–208. DOI: 10.15159/jas.22.08

References

- [1] Kaletnik, G., Adamchuk, V., Bulgakov, V., Kravchuk, V. (2014). About the concept of modern development of domestic agricultural machinery [Pro kontseptsiyu suchasnoho rozvytku vitchyznyanoi sil'skohospodars'koyi tekhniki]. *Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture in Ukraine*, 18, 19–28. [in Ukrainian].
- [2] Aliev, E.B., Mykolenko, S.Yu., Sova, N.A. (2022). Technical and technological support of waste-free processing of grain raw materials into food products and fodder: collective monograph / by general. ed. E. B. Aliyev. *Dnipro: LIRA*. ISBN 978-966-981-687-0. [in Ukrainian].
- [3] Elgersma, A., Soegaard, K., Jensen, S. K. (2012). Vitamin contents in forage herbs. *Aspects of Applied Biology*, 115, 75–80. [in English].
- [4] Xianzhe, Z., Lan, Y., Jianying, W., Hangfei, D. (2009). Process analysis for an alfalfa rotary dryer using an improved dimensional analysis method. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2 (3), 76–82. DOI: 10.3965/j.issn.1934-6344.2009.03.076-082. [in English].
- [5] Mulle, C.J.C., Cruywage, C.W., Du Toi, F.J., Both, J.A. (2008). The drying rate and chemical composition of field and artificially dried lucerne hay. *South African Journal of Animal Science*, 38 (4), 350–354. [in English].
- [6] Gallego, A., Hospido, A., Moreira, M. T., Feijoo, G. (2011). Environmental assessment of dehydrated alfalfa production in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 55 (11), 1005–1012. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.05.010. [in English].
- [7] Adapa, P.K., Schoenau, G.J., Tabil, L.G., Arinze, E.A., Singh, A.K., Dalai, A.K. (2007). Customized



- and value-added high quality alfalfa products: a new concept. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 9, 1–28. [in English].
- [8] Farhang, A., Hosinpour, A., Darvishi, H., Khoshtaghaza, M. H., Tavakolli Hashtjin, T. (2010). Accelerated drying of alfalfa (*Medicago sativa* L.) by microwave dryer. *Global Veterinaria*, 5 (3), 158–163. [in English].
- [9] Neres, M.A., Castagnara, D.D., Mesquita, E.E., Zambom, M.A., Souza, L.C., Rabello de Oliveira, P.S., Jobim, C.C. (2010). Production of alfalfa hay under different drying methods. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(8), 1676–1683. DOI: 10.1590/S1516-35982010000800008. [in English].
- [10] Kic, P. (2017). Effect of different air velocities on convective thin-layer drying of alfalfa for livestock feeding. *Agronomy Research*, 15(3), 737–744. [in English].
- [11] Spirin, A., Kupchuk, I., Tverdokhlib, I., Polievoda, Y., Kovalova, K., Dmytrenko, V. (2022). Substantiation of modes of drying alfalfa pulp by active ventilation in a laboratory electric dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (5), 11–15. DOI:10.15199/48.2022.05.02. [in English].
- [12] Guzyova, I.O., Atamaniuk, V.M. (2022). Dynamics of drying processes of plant raw materials in the period of decreasing speed [*Dynamika protsesiv sushynnya roslynnoi syrovyny v periodi spadayuchoyi shvydkosti*]. *Chemistry and Technologies*, 30 (3), 419–430. DOI: 10.15421/jchemtech.v30i3.259694. [in Ukrainian].
- [13] Kindzera, D., Hosovskyi, R., Atamanyuk, V., Symak, D. (2021). Heat transfer process during filtration drying of grinded sunflower biomass. *Chemistry and Chemical Technology*, 15 (1), 118–124. DOI: <https://doi.org/10.23939/chcht15.01.11>. [in English].
- [14] Hosovskyi, R., Kindzera, D., Atamanyuk, V. (2016). Diffusive mass transfer during drying of grinded sunflower stalks. *Chemistry and Chemical Technology*, 10 (4), 460–463. DOI: 10.23939/chcht10.04.459. [in English].
- [15] Atamanyuk, V., Gnativ, Z., Kinzera, D., Khusanov, A., Kaldybaeva, B. (2020). Hydrodynamics of cotton filtration drying. *Chemistry and Chemical Technology*, 14 (3), 426–432. DOI: 10.23939/chcht14.03.426. [in English].
- [16] Mykychak, B., Biley, P., Kindzera, D. (2013). External heat-and-mass transfer during drying of packed birch peeled veneer. *Chemistry and Chemical Technology*, 7 (2), 191–195. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.23508. [in English].
- [17] Ivashchuk, O.S., Atamanyuk, V.M., Gnativ, Z.Ya., Chyzhovych, R.A. Zhrebetskyi, R.R. (2021). Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillerys tillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 4, 58–65. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-137-4-58-65. [in English].
- [18] Snezhkin, Y.F., Paziuk, V.M., Petrova, Z.O., Tokarchuk, O.A. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 61 (2), 183–192. DOI: 10.35633/inmateh-61-20. [in English].
- [19] Kaletnik, H.M., Yaropud, V.M. (2022). Results of numerical modeling of geothermal cooling in the ventilation system of livestock premises [*Rezultaty chysel'noho modelyuvannya heotermal'noho okholodzhennya u ventylyatsiyniy systemi tvarynnyts'kykh prymishchen'*]. *Vibrations in engineering and technology*, 3 (106), 5–12. [in Ukrainian].
- [20] Kaletnik, H.M., Yaropud, V.M. (2022). Simulation of the heat and mass transfer process of the indirect-evaporative type heat exchanger [*Symulyatsiya protsesu teplomasoobminu teploobminnyka pobichno-vyparnoho typu*]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APC*, 1 (116), 4–15. [in Ukrainian].
- [21] Yaropud, V.M., Shargorodskyi, S.A., Luts, P.M., Lavreniuk, P.P. (2022). Simulation of the process of drying walnuts in a convective dryer [*Symulyatsiya protsesu sushynnya volos'kykh horikhiv u konvektyvniy susharts'i*]. *Technology, energy, transport of agricultural industry*, 3 (118), 101–109. [in Ukrainian].
- [22] Yaropud, V., Honcharuk, I., Datsiuk, D., Aliiev, E. (2022). The model for random packaging of small-seeded crops' seeds in the reservoir of selection seeders sowing unit. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, XXXIII (1), 199–208. DOI: 10.15159/jas.22.08. [in English].

NUMERICAL SIMULATION OF THE DRYING PROCESS BY ACTIVE VENTILATION OF THE PRODUCTS OF FRACTIONAL PROCESSING OF LEGUMES IN A CONVECTIVE BELT DRYER

The process of removing moisture from vegetable agricultural raw materials is a diverse, but energy-consuming stage of production, regardless of the applied methods and methods of drying. For forecasting



energy consumption and designing drying equipment, analysis and generalization of the kinetics and dynamics of drying of plant raw materials is an urgent task.

Based on the results of the conducted research, the technological and constructive-technological scheme of the convective belt dryer for the fractional processing of leguminous herbs was theoretically justified. The dryer is made in the form of a chamber with horizontal belt conveyors, in the middle of which there are heaters with heated steam, and in the upper part of the chamber there are centrifugal fans.

With the help of the Simcenter STAR-CCM+ software package, a simulation of the technological process of drying in the developed dryer was carried out. Visualizations of the particle flow velocity distribution of products of fractional processing of legumes and air flow in the area of the convective belt dryer in the form of scalar and vector data were obtained. The temperature distribution of the air flow in the area of the convective belt dryer was also determined in a scalar form, which made it possible to detect its influence on the temperature of the alfalfa particles moving along the belt conveyors.

The obtained results of numerical modeling confirmed the analytical calculations. However, for a more complete evaluation and optimization of dryer parameters, it is recommended to conduct additional experimental studies of the drying process of products of fractional processing of leguminous herbs and empirically check the rational structural and technological parameters of the convective belt dryer.

Key words: products of fractional processing of legumes, alfalfa, drying, structural and technological scheme, convective dryer, modeling, simulation, parameters.

Fig. 7. Ref. 22.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Калетнік Григорій Миколайович – академік НААН України, доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри адміністративного менеджменту та альтернативних джерел енергії Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: rector@vsau.org, <https://orcid.org/0000-0002-4848-2796>).

Яропуд Віталій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Полєвода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Grygorii Kaletnik – Academician of the NAAS of Ukraine, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Administrative Management and Alternative Energy Sources of Vinnitsa National Agrarian University (Soniachna Str., 3, Vinnitsa, Ukraine, 21008, e-mail: rector@vsau.org, <https://orcid.org/0000-0002-4848-2796>).

Vitalii Yaropud – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machinery and equipment for agricultural production of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: yaropud77@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Yurii Polevoda – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Processes and Equipment of Processing and Food Industries of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).