

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПОТОКОВОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ЗА ДОПОМОГОЮ ДВОСТОРОННЬОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ОПРОМІНЮВАННЯ

Паламарчук В. І., Гирич С. В., Василюшина О. В., Пахомська О. В.

Об'єкт дослідження є процес інфрачервоного сушіння зерна сільськогосподарських культур. В процесі переробки насіння зернових та олійних культур проходить досить велика кількість технологічних операцій, серед яких однією із найважливіших є сушіння. Підтримання потрібної вологості зерна є основним фактором впливу на його термін зберігання та якісні показники. Тому важливою проблемою є інтенсифікація процесу висушування насіння зернових та олійних культур при низьких енерговитратах.

Процес інфрачервоного сушіння зернових має суттєві переваги порівняно з найбільш розповсюдженим сушінням конвективним методом через те, що не використовується органічне пальне. Інфрачервоні промені характеризуються високою тепловою дією на продукцію, тому зростає попит на використання інфрачервоного випромінювання у сільськогосподарському, харчовому та переробному виробництві для сушки зерна, сипких інгредієнтів, теплової дезінфекції та ін. Принцип роботи інфрачервоного методу полягає у тому, що волога, яка знаходиться всередині зернини, поглинає інфрачервоні промені, через це відбувається її нагрівання. Іншими словами, енергію безпосередньо підводять до вологи, через це і вдалося досягти не лише високої ефективності, а й високої економічності.

Для підвищення ефективності видалення вологи із зерна за допомогою інфрачервоного опромінювання треба збільшувати площу контакту зернин з інфрачервоними променями. Враховуючи проникність інфрачервоних променів та шар зерна на робочому органі транспортера можна використати декілька способів підвищення площі опромінювання. Першим способом є застосування вібрації робочого органу для перемішування шарів зерна, що сприяє більш рівномірній обробці продукції. Другим способом, що описується в даній роботі, є використання більшого числа випромінювачів, які розташовані не тільки над лотком транспортера, а також і під ним. При цьому лоток повинен бути виконаний із проникного для інфрачервоних променів матеріалу.

Ключові слова: *інфрачервоне сушіння зерна, вібраційне транспортування, лотковий транспортер, вібраційне перемішування, псевдозрідений шар.*

1. Вступ

Проблема швидкого та якісного висушування насіння є завжди актуальною в сільському господарстві, тому що це напряму впливає на зменшення втрат насіння під час зберігання, на строки його зберігання та якість самого насіння, що надходить на подальшу переробку. Використання інфрачервоних сушарок

дає можливість швидкого та якісного вологовидалення з насіння різних культур при невеликих розмірах і металоємності конструкцій сушарок.

Метод інфрачервоного (ІЧ) опромінювання є одним із перспективних фізичних методів обробки харчових продуктів. Завдяки перевагам перед традиційними способами теплової обробки його все більше застосовують у різних галузях харчової промисловості та ресторанному господарстві.

Завдяки інфрачервоному випромінюванню є можливість передачі енергії, коли відсутній контакт між зерном та джерелом випромінювання, так як повітря не створює перешкод для проходження ІЧ променів.

Короткочасна інтенсивна дія інфрачервоного поля на поверхневий шар сировини створює водночас проблеми його перегріву та нерівномірність пошарової обробки. Тому є актуальним при транспортуванні продукції в зоні обробки використовувати віброконвеєрні та хвильові технології, що дозволяють:

- створити сприятливі умови для інтенсифікації процесу виробництва та застосування ефективних методів дії на його об'єкт;
- реалізувати технологічний рух у безперервному режимі;
- зменшити та усунути взагалі використання непродуктивної праці, зокрема при здійсненні допоміжних операцій;
- створити загальне керування динамічним станом системи, в якій відбувається технологічна дія;
- мінімізувати механічні пошкодження об'єкта.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – процес інфрачервоного сушіння зерна сільськогосподарських культур.

Під час ІЧ опромінення підвищення температури проходить досить швидко, але не на велику глибину, тобто прогрівається практично тільки оболонка насіння. Це явище є вигідним при обробці насіння соняшнику перед обрушенням. Адже при опроміненні інфрачервоними променями проходить швидке нагрівання оболонки насіння соняшнику, при мінімальному ризику перегріву ядра. Висушування ж оболонки насіння значним чином впливає на якість його обрушення та процент вмісту лузки після обрушення. Особливе значення цей показник має при виробництві ядра насіння соняшнику для кондитерських цілей [1].

Дозована дія інфрачервоного випромінювання на насіння сільськогосподарських культур забезпечує позитивний вплив на його посівні якості. Інфрачервоні промені також застосовують замість повітряно-теплового або сонячного обігріву для зменшення твердонасінності при передпосівній обробці насіння. Інфрачервоне випромінювання активує ферменти зародку, що підвищує енергію проростання насіння та урожайність зернових культур. Також інфрачервоне сушіння при температурі 40–60 °С приводить до знищення шкідливої мікрофлори, що наявна на поверхні зерна [2, 3].

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – інтенсифікація інфрачервоного сушіння при зменшенні енерговитрат та металоємності при обробці зерна сільськогосподарських культур.

Для досягнення даної мети були поставлені наступні завдання:

1. Визначити основні закономірності та способи інтенсифікації процесів інфрачервоного сушіння сільськогосподарської сировини.

2. Обґрунтувати способи інтенсифікації вологовидалення із насіння сільськогосподарських культур за допомогою інфрачервоного випромінювання.

3. Обґрунтувати технологічно-конструктивну схему вібраційної лоткової інфрачервоної сушарки для потокової обробки сировини.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Тенденції розвитку технологій сушіння продукції рослинництва, зокрема при використанні інфрачервоних променів, фундаментальні теоретичні та експериментальні результати, досвід та основи проектування обладнання для їх реалізації покладені у надбаннях наукових шкіл та робіт багатьох відомих вчених [4, 5]. Так, в [6] розв'язано науково-прикладну проблему підвищення енергетичної ефективності сушіння насіння зернових, олійних, овочевих та технічних культур та впроваджено експериментально обґрунтовані новітні технічні рішення при розробці технологічних ліній та обладнання. В [7] описана важливість використання процесу інфрачервоного сушіння термолабільних матеріалів. Завдяки описаному в роботі методу сушіння збільшується якість продукту, швидкість сушіння та зменшуються енергетичні витрати на процес. В [8] описано спосіб сушіння зерна інфрачервоними (ІЧ) променями із застосуванням імпульсного режиму. В результаті чого скорочуються енерговитрати та збільшується ефективність сушіння, поліпшуються насіннєві, смакові якості зерна, його запах та колір. Опромінення зерна ІЧ-променями позитивно позначається на його збереженні, так як використання ІЧ-променів призводить до знезараження зерна. В роботі же [9] проводилось сушіння зерна ячменю тонкими шарами як при комбінованій ІЧ-конвекції, так і лише при конвекції. Для конвекційної сушки використовували найвищу температуру, досягнуту зерном в кінці радіаційного сушіння з різною інтенсивністю. Експериментальні результати показують, що використання інфрачервоного випромінювання покращує швидкість сушіння, а споживання енергії значно зменшується. Швидкість руху повітря показала сильний вплив на споживання енергії. Як параметри якості використовували схожість та насипну щільність. Авторами дослідження [10] розглядалось сушіння зерен, зокрема основних злакових культур, кукурудзи, рису та пшениці, а також олійних культур, сої та ріпаку. Досліджено основні фізичні та термодинамічні властивості зерна та повітря та розроблено теорію процесу сушіння. Представлено дизайн оптимальних умов експлуатації сушарок для ферм. У [11] авторами розглядались різні способи видалення вологи із сировини. Під час сушіння при високій температурі можна уникнути згубного впливу на якість зерна, якщо зерно не нагрівається вище критичної температури. Досліджуваний процес сушіння поєднує високотемпературну сушку з низькотемпературним охолодженням і призводить до отримання більш якісного зерна, ніж при високотемпературному сушінні для видалення тієї ж кількості вологи. Автори роботи [12] досліджували сушіння рису інфрачервоним випромінюванням і

показали перспективний потенціал із покращеною якістю та енергоефективністю. Однак через обмежену проникну здатність інфрачервоного випромінювання в конструкції інфрачервоної сушарки може ефективно використовуватись тільки тонкошарова сушка. Метою цього дослідження було вивчити характеристики вологовідведення тонкого шару рису, що нагрівається інфрачервоним випромінюванням і охолоджується різними методами, включаючи природне охолодження, примусове повітряне охолодження та вакуумне охолодження. У [13] представлена модель системи управління для сушильних машин з поперечним потоком. Імітаційні тести на віртуальній сушарці показали, що контролер добре працював у широкому діапазоні умов сушіння. Він був випробуваний на комерційній сушарці для кукурудзи з перехресним потоком і показав чудову точність та стабільність. В роботі [14] були проведені експериментальні та теоретичні дослідження на конвекційній сушарці з пневматичним транспортуванням матеріалу. Наведені числові значення для оптимальних параметрів сушіння та енергетичних характеристик для моделі теплообміну. Досягнення тепловіддачі в цих системах базується на принципі безпосереднього контакту сировини і теплого повітря. Авторами роботи [15] досліджувалась конверсія між різними типами вологозв'язуючих одиночних зерен пшениці при ізотермічній обробці сушінням при 60 °С. Міграцію вологи досліджували за допомогою магнітно-резонансної томографії (МРТ). Під час висушування волога мігрує від ендосперму до епідермісу. Оскільки швидкість сушіння зерен пшениці від поверхні до середини суттєво зменшується, умови та параметри сушіння потрібно коригувати, щоб покращити швидкість сушіння, одночасно забезпечуючи якість зерен пшениці.

На основі проведеного літературного аналізу автори даного дослідження пропонують поєднати інфрачервоне сушіння із сушінням надвисокими частотами, так як сушіння надвисокими частотами поглинає вологу, яка є в зерні. При сушінні надвисокими частотами волога з середини зерна відправляється до краю поверхні оболонки, а інфрачервоне сушіння забирає її з оболонки. Таким чином, автори пропонують прискорити процес сушіння.

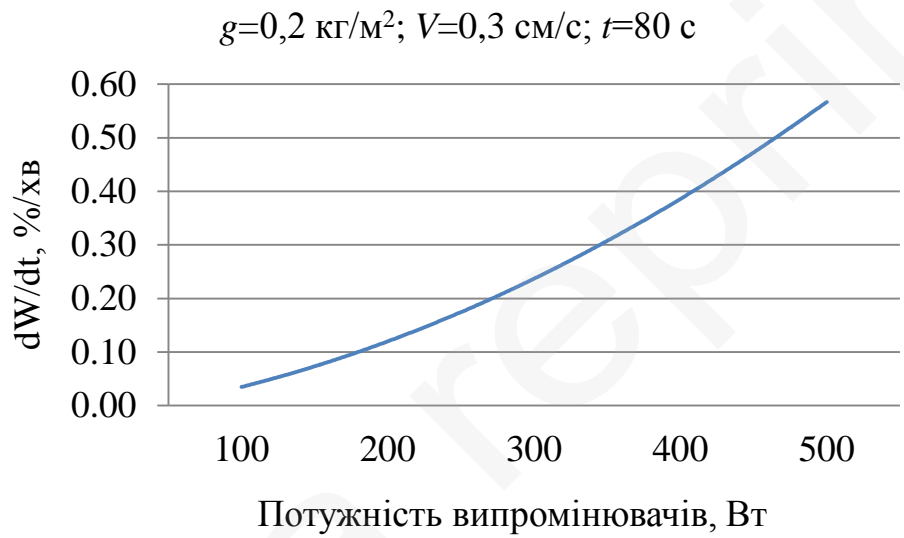
5. Методи дослідження

Одним із недоліків інфрачервоного сушіння є те, що волога всередині довго зберігається, а поглинання теплоти відбувається завдяки зовнішній поверхні зерна. Запропонована конструкція (рис. 1) дає можливість максимально нівелювати цей недолік за рахунок рівномірного опромінення поверхні зерна з обох сторін одночасно. Розроблена віброконвеєрна сушарка з двостороннім інфрачервоним опромінюванням продукції являє собою поєднання ІЧ сушарки з вібраційним лотковим транспортером з комбінованим кінематичним способом генерації коливань.

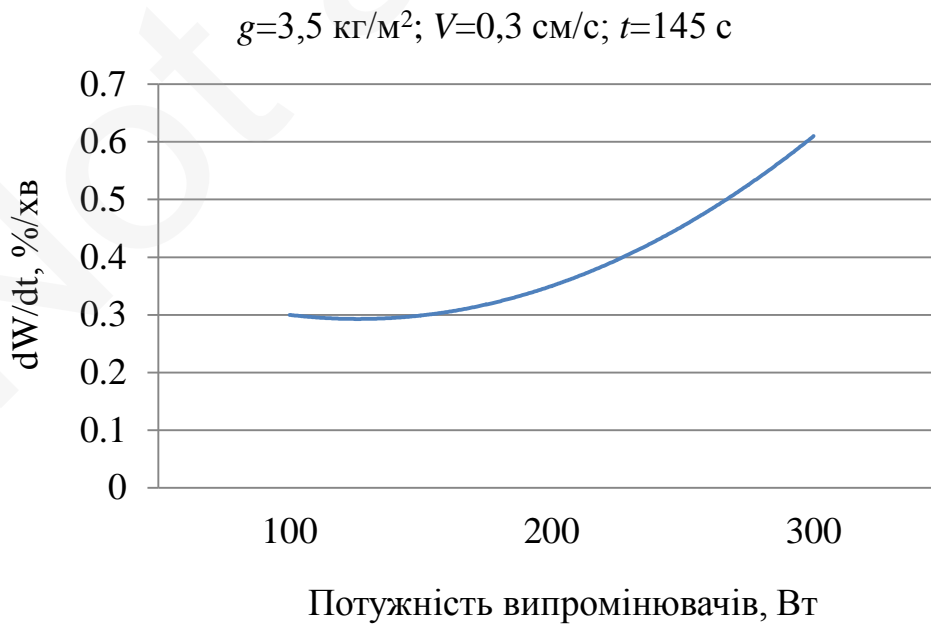


Рис. 1. Робоча камера конвеєрної інфрачервоної сушарки.

На рис. 2 показані графіки зростання швидкості виходу вологи від збільшення потужності ПЧ-випромінювання.



a



б

Рис. 2. Графіки зміни швидкості вологовидалення від збільшення потужності випромінювачів при інфрачервоному сушінні зерна: *a* – ріпаку; *б* – сої

Експерименти проводились на стрічковому транспортері з інфрачервоними випромінювачами, розташованими над стрічкою з продукцією (рис. 1). При сушінні зерна ріпаку випромінювачем потужністю в 500 Вт (рис. 2, а) вже через 80 с можна досягнути швидкості вологовидалення в 0,56 %/хв [16].

При цьому поверхня зерна нагрівалась до 40 °С. При тривалому сушінні на такій потужності поверхня зерна буде перегріватись, що є небажаним для збереження якісних показників продукції. Тому більш оптимальним варіантом є використання декількох випромінювачів меншої потужності для більш рівномірного прогрівання зерна. Інтенсифікуючим фактором в даному випадку буде збільшення площі обробки продукції шляхом опромінення з різних боків, а також підключення вібраційної дії для створення віброзваженого шару продукції [17].

6. Результати дослідження

Вплив вібраційної дії на масу продукції призводить як до значного оновлення поверхонь тепломасообміну при коливанні опорного лотка, так і до забезпечення рівномірної теплової обробки сипкої продукції [18, 19]. Також відповідно запобігає перегріванню поверхневого шару, зменшенню внутрішнього тертя та в'язкості у технологічному середовищі. Опромінення шару продукції з двох боків дає можливість одночасної обробки зернини по всій поверхні, за рахунок чого відбувається інтенсифікація процесу прогрівання продукції та вологовидалення. Також це дає можливість використання більш низької амплітуди коливань робочого органу сушарки в порівнянні із конструкціями, де ІЧ-випромінювачі розміщені тільки над шаром продукції (рис. 1). В таких конструкціях при вібраційному перемішуванні шару зерна для досягнення значного збільшення площі обробки треба використовувати велику амплітуду коливань робочого органу, що призводить до збільшення витрат потужності електропривода та значного розкидання дрібної зернової продукції. Зменшення амплітуди коливань зменшує енерговитрати на привод та підвищує довговічність опорних вузлів машини, дає змогу кращого контролю швидкості руху продукції в робочій зоні [20].

Для вирішення даних задач було розроблено конструкцію конвеєрної лоткової інфрачервоної сушарки (рис. 3). Особливістю запропонованої конструкції вібраційної інфрачервоної сушарки є використання у вигляді робочого органу лотка 1 із прозорого листового скла, що кріпиться на сталеву платформу 2 з ребордами 3, яка опирається на пружні елементи 4. Над лотком та під ним розміщені інфрачервоні випромінювачі 5 і 6. Ексцентриковий вал 7 опирається на опорний вузол 8 віброзбуджувача, що через пружні елементи 9 зв'язаний з рамою установки, яка опирається на віброопори, що дає змогу нівелювати паразитні коливання, які передаються на раму установки. Противаги 10 зрівноважують інерційні зусилля в кінематичному віброзбуджувачі. Привод віброзбуджувача здійснюється двигуном 11 через пружну муфту 12. Продукція 13 подається на лоток конвеєра 1. Вмикають електродвигун 11 та випромінювачі 5 і 6. Крутний момент від електродвигуна 11 через гнучку муфту 12 передається на ексцентриковий приводний вал 7, створюючи коливання лотка 1. Це призводить до виникнення псевдозваженого

стану оброблювального матеріалу 13 та його поступального руху за рахунок нахилу лотка під певним кутом α . Кінематичний віброзбуджувач дозволяє зменшити коливну масу привода та передбачає нівелювання паразитних коливань за допомогою пружних елементів 9.

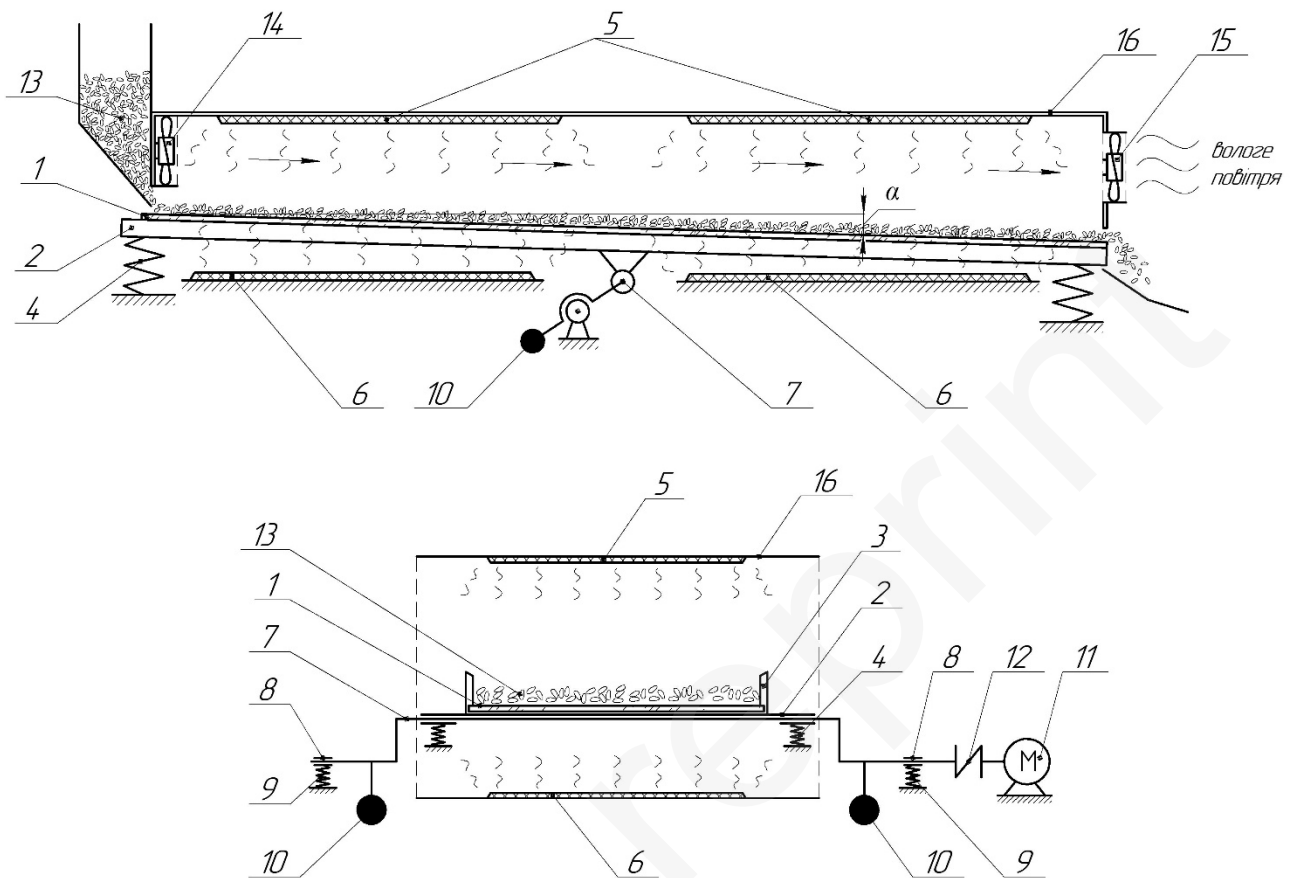


Рис. 3. Схема конвеєрної лоткової інфрачервоної сушарки:

- 1 – лоток; 2 – підпружинена платформа; 3 – реборди; 4, 9 – пружні елементи;
- 5, 6 – інфрачервоні випромінювачі; 7 – ексцентриковий вал; 8 – опорні вузли віброзбуджувача; 10 – протизваги; 11 – електродвигун; 12 – пружна муфта;
- 13 – зернова продукція; 14, 15 – вентилятори; 16 – робоча камера сушарки;
- α – кут нахилу вібраційного лотка

Через те, що за короткий час відбувається активне підведення енергії до кожної зернини, вихід вологи з насіння відбувається інтенсивно, що спричиняє утворення конденсату всередині сушильної камери 16. Для вирішення даної проблеми в конструкції сушильної установки передбачено активну циркуляцію повітря за допомогою вентиляторів 14 і 15. Регулювання швидкості обертання лопатей вентиляторів дає змогу встановлювати оптимальну швидкість повітряного потоку всередині сушильної камери в залежності від інтенсивності ІЧ опромінення продукції та величини та маси окремих зернин, що обробляються. Продування псевдозрідженого шару зерна горизонтальним потоком повітря дає змогу ефективніше забирати вологу, що випарувалась і запобігати утворенню конденсату всередині сушильної камери.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. У порівнянні з аналогами позитивна дія розробленої конструкції сушарки дає можливість більш інтенсивно висушувати насіння під час його переміщення по лотку, а також ефективно виводити видалену вологу із робочої камери. Також підвищується якість висушеного насіння за рахунок значного підвищення площі опромінення, що дає можливість більш рівномірної обробки продукції.

Weaknesses. До слабких сторін запропонованого способу сушіння відноситься складність налаштування робочих режимів вібраційного транспортування продукції, а також потужності інфрачервоних випромінювачів, що напряму залежить від типу продукції та швидкості її транспортування.

Opportunities. Запропоновані технічні рішення з інтенсифікації інфрачервоного сушіння дають можливості подальшого технічного вдосконалення промислових сушарок та розробки нових конструкцій із підвищеною продуктивністю. Подальші дослідження в даній сфері дадуть можливість визначення індивідуальних оптимальних робочих режимів інфрачервоного опромінення для насіння різних сільськогосподарських культур, що дасть можливість максимізувати ККД сушильних установок, а також поліпшити умови їх експлуатації.

Threats. Від підприємства чи експлуатуючої організації будуть потрібні початкові капітальні вкладення в переоснащення виробництва та заміни застарілих громіздких сушильних установок на нові, а також перенавчання персоналу для ефективної експлуатації техніки.

8. Висновки

1. Основними способами підвищення ефективності видалення вологи із зерна за допомогою інфрачервоного опромінювання є підвищення площі опромінення зерна, забезпечення перемішування шарів зерна між собою під час обробки та ефективне видалення вологи із робочої камери.

2. Опромінення з двох боків одночасно для збільшення площі тепломасообміну та можливості обробляти більший шар продукції, а це в свою чергу дає можливість вийти на режим вологовидалення в 0,6 %/хв. за 60 с з використанням двох випромінювачів потужністю по 300 Вт.

3. Застосування запропонованої конструкції вібраційної сушарки дасть можливість значно інтенсифікувати процес видалення вільної та фізично зв'язаної вологи з продукту за рахунок:

- підвищення площі обробки насіння;
- за рахунок створеного віброзваженого шару продукції, за рахунок чого відбувається більш рівномірна теплова обробка та перемішування шарів між собою. Це сприяє за інтенсивної термічної інфрачервоної дії високого виходу вологи із зерен в повітря при забезпеченні безпечного температурного режиму на поверхні зернини – до 60 °С;

- активне продування віброзваженого шару продукції прискорює процес вологовидалення та запобігає конденсації вологи всередині робочої камери;

– вібраційна дія дає можливість перемішувати продукцію в зоні обробки та одночасно транспортувати її при використанні невеликої потужності електродвигуна, а саме до 500 Вт при забезпеченні швидкості вологовидалення 0,6 %/хв.;

– така схема приводного органу разом із ІЧ-опроміненням продукції дозволяє значно підвищити ККД процесу сушіння.

Література

1. Жилинский, Ю. М., Кумин, В. Д. (1982). *Электрическое освещение и облучение*. Москва: Колос, 272.
2. *Применение электроэнергии в сельском хозяйстве* (1974). Москва: Колос, 623.
3. Козинский, В. А. (1991). *Электрическое освещение и облучение*. Москва: Агропром-издат, 239.
4. Бурдо, О. Г. (2008). *Энергетический мониторинг пищевых производств*. Одесса: Полиграф, 244.
5. Снежкин, Ю. Ф., Пазюк, В. М., Петрова, Ж. А., Михайлик, Т. А. (2010). Исследования влияния параметров сушки на кинетику и всхожесть семян рапса. *Промышленная теплотехника*, 32 (3), 37–42.
6. Пазюк, В. М. (2019). *Теплотехнічні основи сушіння насіннєвого зерна*. Київ, 355.
7. Корінчук, Д. М., Демчук, Д. Ю. (2015). Фізична модель процесу інфрачервоного сушіння термолабільних матеріалів. *Наукові праці ОНАХТ*, 47 (2), 98–100.
8. Бандура, В. М., Кірієнко, О. О. (2015). Розвиток інфрачервоної техніки для обробки зерна. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 3 (92), 53–57.
9. Afzal, T. M., Abe, T., Hikida, Y. (1999). Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering*, 42 (4), 177–182. doi: [http://doi.org/10.1016/s0260-8774\(99\)00117-x](http://doi.org/10.1016/s0260-8774(99)00117-x)
10. Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., Hall, C. W. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York: Van Nostrand Reinhold, 450.
11. Jayas, D. S., Ghosh, P. K. (2006). *Preserving quality during grain drying and techniques for measuring grain quality*. Department of Biosystems Engineering, E2-376 Engineering and Information Technology Complex. University of Manitoba, 969–980.
12. Khir, R., Pan, Z., Salim, A. (2006). Drying Rates of Thin Layer Rough Rice Drying Using Infrared Radiation. *ASABE Annual International Meeting*. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Zhongli_Pan/publication/43262362_Drying_Rates_of_Thin_Layer_Rough_Rice_Drying_Using_Infrared_Radiation/links/54b55c1c0cf28e92e50bd6/Drying-Rates-of-Thin-Layer-Rough-Rice-Drying-Using-Infrared-Radiation.pdf
13. Liu, Q., Bakker-Arkema, F. W. (2001). A model-predictive controller for grain drying. *Journal of Food Engineering*, 49 (4), 321–326. doi: [http://doi.org/10.1016/s0260-8774\(00\)00229-6](http://doi.org/10.1016/s0260-8774(00)00229-6)
14. Prvulovic, S., Tolmac, D., Lambic, M. (2007). Convection Drying in the Food Industry. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, IX (9). Available at: <https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/10679/Invited%20Overview%20Tolmac%20final%2030June2007.pdf?sequence=1>

15. Hu, X., Wu, P., Zhang, S., Chen, S., Wang, L. (2018). Moisture conversion and migration in single-wheat kernel during isothermal drying process by LF-NMR. *Drying Technology*, 37 (7), 803–812. doi: <http://doi.org/10.1080/07373937.2018.1459681>

16. Бандура, В. М., Паламарчук, В. І. (2012). Експериментальні дослідження кінетики сушіння ріпаку та сої в нерухомому шарі в інфрачервоному полі. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 41 (2), 110–113.

17. Бандура, В. М., Цуркан, О. В., Паламарчук, В. І. (2015). Экспериментальное исследование технологических параметров процесса инфракрасной сушки движущегося шара сырья масличных культур. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 17 (4), 211–214.

18. Паламарчук, І. П., Бандура, В. М., Паламарчук, В. І. (2012). Обґрунтування конструктивної та технологічної схеми конвеєрної вібраційної сушарки. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2 (66), 116–125.

19. Паламарчук, І. П. (2015). Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми інфрачервоної віброхвильової конвеєрної сушарки для післязбиральної обробки сипкої сільськогосподарської продукції. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*, 1 (1 (89)), 117–123.

20. Паламарчук, І. П., Паламарчук, В. І., Драчишин, В. І. (2013). Обґрунтування параметрів пружної системи віброконвеєрної машини з кінематичним комбінованим віброзбудженням. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 6 (7 (66)), 25–30. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18826>