

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА КУКУРУДЗИ У ШАХТНИХ ЗЕРНОСУШАРКАХ

В. В. ЛЮБИЧ¹, доктор сільськогосподарських наук

О. А. ЄРЕМЕЄВА¹, кандидат технічних наук

Ю. В. ПАРИШКУРА²

¹ Уманський національний університет садівництва

² НВТ-Технологія

Встановлено механізм внутрішньої дифузії вологи і причини значного зростання витрат енергії при вилученні фізично зв'язаної вологи на завершальному етапі зневоднення зерна. Обґрунтовано теплоенергетичну модель керованого тепловологообміну ВЗС і розроблено енергоощадні способи та режими інтенсифікації ТПОЗ підвищеного вологовмісту.

Ключові слова: сушіння, шахтна сушарка, альтернативні види палива, кукурудза, вологість зерна.

Вступ. Забезпечення населення продуктами переробки зерна, як унікального за харчовими і технологічними властивостями продукту є однією з пріоритетних ознак розвиненого суспільства, а його виробництво становить складову продовольчої безпеки держави [1]. Приймаючи до уваги особливості природно-кліматичних умов України, зернова індустрія має значний запас потенціалу та набуває важливого економічного чинника, як соціального показника з забезпечення внутрішнього ринку продуктами переробки зерна, так і експортного потенціалу надлишків зерно продуктів [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі конструкції зерноочисних та сушильних агрегатів є складними системами елементів взаємопов'язаних між собою розгалуженими технологічними зв'язками. До них відносяться пристрої рівномірного підведення-відведення та розподілу матеріалопотоків, топка (теплогенератор), підігрівачі й охолоджувачі зерна, пристрої тепловологообміну, засоби запобігання екологічного забруднення, транспортне й вентиляційне обладнання та допоміжні пристрої разом з контрольно-вимірювальним приладами і засобами автоматизації [4, 5].

У вітчизняних конструкціях зерносушарок викиди відпрацьованих газів складають близько 5,3 тис. м³/пл. т·год, або в перерахунку на добу 1 зерносушильний агрегат викидає у довкілля 4 080 тис. м³ відпрацьованих газів. Зерносушильні агрегати імпортного виробництва забруднюють довкілля ненабагато менше, лише на 10...15 % [6].

Крім забруднення довкілля, із відпрацьованими газами втрачається теплота. Втрати теплоти пов'язані із досконалістю технології сушіння і найбільша їх

частка припадає на втрати з відпрацьованими газами (до 50...60 % загальних втрат), поверхні нагрівання (до 15...20 %), нагрівання зерна (до 30 %) та з недоспалюванням палива (до 5 %) [7]. Температура відпрацьованих газів може перевищувати температуру повітря доквілля на 20...50 °С. Зменшення питомих витрат сушіння зерна зерносушильних агрегатів вітчизняної конструкції лише на 10 % дозволить заощаджувати в перерахунку на природний газ до 50...60 млн. м³/рік [8]. У кожному з цих елементів має місце енергообміну, що неминуче супроводжується частковими втратами енергії. Щоб зменшити загальні втрати необхідно виконати послідовний аналіз утворення та передачі теплоти в кожному елементі сушильного агрегату і розробити заходи із зменшення втрат теплоти.

Мета дослідження – оптимізувати процес сушіння зерна кукурудзи у шахтних зерносушарках.

Методика досліджень. Розміри зерна встановлювали штангельциркулем або набором сит, відповідним дослідному зразку. Так для зразка пшениці – три яруси сит із розміром отворів верхнього 2,7 × 20 мм, середнього – 2,2 × 20 мм та нижнього – 1,7 × 20 мм. Об'єм зернини та насінини визначали зануренням наважки зерна в мірну колбу з рідиною, що не викликає розбухання зерна (керосин).

До щуплого зерна відносили сильно недорозвинене зерно, щупле, вдавлене по боках, зморшкувате, з гострою спинкою та зморшкувате на вигляд із цілою оболонкою. Спірні зернини визначали за методом Ульріха, по співвідношенню периметру поперечного перетину до периметри кола однакових площ. Для щуплого це співвідношення становить 1,2–1,96, для нормального – 1,11.

Вологість зерна встановлювали експрес-аналізаторами, стандартним і зразковим методами. Стандартний метод зводиться до висушування наважок розмеленого зерна в сушильній шафі СЕШ-1 при температурі 130 °С протягом 40 хв. з подальшим охолодженням. Зразковий – за ГОСТ 17197–71 «Методи визначення вологості» висушуванням трьох видів бюксів два рази: впродовж 60 хв. в сушильній шафі при температурі 105 °С під розрідженням. Зразки зерна із вологістю понад 18 % попередньо висушували впродовж 30 хв. в сушильній шафі при температурі 105 °С, потім проводили основне висушування.

Дослідження проводили із зразками зерна кукурудзи напівзубовидної урожаю 2021 року з початковою вологістю 13,8 %. Маса 1000 зерен – 255 г, натура – 720 г/дм³, засміченість сміттєвими домішками – 3,28 %, зерновими – 8,24 % та зерном кукурудзи напівзубовидної урожаю 2019 року з початковою вологістю 12,6 %. Маса 1000 зерен – 275 г, натура – 740 г/дм³, засміченість сміттєвими домішками – 0,74 %, зерновими – 3,34 %.

Масу наважок зерна визначали терезами лабораторними електронними ЕТ-600П-Е (заводський № 023063) серії ЕТ-Е та вагами електронними ВТНЕ-6L1. Температуру зерна та газів заміряли термопарами з електронним перетворювачем ТМ-914С, термометрами ртутними та портативним вимірювачем вологості, вологовмісту та температури газів ІВТМ-7. Швидкість течії газів заміряли термоанемометром ТТМ-2, або розрахунковою формулою за

показниками динамічного тиску, статичний та динамічний тиск – мікроманометром ММН-200 та мановакууметром цифровим ММЦ-200 з трубками напірними конструкції. Маса дослідних зразків зерна становила $M=1,4\dots 1,8$ кг, висота шару зерна $\Delta=240\dots 320$ мм. Температура агенту сушіння (робочих газів) задавали наближено до виробничих умов в межах $t=80\dots 160$ °С. Швидкість агенту сушіння регулювали регулятором 3 в діапазоні $v=0,1\dots 0,4$ м/с.

Досліди виконували у відповідності з вибраним планом експериментальних досліджень. Число повторень дослідів відповідало критерію логічно-допустимих відхилень та достатності для встановлення залежності. Для уникнення впливу неврахованих випадковостей, досліди мінімізували в часі, тобто черговість їх реалізації встановлювали не порядком в плані досліджень, а відповідно до таблиць випадкових чисел.

По завершенню виконання всіх дослідів плану експериментів здійснювали статистичну оцінку отриманих результатів, суть якої зводиться до виключення грубих помилок, розрахунків середніх значень спостережень, а також розрахунку відносної помилки та ряду інших статистичних характеристик [9]. У тому разі, коли виявляли значні розбіжності отриманих результатів або відносної помилки в межах, що перевищують допустимі виконували повторні досліди за незмінних параметрів та умов їх виконання.

Для чисельної оцінки коефіцієнтів в емпіричних залежностях застосовували метод найменших квадратів. Для підтвердження сформульованої в попередньому розділі гіпотези, встановлення особливостей перебігу цих процесів у виробничих умовах на найпоширенішій зерносушарці ДСП-320Т, а також для перевірки отриманих результатів досліджень були виконані експериментальні дослідження в декілька етапів [10].

Для досліджень було вибрано зерно найпоширенішої культури кукурудзи. На вибір цієї культури вплинуло особливість фізико-хімічного складу, а також і відмінність параметрів доквілля пов'язана із періодом дозрівання для зерна кукурудзи. Вибір для дослідження вказаної культури із найбільшими відмінностями дозволяє найбільш повно описати перебіг тепломасообмінних процесів, уточнити їх механізм та розробити рекомендації з удосконалення технології сушіння зерна із застосуванням енергоощадних комбінованих методів та режимів сушіння.

Результати досліджень. У табл. 1 представлено результати сушіння зерна п'яти зразків кукурудзи напівзубовидної, урожаю 2018 року, вологістю $W_0^1 = 56\%$, $W_0^2 = 49\%$, $W_0^3 = 45\%$, $W_0^4 = 39\%$ та $W_0^5 = 33\%$. Температура робочих газів становила $t_0^1 = 120$ °С, $t_0^2 = 180$ °С, $t_0^3 = 100$ °С, $t_0^4 = 105$ °С і $t_0^5 = 90$ °С. Швидкість течії робочих газів $v = 0,13$ м/с.

Висоту шару зерна для всіх зразків прийнято однаковою $\Delta = 310$ мм. Оскільки натурна маса зразків зерна однієї культури різного вологовмісту є різною, тому маса зразків в капсулі була відмінною: $M_1 = 1368$ г (для $W_0^1=56\%$), $M_2 = 1300$ г (для $W_0^2=49\%$), $M_3 = 1264$ г (для $W_0^3=45\%$), $M_4 = 1212$ г (для $W_0^4=39\%$) та $M_5 = 1156$ г (для $W_0^5=33\%$).

Табл. 1. Вплив вмісту вологи та температури робочих газів на КВО

| Показник | | Од. вим. | Зразки | | | | |
|--|-----------------|----------------------|--------|------|------|------|------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Початкова маса зразка зерна, М | | г | 1368 | 1300 | 1264 | 1212 | 1156 |
| Вологість зерна, W | до сушіння | % | 56 | 49 | 45 | 39 | 33 |
| | після сушіння | % | 22 | 9 | 25 | 15 | 22 |
| Температура зерна, θ | після сушіння | °С | 80 | 95 | 65 | 67 | 53 |
| | після відлежння | °С | 55 | 65 | 50 | 50 | 40 |
| Швидкість робочих газів, v | | м/с | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,10 |
| Температура робочих газів, t | до шару зерна | °С | 120 | 180 | 100 | 105 | 90 |
| Об'єм випаруваної вологи | | см ³ | 292 | 350 | 172 | 204 | 92 |
| Зменшення об'єму газів міжзернового простору при їх охолоджені | | см ³ | 181 | 244 | 134 | 147 | 142 |
| Всього газів поглинутих зразком | | см ³ | 342 | 425 | 206 | 233 | 159 |
| Об'єм газів поглинутих зерном | | см ³ /1кг | 118 | 139 | 57 | 71 | 14 |
| Частка об'єму поглинутих газів до об'єму вилученої вологи | | % | 40 | 40 | 33 | 35 | 16 |
| Швидкість сушіння зерна, | | %/хв. | 1,7 | 2,0 | 1,0 | 1,2 | 0,5 |
| Середня швидкість поглинання газів, v^{\checkmark} | | см ³ /хв. | 1,3 | 1,5 | 0,6 | 0,8 | 0,2 |

Тривалість сушіння для всіх дослідних зразків зерна було встановлено однакову $\tau = 20$ хв. Об'єм поглинутих зерном газів, після його сушіння, компенсували введенням мірним шприцом в капсулу із зерном додаткових об'ємів газів до стану набуття рівноваги тисків в капсулі із зразком зерна та довкілля.

Фактичний об'єм газів поглинутих безпосередньо зразком зерна встановлювали розрахунково: на одиницю маси зразка зерна за виключенням зменшення частки об'єму газів міжзернового та надзернового простору капсули із зразком зерна внаслідок їх охолодження за весь період поглинання газів (рис. 1). Природно, що із збільшенням вмісту вологи в зерні зростає частка вологи, що переміщається в капілярах зернини і енергія на її переміщення, в тому числі за рахунок зростання КВО. Вплив температури робочих газів (швидкості сушіння). За результатами приведених досліджень встановлено прямий зв'язок швидкості поглинання зерном газів ($v_z = \frac{V_z}{\tau}$) із швидкістю його сушіння ($\frac{\partial W}{\partial \tau}$).

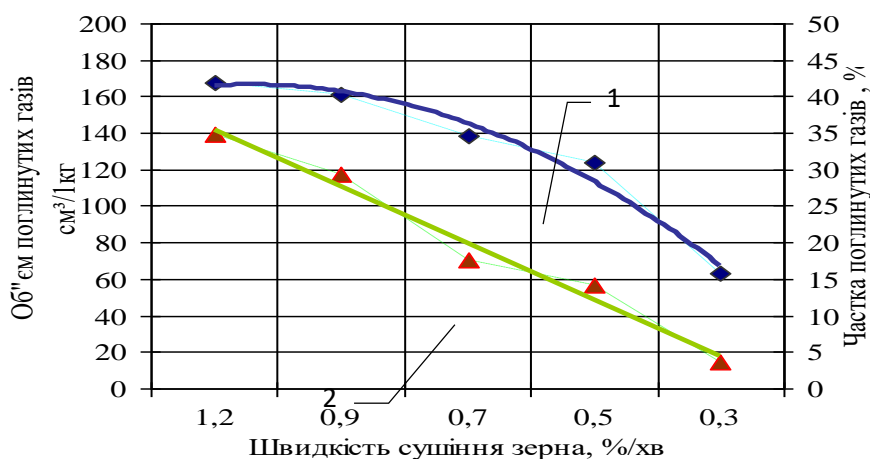


Рис. 1. Залежність поглинання газів докільля зерном кукурудзи вологістю $W = 39\%$ від швидкості його сушіння:
1) – об'єм поглинутих газів;
2) – частка поглинутих газів до об'єму вилученої із зерна

У табл. 2 представлено графічну залежність об'єму та частки поглинутих зерном газів від швидкості її вилучення із зернини.

Табл. 2. Вплив швидкості сушіння зерна на КВО

| Показники | | Од. вим. | Зразки | | | | |
|--|-----------------|----------|--------|------|------|------|------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5* |
| Вологість зерна, W | до сушіння | % | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 |
| | після сушіння | % | 24 | 15 | 20 | 12 | 14 |
| Температура зерна, θ | після сушіння | °C | 58 | 64 | 68 | 94 | 63 |
| | після відлежння | °C | 47 | 54 | 57 | 78 | 54 |
| Швидкість робочих газів, v | | м/с | 0,14 | 0,12 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| Температура газів, t | | °C | 80 | 105 | 120 | 140 | 110 |
| Об'єм випаруваної води | | см³ | 130 | 164 | 170 | 236 | 260 |
| Охолодження газів в капсулі | | см³ | 93 | 83 | 76 | 66 | 65 |
| Об'єм газів поглинутих зразком | | см³ | 170 | 233 | 285 | 401 | 204 |
| Об'єм газів поглинутих зерном | | см³/кг | 64 | 124 | 173 | 278 | 103 |
| Частка об'єму поглинутих газів до об'єму вилученої води, | | % | 49 | 76 | 102 | 118 | 39 |
| Середня швидкість поглинання газів, v^* | | см³/хв. | 0,7 | 1,4 | 1,9 | 3,1 | – |

Примітка. * зразок зерна із збільшеним вмістом зацемлених газів.

Найменша частка поглинутих зерном газів, а отже і опір дифузії води, при швидкості сушіння зерна $v = 0,3$ %/хв. При перевищенні температури робочих газів t_1 певної межі, частка поглинутих газів значно зростає. Так для зерна кукурудзи вологістю $W = 39\%$ і швидкості робочих газів $v = 0,14$ м/с при

перевищенні робочих газів $t_l > 120$ °С, частка поглинутих газів зростає до 80 %.

Дослідження динаміки поглинання зерном газів після його конвективного сушіння представлено на Із наведених даних слідує нерівномірність величини сорбції газів, а разом із нею і *КВО* дифузії вологи при конвективному зневодженні зерна. Більше всього висушене зерно поглинає газів та найбільший *КВО* в перші 10...15 хв. після завершення тепловологообміну із робочими газами. Як видно з дослідів, тривалість сорбції цих газів не суттєво залежить від початкового вологовмісту зерна).

Із досліджень впливу відлежування зерна на процеси тепловологообміну встановлено зв'язок вмісту защемлених газів із швидкістю вологообміну та в меншій мірі вплив на швидкість нагрівання зерна (табл. 3). Особливо помітний вплив защемлених газів при відлежуванні зерна більше однієї доби (тобто за умов виділення від 750 мг CO₂/кг зерна) на початковому етапі сушіння (до 30 %).

Табл. 3. Вплив відлежування зерна на швидкість перебігу конвективного тепловологообміну

| Тривалість сушіння τ , хв. | Температура газів, t_1 °С | Без відлежування | | Відлежування, 24 год. | | Відлежування, 48 год. | |
|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | Вологість W , % | Температура θ , °С | Вологість W , % | Температура θ , °С | Вологість W , % | Температура θ , °С |
| 0 | 80 | 24,3 | 16,5 | 24,3 | 28 | 24,3 | 28 |
| 10 | 85 | 21,5 | 38 | 21,1 | 64 | 18,4 | 63 |
| 20 | 70 | 18,5 | 49 | 18,1 | 68 | 14,9 | 69 |
| 30 | 85 | 15,7 | 58 | 15,8 | 72 | 12,2 | 70 |
| 40 | 85 | 13,0 | 65 | 13,8 | 76 | 10,0 | 72 |

На рис. 2 представлено залежність швидкості міжфазової дифузії вологи дослідного зразка вологовмістом 19,8 % та 36,2 % за різного рівноважного вологовмісту та градієнту температури фазових середовищ. За умов направлення вектору теплоти із доквілля в зернину (від'ємні значення різниці температури: $[\theta - t] < 0$) та зустрічного напрямку вектору вологовмісту із зернини в доквілля ($[W_0 - W_{рівнов}] > 0$) волога переміщається в сторону менших значень. Із підвищенням температури зерна швидкість дифузії вологи дещо зростає до рівноважної температури зерна і доквілля. Із перевищенням температури зерна інтенсивність вологообміну починає швидше зростати. Це пояснюється не так впливом градієнту теплоти, як в більшій мірі за відомої степеневій залежності коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи a_m від температури зерна.

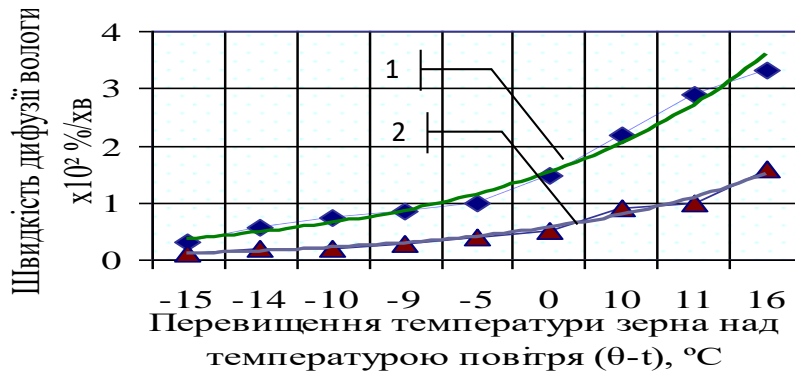


Рис. 2. Вплив градієнту температури на конвективний вологообмін зерна кукурудзи різної вологості:

1 – W = 36,2 %;

2 – W = 19,8 %

Для спрощеного розрахунку можливості повторного використання теплоти відпрацьованих газів, було розроблено графоаналітичний метод сутність якого зводиться до встановлення параметрів відпрацьованих газів, аналізу їх вологопоглинаючої спроможності та вибору раціонального рішення їх подальшого застосування: а) вологопоглинаюча спроможність газів менша 50 % максимально можливої ($\varepsilon_{\phi} \leq 0,5 \cdot \varepsilon_{\max s}$) – для подальшого повернення в топку або підмішування робочими газами; б) $\varepsilon_{\phi} \geq 50\%$ – часткового використання по варіанту а) та частково для попереднього підігрівання зерна; в) $\varepsilon_{\phi} \geq 95\%$ та перевищенні температури відпрацьованих газів ($t_2 - t_0$) > 10...15 °C – змінити вхідні параметри робочих газів t_1 і v_1 .

Відомо, що при конвективному способі сушіння зерна із відпрацьованими газами втрачається від 40 % і більше теплоти робочих газів. Із проведених досліджень функціонування шахтних зерносушарок ДСП-32 в осінній та зимовий період встановлено, що зі зниженням температури довкілля втрати теплоти з відпрацьованими газами зростають та можуть більш ніж вдвічі перевищувати ці показники в теплу пору року. В цей же період більша частка втрат теплоти через поверхню теплообмінних камер сушарки та енерговитрати на охолодження зерна.

Виробничі дослідження з впливу температури та швидкості проникнення робочого агента зернового шару за показниками швидкості нагрівання й сушіння зерна, температури й вологовмісту відпрацьованих газів дозволили уточнити тепло-кінетичні показники швидкості і енергоємності сушіння в шахтних зерносушарках.

Таким чином, зі зменшенням швидкості робочого агента крізь шар зерна гази встигають поглинути більше вологи з поверхні зерна і втрати теплоти зменшуються. Це пояснюється двома причинами – тим, що швидкість випаровування вологи з поверхні зернини значно перевищує швидкість підведення вологи із внутрішніх шарів зернини до його поверхні, тобто

домінування коефіцієнту зовнішньої дифузії вологи α_m над внутрішньої λ_m . А також тим, що при паспортних параметрах швидкості проникнення шару зерна ($v \approx 0,63$ м/с), швидкості малорухомого шару зерна та температури нагрівання газів, робочий агент поглинає значно менше вологи від його вологопоглинаючої спроможності.

Найменший вологовміст відпрацьованих газів встановлено після тепловологообміну в зоні охолодження, куди зерно потрапляє з найменшим вологовмістом u та із частково пересушеними периферійними шарами зерна, що обумовлює зменшення коефіцієнту дифузії вологи α_m . Щодо температури відпрацьованих газів, то найбільші їх значення встановлено після останніх зерносушильних зон (45–55 °С).

З урахуванням продуктивності газових потоків, найбільше теплоти втрачається з відпрацьованими газами після першої сушильної зони – 2893 мДж/год, або в перерахунку в умовне паливо – 68 кг ум. п./год (табл. 4).

Табл. 4. Технологічні параметри роботи сушарки ДСП-320Т за вдосконаленими режимами сушіння в осінній період при сушінні кукурудзи

| Показник | Витрати газів, 10^3 м ³ /год. Продуктивність сушарки, фіз. кг/год | Температура, °С | | Вологовміст (d , г/кг. с. п), вологість (u ,%), | | Швидкість газів, м/с | | Ентальпія, I , мДж | | Втрати теплоти з відпрацьова ними газами, кг/год | |
|----------------|--|-----------------|-------|--|-------|-------------------------|------------|-------------------------|-------|--|-----------|
| | | вхід | вихід | вхід | вихід | фіктивна | із коробів | вхід | вихід | ум. п. | диз. пал. |
| Робочі гази | | | | | | | | | | | |
| 1 суш. зона | 22 | 115 | 21 | 10 | 49 | 0,17 | 1,4 | 2249 | 159 | 5 | 4 |
| 2 суш. зона | 10 | 115 | 20 | 10 | 42 | 0,07 | 0,9 | 967 | 58 | 2 | 1 |
| 3 суш. зона | 10 | 80 | 19 | 10 | 39 | 0,08 | 0,9 | 650 | 50 | 2 | 1 |
| 4 зона охолод. | 9 | 14 | 40 | 10 | 12 | 0,07 | 0,9 | – | 235 | 8 | 6 |
| Разом | – | | | | | | | 3866 | 502 | 17 | 12 |
| Зерно | | | | | | | | | | | |
| 1 суш. зона | 8533 | 23 | 25 | 27 | 24 | – | | | | | |
| 2 суш. зона | | 28 | 35 | 24 | 19 | | | | | | |
| 3 суш. зона | | 35 | 40 | 19 | 15 | | | | | | |
| 4 зона охолод. | | 40 | 32 | 15 | 14 | | | | | | |

Для зменшення втрат енергії існують різні способи та методи. Найменш затратним є організаційні, потім технологічні та порівняно найбільш затратними є техніко-технологічні.

Висновки. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено

механізм внутрішньої дифузії фізико-хімічно зв'язаної вологи для капілярно-шпаруватих тіл при конвективному способі тепломасообміну та встановлено причину зростання енергії внутрішньої дифузії вологи на завершальних етапах сушіння таких тіл, що пов'язано із зростанням енергії внутрікапілярного розрідження (ВКР). Величина ВКР залежить від вмісту фізико-механічної вологи та швидкості міжфазової дифузії вологи. Уточнено фактори впливу та встановлено математичну модель конвективного масообміну й обґрунтовано технологічні способи зменшення енерговитрат і інтенсифікації сушіння зерна управлінням градієнтами теплоти, вологи та тиску. Отримано напівемпіричні рівняння міжфазової взаємодії та розроблено режими заданого тепло- і вологообміну.

Доведено відсутність впливу градієнту теплоємності на градієнт вологоємності ($\nabla T \downarrow \nabla W$) в діапазоні різниці температур ($|t_l - \theta_0| < 100$ °C) і вологи ($\nabla W < 30$ %) для конвективного та кондуктивного способів тепломасообміну шарів зерна в діапазоні змінних параметрів об'єктів взаємодії та на основі цього обґрунтовано спадні режими сушіння зерна в зерносушарках з конвективним способом тепломасообміну, що забезпечують менші втрати теплоти із відпрацьованими РГ та зменшення травмування поверхневих шарів зернин.

Досліджено параметри відпрацьованих РГ на кожному етапі тепловологообміну шахтного зерносушильного агрегату. Вперше встановлено та експериментально підтверджено умови міжфазової взаємодії шару зерна і РГ наближені до виробничих, за яких не відбувається сорбція зерном вологи із РГ вологовмістом вищим від рівноважного, що дає можливість змінити напрямок градієнту вологи та розробити технологічні рішення використання теплоти надміру зволжених РГ без погіршення якості зерна.

На основі розробленої моделі удосконаленого механізму внутрішньої дифузії вологи капілярно-шпаруватих тіл та експериментальних досліджень уточнено існуючі положення щодо впливу способу підведення РГ на параметри міжфазового тепломасообміну та обґрунтовано змінення традиційного способу їх підведення в тепломасообмінні камери зерносушильного агрегату «під нагнітанням» на «під розрідженням», що дозволить збільшити до 12–17 % коефіцієнт зовнішньої дифузії вологи та відповідно інтенсифікувати міжфазовий вологообмін із одночасним вирівнюванням швидкості масообміну в перетині малорухомого або нерухомого шару зерна. За результатами експериментальних досліджень за зневоднення зерна кукурудзи початкової вологості $W_0 = 30$ – 40 % робочими газами незмінних параметрів та енергії течії ($t_l = 110$ °C, $H = 1,3$ кПа, $v = 0,2$ м/с), швидкість сушіння зерна ($dW/d\tau$) за розробленим способом підведення РГ перевищує швидкість сушіння за традиційним від 12 до 15 % проти 2,6 % отриманих розрахунково за відомими формулами.

Література:

1. Любич В. В. Продуктивність сортів і ліній пшениць залежно від абіотичних і біотичних чинників. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2017. Вип. 95. С. 146–161.

2. Любич В. В. Технологічні параметри виробництва зерна тритикале ярого, вирощеного за різних доз азотних добрив. *Вісник Уманського НУС*. 2023. №2. С. 74–82.

3. Любич В. В. Вплив абіотичних та біотичних чинників на продуктивність сортів і ліній пшениці спельти. *Вісник Полтавської ДАА*. 2017. №3. С. 18–24.

4. Jiang Q., Zhang Y., Yan S., Xu L. Optimal design of an corner box for a mixed flow grain dryer. *Appl. Eng. Agric.* 2021. Vol. 37. P. 555–562.

5. Visconcini A.R., Andrade C.M.G., de Souza Costa A.M. Fluid flow simulation of industrial fixed bed mixed-flow grain dryer using k- ω SST turbulence model. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2021. Vol. 14. P. 226–230.

6. Nelson S. O. Effects of natural and added water on prediction of Moisture content and density of corn from microwave dielectric properties. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2010. Vol. 44. P. 72–80.

7. Qu Z., Han M., Lv Y., Zhou Z., Lv Z., Wang W., He X. Design and Test of a Crawler-Type Tiger-Nut Combine Harvester. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. 277.

8. Yu Y., Lu X., Zhang T., Zhao C., Guan S., Pu Y., Gao F. Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.): Nutrition, Processing, Function and Applications. *Foods*. 2022. Vol. 11. 601.

9. Станкевич Г. М., Страхова Т. В., Атаназевич В. І. Сушіння зерна. Київ: Либідь, 1997. 352 с.

10. Хобін В. А., Бабіков А. Ю. Дослідження систем гарантує управління екстремальними нестационарними об'єктами з обмеженнями. *Зб. наук. пр. Кіровоград. держ. техн. універ.* 2002. Вип. 11. С. 54–57.

References:

1. Liubych, V. V. (2017). Productivity of varieties and lines of wheat depending on abiotic and biotic factors. *Ukrainian Black Sea region agrarian science*, no. 95, pp. 146–161. [in Ukrainian].

2. Lyubich, V. V. (2023). Technological parameters of spring triticale grain production grown under different doses of nitrogen fertilizers. *Bulletin of the Uman State University*, no. 2, pp. 74–82. [in Ukrainian].

3. Liubych, V. V. (2017). The influence of abiotic and biotic factors on the productivity of varieties and spelled wheat lines. *Bulletin of Poltava SAA*, no. 3, pp. 18–24. [in Ukrainian].

4. Jiang, Q., Zhang, Y., Yan, S., Xu, L. (2021). Optimal design of an corner box for a mixed flow grain dryer. *Appl. Eng. Agric.*, no. 37, pp. 555–562.

5. Visconcini, A. R., Andrade, C. M. G., de Souza Costa, A. M. (2021). Fluid flow simulation of industrial fixed bed mixed-flow grain dryer using k- ω SST turbulence model. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, no. 14, pp. 226–230.

6. Nelson, S. O. (2010). Effects of natural and added water on prediction of Moisture content and density of corn from microwave dielectric properties. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, no. 44, pp. 72–80.

7. Qu, Z., Han, M., Lv, Y., Zhou, Z., Lv, Z., Wang, W., He, X. (2023). Design and Test of a Crawler-Type Tiger-Nut Combine Harvester. *Agriculture*, no. 13, pp. 277.

8. Yu, Y., Lu, X., Zhang, T., Zhao, C., Guan, S., Pu, Y., Gao, F. (2022). Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.): Nutrition, Processing, Function and Applications. *Foods*, no. 11, pp. 601.

9. Stankevich, H. M., Strakhova, T. V., Atanazevych, V. I. (1997). Grain drying.

Kyiv: Lybid, 352 p. [in Ukrainian].

10. Khobin, V. A., Babikov, A. Yu. (2002). The study of systems guarantees the management of extreme non-stationary objects with constraints. *Coll. of science Kirovohrad Ave. state technical Univ.*, no. 11, pp. 54–57. [in Ukrainian].

Annotation

Lyubich V.V., Eremeyeva O.A., Parishkura Yu.V.

Optimization of the corn grain drying process in mine grain dryers

Goal. To optimize the process of drying corn grain in mine grain dryers.

Methods. Analytical, physical-technological, production-research, calculation-statistical, according to the criterion of economic feasibility and production relevance with the use of automation systems and computer technology.

The results. The mechanism of internal diffusion of moisture and the reasons for a significant increase in energy consumption during the extraction of physically bound moisture at the final stage of grain dehydration have been established. The thermal energy model of the controlled heat-moisture exchange of the VZS is substantiated, and energy-saving methods and modes of intensification of high-moisture TPOZ are developed. The influence of the moisture content of the surface layers of the VZS particles on its divisibility was studied, and energy-saving modes of improving the flowability of the VZS by changing the gradient of the layer-by-layer moisture content of the peripheral layers of its particles were developed. On the basis of studies of the influence of the moisture content of grain mixture particles on its flowability, the study of the physical nature of moisture diffusion in grain capillaries during convective drying, the mechanism of internal moisture diffusion and the reason for the increase in energy consumption from the extraction of physically bound moisture at the final stage of drying have been established, and a physical model has been developed intensification of moisture diffusion processes with less energy expenditure to overcome resistance to the movement of moisture in the capillaries of the body.

The lack of mutual influence of temperature and moisture content gradients on the diffusion of capillary-bound moisture during grain drying in the range of variable parameters of objects of convective interaction of grain-drying units was established, and the descending regimes of grain drying were substantiated. Theoretical and practical technological solutions of practical application have been formed, which allow to intensify the processes of separation and heat-mass exchange of wet grain mixture or to reduce their energy intensity.

Conclusions. The mechanism of internal diffusion of physico-chemically bound moisture for capillary-spared bodies with the convective method of heat and mass exchange has been theoretically substantiated and experimentally confirmed, and the reason for the increase in the energy of internal diffusion of moisture at the final stages of drying of such bodies, which is associated with the increase in the energy of intracapillary rarefaction (VKR) has been established. The value of RKR depends on the content of physical and mechanical moisture and the rate of interphase diffusion of moisture. Factors of influence were specified and a mathematical model of convective mass transfer was established, and technological methods of reducing energy consumption and intensifying grain drying by controlling heat, moisture and pressure gradients were substantiated. Semi-empirical equations of interphase interaction were obtained and regimes of given heat and moisture exchange were developed.

Key words: drying, mine dryer, alternative fuels, corn, grain moisture.