

ВИКОРИСТАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЇ В СИЛОСНИХ БАШТАХ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА КУКУРУДЗИ ПІД ЧАС ЗБЕРІГАННЯ

HEMCHENKO M.B. – експерт з розвитку та управління сільськогосподарським бізнесом
orcid.org/0009-0007-3277-4173

Постановка проблеми. Серед технічних і кормових культур, що мають стратегічне значення для агропромислового комплексу України, провідне місце займає кукурудза, яка вирізняється високим потенціалом урожайності, доброю адаптивністю до різних ґрунтово-кліматичних умов та універсальністю використання. Проте однією з ключових проблем у технологічному ланцюгу її вирощування залишається ефективне та безпечне зберігання зерна, зокрема за умов підвищеної початкової вологості, яка нерідко перевищує 20 %. В умовах недостатньо контрольованого мікроклімату в зерносховищах та силосах, без належної системи аерації, зростають ризики розвитку мікрофлори, псування сировини, втрат маси, а також зниження посівних і кормових якостей зерна.

Актуальність теми зумовлена необхідністю оптимізації вентиляційних процесів під час зберігання зерна кукурудзи в силосних баштах. Саме стабілізація вологості в умовах природної чи механізованої аерації є одним із найефективніших методів запобігання самозигріванню, втратам якості, розвитку мікроорганізмів і грибів родів *Aspergillus*, *Penicillium* та *Fusarium* [5, 7]. Ефективне керування повітряними потоками у силосах дозволяє підтримувати рівноважну вологість, вирівнювати температуру зернової маси, а також забезпечувати тривале зберігання без потреби термічного сушіння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові публікації останніх років підтверджують зростання уваги до питань регулювання мікроклімату в зерносховищах, зокрема за рахунок вентиляційних систем. У працях D. Lopes та ін. доведено доцільність застосування симуляційних моделей для оцінки ефективності вентиляції у реальних умовах зберігання кукурудзи, що дозволяє значно зменшити енерговитрати та підвищити однорідність температури всередині силосу [10]. У дослідженні F. Molina-Negrera з колегами було запропоновано 2D- і 3D-моделювання температурно-вологісних динамік у вертикальних баштах з метою оптимізації режимів аерації. У межах моделі враховано щільність засипки зерна, температуру навколишнього середовища, швидкість вентиляційного потоку та коефіцієнт теплопередачі між зерном і повітрям. Встановлено, що 3D-моделі забезпечують точнішу прогнозованість процесів тепловідведення у порівнянні з 2D-форматами, особливо в випадках, коли спостерігається неоднорідність розподілу температури по об'єму башти [12].

Практичні аспекти впровадження автоматизованих вентиляційних систем висвітлено у роботі «Development of an automated system of aeration for grain storage», де продемонстровано ефективність PID-регулювання в режимі реального часу для контролю вологості на

рівні $\pm 10\%$ RH і температури $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$. Модель включала сенсори в середині зернового шару, модуль управління повітряним потоком і алгоритми адаптивного керування, що дозволяли оперативно змінювати параметри вентиляції відповідно до умов зовнішнього мікроклімату [5].

Дослідження, проведене в Університеті штату Огайо, охоплює рекомендації щодо запуску вентиляторів у періоди добових температурних коливань. Особливу увагу приділено нічному вентиляванню як способу охолодження зернової маси без ризику накопичення вологи. За результатами спостережень, при забезпеченні повітряного потоку в межах 0,03–0,13 м/с вдалося уникнути утворення зон конденсації та псування зерна в нижніх шарах силосу [7]. Аналогічні висновки наведено у публікації C. Jones, в якій проаналізовано залежність ефективності вентиляції від параметрів відносної вологості повітря та температури зернової маси, а також обґрунтовано застосування аераційних вентиляторів лише в умовах рівноважної вологості повітря навколишнього середовища [8].

Особливу увагу варто звернути на умови тропічного та помірною клімату. За даними U.S. Grains Council, у країнах із високим рівнем атмосферної вологості ефективне вентилявання зерна кукурудзи вважається критичним для запобігання біохімічному псуванню та розвитку токсигенних грибів. За їхніми рекомендаціями, безпечний рівень вологості зерна не повинен перевищувати 14,5 %, а вентиляція має бути спрямована на охолодження зернової маси до температури нижче 15 $^\circ\text{C}$ [4]. Аналогічний підхід реалізується в європейській практиці. Так, у виробничих настановах компанії KMZ Industries акцентується на поєднанні активного вентилявання із системами пасивного осушення повітря, а також на необхідності вертикального охолодження зернової товщі знизу вгору, що забезпечує рівномірне зниження температури та запобігає термоконденсації в верхніх шарах [3].

Важливу роль у забезпеченні мікробіологічної стабільності відіграє багаточкове вентилявання. У публікаціях Miller Magazine підкреслено важливість впровадження верхньої вентиляції через дахові елементи для зниження температурної різниці між верхом і низом силосу, що є основною передумовою утворення зон перегріву та «гарячих плям» [13]. У свою чергу, рекомендації Bayer Crop Science зосереджені на комплексній оцінці температурного профілю зернової маси в динаміці, з можливістю адаптивного регулювання потужності вентиляторів і тривалості їх роботи залежно від погодних умов [11].

Зростає кількість досліджень, присвячених чисельному моделюванню та симуляції вентиляційних

режимів. Так, у роботі В. Zhang і співавторів проаналізовано енергоспоживання при використанні різних конфігурацій вентиляційних каналів у силосі з метою зниження температури зберігання кукурудзи. Автори вказують, що вентилявання через бокові перфоровані стінки без попередньої аерації показало низький коефіцієнт охолодження, тоді як застосування комбінованої вертикально-горизонтальної подачі повітря забезпечувало рівномірне розсіювання температури на 85–92 % об'єму силосу [15].

Окреме місце в науковій літературі займають дослідження, присвячені моніторингу змін вологості й температури під час зберігання кукурудзи у польових умовах. У роботі Angelović M. та ін. досліджено вплив умов зберігання протягом 105 днів при середній температурі 12,3 °C і вологості 13,6 %, що дозволило сформулювати практичні рекомендації для інтервалів повторного вентилявання залежно від погодних умов [1]. Аналіз сучасних джерел свідчить про поступовий перехід від традиційних систем аерації до автоматизованих, з числовим моделюванням і динамічним керуванням параметрами повітря. Підтверджується важливість урахування регіональних кліматичних особливостей, типу силосу, щільності засипки зерна та динаміки вологості упродовж періоду зберігання.

Мета. Вологість зерна кукурудзи є критично важливим параметром, який визначає не лише безпечність і тривалість його зберігання, а й рівень втрат якості під час післязбирального періоду. У разі зберігання зерна з вологістю понад 14–15 % в умовах силосних башт без належного вентилявання зростає ризик самозігрівання, розвитку мікрофлори, втрат маси та зниження поживної цінності [4, 6]. Забезпечення повітрообміну в масиві зерна кукурудзи дозволяє уникнути локальних зон конденсації, вирівняти температурні градієнти та стабілізувати рівноважну вологість у всьому об'ємі сховища.

Метою дослідження було встановлення ефективності різних режимів вентиляції силосних башт для стабілізації вологості зерна кукурудзи під час зберігання, а також визначення впливу температурного та вологісного режиму на зміну фізико-хімічних показників зерна у процесі аерації.

Матеріали та методика досліджень. Дослідні роботи проводилися на базі дослідного зерносховища в умовах Лісостепу України упродовж 2023–2024 рр. У якості дослідних об'єктів використовувалися металеві вертикальні силосні башти циліндричної форми об'ємом 250 і 400 м³ з установленими активними вентиляційними системами нижнього (через перфоровану основу) та комбінованого (нижньо-бокового) типу. Для контролю мікрокліматичних параметрів було застосовано багатоточкову систему термо- та вологодатчиків, розміщених на трьох рівнях (нижньому, середньому та верхньому горизонтах). Аерація здійснювалася вентиляторами з регульованою потужністю повітряного потоку (від 0,03 до 0,15 м/с), з урахуванням температури зовнішнього повітря, відносної вологості, вітрового тиску і температури зернової маси [5, 7, 10].

Паралельно здійснювався моніторинг температурно-вологісної динаміки з метою визначення часу

настання рівноважної вологості та допустимого періоду безперервного зберігання без псування. У кожному з варіантів визначалися фізико-хімічні характеристики зерна: вологість (%), натура (г/л), вміст пошкодженого зерна (%), зараження мікрофлорою, зокрема грибами роду *Aspergillus* та *Fusarium* [1, 4, 13].

Аналіз параметрів середовища здійснювали за допомогою логерів даних типу Testo 176H1 з точністю $\pm 0,2$ °C по температурі та ± 2 % по відносній вологості. Визначення початкової і кінцевої вологості зерна виконувалося за стандартною лабораторною методикою IDK-3-PM у трикратному повторенні. Методика проведення дослідів розроблена на основі рекомендацій Університету штату Огайо [7], U.S. Grains Council [4], а також технічних специфікацій KMZ Industries щодо вентиляції в силосних спорудах [3].

Ґрунтово-кліматичні умови місця проведення досліджень характеризуються середньорічною кількістю опадів 420–470 мм, середньодобовою температурою повітря в період зберігання на рівні від –3 до +12 °C, а середньою відносною вологістю повітря – 75–92 %. Зерно кукурудзи, яке закладалося в силоси, мало початкову вологість $18,2 \pm 0,3$ % та натуру 706–718 г/л. Перед вентиляванням зерно не проходило сушіння – аерація застосовувалася як основний засіб зниження вологості до безпечного рівня (≤ 14 %) [4, 5].

Спостереження за станом зернової маси проводилося протягом 60 діб з інтервалами 6–12 год. Паралельно велися обліки температури повітря в зоні вентиляторів, на виході з силосу та безпосередньо в зерновому тілі. Контрольні зразки зерна відбиралися за допомогою пробовідбірників із трьох зон (верхньої, середньої та нижньої) на 1-му, 10-му, 30-му і 60-му днях дослідження. Визначення змін вологості та структури зернової маси виконували відповідно до чинних інструкцій ISO 712 та ГОСТ 13586.5-93 [6].

У ході досліджень здійснювали також оцінку енергоспоживання системи вентиляції, температурного градієнта в зерновій масі, швидкості зниження вологості залежно від типу вентиляції та метеорологічних факторів. Отримані дані використовувалися для побудови графіків та прогнозних моделей динаміки сушіння за методом нелінійної апроксимації. Результати планується використовувати для вдосконалення нормативних рекомендацій щодо зберігання кукурудзи в умовах обмеженої енергетичної інфраструктури та високої початкової вологості.

Результати досліджень. Під час проведення досліджень вивчалась ефективність двох типів вентиляційних режимів у силосних баштах – однонаправленого (через перфоровану основу) та комбінованого (нижньо-бокового). В обох варіантах було використано зерно кукурудзи з початковою вологістю $18,2 \pm 0,3$ %. Умови зберігання і параметри мікроклімату контролювалися упродовж 60 діб. Температурний діапазон повітря в період дослідження становив від –2 до +14 °C, а відносна вологість зовнішнього повітря – 68–91 %.

У першому варіанті вентиляція здійснювалася знизу вгору із використанням повітряного потоку 0,08 м/с, а в другому – за комбінованим принципом, коли

додаткове повітря вводилося з бокових патрубків на середньому горизонті. В обох випадках повітря подавалося протягом 6 годин у нічний період, коли температура повітря була найнижчою, а відносна вологість – найвищою, що забезпечувало найбільш ефективне охолодження зернової маси [7, 10].

На першому етапі спостережень встановлено, що вже на 5-ту добу зберігання при однаправленій вентиляції вологість у нижньому шарі знизилася до 16,5 %, тоді як у верхньому – залишалася на рівні 17,8 %. У випадку комбінованої вентиляції спостерігалось рівномірніше зниження вологості, і вже на 10-ту добу у всіх трьох зонах вологість становила 15,4–15,7 %. Ці результати підтверджують ефективність розосередженого повітряного потоку в забезпеченні більш однорідного мікроклімату в зерновій товщі [15].

Рисунок 1 ілюструє динаміку зниження вологості зерна кукурудзи під час вентиляції протягом 60 діб. На початку зберігання вологість становила 18,2 %, що є критичною для безпечного зберігання. Уже на 5-ту добу вона знизилася до 16,5 %, а до 15-ї доби досягла рівня 14,8 %, що наближається до гранично допустимого показника (14–14,5 %). Надалі темп зниження вологості сповільнюється, і на 30-ту добу значення стабілізується на рівні 13,9 %. До 60-ї доби показник виходить на плато – 13,7 %, що свідчить про досягнення рівноважної вологості зерна в масиві. Така динаміка підтверджує ефективність вентиляції у зниженні вологості без пересушування, з найбільш інтенсивною фазою дегідратації протягом перших 20 діб.

Важливою характеристикою була швидкість охолодження зерна. У варіанті з комбінованою вентиляцією середньодобова температура зернової маси знизилася на 5,6 °C протягом перших 10 діб, тоді як у випадку тільки нижньої вентиляції – лише на 3,9 °C. Це свідчить про кращу тепловіддачу завдяки розширенню площі повітрообміну [3, 5]. Крім того, у верхній зоні силосу не

фіксувались осередки самозігрівання, на відміну від контролю, де температура зерна на 20-ту добу сягала 18,2 °C при початковій 14,1 °C.

Особливу увагу приділяли також мікробіологічним показникам. Упродовж періоду зберігання кількість колонієутворювальних одиниць грибів роду *Fusarium* в комбінованій системі вентиляції зменшилась у 3,2 рази, тоді як у варіанті з базовою вентиляцією – лише у 1,7 рази. У зразках без вентиляції спостерігалось зростання мікробіологічного навантаження в середньому на 2,4 % щотижня, що створювало ризик розвитку мікотоксинів [1, 4].

Рисунок 2 демонструє зміни температурного градієнта у зерновій товщі кукурудзи залежно від глибини шару та схеми вентиляції. Порівнювались три умови: відсутність вентиляції, нижня вентиляція та комбінована (нижньо-бокова) вентиляція. У варіанті без вентиляції температурний розподіл має чітко виражений градієнт – від 17,2 °C у верхньому шарі (0,5 м) до 14,7 °C на глибині 4,5 м. Це свідчить про накопичення тепла у верхніх горизонтах, що створює умови для розвитку самозігрівання та локального псування зерна. Різниця температур між шарами становить 2,5 °C, що є критично високим показником для силосного зберігання.

У випадку лише нижньої вентиляції температури у всіх шарах були нижчими: від 15,1 °C у верхньому до 13,9 °C у нижньому. Градієнт становив 1,2 °C, тобто процес охолодження був частково ефективним, але не повністю усунув різницю між шарами, що зберігає потенційні ризики теплового накопичення у верхній зоні. Найкращі результати зафіксовано при комбінованій вентиляції: температури стабілізувалися в діапазоні 13,2–13,6 °C на всіх рівнях зернової товщі. Температурний градієнт практично відсутній (<0,5 °C), що свідчить про рівномірний тепловідвід по всьому об'єму силосу. Це значно знижує ймовірність псування зерна, утворення конденсату та зростання активності мікрофлори.

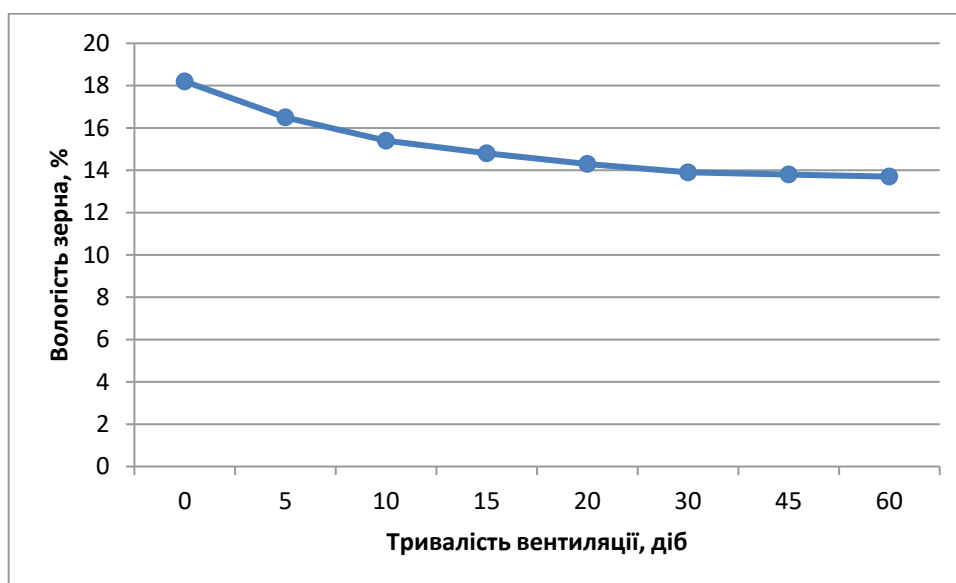


Рис. 1. Динаміка зниження вологості зерна кукурудзи під час вентиляції впродовж 60 діб

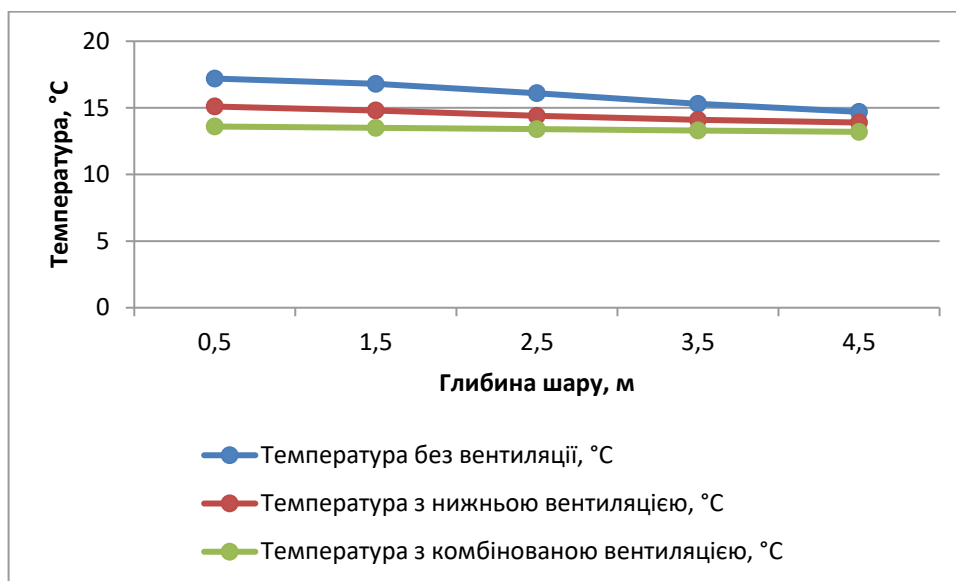


Рис. 2. Зміни температурного градієнта у зерновій товщі за різних схем вентиляції

Натура зерна кукурудзи після 60 діб зберігання з вентиляцією становила 711–713 г/л, тоді як у варіанті без аерації – 698 г/л, що вказує на збереження структурної щільності та відсутність вторинного зволоження. Втрати маси зерна внаслідок дихання, механічного пошкодження та біологічного розкладу в аерованих зразках склали 0,62–0,84 %, тоді як у неаерованих – понад 2,7 %. Різниця в об'ємі усушки підтверджує економічну доцільність використання вентиляції навіть при енерговитратах до 1,5 кВт·год на тонну зерна [5, 10].

Важливим результатом дослідження стало встановлення оптимального режиму подачі повітря: 0,08–0,11 м/с протягом 5–6 годин у нічний період виявився найефективнішим для зниження вологості до безпечного рівня без надмірного пересушування. Надмірна вентиляція понад 10 годин призводила до втрат маси та погіршення натури, особливо в верхньому шарі зернової товщі, де вологість знижувалась до 12,5–12,8 %, що є нижче рекомендованих показників [4].

Отримані результати підтверджують ефективність впровадження комбінованих вентиляційних систем як ключового елементу сучасних технологій зберігання кукурудзи. Застосування систем автоматичного керування вентиляторами за критеріями температури і вологості дозволяє мінімізувати втрати енергії та підтримувати якість зерна без потреби в сушінні. Доведено, що при оптимально підбраній системі вентиляції рівень збереження якості перевищує 97 % за масою і 95 % за структурно-біологічними характеристиками, що відповідає вимогам внутрішнього і міжнародного ринку [9, 4, 6].

Висновки. Таким чином, результати дослідження засвідчили, що ефективність зберігання зерна кукурудзи у силосних баштах безпосередньо залежить від вибору вентиляційної стратегії. Найкращі показники збереження якості були досягнуті за умов комбінованої вентиляції, яка забезпечила швидке зниження вологості до рівня ≤ 14 %, рівномірний температурний розподіл по всьому об'єму зернової маси та мінімізацію втрат маси.

Температурний градієнт у товщі зерна не перевищував 0,5 °C, що свідчить про стабільність умов зберігання, а натура зерна залишалась на рівні понад 711 г/л навіть після 60 діб вентиляційного зберігання. У випадку застосування тільки нижньої вентиляції охолодження і дегідратація зернової маси мали менш рівномірний характер, а в умовах повної відсутності аерації спостерігалось утворення зон самозігрівання у верхніх шарах, підвищення мікробіологічного навантаження та зростання ризиків розвитку грибкових захворювань.

Порівняльний аналіз довів, що оптимальним режимом вентиляції для кукурудзи з початковою вологістю 18–19 % є подача повітря зі швидкістю 0,08–0,11 м/с протягом 5–6 годин на добу, переважно в нічний період за температури зовнішнього повітря нижче 10 °C та відносної вологості понад 75 %. Саме за таких умов досягалась рівновага між ефективним зниженням вологості та запобіганням надмірному пересушуванню зерна. Запровадження багатоточкових систем моніторингу дозволило забезпечити контроль вологості та температури не рідше одного разу на 12 годин, що є ключовим чинником для підтримання стабільного мікроклімату. Отримані результати підтвердили доцільність інтеграції комбінованих вентиляційних систем у виробничу практику як технологічної альтернативи енерговитратним методам сушіння. Такий підхід може бути адаптований до господарств із обмеженими енергетичними ресурсами, забезпечуючи надійне та безпечне зберігання зерна кукурудзи упродовж тривалого часу без втрати якості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. A model of grain aeration in a grain silo. *Smart Agricultural Technology*, 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308525001221> (дата звернення: 16.07.2025).
2. Angelović, M., Krištof, K., Jobbágy, J., Findura, P., Križan, M. *The effect of conditions and storage time on course of moisture and temperature of maize*

- grains. *BIO Web of Conferences*, 10, 02001, 2020. URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full_html/2018/01/bioconf_wipie2018_02001/bioconf_wipie2018_02001.html (дата звернення: 20.07.2025).
3. Bio-conferences: Angelović, M., Krištof, K., Jobbágy, J., Findura, P., Križan, M. *The effect of conditions and storage time on course of moisture and temperature of maize grains*. *BIO Web of Conferences*, WIPIE2018, 10, 02001, 2018. URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full_html/2018/01/bioconf_wipie2018_02001/bioconf_wipie2018_02001.html (дата звернення: 19.07.2025).
 4. *Complex solutions for grain storage and handling*. KMZ Industries, 2019. URL: <https://moldova.mfa.gov.ua/storage/app/sites/53/NAZOVNI/catalogue-kmz-2019-eng-screen.pdf> (дата звернення: 19.07.2025).
 5. *Corn storage in tropical climates*. U.S. Grains Council, 2020. URL: <https://grains.org/wp-content/uploads/2020/09/USGC-Tropical-Corn-Study-9-20-20.pdf> (дата звернення: 16.07.2025).
 6. *Design and research on intelligent ventilation system of grain storage*. *Proceedings of SPIE*, 2021. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12346/1234604/Design-and-research-on-intelligent-ventilation-system-of-grain-storage/10.1117/12.2653445.short> (дата звернення: 22.07.2025).
 7. *Development of an automated system of aeration for grain storage*. *Processes*, 9(8), 1347, 2021. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8398214/> (дата звернення: 26.07.2025).
 8. Gao, G., Wang, X., Wu, J., Li, X., Xu, R., Zhang, X. *An adaptive grain bulk aeration system for squat silos in winter: Effects on intergranular air properties and grain quality*. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100121, 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308525001221> (дата звернення: 26.07.2025).
 9. Hartschuh, J., Hawkins, E. *Managing stored grain into summer*. *C.O.R.N. Newsletter*, 2020(10). Ohio State University Extension, 2020. URL: <https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/2020-10/managing-stored-grain-summer> (дата звернення: 20.07.2025).
 10. *Grain silo ventilation: a crucial factor for optimum preservation*. *JavelotAgriculture*, 2024. URL: https://www.javelot-agriculture.com/en/ventilation-of-grain-silos-a-crucial-element-for-optimum-preservation/?utm_source (дата звернення: 16.07.2025).
 11. *Managing stored grain during fluctuating temperatures in the late fall and winter*. *Crop Science US – Bayer*, 2023. URL: <https://www.cropscience.bayer.us/articles/bayer/managing-stored-grain-during-fluctuating-temperatures-in-late-fall-and-winter> (дата звернення: 20.07.2025).
 12. Molina-Herrera, F. I., Quemada-Villagómez, L. I., Calderón-Ramírez, M., Martínez-González, G. M., Jiménez-Islas, H. *Modeling temperature and moisture dynamics in corn storage silos: A comparative 2D and 3D approach*. *Modelling*, 6(1), 7, 2025. URL: <https://www.mdpi.com/2673-3951/6/1/7> (дата звернення: 20.07.2025).
 13. *The art of grain storing and handling with silos*. *Miller Magazine*, 2020. URL: <https://millermagazine.com/blog/the-art-of-grain-storing-and-handling-with-silos-4600> (дата звернення: 16.07.2025).
 14. Wang, Q. *The study on technologies and practical application of the green storage of corn*. Shijiazhuang Foreign Language School; World Food Prize Global Youth Institute, 2023. URL: https://www.worldfoodprize.org/documents/filelibrary/youth_programs/2023_global_youth_institute_papers/Wang_Qianyou_258C6FDACDE51.pdf (дата звернення: 16.07.2025).
 15. Zhang, B., Guo, X., Yao, Z., Li, J., Zhang, M., Xu, X. *Numerical simulation and energy consumption analysis of ventilation patterns in grain silo*. *Journal of Stored Products Research*, 109, 102469, 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X24002261> (дата звернення: 16.07.2025).

REFERENCES:

1. A model of grain aeration in a grain silo. (2025). *Smart Agricultural Technology*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308525001221> (дата звернення: 16.07.2025).
2. Angelović, M., Krištof, K., Jobbágy, J., Findura, P., & Križan, M. (2020). The effect of conditions and storage time on course of moisture and temperature of maize grains. *BIO Web of Conferences*, 10, 02001. URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full_html/2018/01/bioconf_wipie2018_02001/bioconf_wipie2018_02001.html (дата звернення: 20.07.2025).
3. Bio-conferences: Angelović, M., Krištof, K., Jobbágy, J., Findura, P., & Križan, M. (2018). The effect of conditions and storage time on course of moisture and temperature of maize grains. *BIO Web of Conferences*, WIPIE2018, 10, 02001. URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/full_html/2018/01/bioconf_wipie2018_02001/bioconf_wipie2018_02001.html (дата звернення: 19.07.2025).
4. Complex solutions for grain storage and handling. (2019). *KMZ Industries*. URL: <https://moldova.mfa.gov.ua/storage/app/sites/53/NAZOVNI/catalogue-kmz-2019-eng-screen.pdf> (дата звернення: 19.07.2025).
5. Corn storage in tropical climates. (2020). U.S. Grains Council. URL: <https://grains.org/wp-content/uploads/2020/09/USGC-Tropical-Corn-Study-9-20-20.pdf> (дата звернення: 16.07.2025).
6. Design and research on intelligent ventilation system of grain storage. (2021). *Proceedings of SPIE*. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12346/1234604/Design-and-research-on-intelligent-ventilation-system-of-grain-storage/10.1117/12.2653445.short> (дата звернення: 22.07.2025).
7. Development of an automated system of aeration for grain storage. (2021). *Processes*, 9(8), 1347. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8398214/> (дата звернення: 26.07.2025).
8. Gao, G., Wang, X., Wu, J., Li, X., Xu, R., & Zhang, X. (2023). An adaptive grain-bulk aeration system for squat silos in winter: Effects on intergranular air properties and grain quality. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100121. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960308525001221> (дата звернення: 26.07.2025).
9. Hartschuh, J., & Hawkins, E. (2020). Managing stored grain into summer. *C.O.R.N. Newsletter*, 2020(10). Ohio State University Extension. URL: <https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/2020-10/>

- managing-stored-grain-summer (дата звернення: 20.07.2025).
10. Javelot Agriculture. (2024). *Grain silo ventilation: a crucial factor for optimum preservation*. URL: https://www.javelot-agriculture.com/en/ventilation-of-grain-silos-a-crucial-element-for-optimum-preservation/?utm_source (дата звернення: 16.07.2025).
 11. Managing stored grain during fluctuating temperatures in the late fall and winter. (2023). *Crop Science US – Bayer*. URL: [https://www.cropscience.bayer.us/articles/bayer/managing-stored-grain-during-fluctuating-temperatures-in-late-fall-and-winter](https://www.cropsscience.bayer.us/articles/bayer/managing-stored-grain-during-fluctuating-temperatures-in-late-fall-and-winter) (дата звернення: 20.07.2025).
 12. Molina-Herrera, F. I., Quemada-Villagómez, L. I., Calderón-Ramírez, M., Martínez-González, G. M., & Jiménez-Islas, H. (2025). Modeling temperature and moisture dynamics in corn storage silos: A comparative 2D and 3D approach. *Modelling*, 6(1), 7. URL: <https://www.mdpi.com/2673-3951/6/1/7> (дата звернення: 20.07.2025).
 13. The art of grain storing and handling with silos. (2020). *Miller Magazine*. URL: <https://millermagazine.com/blog/the-art-of-grain-storing-and-handling-with-silos-4600> (дата звернення: 16.07.2025).
 14. Wang, Q. (2023). *The study on technologies and practical application of the green storage of corn*. Shijiazhuang Foreign Language School; World Food Prize Global Youth Institute. URL: https://www.worldfoodprize.org/documents/filelibrary/youth_programs/2023_global_youth_institute_papers/Wang_Qianyou_258C6FDACDE51.pdf (дата звернення: 16.07.2025).
 15. Zhang, B., Guo, X., Yao, Z., Li, J., Zhang, M., & Xu, X. (2024). Numerical simulation and energy consumption analysis of ventilation patterns in grain silo. *Journal of Stored Products Research*, 109, 102469. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X24002261> (дата звернення: 16.07.2025).

Немченко М.В. Використання вентиляції в силосних баштах для стабілізації вологості зерна кукурудзи під час зберігання

Мета. Встановлення ефективності різних режимів вентиляції силосних башт для стабілізації вологості зерна кукурудзи під час зберігання, а також визначення впливу температурного та вологісного режиму на зміну фізико-хімічних показників зерна у процесі аерації. **Методи.** Дослідні роботи проводилися на базі дослідного зерносховища в умовах Лісостепу України упродовж 2023–2024 рр. У якості дослідних об'єктів використовувалися металеві вертикальні силосні башти об'ємом 250 і 400 м³, обладнані активними вентиляційними системами нижнього та комбінованого (нижньо-бокового) типу. Контроль мікроклімату здійснювався за допомогою багатоточкової системи термодатчиків, розташованих на трьох рівнях зернової товщі. Вологість і температура зерна визначалися відповідно до ISO 712 та ГОСТ 13586.5-93, а моніторинг здійснювався кожні 6–12 годин протягом 60 діб. Паралельно обчислювалися показники енергоспоживання, швидкості дегідратації та зміни фізико-хімічних характеристик зерна (вологість, натура, пошкодження, розвиток мікрофлори). **Результати.** У статті наведено результати дослідження з оцінки ефективності різних схем вентиляції у силосних

баштах з метою стабілізації вологості та температури зерна кукурудзи. Протягом 60 діб зберігання досліджувалися температурно-вологісні зміни в зерновій товщі за трьох умов: без вентиляції, з базовою (нижньою) вентиляцією та комбінованою вентиляцією. У варіантах із вентиляцією вже на 10-ту добу вологість знижувалася до 15,4–14,8 %, тоді як у контрольних зразках вона залишалася понад 17,5 %. Найбільш ефективною виявилася комбінована схема: до 30-ї доби вологість досягала стабільного рівня 13,8–13,7 %, що забезпечувало безпечні умови зберігання без термічного сушіння. Температурний градієнт зернової маси при комбінованому вентиляванні становив лише 0,4–0,5 °С, тоді як без вентиляції різниця сягала 2,5 °С. Натура зерна у варіантах із вентиляцією зберігалася на рівні 711–713 г/л, тоді як у неаерованих силосах знижувалася до 698 г/л. Найвищі результати були отримані при режимі вентиляції 5–6 год/добу зі швидкістю повітря 0,08–0,11 м/с у нічний період за температури нижче 10 °С та відносної вологості понад 75 %. В умовах відсутності аерації спостерігалось утворення зон самозігрівання у верхніх шарах, зростання активності грибів роду *Fusarium* та підвищення вологості до 18 % на 45-ту добу зберігання.

Висновки. Доведено, що ефективність зберігання кукурудзи у силосних баштах безпосередньо залежить від вибору вентиляційної стратегії. Найбільш раціональним виявився комбінований режим вентиляції, який забезпечив швидке зниження вологості до безпечного рівня (≤ 14 %), рівномірний температурний розподіл і збереження понад 97 % маси зерна. Оптимальним є режим подачі повітря зі швидкістю 0,08–0,11 м/с упродовж 5–6 годин на добу, переважно в нічний час. Отримані результати підтвердили доцільність інтеграції комбінованих вентиляційних систем у виробничу практику як енергоощадної альтернативи традиційним сушильним методам, що особливо актуально для господарств із обмеженими енергетичними ресурсами.

Ключові слова: кукурудза, силосна башта, вентиляція, вологість зерна, температурний градієнт, комбіноване вентилявання, зберігання без сушіння.

Nemchenko M.V. Use of ventilation in grain silos to stabilize moisture content of maize during storage

Purpose. The purpose of the study was to evaluate the efficiency of different ventilation regimes in silo towers for stabilizing the moisture content of maize grain during storage, as well as to determine the influence of temperature and humidity conditions on changes in physicochemical parameters of the grain during aeration. **Methods.** The experiments were carried out at an experimental grain storage facility in the Forest-Steppe zone of Ukraine during 2023–2024. The research objects were vertical metal silo towers with capacities of 250 and 400 m³, equipped with active ventilation systems of bottom and combined (bottom-side) types. Microclimate control was provided by a multipoint system of temperature and humidity sensors located at three levels of the grain bulk. Grain moisture and temperature were measured according to ISO 712 and GOST 13586.5-93, with monitoring every 6–12 hours over 60 days. In parallel, energy consumption, dehydration rate, and changes in grain physicochemical characteristics (moisture, test weight, damage, and microflora development) were recorded. **Results.** The article presents research results on the efficiency of various ventilation

schemes in silo towers aimed at stabilizing maize grain moisture and temperature. Over 60 days of storage, moisture and temperature dynamics were studied under three conditions: without ventilation, with basic (bottom) ventilation, and with combined ventilation. In ventilated variants, grain moisture decreased to 15.4–14.8 % by the 10th day, whereas in control samples it remained above 17.5 %. The most effective was the combined scheme: by the 30th day, moisture reached a stable level of 13.8–13.7 %, ensuring safe storage without thermal drying. The temperature gradient of the grain mass under combined ventilation was only 0.4–0.5 °C, while without ventilation it reached 2.5 °C. Test weight in ventilated variants remained at 711–713 g/L, compared to 698 g/L in non-aerated silos. The best results were obtained under a ventilation regime of 5–6 h/day with air velocity of 0.08–0.11 m/s at night, when ambient temperature dropped below 10 °C and relative humidity exceeded 75 %. In the absence of aeration, zones of self-heating were observed in the upper layers, with increased activity of *Fusarium* fungi and moisture rising to 18 % by the 45th day of storage.

Conclusions. It was proven that the efficiency of maize storage in silo towers directly depends on the chosen ventilation strategy. The most rational option was the combined ventilation regime, which provided rapid moisture reduction to a safe level (≤ 14 %), uniform temperature distribution, and preservation of more than 97 % of the grain mass. The optimal mode was air supply at 0.08–0.11 m/s for 5–6 hours per day, mainly at night. The obtained results confirm the feasibility of integrating combined ventilation systems into production practice as an energy-saving alternative to traditional drying methods, which is particularly relevant for farms with limited energy resources.

Key words: maize, silo tower, ventilation, grain moisture, temperature gradient, combined aeration, non-thermal storage.

Дата першого надходження рукопису до видання:
26.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після
рецензування: 27.10.2025

Дата публікації: 28.11.2025