

Автоматизація контролю стану зерна в зерносховищах на основі динамічних характеристик

Предметом дослідження є зерносховище як об'єкт автоматизації та контролю ключових кліматичних параметрів, зокрема температури, вологості та газового складу повітря. За ручного керування кліматом зерносховища виникає низка труднощів, оскільки людині складно часто контролювати великі обсяги зерна. Ефективний моніторинг мікроклімату особливо актуальний для великих елеваторів, де обсяги зберігання зерна сягають десятків тисяч тонн. Для досягнення ефективного аналізу мікроклімату зерна та елеватора проаналізовано наявні рішення й досліджено процеси зберігання зерна та причини його псування з метою розроблення науково обґрунтованого підходу до контролю й моніторингу кліматичних параметрів зерносховища та зерна.

На основі проведеного аналізу визначено можливості вдосконалення існуючих методів і запропоновано систему та алгоритм перевірки стану зерна. Для аналізу використано принципи автоматизованого керування, побудовано перехідні характеристики, досліджено динамічні властивості та процеси самовирівнювання зернової маси. У результаті визначено оптимальну відстань розміщення датчиків температури один відносно одного в зерносховищі та зерновій масі. Запропонований підхід дозволяє визначити найкраще розташування сенсорів, своєчасно виявляти зіпсоване зерно та запобігти його поширенню, що дає змогу значно скоротити втрати продукції.

Наукова новизна роботи полягає в поєднанні аналізу динамічних характеристик зернової маси з принципами саморегулювання для розроблення методики обґрунтованого визначення оптимального просторового розташування сенсорів у зерносховищі. Практична цінність полягає в можливості впровадження запропонованого підходу на сучасних елеваторах і зерносховищах. Запропонована методика сприяє підвищенню ефективності автоматизованих систем контролю та зменшенню витрат на утримання зерносховищ. Отримані результати мають теоретичне значення для подальшого розвитку систем автоматизації процесів зберігання зернових культур.

Ключові слова: автоматизований контроль; зерносховище; елеватор; мікроклімат зернової маси; температурно-вологісний режим; моніторинг стану зерна.

Актуальність теми. Україна посідає провідні позиції у світі серед експортерів зернових культур. Щорічний обсяг виробництва становить близько 100 млн тонн, з яких приблизно 70 % експортується до країн Європейського Союзу, Азії та Африки. Галузь переробки зерна забезпечує значну кількість робочих місць, залучаючи сотні тисяч працівників. Високі врожаї безпосередньо впливають на економічні показники держави: зокрема рекордний урожай 2021 року сприяв зростанню валового внутрішнього продукту України на 0,8 процентного пункту.

Попри значний потенціал аграрного сектору, в Україні щорічно фіксуються суттєві втрати врожаю, значна частина яких зумовлена недосконалістю систем контролю умов зберігання зерна. Зокрема, за умов зберігання 30–40 млн тонн зерна через недостатній розвиток матеріально-технічної бази для його зберігання та переробки втрати сягають близько 8 млн тонн, що еквівалентно приблизно 800 млн доларів США. Дослідження свідчать, що навіть часткові інвестиції в розмірі близько 50 % від обсягу таких втрат можуть суттєво знизити їх рівень і покращити якість збереженої продукції [1, 2].

У цьому контексті особливого значення набуває оптимізація процесів зберігання зернових культур. Автоматизація та впровадження систем моніторингу основних параметрів, зокрема температури й вологості, дають змогу істотно зменшити ризики псування врожаю завдяки своєчасному виявленню критичних відхилень.

Предметом дослідження цієї статті є зерносховище як об'єкт автоматизації. Одним із ключових завдань у процесі зберігання є безперервний аналіз стану зерна та оперативна реакція системи контролю на відхилення параметрів від нормативних значень.

Значні розміри сучасних елеваторів і зерносховищ зумовлюють низьку ефективність ручного керування технологічними процесами, зокрема роботою сепараторів, що робить необхідним перехід до автоматизованих систем контролю та управління. Це пояснюється як великим обсягом продукції, так і складністю оперативного аналізу в ручному режимі. Отже, для забезпечення ефективного збереження зернових культур необхідним є впровадження систем автоматизації та безперервного моніторингу.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукових джерел свідчить про наявність значної кількості публікацій, присвячених питанням автоматизації процесів сортування зерна [1, 3, 4, 5–9] і забезпечення оптимальних кліматичних умов у зерносховищах [4, 10]. У [2, 5, 11] розглядаються методи сортування, що ґрунтуються на технологіях комп'ютерного зору та обробки зображень. Запропоновані підходи передбачають поділ цифрового зображення на пікселі та аналіз їхніх RGB-компонентів з метою ідентифікації пошкоджених або сторонніх зерен. Прикладом реалізації цього методу є фотосепаратори, здатні відокремлювати зерно різних культур або зіпсовані зразки за кольоровими характеристиками. У літературі підкреслюється, що фотосепарація є перспективним і високопродуктивним методом сортування. Водночас до її недоліків належать значні габарити обладнання та обмежені можливості своєчасного виявлення локальних зон псування зерна.

Альтернативним напрямом є використання методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, для автоматизації процесу сортування. Такі системи оснащуються програмним забезпеченням, здатним навчатися на основі вхідних даних із відео- чи фотокамер. Головним завданням цього підходу є класифікація зерен за заданими параметрами, такими як колір і розмір. Цей метод має багато спільного з фотосепарацією, оскільки також ґрунтується на аналізі вхідного зображення, поділеного на пікселі.

Інший технічний підхід представлений у вигляді аеродинамічного сортування. Його принцип дії полягає в розділенні зернової маси за масою, формою та аеродинамічними властивостями під впливом повітряного потоку. Легкі зерна відхиляються та переміщуються в один контейнер, тоді як важчі залишаються в іншому. Недоліком цього методу є необхідність ручного завантаження зерна до подаючої системи аеросепаратора, що знижує загальний рівень автоматизації процесу.

Зазначені методи демонструють ефективність у вирішенні окремих завдань, проте їх спільним обмеженням є потреба в безпосередній участі людини. У цьому контексті актуальним стає застосування комплексних систем автоматизованого моніторингу та сортування, що ґрунтуються на даних від кліматичних сенсорів, розміщених безпосередньо в зерносховищах. Запропоновані підходи передбачають поділ зерносховища на окремі зони, кожна з яких обладнана датчиками для контролю параметрів мікроклімату, а також програмним забезпеченням для аналізу отриманої інформації та своєчасного ухвалення рішень щодо видалення пошкодженого зерна.

Особливу увагу в літературі приділено проблематиці забезпечення стабільного мікроклімату в зерносховищах. У [4] визначено оптимальні умови для зберігання різних культур, зокрема кукурудзи й гороху. Ключовими показниками, що дозволяють оцінити стан зернової маси під час системного моніторингу, є температура, вологість, склад домішок, рівень зараженості шкідниками, а також якісні характеристики, зокрема колір і запах [10].

Метою статті є розроблення та обґрунтування автоматизованого підходу до контролю мікроклімату зерносховищ на основі аналізу динамічних характеристик зернової маси з метою визначення оптимального просторового розміщення сенсорів температури та вологості.

Викладення основного матеріалу. Для поділу зерносховища на зони контролю та моніторингу стану зернової маси попередньо здійснюють вимірювання його внутрішніх габаритів. Далі визначають площу елементарної ділянки спостереження, після чого здійснюють поділ об'єкта на зони контролю.

Для розрахунку зон моніторингу застосовують методологію систем автоматизованого керування, що ґрунтується на визначенні динамічних характеристик. При цьому використовують принцип самовирівнювання процесу регулювання, тобто здатність об'єкта стабілізувати регульовані величини (температуру й вологість) у процесі функціонування. Для аналізу поділу об'єкта на зони необхідно визначити його перехідну характеристику, здійснити нумерацію діапазону зміни перехідної функції та розрахувати час запізнення. Це дає змогу обґрунтовано визначити відстань між сенсорами температури та вологості.

Складові перехідної характеристики аперіодичної ланки першого порядку зображені на рисунку 1. Час регулювання t_p визначається тривалістю перехідного процесу. Теоретично він триває нескінченно, проте на практиці прийнято вважати його завершеним тоді, коли відхилення регульованої величини від усталеного значення не перевищує допустимих меж ϵ . Як правило, приймають інтервал у межах 3–5 τ , де τ – стала часу об'єкта. Цей параметр характеризує швидкодію системи. У низці випадків швидкодію також оцінюють за допомогою часу t_y – моменту досягнення максимального значення, або часу t_{max} , що відповідає екстремальному значенню функції відгуку h_{max} [8].

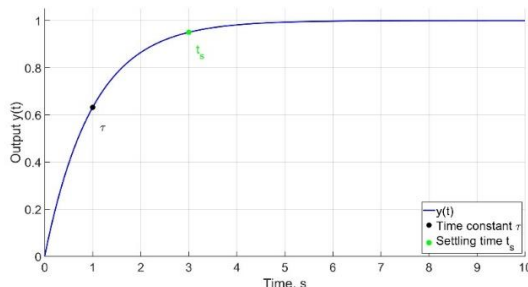


Рис. 1. Перехідна характеристика аперіодичної ланки першого порядку

Вихідні дані для цього дослідження використано відповідно до результатів, наведених у [12]. У ній описано модельне зерносховище розмірами $1,5 \times 0,95 \times 1,2$ м, виготовлене з вуглецевої сталі. Конструкція обладнана вентиляційними отворами для прокладання кабелів вимірювальних датчиків температури, які забезпечують фіксацію фактичної температури зернової маси. Для запобігання підвищенню температури, що спричинено диханням насіння, використано систему вентиляції. Насіння пшениці зберігалось за температури 15–25 °С.

За результатами дослідження встановлено, що температура зернової маси суттєво перевищувала температуру навколишнього середовища. Протягом 30 діб температура повітря зросла до 22 °С, тоді як кінцева температура зерна коливалася в межах 30–44 °С. Зростання було зумовлене не лише зовнішніми умовами, а й вологістю самого зерна. Зокрема, за вмісту води 16 % підвищення температури становило близько 11–13 °С протягом 103 діб, тоді як за вологості 22 % підвищення досягало 20 °С уже через 24 доби зберігання. Таким чином, підвищений рівень вологості сприяв інтенсивнішому нагріванню зерна як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. Крім амплітуди зміни температури, суттєвим чинником виявився її градієнт, який також прямо залежав від вологості зернової маси.

Для кількісної оцінки побудовано графіки зміни температури, на основі яких проведено розрахунки швидкості її зміни за різні часові інтервали (доба, година, хвилина, секунда) (табл. 1). Зміну температури за днями подано на рисунку 2.

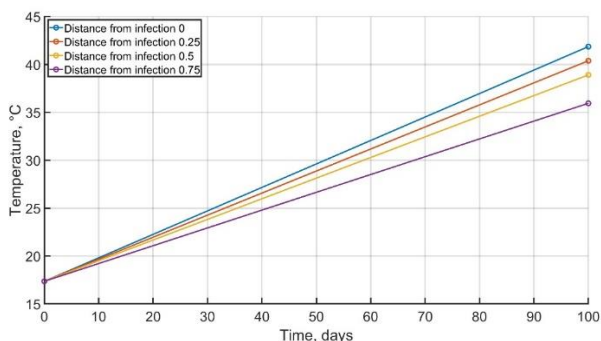


Рис. 2. Зміна температури протягом 100 діб на різних відстанях від точки вимірювання

Наведений графік ілюструє характер зміни температури зернової маси в часі для різних відстаней від точки вимірювання. З метою кількісної оцінки динаміки процесу виконано перерахунок температурної залежності у швидкість її зміни для різних часових інтервалів.

Таблиця 1

Розрахунок зміни температури зернової маси в різних часових інтервалах

Відстань від точки вимірювання, м	За добу, °С/доба	За годину, °С/год	За хвилину, °С/хв	За секунду, °С/с
0,0	0,245	0,010208	0,00017	0,000003
0,25	0,2302	0,009592	0,00016	0,000003
0,5	0,2154	0,008975	0,00015	0,000002
0,75	0,1858	0,007742	0,000129	0,000002

Наведені результати отримані в дискретні моменти часу, що не дає змоги безпосередньо відтворити повну безперервну форму кривої зміни температури. Відомо, що процес нагрівання зерна описується перехідною характеристикою. Для її побудови використано характерні точки 1τ (~63,2 %), 3τ (~95,0 %) та 5τ (~99,3 %).

Подальший аналіз передбачає апроксимацію отриманих даних експоненціальною залежністю та побудову перехідних характеристик, що дає змогу уточнити модель динаміки температурних змін зернової маси. За допомогою експоненціальної апроксимації здійснено продовження графіка, поданого на рисунку 3.

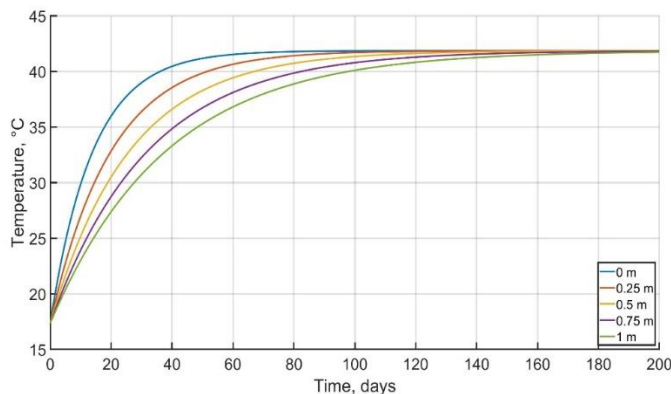


Рис. 3. Перехідні характеристики температури зернової маси для різних відстаней

Перехідні функції мають вигляд аперіодичної ланки першого порядку $W(p) = K / (T \cdot p + 1)$, де K – повний тепловий приріст температури системи і дорівнює $y_{\infty} - y_0 = 41,85 - 17,35 = 24,5$.

На основі експоненціальної апроксимації для кожної відстані від точки вимірювання визначено значення сталої часу T , що характеризує теплову інерційність зернової маси. Отримані значення використано для кількісного аналізу динамічних властивостей об’єкта та подальшого обґрунтування просторового розміщення сенсорів.

Таблиця 2

Коефіцієнти перехідних характеристик температури зернової маси

Відстань від точки вимірювання, м	0,00	0,25	0,5	0,75	1,00
Стала часу T , діб	12,87	18,39	23,9	29,42	34,93

Для верифікації отриманих математичних моделей перехідних функцій використано програмний засіб Simulink у середовищі MATLAB. Результати побудови перехідних характеристик наведено на рисунку 4 та узгоджуються з експериментальними даними.

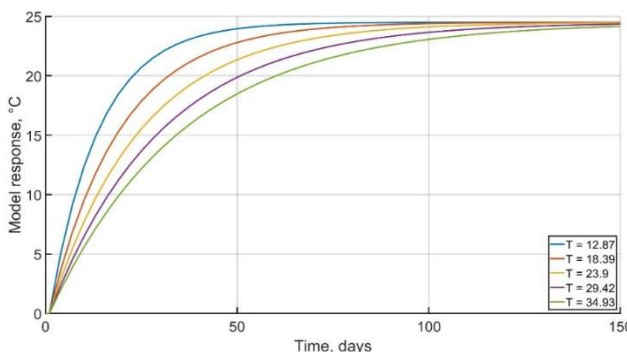


Рис. 4. Перехідні характеристики температури зернової маси, отримані за допомогою Simulink у середовищі MATLAB

Побудовані перехідні характеристики за допомогою програмного засобу Simulink у середовищі MATLAB узгоджуються з перехідними характеристиками, що отримано за вхідними експериментальними

даними, що підтверджує адекватність обраної математичної моделі. Отримані перехідні характеристики (рис. 4) дозволяють не лише описати динаміку температурних змін зернової маси, а й визначити характер просторового розподілу теплової інерційності (табл. 2) в зерносховищі. Це створює основу для обґрунтованого вибору кроку розміщення сенсорів температури та вологості з урахуванням динамічних властивостей об'єкта.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропонований метод дає змогу науково обґрунтовано визначити оптимальне просторове розташування датчиків температури та вологості в зерносховищах на основі аналізу динамічних характеристик зернової маси та принципів самовирівнювання. Отримані результати свідчать, що застосування аперіодичної моделі першого порядку є адекватним для опису процесів тепломасообміну в зерновій масі та може бути використане для підвищення ефективності автоматизованих систем контролю мікроклімату. Реалізація запропонованого підходу сприяє зменшенню ризику локального перегріву та зволоження зерна, своєчасному виявленню зон псування і, як наслідок, підвищенню якості збереження зерна та скороченню економічних втрат.

Перспектива подальших досліджень полягає в необхідності масштабування результатів з лабораторної моделі на промислові зерносховища й елеватори різних типів і об'ємів. Крім того, точність вихідних експериментальних даних потребує уточнення шляхом збільшення кількості вимірювань і врахування просторової неоднорідності зернової маси. Доцільним є також урахування додаткових зовнішніх чинників, таких як циркуляція повітря, нестационарні теплові процеси, вплив конструктивних особливостей сховища та варіативність фізико-хімічних властивостей зерна. Запропоновані методи є адекватними для дослідження, однак потребують подальшої експериментальної верифікації, промислової апробації та комплексної валідації результатів у реальних умовах експлуатації зерносховищ.

Список використаної літератури:

1. *Chakraverty A. Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices / A. Chakraverty, A.S. Mujumdar, H.S. Ramaswamy. – New York : Marcel Dekker, 2003. – 884 p.*
2. *Яцук Н. Контроль за «нестандартним» зберіганням зерна / Н.Яцук [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://propozitsiya.com/ua/kontrol-za-nestandardnim-zberigannjam-zerna>.*
3. *Основні технологічні регулювання зерноочисних машин [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://agronomy.com.ua/statti/1946-osnovni-tekhnologichni-rehulivannia-zernoochisnykh-mashyn.html>.*
4. *Технологія оптичного сортування [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://orientway.com.ua/tehnologiya/>.*
5. *Принципи роботи зерноочисних машин [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://agrosepmash.ua/uk/principi-roboti-zernoochisnix-mashin>.*
6. *Соколенко Л.Є. Технологічне обладнання зернових виробництв : навч. посіб. / Л.Є. Соколенко. – Київ : Кондор, 2010. – 496 с.*
7. *Чурсінов Ю.О. Розробка мобільної установки для сортування зернових відходів / Ю.О. Чурсінов, І.М. Кудрявцев, М.В. Луценко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. – 2022. – № 2 (12). – С. 98–104. DOI: 10.20998/2413-4295.2022.02.14.*
8. *Improving Corn Grain Purity by Using Color-Sorting Technology / P.R. Thomison, K.R. Miedaner, R.L. Nielsen, A.E. Dorrance // Crop Management. – 2006. – Vol. 5, Issue 1. DOI: 10.1094/CM-2006-0309-01-RS.*
9. *Lazăr E.I. Studies on the use of new technologies to improve the technological process of grain sorting / E.I. Lazăr, O. Tița // Journal of Agroalimentary Processes and Technologies. – 2022. – Vol. 28, Issue 4. – P. 319–324.*
10. *Ярошенко С. Рациональні способи збирання озимих зернових культур / С.Ярошенко, А.Черенков, М.Солодушко [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/8913-ratsionalni-sposoby-zbyrannia-ozymykh-zernovykh-kultur.html>.*
11. *Innovation in Agriculture Industry by Automated Sorting of Rice Grains / K.Sujatha and other // Evergreen. – 2023. – Vol. 10, Issue 1. – P. 283–288. DOI: 10.5109/6781076.*
12. *Effects of deterioration and mildewing on the quality of wheat seeds with different moisture contents during storage / R.Wang, L.Liu, Y.Guo and other // RSC Advances. – 2020. – Vol. 10, Issue 25. – P. 14581–14594. DOI: 10.1039/D0RA00542H.*

References:

1. *Chakraverty, A., Mujumdar, A.S. and Ramaswamy, H.S. (2003), Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices, Marcel Dekker, New York, 884 p.*
2. *Yashchuk, N., «Kontrol za “nestandartnym” zberihanniam zerna», [Online], available at: <https://propozitsiya.com/ua/kontrol-za-nestandardnim-zberigannjam-zerna>*
3. *«Osnovni tekhnologichni rehulivannia zernoochisnykh mashyn», [Online], available at: <https://agronomy.com.ua/statti/1946-osnovni-tekhnologichni-rehulivannia-zernoochisnykh-mashyn.html>*
4. *«Tekhnologhiia optychnoho sortuvannia», [Online], available at: <https://orientway.com.ua/tehnologiya/>*
5. *«Pryntsy py roboty zernoochisnykh mashyn», [Online], available at: <https://agrosepmash.ua/uk/principi-roboti-zernoochisnix-mashin>*
6. *Sokolenko, L.E. (2010), Tekhnologichne obladnannia zernovykh vyrobnytstv, KONDOR, Kyiv, 496 p.*

7. Chursinov, Y.O., Kudriavtsev, I.M. and Lutsenko, M.V. (2022), «Rozrobka mobilnoi ustanovky dlia sortuvannia zernovykh vidkhodiv», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii. *Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, No. 2 (12), pp. 98–104, doi: 10.20998/2413-4295.2022.02.14.
8. Thomison, P.R., Miedaner, K.R., Nielsen, R.L. and Dorrance, A.E. (2006), «Improving Corn Grain Purity by Using Color-Sorting Technology», *Crop Management*, Vol. 5, Issue 1, doi: 10.1094/CM-2006-0309-01-RS.
9. Lazăr, E.I. and Țița, O. (2022), «Studies on the use of new technologies to improve the technological process of grain sorting», *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, Vol. 28, Issue 4, pp. 319–324.
10. Yaroshenko, S., Cherenkov, A. and Solodushko, M., «Ratsionalni sposoby zbyrannia ozymykh zernovykh kultur», [Online], available at: <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/8913-ratsionalni-sposoby-zbyrannia-ozymykh-zernovykh-kultur.html>
11. Sujatha, K. et al. (2023), «Innovation in Agriculture Industry by Automated Sorting of Rice Grains», *Evergreen*, Vol. 10, Issue 1, pp. 283–288, doi: 10.5109/6781076.
12. Wang, R., Liu, L., Guo, Y. et al. (2020), «Effects of deterioration and mildewing on the quality of wheat seeds with different moisture contents during storage», *RSC Advances*, Vol. 10, Issue 25, pp. 14581–14594, doi: 10.1039/D0RA00542H.

Євсєєнко Олег Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

<https://orcid.org/0000-0001-5432-1211>.

Наукові інтереси:

– розробка автоматизованих систем керування технологічними процесами.

E-mail: olegyevseienko@gmail.com.

Шалімов Олександр Євгенович – студент Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

<https://orcid.org/0009-0006-0607-2621>.

Наукові інтереси:

– комп'ютерні системи;

– математичне моделювання та нейронні мережі.

E-mail: Oleksandr.Shalimov@infiz.khpi.edu.ua.

Yevseienko O.M., Shalimov O.Ye.

Automation of grain condition monitoring in silos based on dynamic characteristics

The subject of this study is a grain silo as an object of automation and monitoring of key climatic parameters, including temperature, humidity, and air composition. Manual control of the silo climate presents a number of challenges, as it is difficult for a human operator to frequently monitor large volumes of grain. Effective microclimate monitoring is especially critical for large elevators, where storage volumes reach tens of thousands of tons. To achieve efficient analysis of the grain and silo microclimate, existing solutions were reviewed, and the grain storage processes and causes of spoilage were investigated in order to develop a scientifically justified approach to monitoring and controlling the silo and grain climatic parameters. Based on the conducted analysis, opportunities for improving existing methods were identified, and a system and algorithm for grain condition assessment were proposed. The analysis employed principles of automated control, transient characteristics were constructed, and the dynamic properties and self-leveling processes of the grain mass were investigated. As a result, the optimal spacing of temperature sensors relative to each other within the silo and the grain mass was determined. The proposed approach allows for optimal sensor placement, timely detection of spoiled grain, and prevention of its spread, significantly reducing product losses. The scientific novelty of this work lies in combining the analysis of the dynamic characteristics of the grain mass with self-regulation principles to develop a methodology for scientifically justified determination of the optimal spatial arrangement of sensors in silos. The practical significance lies in the feasibility of implementing the proposed approach in modern elevators and grain storage facilities. The proposed methodology contributes to increasing the efficiency of automated monitoring systems and reducing the operational costs of maintaining silos. The obtained results also have theoretical value for the further development of automation systems for grain storage processes.

Keywords: automated control; grain silo; elevator; grain mass microclimate; temperature and humidity regime; grain condition monitoring.

Стаття надійшла до редакції 01.12.2025.