

СТРУКТУРИЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ ТА ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ШАХТНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ БАЗОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Гайдай Т., канд. техн. наук, ст. наук. співробітник

<https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>,

Занько М., канд. техн. наук, ст. наук. співробітник

<https://orcid.org/0000-0001-8964-0706>

ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»

Лазаренко Н., <https://orcid.org/0000-0002-7454-6829>, e-mail: lazar2012@ukr.net

ДП «Київоблстандартметрологія»

Анотація

Функціонування шахтних зерносушарок супроводжується значним споживанням паливно-енергетичних ресурсів, що зумовлює потребу в детальному аналізі їх внутрішніх енергетичних потоків. **Метою** цієї роботи є аналітичне визначення та математичне формалізування теплового балансу конвективної шахтної зерносушарки, яку не обладнано системою енергозбереження. Розрахунок виконувався з урахуванням теплової потужності пальника для спалювання природного газу, витрат тепла на безпосереднє технологічне зневоднення зернової маси, акумуляційних процесів у металоконструкціях сушарки залежно від температури атмосферного середовища, а також викидів теплової енергії в атмосферу разом із відпрацьованим теплоагентом.

Методи. У ході виконання роботи застосовано аналітичні дослідження конструкції та внутрішніх технологічних потоків зерносушарки шахтного типу, розрахункові математичні методи, що базуються на фундаментальних законах термодинаміки, та експертний аналіз під час побудови функціональних залежностей.

Результати. Проведено комплексний аналіз теплового балансу зернової сушарки, в основу якого покладено теплову потужність газового пальника. Встановлено, що отримане тепло використовується на процес сушіння зерна, на початкове нагрівання металоконструкції шахти та її підтримання в процесі функціонування у визначеному температурному режимі. Основна частина тепла витрачається на зневоднення матеріалу й виходить зі зниженими температурними показниками із шахти в атмосферу. Розроблено та обґрунтовано формули для розрахунку отриманого тепла під час спалювання певної кількості газу, а також необхідної потужності пальника для сушіння зерна визначеної маси та фактичної вологості з урахуванням питомої теплоємності культури. Втрати тепла на металоконструкції диференційовано на два послідовні етапи: стартову акумуляцію енергії для розігрівання корпусу та подальшу компенсацію втрат через теплопровідність, конвекцію й випромінювання. Кількість тепла для підтримання стабільної температури розраховується як витрата за певний час роботи установки. Запропоновано формулу сумарної енергії для нагрівання металу та утримання температури протягом визначеного часу, що дало змогу структурувати й деталізувати остаточне рівняння теплового балансу немодернізованої установки.

Висновки. Тепловий баланс шахтної зерносушарки без застосування систем енергозбереження повністю визначається тепловою потужністю газового пальника. Основна частина теплової енергії витрачається на нагрівання зернової маси та випаровування вологи, тоді як металева конструкція сушарки спричиняє непродуктивні втрати теплоти на всіх етапах технологічного процесу. Розроблена модель враховує технічні характеристики конструкції, параметри теплообміну через її поверхню, теплофізичні властивості матеріалів, вплив метеорологічних умов, а також втрати теплоти з відхідними газами. Це формує теоретичну основу для комплексного оцінювання теплового балансу сушарки та визначення потенціалу її теплової модернізації.

Ключові слова: енергозбереження, енергоефективність, зерносушарка шахтного типу, теплові витрати, тепловий баланс, сушіння зерна.

Вступ. Постживна обробка та сушіння зерна — найбільш енергомісткі технологічні операції в агропромисловому секторі світової та національної економіки [Besrodny et al., 2025]. На сучасному ринку України представлено широкий спектр зерносушильного обладнання, серед якого провідне місце за обсягами застосування посідають установки шахтного типу [Кравчук та ін., 2018; Занько, 2019; 2020]. Ефективне функціонування таких агрегатів безпосередньо пов'язане зі споживанням значних обсягів теплової енергії, що генерується здебільшого газовими пальниками в складі конструкції зерносушарки [Новохацький та ін., 2022]. Висока вартість викопного палива та сучасні екологічні вимоги зумовлюють гостру актуальність пошуку методів підвищення ефективності процесів сушіння зерна.

У традиційних конвекційних сушарках значна кількість енергії втрачається разом із вологим і теплим повітрям, що виводиться, через що тепловий коефіцієнт корисної дії (ККД) іноді не перевищує 50 % [Nowak & Przystupa, 2019]. Для вирішення цієї проблеми розробляють алгоритми розрахунку енергетичних показників як для фактичних, так і для стандартних умов сушіння. Відомо, що енергетичні витрати найпоширеніших зерносушарок бункерного, колонного та шахтного типів становлять у межах 4350–5000 кДж на 1 кг випареної вологи [Пазюк, 2021].

Як альтернативу конвективному способу дослідники розглядають теплонасосні сушарки, застосування яких дає змогу знизити загальне споживання енергії приблизно на 10 % порівняно з використанням лише гарячого повітря [Narchegani et al., 2012]. Крім того, вивчають кінетику сушіння в мікрохвильовому полі з розподілом процесу на періоди постійної та спадної швидкості випаровування вологи [Boshkova et al., 2019]. Аналіз експериментальних даних термомеханічних сушарок з роторним термосифоном показує, що вони витрачають до 69,4 % енергії безпосередньо на фазовий перехід і випаровування вологи [Burdo et al., 2025].

З метою підвищення інтенсифікації пропонують двоступеневі режими сушіння за температур 65 та 50 °C [Snezhkin et al., 2020], а також електричні системи циркуляційного сушіння з рециркуляцією газів після їх конденсації та осушення [Wang et al., 2022]. Визначення оптимальних раціональних параметрів на основі узагальнення даних для різних культур (гречки, ячменю, вівса та пшениці) забезпечує високу інтенсивність процесу з мінімальними енерговитратами [Boshkova et al., 2019]. Створені енергоефективні сушарки різних типів підтверджують свої характеристики під час експлуатації дослідних та виробничих партій, вирішуючи комплекс завдань щодо економічності, екологічності та експлуатаційної доцільності установок [Sniezhkin et al., 2025].

Особливістю функціонування традиційних шахтних зерносушарок є те, що їх металева конструкція акумулює тепло і постійно підтримується в температурному режимі сушіння, через що значна частина теплової енергії витрачається некорисно. Водночас великі втрати відбуваються з відпрацьованим теплоагентом, який після контакту із зерном видаляється назовні за температури приблизно 50 °C [Занько, 2019]. У сушарках без системи енергозбереження цей потенціал повністю втрачається. Для вирішення зазначеної проблеми необхідно чітко структурувати теплові потоки в технологічному просторі сушарки: тепло, вироблене пальником, витрачене на сушіння, затрачене на нагрів металоконструкції та втрачене з відхідними газами.

З огляду на високу енергомісткість процесів конвективного зневоднення, **метою** цього дослідження є аналітичне визначення та математичне формалізування теплового балансу шахтної зерносушарки базової конструкції, яка функціонує без використання інтегрованих систем енергозбереження. Для досягнення поставленої мети було передбачено розв'язання низки взаємопов'язаних науково-практичних завдань, що охоплюють основні етапи теплотехнічного аналізу установки.

Методи і матеріали. Методологічну основу дослідження теплового балансу зерносушарки шахтного типу, яка функціонує без використання інтегрованих систем енергозбереження, становить комплексний підхід, що поєднує аналітичні методи, математичне моделювання та експертне оцінювання. Об'єктом аналітичних досліджень обрано конструктивні особливості та внутрішні технологічні потоки традиційного шахтного сушильного агрегату. Матеріалами для розрахунково-теоретичного аналізу слугували нормативно-довідкові теплофізичні параметри зернової маси та конструкційних елементів установки. Зокрема, під час моделювання корисного використання теплоти розглядали масив зерна кукурудзи з початковою вологістю 25 % та відповідною питомою теплоємністю, а для оцінювання акумуляційної здатності корпусу сушарки використовували фізико-механічні характеристики конструкційної сталі.

Для розв'язання поставлених завдань застосовано аналітичні дослідження конструкції сушарки, які дали змогу диференціювати загальний тепловий потік від спалювання природного газу на цільові складові та зони неефективних втрат. Побудову функціональних залежностей та остаточне структурування рівняння теплового балансу здійснювали з використанням розрахункових математичних методів, що базуються на фундаментальних законах термодинаміки та збереження енергії, зокрема на законі зміни внутрішньої енергії та закономірностях теплопередачі через теплопровідність, конвекцію й випромінювання. Метод експертного аналізу застосовували під час побудови функціональних залежностей та оцінювання отриманих результатів, що дало змогу пов'язати технічні характеристики бокових поверхонь шахти, параметри атмосферного середовища та викидів теплової енергії з відхідними газами у єдину деталізовану математичну модель. Таке поєднання методів і матеріалів забезпечило належну теоретичну обґрунтованість розробленого математичного апарату та об'єктивність висновків

щодо структури теплового балансу базових шахтних зерносушарок.

Результати. Тепловий баланс зерносушарки шахтного типу, в складі конструкції якої не застосовано систему енергозбереження, виконано з огляду на теплову продуктивність Q_n газового пальника —джерела теплової енергії для забезпечення процесу сушіння та компенсації теплових втрат під час функціонування сушарки. Отримана в пальнику теплота витрачається:

- безпосередньо на процес сушіння зерна — видалення вологи із зерна;
- на нагрів металевих елементів конструкції сушарки;
- на теплові втрати з конструкції сушарки;
- разом з видаленим із сушарки відпрацьованим теплоагентом.

З урахуванням викладеного формулу теплового балансу сушарки можна представити у вигляді:

$$Q_n = Q_c + Q_1 + Q_2 + Q_{e.m.}, \quad (1)$$

де: Q_n — тепло, отримане під час спалювання природного газу в пальнику, що подається в сушарку для сушіння зерна, ккал;

Q_c — тепло, що витрачене безпосередньо на процес сушіння зерна, ккал;

Q_1 — тепло, витрачене на нагрівання металевих елементів конструкції сушарки перед її виходом на робочий режим сушіння, ккал;

Q_2 — тепло, витрачене в процесі роботи сушарки в режимі проектної продуктивності, на підтримання температури металевої конструкції зерносушарки, отриманої перед її виходом на робочий режим сушіння, ккал;

$Q_{e.m.}$ — тепло, що видаляється з шахти сушарки після сушіння зерна в складі «відпрацьованого» теплоагента, ккал.

Формула для розрахунку отриманого тепла під час спалювання пальником сушарки певної кількості природного газу за 1 годину має наступний вигляд:

$$Q_{n1} = G_{11} \cdot q, \quad (2)$$

де: Q_{n1} — тепло, отримане під час спалювання природного газу, ккал /год;

G_{II} – маса спаленого природного газу, кг/год;

q – питома теплота згорання природного газу, ккал/кг.

Для розрахунку кількості теплоти, необхідної для сушіння зерна масою m , застосуємо формулу:

$$Q_c = c_3 \cdot m \cdot \Delta T, \quad (3)$$

де: Q_c – кількість теплоти, ккал;

c_3 – питома теплоємність зерна, що сушиться (для зерна кукурудзи з вологістю 25% – $c_3 = 0,527$ ккал/(кг·°C);

m – маса зерна в сушарці, кг.

Теплову потужність енергоджерела (кВт) і визначення згідно з нею кількість теплоти (ккал), що необхідна для сушіння зерна масою m , можна встановити розрахунковим шляхом. Відомо, що незалежно від виду зернової культури для зниження вологості 1 т зерна на 1 % необхідно підвести приблизно 15 кВт теплової потужності. Відповідно, для висушування N тонн зерна зі зменшенням вологості на 10 % протягом однієї години необхідно забезпечити продуктивність сушіння, еквівалентну $10N$ т·%, що потребує підведення теплової потужності величиною:

$$10N \text{ т·\%} \times 15 \text{ кВт/т·\%} = 150 N \text{ кВт}; \quad (4)$$

Різниця ΔT між кінцевою та початковою температурами зерна визначається за формулою:

$$\Delta T = T_k - T_n, \quad (5)$$

де: T_k – кінцева температурами зерна, °C;

T_n – початкова температура зерна, °C.

Витрати тепла на нагрівання металевих конструкцій (металоконструкцій) та підтримання температури в них впродовж всього часу сушіння зерна сушаркою складаються з двох етапів:

- витрати тепла на акумуляцію (розігрівання металу конструкції);

- витрати тепла на компенсацію поточних теплових втрат у навколишнє середовище.

Витрати тепла на розігрівання металу визначаються за законом збереження енергії (зміна внутрішньої енергії):

$$Q_I = c_m \cdot m \cdot \Delta T, \quad (6)$$

де: Q_I – витрати тепла на нагрівання металевих елементів конструкції сушарки перед її виходом на робочий режим сушіння, ккал;

m – маса металу частини конструкції зерносушарки, яка пов'язана безпосередньо з процесом сушіння та охолодження зерна, кг;

c_m – питома теплоємність металу (для конструкційної сталі – $c = 0,5$ КДж/кг·°C, або 500 Дж /кг·°C);

Різниця ΔT між кінцевою та початковою температурами металоконструкції визначається за формулою:

$$\Delta T = T_k - T_n, \quad (7)$$

де: T_k – кінцева температурами металоконструкції, °C;

T_n – початкова температура металоконструкції, °C.

Визначення витрат тепла на компенсацію втрат тепла через теплопровідність, конвекцію та випромінювання. Кількість тепла, що необхідне для підтримання стабільної встановленої температури процесу сушіння, розраховується як витрата тепла за певний час:

$$Q_2 = P_{\text{втр}} \cdot t, \quad (8)$$

де: Q_2 – тепло, затрачуване в процесі роботи сушарки, на підтримання отриманої за «стартового» нагрівання температури металевих конструкцій зерносушарки, ккал;

$P_{\text{втр}}$ – теплові втрати металоконструкції, Вт;

t – час підтримання температури на встановленому рівні (температура сушіння зерна), години.

Залежно від типу сушарки теплові втрати розраховуються за формулою:

$$P_{\text{втр}} = S \cdot U \cdot \Delta T, \quad (9)$$

де S – площа бокової поверхні конструкції сушарки, м²;

U – коефіцієнт теплопередачі (теплопровідність) металу, Вт/м²·°C;

ΔT – різниця між температурою поверхні металу та температурою повітря атмосферного середовища довкола, °C:

$$\Delta T = T_m - T_n, \quad (10)$$

де: T_m – кінцева температура метало-конструкції, °C;

T_n – температура повітря атмосферного середовища, °C.

Сумарна енергія, необхідна для нагрівання металу та подальшого підтримання температури металоконструкції протягом часу t :

$$Q_{заг} = Q_1 + Q_2 \quad (11)$$

В остаточному варіанті формула теплового балансу зерносушарки, яка працює без наявної в складі її конструкції системи енергозбереження буде мати загальний (12) та деталізований вигляди:

$$Q_n = Q_c + Q_1 + Q_2 + Q_{н.к.}; \quad (12)$$

$$G_{II} \cdot q = c_3 \cdot m \cdot \Delta T_3 + c_m \cdot m \cdot \Delta T_m + S \cdot U \cdot (T_m - T_n) t + Q_{в.т.}, \quad (13)$$

де $Q_{в.т.}$ – теплоагент, що видаляється з шахти сушарки після сушіння зерна і класифікується як «відпрацьований», ккал.

Обговорення. Порівняння сушарок на основі показників енергоефективності, розрахованих безпосередньо з результатів випробувань за різних умов експлуатації (початкова та кінцева вологість зерна, параметри атмосферного повітря), є складним і не дає об'єктивних висновків [Nowak & Przystupa, 2019]. Застосування запропонованого математичного підходу дає змогу формалізувати та деталізувати складові теплового балансу шахтної зерносушарки незалежно від змінних зовнішніх чинників.

Результати аналізу показують, що значна частина підведеної енергії витрачається на нагрівання й підтримання температури корпусу сушарки й викидається з відхідними газами. Це підтверджує доцільність пошуку нових технологічних рішень, описаних у сучасній літературі. Зокрема, підвищення енергоефективності сушіння насіннєвого зерна можна досягти інтеграцією в схему теплонасосної установки з тризонним розподілом температур (80 °C,

50 °C та зона охолодження) [Пазюк, 2021]. Незважаючи на енергоспоживання компресора, такий підхід знижує загальні витрати енергії приблизно на 10 % порівняно з суто конвективним нагріванням гарячим повітрям [Harchegani et al., 2012].

Ефективною альтернативою є також системи рециркуляції відхідних газів після їх конденсації та осушення, які забезпечують питоме споживання тепла на рівні 3185 кДж на 1 кг води [Wang et al., 2022]. Для порівняння, одночасне мікрохвильово-конвективне енергопостачання без попереднього підігрівання повітря також мінімізує питоме споживання енергії [Boshkova et al., 2019], а термомеханічні сушарки з роторним термосифоном спрямовують більшу частину енергії (69,4 %) безпосередньо на випаровування вологи [Burdo et al., 2025].

Впровадження двостадійних режимів (наприклад, 65 °C і 50 °C) забезпечує високу інтенсивність випаровування вологи, зберігаючи коефіцієнт проростання насіння до 99 % та показуючи енергетичну ефективність на рівні 62 % порівняно з раціональним одностадійним режимом [Snezhkin et al., 2020]. Однак впровадження будь-якої з цих енергоощадних технологій для модернізації існуючих шахтних сушарок потребує чіткого знання базового теплового балансу, який і був формалізований у даному дослідженні у вигляді структурованої математичної моделі (13). Це створює надійне теоретичне підґрунтя для розрахунку потенціалу енергозбереження та оцінювання доцільності теплової модернізації сушильних агрегатів.

Висновки. Авторами обґрунтовано структуру теплового балансу, згідно з якою енергетичні потоки зерносушарки шахтного типу, що працює без системи енергозбереження, повністю визначаються тепловою потужністю газового палиника, який використовується як джерело енергії для генерації теплоагента. Встановлено, що основна частина генерованого тепла витрачається на корисну технологічну роботу – нагрівання зернової маси та безпосереднє відокремлення (ви-

паровування) вологи із зерна.

Доведено негативний вплив акумуляційних процесів у корпусі установки, де металева конструкція сушарки виступає активним чинником неефективного розсіювання теплової енергії на всіх етапах її функціонування — як під час виходу на заданий робочий режим, так і в процесі тривалої експлуатації. Метал шахти поглинає теплову енергію під час «стартового» розігрівання, а також потребує безперервного підведення додаткового тепла для підтримання стабільної температури конструкційних елементів упродовж усього часу сушіння.

Математично конкретизовано та деталізовано поточні втрати енергії, що відбуваються через конструкційні елементи та технологічні викиди установки. Розроблений апарат дає змогу точно розрахувати витрати тепла залежно від геометричних параметрів бічної поверхні сушарки, теплопровідності конструкційного металу та різниці між температурою стінок шахти й атмосферного середовища. Крім того, формалізовано механізм викидів енергії в навколишнє середовище з відпрацьованим теплоагентом, а також за рахунок процесів конвекції та випромінювання. Отримані залежності створюють об'єктивну базу для подальшого оцінювання потенціалу енергозбереження та проектування систем теплової модернізації шахтних зерносушарок.

Список літератури

Занько, М. (2019). Шляхетна шахта. Конструкція, елементна база та особливості процесів сушіння зерна зерносушарок шахтного типу. *ЗЕРНО*. № 05. С. 196-199.

Занько, М. Шахтні ландшафти. *ЗЕРНО*. 2020. № 2. С. 188-195.

Новохацький, М., Занько, М., Шустік, Л., Гайдай, Т. (2022). Дослідження якості сушіння зерна кукурудзи сушаркою моделі Stela Agrodry MDB-XN 4/15-SU в жорсткому режимі. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, № 30 (44), 158-168. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-16](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-16)

[http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-16](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-16)

Кравчук, В., Занько, М., Лисак, О. (2018). Аналіз будови та функціонування зерносушарок шахтного типу. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*, №23 (37), 89-99. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2018-2-23\(37\)-9](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2018-2-23(37)-9)

Пазюк, В. (2021). Сучасні підходи до вирішення проблеми підвищення енергоефективності сушіння насіннєвого зерна. *Відновлювана енергетика*. 2021, (4 (67)), 90-99. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\)](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67)).

Bezrodny, M. K., Prytula, N. O., & Vovk, V. V. (2025). Heat pump grain drying plants. basic methods for increasing the efficiency grain drying processes. *Energy Technologies & Resource Saving*, 83(2), 42-54. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.04>

Boshkova, I., Volgusheva, N., Titlov, A., Titar, S., & Boshkov, L. (2019). Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 8 (97), 78-85. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154527>

Burdo, O., Bezbah, I., Bandura, V., Bezbah, S., Petrovskyi, V., & Osadchuk, P. (2025). Energy-efficient technologies for thermal treatment and drying of food products. *Journal of Central European Agriculture*, 26(2), 405-416. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4515>

Harchegani, M. T., Sadeghi, M., Emaami, M. D., & Moheb, A. (2012). Investigating energy consumption and quality of rough rice drying process using a grain heat pump dryer. *Australian Journal of Crop Science*, 6(4), 592-597. https://www.cropj.com/sadeghi_6_4_2012_592_597.pdf

Nowak, J., & Przystupa, W. (2019). Methods for assessing energy efficiency of grain dryers. *Agricultural Engineering*, 23(2), 39-47. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0015>

Snezhkin, Y. F., Paziuk, V. M., Petrova, Z. O., & Tokarchuk, O. A. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *Inmateh-Agricultural Engineering*, 61(2), 183-192. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-16](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-16)

org/10.35633/inmateh-61-20

Sniezhkin, Y. (2025). Energy-efficient dryers developed at the institute of engineering thermophysics of nas of Ukraine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 50(4), 5–17. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.1>

Wang, G., Qiao, F., & Yue, Z. (2022). Research on energy saving and environmental protection electric power grain circulation drying system. *Journal of Advanced Thermal Science Research*, 9, 38–49. <https://doi.org/10.15377/2409-5826.2022.09.4>.

References

Bezrodny, M. K., Prytula, N. O., & Vovk, V. V. (2025). Heat pump grain drying plants: Basic methods for increasing the efficiency of grain drying processes. *Energy Technologies & Resource Saving*, 83(2), 42–54. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.04>

Boshkova, I., Volgusheva, N., Titlov, A., Titar, S., & Boshkov, L. (2019). Assessment of efficiency of drying grain materials using microwave heating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 8(97), 78–85. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154527>

Burdo, O., Bezbah, I., Bandura, V., Bezbah, S., Petrovskyi, V., & Osadchuk, P. (2025). Energy-efficient technologies for thermal treatment and drying of food products. *Journal of Central European Agriculture*, 26(2), 405–416. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/26.2.4515>

Harchegani, M. T., Sadeghi, M., Emani, M. D., & Moheb, A. (2012). Investigating energy consumption and quality of rough rice drying process using a grain heat pump dryer. *Australian Journal of Crop Science*, 6(4), 592–597. https://www.cropj.com/sadeghi_6_4_2012_592_597.pdf

Kravchuk, V., Zanko, M., & Lysak, O. (2018). Analiz budovy ta funktsiiuvannia zernosusharok shakhtnoho typu. *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniki i tekhnologii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*, 23(37), 89–99. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2018-2-23\(37\)-9](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2018-2-23(37)-9)

Novokhatskyi, M., Zanko, M., Shustik, L., & Haidai, T. (2022). Doslidzhennia yakosti sushinnia zerna kukurudzy susharkoiu

modeli Stela Agrodry MDB-XN 4/15-SU v zhorstkomu rezhymi. *Tekhniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniki i tekhnologii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy*, 30(44), 158–168. [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-16](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-16)

Nowak, J., & Przystupa, W. (2019). Methods for assessing energy efficiency of grain dryers. *Agricultural Engineering*, 23(2), 39–47. <https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0015>

Paziuk, V. (2021). Suchasni pidkhody do vyrishennia problemy pidvyshchennia enerhoefektyvnosti sushinnia nasinnievo-ho zerna. *Vidnovliuvana Enerhetyka*, 4(67), 90–99. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).90-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).90-99)

Sniezhkin, Y. F., Paziuk, V. M., Petrova, Z. O., & Tokarchuk, O. A. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *Inmateh – Agricultural Engineering*, 61(2), 183–192. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-20>

Sniezhkin, Y. (2025). Energy-efficient dryers developed at the Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 50(4), 5–17. <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.1>

Wang, G., Qiao, F., & Yue, Z. (2022). Research on energy saving and environmental protection electric power grain circulation drying system. *Journal of Advanced Thermal Science Research*, 9, 38–49. <https://doi.org/10.15377/2409-5826.2022.09.4>

Zanko, M. (2019). Shliakhetna shakhta. Konstruktsiia, elementna baza ta osoblyvosti protsesiv sushinnia zerna zernosusharok shakhtnoho typu. *ZERNO*, 5, 196–199.

Zanko, M. (2020). Shakhtni landshafty. *ZERNO*, 2, 188–195.

Надійшла до редакції 05.05.2026 р.;
переглянуто 08.05.2026 р.;
прийнято до друку 29.05.2026 р.;
опубліковано 29.06.2026 р.

Received 05/05/2026;
revised 05/08/2026;
accepted 05/29/2026;
published 06/29/2026

UDC 631.365.2

STRUCTURING OF ENERGY FLOWS AND HEAT BALANCE OF A BASIC-CONFIGURATION SHAFT GRAIN DRYER

Haidai T., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

<https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>,

Zanko M., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

<https://orcid.org/0000-0001-8964-0706>)

L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Lazarenko N.,

<https://orcid.org/0000-0002-7454-6829>, e-mail: lazar2012@ukr.net

SE “Kyivoblstandartmetrology”

Summary

The operation of shaft-type grain dryers is accompanied by significant consumption of fuel and energy resources, which drives the need for a detailed analysis of their internal energy flows. The objective of this study is the analytical determination and mathematical formalization of the heat balance of a convective shaft-type grain dryer operating without an integrated energy-saving system. The calculation was performed taking into account the thermal power of the burner for natural gas combustion, heat consumption for the direct technological dehydration of the grain mass, accumulation processes in the dryer's metal structures depending on the ambient air temperature, and the removal of thermal energy into the environment together with the spent heat agent.

Methods. *In the course of the study, analytical investigations of the design and internal technological flows of the shaft-type grain dryer, calculation mathematical methods based on the fundamental laws of thermodynamics, and expert analysis were applied to construct functional dependencies.*

Results. *A comprehensive analysis of the heat balance of the grain dryer was carried out, based on the thermal power of the gas burner. It was established that the received heat is utilized for the grain drying process, the initial heating of the shaft metal structure, and its maintenance during operation within a specified temperature regime. The main part of the heat is spent on the dehydration of the material and leaves the shaft into the atmosphere with reduced temperature indicators. Formulas were developed and substantiated for calculating the heat received during the combustion of a certain amount of gas, as well as the required burner power for drying grain of a specified mass and actual moisture content, taking into account the specific heat capacity of the crop. Heat losses through the metal structures were differentiated into two sequential stages: the starting accumulation of energy for heating the casing and the subsequent compensation for losses due to thermal conductivity, convection, and radiation. The amount of heat required to maintain a stable temperature is calculated as consumption over a certain operating time of the plant. A formula for the total energy required for heating the metal and maintaining the temperature over a specified time was proposed, which allowed structuring and detailing the final heat balance equation of the non-modernized plant.*

Conclusions. *The heat balance of a shaft-type grain dryer without an energy-saving system is completely determined by the power of the burner for gas combustion. The primary heat consumption occurs during grain heating and moisture separation, whereas the metal structure accounts for inefficient heat consumption at all stages of operation. The developed model takes into account the technical parameters of the surface, thermal conductivity of the structure, weather conditions, and energy removal with waste gases, creating a theoretical basis for assessing the potential for thermal modernization of the equipment.*

Keywords: *energy saving, energy efficiency, shaft-type grain dryer, heat losses, heat balance, grain drying.*