ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА

УДК 631.365 dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2023-1-32(46)-19

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ТЕХНОЛОГІЯХ СУШІННЯ ЗЕРНА: ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ

Халін С., канд. екон. наук,
https://orcid.org/0000-0002-7510-5056
Занько М., канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,
https://orcid.org/0000-0001-8964-0706),
Гайдай Т., канд. техн. наук,
https://orcid.org/0000-0001-9141-4820
Лень О.,
https://orcid.org/0000-0001-9141-4820
УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Анотація

Метою роботи *є дослідження перспективних технічних і технологічних рішень щодо енергозбереження та використання альтернативних джерел енергії у технологіях сушіння зерна та зерновиробництві.*

Методи і матеріали. *Отримані результати базуються на експлуатаційній та аналітичній оцінці сушарок шахтного типу з гібридними системами теплозабезпечення, технологічного принципу їхньої роботи, процесів сушіння зерна та показників енергозбереження.*

Результати. *На основі досліджень процесів енергозбереження у технологіях сушіння зерна встановлено, що на сьогоднішній день актуальним є застосування зернових сушарок із гібридними системами теплозабезпечення при умові впровадження в їхню конструкцію прогресивних технічних і технологічних рішень – системи пересічного потоку повітря та рекуперації тепла, вбудованого теплогенератора, системи високопродуктивного вироблення та споживання теплоагента тощо.*

У конструкції таких сушарок можливе використання всіх поширених джерел тепла: газу, нафти, біопалива та радіаторів гарячої води, а також систем прямого й непрямого нагрівання зерна. Для отримання тепла з біопалива необхідне відповідне технологічне обладнання, функцію якого виконують біотеплогенератори та комплекси на їхній базі.

Теплогенераторні комплекси гібридного типу, які спалюють біосировину та природний газ, для збільшення продуктивності утворення теплоагента додатково мають теплообмінники для отримання гарячого повітря, які можуть працювати як автономно, так і разом із газовими пальниками, що дає змогу значно заощадити на енергоресурсах.

Висновки. *Технологічні рішення застосування зерносушарок шахтного типу з гібридними системами теплозабезпечення, здатних працювати на твердому біопаливі, що є вторинним продуктом сільсько- та лісогосподарського виробництва, і забезпечувати його спалювання спеціалізованим технологічним обладнанням – біотеплогенераторами, дають змогу частково відмовитися від традиційного енергоносія (природного газу), зменшити питомі витрати палива і досягти тим самим енергозбереження при виробництві теплоагента.*

Ключові слова: *зернова сушарка, теплогенератор, тверде біопаливо, процеси спалювання та сушіння, теплоагент, енергоефективність, сушіння зерна.*

Вступ. Упровадження інновацій у технологіях сушіння зерна є актуальним напрямком у контексті здоров'я споживачів і захисту навколишнього середовища. До такого типу інновацій відноситься використання енергії з відновлюваних джерел (сонячна енергія, геотермальна енергія, енергія від спалювання біомаси) і зведення до мінімуму використання викопного палива, що сприяє розвитку чисті-

шого виробництва [Dafnomilis et al., 2017; Chojnacka et al, 2021].

Процес сушіння є основним методом консервування та найбільш диверсифікованою одиничною діяльністю в переробці сільськогосподарського зерна [Hashim et al, 2022], який істотно впливає на якість його висушення та виконання операцій фрезерування та шліфування [Balandran-Quintana, 2018]. Процес сушіння включає комбінацію взаємодії тепла, вологи й імпульсу, під час якого вологість зерна знижується до бажаного рівня (наприклад, з 8,5 до 13,0% для рису, з 8,0 до 13,5% для кукурудзи тощо) [Arul et al., 2019; Ziegler et al., 2021]. Сушіння зерна є дуже енерговитратним процесом, енергоємність якого є зворотною до енергоефективності [Keum et al., 1984]. Методи сушіння та різні умови обробки (інтенсивність тепла, швидкість повітря, тривалість сушіння тощо) можуть значно вплинути на якість кінцевих висушених продуктів (висока вологість, тріщини, підгорілі зерна тощо) [Jodicke et al., 2019].

Скорочення запасів викопного палива та значні витрати на енергоносії перенесли акцент досліджень на зменшення споживання енергії для сушіння зерна при збереженні потужності сушарки та якості зерна. Оскільки споживання енергії для сушіння є відносно великим, то рекуперація та повторне використання принаймні частини викидної енергії може значно зменшити загальне споживання енергії в існуючих системах сушіння [Jimoh et al., 2023]. У центрі уваги інноваційних систем сушіння насіння та зерна – гібридні методи з використанням мікрохвиль, інфрачервоного випромінювання та ультразвуку, які дають змогу зменшити споживання невідновлюваної енергії до 80% [Dafnomilis et al., 2017]. Гібридні сушарки включають технологію, коли два чи більше механізмів методу сушіння поєднуються в одну операцію. Окрім того, додаткові процедури, наприклад, ультразвук чи вібрація, можна поєднувати з процедурами сушіння. Незважаючи на те, що технології сушіння зерна нещодавно були вдосконалені й покращені, сьогодні зерносушарки працюють на піку свого потенціалу з обмеженнями. На економічні показники процесу сушіння зерна впливає вид біопалива, теплогенератор і його продуктивність, тип сушарки й особливості її функціювання [Wang et al., 2020; Новохацький та ін., 2022].

Постановка завдань. У зв'язку з воєнним станом в Україні постало питання альтернативної заміни природного газу іншими видами палива, зокрема біопаливом, до якого відноситься побічний урожай сільсько- та лісогосподарського виробництва (солома, дрова, пелети) [Новохацький та ін., 2022; Халін, Занько, 2022]. Таке біопаливо задовільно спалюється в спеціальному технологічному обладнанні зерносушарок – теплогенераторах, спроможних забезпечити теплову потужність від 500 до 3000 кВт [Занько, 2019]. До складу такого обладнання входять пальник і бункер для палива. Отримані при спалюванні біопалива високотемпературні гази, іскри, дрібні недопалені частинки спрямовуються до окремого теплообмінника, де і здійснюється утворення чистого теплоагента.

Метою цієї роботи є дослідження перспективних технічних і технологічних рішень щодо енергозбереження та використання альтернативних джерел енергії у технологіях сушіння зерна та зерновиробництві.

Методи і матеріали. Результати досліджень базуються на аналітичній оцінці експлуатаційних характеристик зерносушарок шахтного типу з гібридними системами теплозабезпечення.

Проаналізовано особливості конструкції зерносушарок і технологічного принципу роботи в процесі сушіння зерна з використанням таких енергоефективних технологічних рішень, як системи пересічного потоку повітря та рекуперації тепла, вбудовані біотеплогенератори, теплообмінники для отримання гарячого повітря, які можуть працювати як автономно, так і разом із газовими пальниками; теплоізоляція стінок зерносушарки тощо.

Результати. З метою зменшення економічних затрат на процес сушіння зерна шляхом належного управління енергією наразі ефективно застосовуються сушарки шахтного типу із системою пересічного потоку повітря. У конструкції таких сушарок можливе використання всіх поширених джерел тепла: газу, нафти, біопалива та радіаторів гарячої води, а також систем прямого та непрямого нагрівання зерна [Занько, 2019]. Системи пересічного потоку повітря у сушарках шахтного типу дають змогу забезпечити достатню регенерацію тепла і зменшити витрати палива та споживання теплової потужності. Полум'я, що утворюється під час горіння, рівномірно розподіляється шириною шахти, а застосовані форсунки з повітряним дуттям мають особливий розподіл полум'я, що не потребує камери згорання. Основною системою, що забезпечує сушарку теплом, є пальник, який працює на природному газі чи пропані [Занько, 2019; Герасименко, 2023].

Енергоефективність процесу сушіння залежить від виду палива (газ, дизель, тріска, пелети, солома, зернові відходи тощо). При спалюванні достатньої кількості біопалива можливо отримати тепло в обсязі, достатньому для забезпечення процесів сушіння (табл. 1) з продуктивністю, властивою зерновим сушаркам.

Відповідно до таблиці 1, витрати енергоносія залежать від його вологості й калорійності. Зокрема, для зниженні вологості зерна на 1% витрата енергоносія для тріски, пелет, гранул складає 2-3 кг на 1 тону зерна, а для лушпиння соняшнику і зернових, тюків соломи – 4 кг відповідно.

Для отримання тепла з біопалива необхідне відповідне технологічне обладнання, функцію якого виконують біотеплогенератори та комплекси на їхній базі. Сьогодні на ринку України використовуються теплогенератори, що характеризуються різноманіттям конструкційного виконання та значним діапазоном теплової продуктивності. Найбільше представлені теплогенератори з тепловою потужністю 5-10 МБ. Вони задовільно забезпечують технологічні потреби зерносушарок середньої продуктивності, проте для теплозабезпечення високопродуктивних сушарок необхідні теплогенератори з тепловою продуктивністю на рівні 20 МБ, яких на ринку України фактично немає [Сухіна,

Таблиця 1 – Енергетичні показники різних видів палива
Джерело: [Котли повітряні..., 2021]

Вид палива	Один. вим.	Питома теплота згорання			Еквівалент		
		кКал	кВт	МДж	Природний газ, м³	Диз. паливо, л	Мазут, л
Метан	1 м³	11950	13,8	50,03	1,494	1,160	1,232
Газ зріджений	1 кг	10800	12,5	45,20	1,350	1,049	1,113
Пропан	1 м³	10885	12,6	45,57	1,361	1,057	1,122
Газ природний	1 м³	8000	9,3	33,50	-	0,777	0,825
Пеллета з деревини	1 кг	4100	4,7	17,17	0,513	0,398	0,423
Пеллета із соломи	1 кг	3465	4,0	14,51	0,433	0,336	0,357
Пеллета з лушпиння соняшника	1 кг	4320	5,0	18,09	0,540	0,419	0,445
Свіжозрубана деревина (W=50...60%)	1 кг	1940	2,2	8,12	0,243	0,188	0,200
Тріски	1 кг	2610	3,0	10,93	0,326	0,253	0,269
Лушпиння соняшника, сої	1 кг	4060	4,7	17,00	0,508	0,394	0,419
Солома	1 кг	3750	4,3	15,70	0,469	0,364	0,387

Таблиця 2 – Експлуатаційні показники зерносушильних комплексів
Джерело: [Занько, 2022]

Найменування показників	Значення показників	
Тип сушарки	«NEZ» (ТОВ «Новий елеватор»)	
Кількість сушарних шахт	1	2
Продуктивність (при зниженні вологи з 28 до 14%), т/добу	220	456
Витрати палива (деревні тріски), м³/год	3,4	6,8
Номінальна потужність силових електроагрегатів, кВт	78	156
Споживання електроенергії, кВт	55	110

2023]. Причиною відсутності є габаритні розміри такого типу теплогенераторів та їхня складна конструкція. Рішенням цієї проблеми може стати технологічне поєднання кількох теплогенераторів потужністю 5-10 МБ. Так, для сушіння зерна в середніх і великих підприємствах із продуктивністю до 700 тонн за добу в складі зерносушильного комплексу на базі двох послідовно з'єднаних сушарок (наприклад «NEZ», ТОВ «Новий елеватор») необхідне використання двох або навіть трьох теплогенераторів (табл. 2).

Послідовне з'єднання сушарок (рис. 1) за допомогою транспортного обладнання – безперервний конвеєр з двома циклами сушіння, що дає змогу в потоковому режимі знижувати вологість зерна кукурудзи на більше, ніж 20% в ощадному температурному режимі без перегріву й пошкодження зерна. Окрім того, така схема сушіння підвищує загальну продуктивність обладнання та дає змогу вести економні витрати енергоносія.

Теплогенераторні комплекси гібридного типу, які спалюють біосировину та природний газ, для збільшення продуктивності утворення теплоагента додатково у своєму складі мають теплообмінники для отримання гарячого повітря. Їхня теплова потужність при цьому досягає 3000 кВт.

Зернова сушарка, укомплектована теплогенераторами гібридного типу, при спалюванні природного чи зрідженого газу або біопалива працює так:

- при сушінні зерна ранніх зернових та олійних культур, де необхідна температура агента сушіння 75-95°С, працює з використанням теплогенератора на біосировині;

Рисунок 1 – Зерносушильний комплекс, побудований на базі трьох сушарок

- при сушінні зерна кукурудзи або фуражного зерна, де необхідна температура агента сушіння 95-120°С, додатково до працюючого біотеплогенератора включається газовий пальник, що разом забезпечує необхідну теплову потужність. При цьому відбувається суттєва економія газу (до 50%) порівняно із сушарками, що працюють виключно на газу.

Гібридна система вироблення теплоагента успішно реалізується в проектах українських зерносушильних комплексів. Свідченням того є сушильний комплекс на базі зерносушарки «Stela AgroDry» моделі «MDB-XN 3/16-SB»: у його складі використано біотеплогенератор (компанія «GRECO TM») (рис.2) і лінійний газовий пальник (рис. 3).

З огляду на різновид сушарок кожна з них має свій технологічний принцип сушіння. У випадку підвищеної вологості зерна (35% і більше) застосовуються установки послідовно з'єднаних двох шахтних сушарок і подвійний пропуск зерна за такою схемою: сушіння – охолодження – досушування – охолодження – складу-

Рисунок 2 – Біотеплогенератор вироблення теплоагента

Рисунок 3 – Система постачання газу до гібридної системи вироблення теплоагента (загальний вигляд у складі сушарки)

вання. За повного сушіння однієї партії зерна, як правило, шукають компроміси у процесах і режимах сушіння і економії палива. У цьому випадку в складі елеваторів біля сушарки розміщуються та застосовуються для охолодження зерна силоси з активним вентилюванням.

Для підприємств, які мають надлишки теплової енергії у вигляді пару чи гарячої води, сушарки додатково комплектуються теплообмінниками, які можуть працювати як автономно, так і разом із газовими пальниками, що дає змогу значно заощадити на енергоресурсах.

Газові пальники здатні забезпечити сушарку теплом на рівні 10 МВт. Такої потужності достатньо, щоб сушарка сушила зерно кукурудзи з продуктивністю до 900 т/год. До позитивних особливостей газового пальника можна віднести можливість легкого регулювання його потужності в діапазоні від 10 % до 100 %.

В основу енергозберігаючого принципу сушіння покладено принцип рекуперації (повторного використання) тепла нагрітого сухого повітря, що пройшло крізь шар гарячого зерна, яке охолоджується після сушіння, за рахунок чого значно зменшується витрата палива і підвищується ККД сушарки. При цьому зовнішнє холодне повітря також спочатку проходить через нижню зону сушарки, де відбувається охолодження гарячого і вже висушеного зерна.

При проходженні через тепле зерно холодне повітря нагрівається до температури близько 100°С (різна температура для зерна різних культур) і тільки після цього надходить до пальника теплогенератора, де продовжує нагріватись до температури близько 300°С. Аналогічний принцип застосовується також при роботі сушарки в холодну пору року навіть при мінусовій температурі. Таким чином, для підігріву вже достатньо теплого повітря до температури, при якій здійснюється процес сушіння зерна, потрібно використати менше палива.

Рекуперація тепла здійснюється постійно протягом циклу роботи зерносушарки. Застосування системи рекуперації разом із утепленою шахтою, економними пальниками та системою керування потоками сушильного агенту дає реальні зниження витрат енергоносія – до 30% порівняно з сушарками без рекуперації тепла.

Як приклад розглянемо сушарку «Stela AgroDry» моделі «MDB-XN 3/16-SB», яка має три технологічні зони (рис. 4): більш активне сушіння – у верхній частині сушарки, менш активне сушіння – у середній частині сушарки і процес рекуперації – у нижній частині конструкції. Роздільні потоки атмосферного повітря та теплоагента надходять до сушарки окремими потоками у трьох зонах [Новохацький, Занько та ін., 2022].

Перша зона (верхня зона сушарки) забезпечує основну частину процесу сушіння зерна. У цій зоні розміщено основний газовий пальник. До нього спрямовано автономний потік атмосферного повітря, яке забезпечує процес спалювання газу

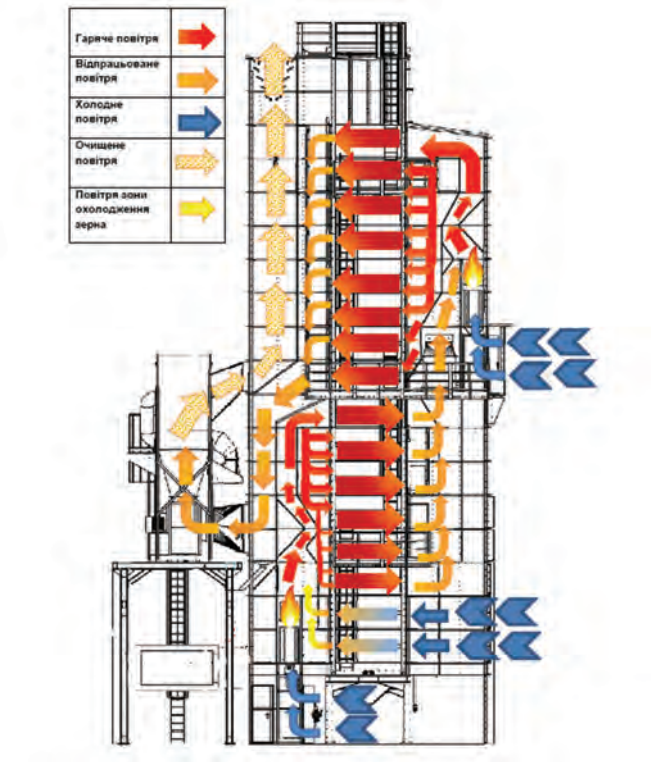

Рисунок 4 – Принципова конструкційно - технологічна схема зерносушарки «Stela AgroDry» моделі «MDB-XN 3/16-SB»

та утворення при цьому теплоагента, що пронизує шахту сушарки з зерном.

Подальший процес сушіння зерна здійснюється в другій зоні сушарки (середній), що знаходиться під сушильною секцією. Забезпечення її теплоагентом здійснюється від пальника, розміщеного в нижній частині сушарки. Установлені для цієї секції теплова потужність пальника та продуктивність теплоутворення обумовлюють потік теплоагента зі значно меншою температурою, ніж у зоні основного сушіння.

Теплоагент після проходження цієї секції сушарки тепловими каналами спрямовується до продуктів згорання основного пальника сушильної зони. Свіже повітря при цьому змішується з використаним, що виходить із охолоджувальних елементів. При роботі пальника суміш свіжого повітря та топкових газів нагрівається до «робочої» температури 115-120°С і спрямовується через шахту сушильної секції для сушіння зерна. Таким чином, тепло, що збереглося в сушильному продукті, повторно використовується в подальшому процесі сушіння.

Третя зона сушарки (зона рекуперації) розміщена в нижній частині конструкції під секцією охолодження. Проходячи через цю частину сушарки, холодне атмосферне повітря підігрівається і спрямовується відповідними каналами до нижнього пальника, де змішується з іншим прямим потоком холодного повітря і спрямовується вже на сушильну секцію. Тобто, залишкове тепло, наявне у фактично висушеному продукті зони охолодження, використано для часткового нагрівання холодного атмосферного повітря. За рахунок рекуперації тепла забезпечується економія витрат палива.

Відповідно до обраної комплектації сушарки джерелами вироблення теплоагенту можливі декілька режимів роботи сушарки та теплогенератора: одночасна робота нижнього і верхнього газових пальників; робота лише нижнього газового пальника; робота теплогенератора на біопаливі та верхнього газового пальника; робота теплогенератора на біопаливі разом із нижнім і верхнім газовими пальниками.

Зниження енерговитрат сушарки можливе також при застосуванні теплоізоляції за рахунок зменшення непродуктивної тепловіддачі з її поверхні. Для цього на всіх гарячих зонах сушарки з внутрішнього боку встановлюється теплоізоляція – утеплення спеціальними матами з теплоізоляційної технічної тканини. Зовні сушарка додатково закривається листами з оцинкованої сталі. Це дає змогу зменшити витрати тепла на нагрів металевих конструкцій сушарки, скоротити непродуктивні втрати палива через зовнішнє теплове випромінювання і заощадити значну кількість енергії [Гайдук, 2021].

Обговорення. Останнім часом використовується багато різних технологій сушіння зерна: сушарки з псевдозрідженим шаром, сушарки з нерухомим шаром, інфрачервоні сушарки, мікрохвильові сушарки, вакуумні та сублімаційні сушарки, ультразвукова діелектрика та осушення тощо [Jimoh et al., 2023].

Враховуючи реалії сьогодення, на дум-

ку авторів, в Україні найефективнішими наразі є сушарки, що працюють на біопаливі. Найголовніша перевага застосування твердопаливних котлів у таких сушарках – економія газу, що є доцільним рішенням у період енергетичної кризи. Іншою перевагою є висока тепловіддача та низька вартість біопалива.

У якості теплогенератора для сушарок шахтного типу можуть бути застосовані також цегляні печі на дровах, які мають теплову потужність до 10 МВт. Зерно в таких печах сушиться прямим нагріванням без теплообмінника, що здешевлює вартість теплогенератора/печі та самого процесу сушіння. Печі на дровах відрізняються високою тепловою продуктивністю і зручністю експлуатації. Витрата дров залежно від їхньої вологості й породи деревини при зниженні вологості зерна на один відсоток – 3-5 кг на 1 т зерна [Халін, Занько, 2022].

Використання пальників, що працюють на зрідженому газі, дає змогу зменшити споживання теплової й електричної енергії в 1,5-2 рази (на 15 % та 40 % відповідно) порівняно із зерносушарками, які працюють на нагнітальному принципі [Занько, 2019].

За результатами аналізу іноземних джерел, найпоширенішим типом високопродуктивної сушарки в аграрному секторі є сушарка безперервного потоку. Завдяки застосованій автоматизації така сушарка підтримує задані параметри сушіння на постійному рівні, а використані техніко-технологічні рішення дають змогу досягти низьких витрат палива [Debowski et al., 2021].

Висновки. За результатами досліджень процесів енергозбереження у технологіях сушіння зерна встановлено, що на сьогодні актуальним є застосування зернових сушарок із гібридними системами теплозабезпечення при умові впровадження в їхню конструкцію прогресивних технічних і технологічних рішень – системи рекуперації тепла, вбудованого теплогенератора, системи високопродуктивного виробленя та споживання теплоагента тощо.

Сушарки гібридного типу здатні працювати на твердому біопаливі, що є вторинним продуктом сільсько- та лісогосподарського виробництва, і забезпечувати його спалювання спеціалізованим технологічним обладнанням – біотеплогенераторами. Такі технологічні рішення дають змогу частково відмовитися від традиційного енергоносія (природного газу), зменшити питомі витрати палива і досягти тим самим енергозбереження при виробництві теплоагента.

Перелік літератури

Гайдук, О. (2021). Як знизити витрати газу на елеваторі: економна зерносушарка, підготовка зерна до сушіння. Elevatorist.com URL: https://elevatorist.com/spetsproekt/157-kak-snizit-rashodyi-gaza-na-elevatore-ekonomnaya-zernosushilka-podgotovka-zerna-k-sushke-chast-1

Герасименко, І. (2023). Q&A: що треба знати про зерносушарки шахтного типу. Agravery. URL: https://agravery.com/uk/posts/show/qa-so-treba-znati-pro-zernosusarki-sahtnogo-tipu

Занько, М. (2019). Шляхетна шахта. Конструкція, елементна база, та особливості процесів сушіння зерна зерноносушарок шахтного типу. Зерно. № 6. С. 50-54.

Занько, М. (2020). Шахтні ландшафти. Конструктивні особливості шахтних сушарок. Зерно. № 2. С. 188-194.

Занько, М. (2022). Новий Елеватор. Нові підходи, нові можливості. Пропозиція. №1. С. 126-130.

Котли повітряні серії 2КСП. Настанова з експлуатації. (2021). НВТ-Технологія. м. Чернігів. р. С. 15. URL: https://nvt-tehno.com.ua/shop/kotly-na-drovah-dlya-nagreva-vozduha/

Новохацький, М., Шустік, Л., Занько, М. (2022). Зерносушильний комплекс виробництва ТОВ «Новий Елеватор»: особливості будови, функціювання та результати випробувань під час сушіння зерна кукурудзи. Техніка і технології АПК, № 4. С.7-14.

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. Вип. 30 (44), С.158-168.

Сухіна, А. (2023). Сушіння зерна: ще раз про енергоефективність та про енергонезалежність. Пропозиція. №2. С. 96-100.

Халін, С., Занько, М. (2022). Біотеплогенераторний комплекс роздільно-блочного типу: особливості будови та експлуатаційні показники. Техніка і технології АПК, № 4. С. 30-34.

Arul, G. P., Shanmugam, S., Veerappan, A. R., Kumar, P. (2019). Mathematical modeling and experimental studies on a dual inclined oscillating bed with double pass solar dryer for drying of non - parboiled paddy grains. Energy Sources A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 43(22): 2935-2946. https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1670754

Balandran-Quintana, R. R. (2018). Recovery of proteins from cereal processing by-products. In Sustainable recovery and reutilization of cereal processing by-products. Elsevier Ltd., pp 125-157. DOI: 10.1016/B978-0-08-102162-0.00005-8

Chojnacka, K., Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., ... & Kułażyński, M. (2021). Improvements in drying technologies - Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. Journal of Cleaner Production, 320, 128706. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128706

Dafnomilis, I., Hoefnagels, R., Pratama, Y. W., Schott, D. L., Lodewijks, G., & Junginger, M. (2017). Review of solid and liquid biofuel demand and supply in Northwest Europe towards 2030 – A comparison of national and regional projections. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 31-45 https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.108

Dębowski, M., Bukowski, P., Kobel, P., Bieniek, J., Romański, L., & Knutel, B. (2021). Comparison of Energy Consumption of Cereal Grain Dryer Powered by LPG and Hard Coal in Polish Conditions. Energies, 14(14), 4340. https://doi.org/10.3390/en14144340

Hashim, N., Onwude, D. I., Maringgal, B. (2022). Technological advances in postharvest management of food grains. Research and Technological Advances in Food Science. pp. 371-406. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824369-5.00016-6

Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Man, H. C., Jahari, M., & Onwude, D. I. (2023). Recent Advances in the Drying Process of Grains. Food Engineering Reviews, 1-29. https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7

Jodicke, K., Arendta, S., Hofachera, W., Speckleb, W. (2019). The influence of process parameters on the quality of dried agricultural products determined using the cumulated thermal load. Drying Technol. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1568254

Keum, D. H., Lee, Y. K., Lee, K. S., & Han, J. H. (1984). Reuse of Exhaust Heat and Improvement in Fuel Efficiency of Grain Dryer. Journal of Biosystems Engineering, 9(2), 65-73.

Wang, G., Wu, W., Qiao, F., Fu, D., Liu, Z., Han, F. (2020). Research on an electric energy-saving grain drying system with internal circulation of the drying medium. Journal of Food Process Engineering. 43:9 e 13476. https://doi.org/10.1111/jfpe.13476

Ziegler, V., Paraginski, R. T., Ferreira, C. D. (2021). Grain storage systems and effect of moisture, temperature and time on grain quality – A review. J Stored Prod Res 91:101770. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770

References

Air boilers of the 2KSP series. Operating instructions. (2021). NVT-Technology. Chernigiv. 15 p. URL: https://nvt-tehno.com.ua/shop/kotly-na-drovah-dlya-nagreva-vozduha/

Arul, G. P., Shanmugam, S., Veerappan, A. R., Kumar, P. (2019). Mathematical modeling and experimental studies on a dual inclined oscillating bed with double pass so-

lar dryer for drying of non - parboiled paddy grains. Energy Sources A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 43(22): 2935-2946. https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1670754

Balandran-Quintana, R. R. (2018). Recovery of proteins from cereal processing by-products. In Sustainable recovery and reutilization of cereal processing by-products. Elsevier Ltd., pp 125-157. DOI: 10.1016/B978-0-08-102162-0.00005-8

Chojnacka, K., Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., ... & Kułażyński, M. (2021). Improvements in drying technologies - Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. Journal of Cleaner Production, 320, 128706. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128706

Dafnomilis, I., Hoefnagels, R., Pratama, Y. W., Schott, D. L., Lodewijks, G., & Junginger, M. (2017). Review of solid and liquid biofuel demand and supply in Northwest Europe towards 2030—A comparison of national and regional projections. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 78, 31-45 https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.108

Dębowski, M., Bukowski, P., Kobel, P., Bieniek, J., Romański, L., & Knutel, B. (2021). Comparison of Energy Consumption of Cereal Grain Dryer Powered by LPG and Hard Coal in Polish Conditions. Energies, 14(14), 4340. https://doi.org/10.3390/en14144340

Gerasimenko, I. (2023). Q&A: what you need to know about shaft-type grain dryers. Agravery. URL: https://agravery.com/uk/posts/show/qa-so-treba-znati-pro-zernosusarki-sahtnogo-tipu

Hashim, N., Onwude, D. I., Maringgal, B. (2022). Technological advances in postharvest management of food grains. Research and Technological Advances in Food Science. pp. 371-406. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824369-5.00016-6

Hayduk, O. (2021). How to reduce gas consumption at the elevator: economical grain dryer, preparation of grain for drying. Elevatorist.com URL: https://elevatorist.com/spetsproekt/157-kak-snizit-rashodyi-gaza-na-elevatore-ekonomnaya-zernosushilka-podgotovka-zerna-k-sushke-chast-1

Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Man, H. C., Jahari, M., & Onwude, D. I. (2023). Recent Advances in the Drying Process of Grains. Food Engineering Reviews, 1-29. https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7

Jodicke, K., Arendta, S., Hofachera, W., Speckleb, W. (2019). The influence of process parameters on the quality of dried agricultural products determined using the cumulated thermal load. Drying Technol. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1568254

Keum, D. H., Lee, Y. K., Lee, K. S., & Han, J. H. (1984). Reuse of Exhaust Heat and Improvement in Fuel Efficiency of Grain Dryer. Journal of Biosystems Engineering, 9(2), 65-73.

Khalin, S., Zanko, M. (2022). Bioheat generator complex of split-block type: structural features and performance indicators. Techniques and technologies of agricultural industry, No. 4. P. 30-34.

Novokhatskyi, M., Shustik, L., Zanko, M. (2022). Grain drying complex produced by Novy Elevator LLC: structural features, operation and test results during corn grain drying. Techniques and technologies of agricultural industry, No. 4. P.7-14.

Novokhatskyi, M., Zanko, M., Shustik, L., & Gaidai, T. (2022). Study of the quality of corn grain drying with the STELA AGRODRY MDB-XN 4/15-SU model dryer in hard mode. Technical and technological aspects of development and testing of new equipment and technologies for agriculture in Ukraine. Vol. 30 (44), pp. 158-168.

Sukhina, A. (2023). Grain drying: once again about energy efficiency and energy independence. Proposal. No. 2. P. 96-100.

Wang, G., Wu, W., Qiao, F., Fu, D., Liu, Z., Han, F. (2020). Research on an electric energy-saving grain drying system with internal circulation of the drying medium. Journal of Food Process Engineering. 43:9 e 13476. https://doi.org/10.1111/jfpe.13476

Zanko, M. (2019). A noble mine. Design, element base, and features of grain drying processes of mine-type grain dryers. Grain.

No. 6. P. 50-54.

Zanko, M. (2020). Mine landscapes. Design features of mine dryers. Grain. No. 2. P. 188-194.

Zanko, M. (2022). New Elevator. New approaches, new opportunities. Proposal. № 1. P. 126-130.

Ziegler, V., Paraginski, R. T., Ferreira, C. D. (2021). Grain storage systems and effect of moisture, temperature and time on grain quality – A review. J Stored Prod Res 91:101770. https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770

UDC 631.365

ENERGY SAVING IN GRAIN DRYING TECHNOLOGIES: PROSPECTIVE TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

Khalin S., Ph.D. Econ. Sc.,
https://orcid.org/0000-0002-7510-5056
Zanko M., Ph. D. of Tech. Sc.
https://orcid.org/0000-0001-8964-0706),
Gaidai T., Ph. D. of Tech. Sc.
https://orcid.org/0000-0001-9141-4820
Len O.,
https://orcid.org/0000-0001-9141-4820
L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Summary

The purpose of the work *is to research promising technical and technological solutions for energy saving and the use of alternative energy sources in grain drying technologies.*

Methods and materials*. The obtained results are based on the operational and analytical evaluation of mine-type dryers with hybrid heat supply systems, the technological principle of their operation, grain drying processes and energy saving indicators.*

Results. *Studies of energy saving processes in grain drying technologies have established that today the use of grain dryers with hybrid heat supply systems is relevant, subject to the introduction of advanced technical and technological solutions into their design – cross-flow air and heat recovery systems, built-in heat generator, high-performance production and heating agent consumption systems, etc.*

In the design of such dryers, it is possible to use all common heat sources: gas, oil, biofuel and hot water radiators, as well as direct and indirect grain heating systems. To obtain heat from biofuel, appropriate technological equipment is required, the function of which is performed by bio-heat generators and complexes based on them.

Heat generator complexes of the hybrid type, which burn bio-raw materials and natural gas, to increase the productivity of heat agent formation, additionally have heat exchangers for obtaining hot air in their composition, which can work both autonomously and in tandem with gas burners, which makes it possible to significantly save on energy resources.

Conclusions. *Technological solutions for the use of mine-type grain dryers with hybrid heat supply systems, which are able to work on solid biofuel, which is a secondary product of agricultural and forestry production, and ensure its burning with specialized technological equipment - bioheat generators, make it possible to partially abandon the traditional energy carrier (natural gas), reduce specific fuel consumption and thus achieve energy savings in the production of heating agent.*

Key words*: grain dryer, heat generator, solid biofuel, combustion and drying processes, heating agent, energy efficiency, grain drying.*