УДК 631.365
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).31

IMPROVING GRAIN DRYER ENERGY EFFICIENCY THROUGH HEAT RECOVERY AND ADAPTIVE AIR CIRCULATION

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗЕРНОСУШАРОК РЕКУПЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ ТА АДАПТИВНОЮ ЦИРКУЛЯЦІЄЮ ПОВІТРЯ

Oleksandr V. Shabelnyk
Oleksandr.Shabelnyk@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: 0009-0005-1167-4830

Mykola P. Kundenko
Mykola.Kundenko@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5841-4367

Oleksandr V. Koshelnik
Oleksandr.Koshelnik@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0001-6521-4403

Olga Yu. Iegorova
Olha.Yehorova@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8593-1557

О. В. Шабельник,
аспірант

М. П. Кунденко,
докт. техн. наук, професор

О. В. Кошельнік,
канд. техн. наук, доцент

О. Ю. Єгорова,
канд. техн. наук, доцент

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Abstract. *Purpose*. To substantiate a promising approach to improving the energy efficiency of convective grain dryers by coordinating exhaust-air heat recovery with adaptive air-circulation control. *Methodology*. A review and analytical study of twenty verified scientific sources published in 2022–2026 was conducted. The publications were classified by heat-recovery method, airflow arrangement, dryer scale, control algorithm, and performance indicators. The compared indicators included specific energy consumption, specific moisture extraction rate, energy and exergy efficiencies, final-moisture non-uniformity, and the temperature margin between the coldest surface and the dew point. *Results*. Maximising a constant recirculation ratio was found to be an unsuitable control objective because a greater return of warm exhaust air simultaneously raises the humidity ratio of the mixed stream, condensation risk, and fan-power demand. A combined configuration is proposed comprising exhaust-air cleaning, an air-to-air heat exchanger, a controlled recirculation branch, a bypass, a final heater or heat pump, and a variable-speed fan. A two-level control structure is formulated: the lower level stabilises temperature, airflow, and pressure, while the supervisory level determines an admissible recirculation ratio from grain condition, air humidity ratio, dew-point margin, and a multi-criteria objective incorporating energy use and drying uniformity. *Scientific novelty*. A systemic approach has been developed in the study of drying processes, where the method of heat recovery, aerodynamic flow equalisation, and the control algorithm are treated as interdependent elements, with condensation safety imposed as an explicit constraint. *Practical significance*. The results specify the sensors, actuators, and performance indicators required to develop a digital model and subsequently conduct industrial tests of a retrofitted grain dryer.
Key words: convective drying unit; specific energy consumption; exhaust drying medium; predictive control; heat and mass transfer; exergy efficiency.

Анотація. *Мета*. Обґрунтувати перспективний напрям підвищення енергоефективності конвективних зерносушарок шляхом узгодженого застосування рекуперації теплоти відпрацьованого сушильного агента та адаптивного керування циркуляцією повітря. *Методика*. Виконано оглядово-аналітичне дослідження двадцяти перевірених наукових джерел 2022–2026 років. Публікації класифіковано за способом повернення теплоти, організацією повітряного потоку, масштабом сушарки, алгоритмом керування та показниками ефективності. Для зіставлення рішень використано питоме енергоспоживання, показник видалення вологи, енергетичну та ексергетичну ефективність, нерівномірність кінцевої вологості та запас температури поверхні до точки роси. *Результати*. Установлено, що максимізація сталої частки рециркуляції не є раціональною метою: зі зростанням повернення теплого вихлопу одночасно збільшуються вологовміст суміші, ризик конденсації та потреба у вентиляторній потужності. Запропоновано комбіновану схему, яка містить очищення вихлопу, повітряно-

повітряний рекуператор, регульовану рециркуляційну гілку, байпас, кінцевий нагрівач або тепловий насос і вентилятор із частотним регулюванням. Сформовано дворівневу логіку керування: нижній рівень стабілізує температуру, витрату й тиск, а верхній визначає допустиму частку рециркуляції за станом зерна, вологовмістом повітря, запасом до точки роси та багатокритеріальною функцією енерговитрат і рівномірності сушіння. *Наукова новизна*. Розвинуто системний підхід при дослідженні процесів сушіння, де спосіб повернення теплоти, аеродинамічне вирівнювання та алгоритм керування розглядаються як взаємозалежні елементи, а конденсаційна безпека задається явним обмеженням. *Практична значимість*. Результати визначають склад датчиків, виконавчих механізмів і контрольних показників для розроблення цифрової моделі та подальшого промислового випробування модернізованої зерносушарки.

Ключові слова: конвективні сушарка; питомі енерговитрати; відпрацьований сушильний агент; прогнозне керування; тепломасообмін; ексергетична ефективність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Конвективні сушарки придатні до безперервного оброблення великих потоків зерна, проте універсального енергоощадного режиму не існує через відмінності культур, початкової вологості, клімату та конструкцій [1]. Частина енергії витрачається на нагрівання зерна й обладнання, втрачається через огородження та виноситься з теплим вологим вихлопом, додаткові витрати створюють вентилятори і транспортні механізми. Тому оцінювати модернізацію потрібно відносно визначеного базового режиму з урахуванням завантаження, вентиляції, витрати палива та погодних умов [2].

Повернення вихлопу зменшує потребу в нагріванні свіжого повітря, але одночасно підвищує вологовміст суміші, знижує рушійну силу масопереносу та створює ризик конденсації. Рекуператор, фільтр і повітроводи також збільшують опір і потужність вентилятора. Просторова нерівномірність посилює проблему: ділянки з малим потоком залишаються вологими, а з надмірним – пересушуються. Отже, тепловий виграш необхідно узгоджувати з аеродинамічним вирівнюванням і якістю зерна.

Робоча гіпотеза полягає в тому, що кероване за станом повітря, стадією сушіння й опором шару повернення вихлопу ефективніше за сталу частку рециркуляції. Задачею дослідження є обґрунтування структури системи та критеріїв, за якими допустимий коефіцієнт рециркуляції змінюється без порушення інтенсивності й конденсаційної безпеки.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Результат процесу конвективного сушіння пов’язують з температурою і вологовмістом агента, швидкістю повітря, шаром, часом перебування та властивостями сільськогосподарської культури [1]. Для енергетичного порівняння додатково потрібні межі системи, вид палива, завантаження й допоміжна електроенергія [2]. Застосовують питому енергію на випаровування води, теплову й ексергетичну ефективність та показник видалення вологи [3], тоді як нові класифікації обладнання поєднують енергозбереження з точністю кінцевої вологості та інтелектуальним керуванням [4].

Так, для глибокого шару кукурудзи рециркуляцію вмикали за вологістю вихлопу нижче 65 % і вимикали вище 80 %. При температурі 50–70 °C економія 5,8 % не була статистично значущою, а повернення повітря використовувалося лише протягом останніх 10–23 % процесу [5]. Отже, важливим є не саме число, а залежність допустимості рециркуляції від стадії сушіння. Для пшениці на вихлоп припадало 57,07 % підведеної енергії; реверсування вирівнювало вологість, але надмірна частота знижувала ефективність [6]. Ступінчаста вентиляція й відлежування також давали різноспрямовані зміни теплової ефективності [7].

Конструктивне вирівнювання залишається передумовою використання автоматики. Чотиристороння вентиляція змішанопотокової секції зменшувала нерівномірність швидкості на 6,11 процентного пункту, а кінцевої вологості – до рівня менш як 0,7 % [8]. CFD-DEM аналіз показав вплив форми інвертора на траєкторію та час перебування зерна [9], а промислові теплові карти підтвердили доцільність багаточкового настроювання потоку [10].

Ієрархічне прогнозоване керування за моделлю (model predictive control, MPC) промислової циркуляційної сушарки з верхнім кроком 180 с і нижнім 2,25 с знижувало енергоспоживання на 12,8 % відносно статичної вентиляції [11]. У 15-тонній сушарці інтелектуальна система керування, що поєднує регресію гаусівського процесу з прогнозованим керуванням за моделлю (Gaussian process regression-model predictive control, GPR-MPC), забезпечила максимальну й середню похибки визначення вологості 0,4 % та 0,165 % відповідно [12]. Ці результати обґрунтовують поділ керування за часовими масштабами, однак не формалізують конденсаційне обмеження рекуператора.

У замкненій теплонасосній системі два регенератори дали розрахункове зменшення потужності компресора на 26,3 % та ексергетичних втрат на 32,5 % [13]. Інше динамічне моделювання показало приріст середнього питомого показника видалення вологи (specific moisture extraction rate, SMER) на 0,36 кг/кВт·год, але після утилізації теплоти вихлопного повітря розімкнена система стала нестійкою [14]. Для вихрового апарата ефективність сушіння зросла на 29,7 %, проте дослідні 0,5–1,5 кг і швидкості

25–35 м/с не дають підстав прямо переносити ефект на шахтні сушарки [15].

У трирічних промислових спостереженнях двопотокова сушарка з поверненням теплоти мала 6,3 ± 1,9 ГДж/т зерна [16]. Модель 17-ярусної установки показала ефективність 18–79 %, що підтверджує залежність оцінки від погоди, вологості й продуктивності [17]. В роботі [18] виділяються рециркуляція, теплота вихлопу, охолодженого зерна й конденсації як базові резерви. В [19] розглядається гібридне теплозабезпечення, в [20] сонячний попередній нагрів, але через тезовий формат дані роботи не можна використовувати як самостійний кількісний доказ.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Рекуперацію, аеродинамічне вирівнювання і алгоритми керування здебільшого досліджували окремо. Використані показники мають різні межі системи, тому відсоткові ефекти не утворюють єдиного середнього. Лабораторні пороги вологості також не переносяться безпосередньо між температурами, різними кліматичними умовами і різними типами сушарок. Невирішеною залишається системна задача – узгодити спосіб повернення теплоти, просторову рівномірність сушіння та алгоритм керування, визначивши необхідний набір датчиків температури й відносної вологості повітря, тиску, витрати, температури найхолоднішої поверхні та вологості зерна, а також однозначні умови переходу сушильної системи в безпечний режим.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи – на основі порівняльного аналізу існуючих досліджень обґрунтувати перспективний напрям підвищення енергоефективності конвективних зерносушарок шляхом інтеграції рекуперації теплоти відпрацьованого сушильного агента з адаптивним керуванням циркуляцією повітря.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: визначити основні теплові й аеродинамічні втрати; класифікувати способи повернення теплоти та організації повітряних потоків; установити зіставні показники ефективності; обґрунтувати інформативні параметри й технологічні обмеження адаптивного керування; запропонувати функціональну схему та критерій вибору режиму; визначити межі застосовності й напрями подальшої перевірки.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оглядову вибірку формували за комбінаціями: grain drying, energy efficiency, heat recovery, air recirculation, reversing airflow, heat pump drying і model predictive control. Включали праці 2022–2026 років із DOI або офіційною інституційною сторінкою та фіксували тип сушарки, культуру, масштаб, базовий режим, енергетичні й якісні показники. Виключали дублікати, неперевірювані матеріали, російськомовні джерела, видання з Росії чи Білорусі та праці з російськими афіліаціями. Відібрано 20 джерел, частка самоцитування – приблизно 5 %. Застосовано тематичну класифікацію, порівняльний аналіз і структурно-функціональний синтез; різнорідні відсоткові ефекти не усереднювали.

Об'єкт дослідження – тепломасообмінні та аеродинамічні процеси в конвективних зерносушарках.

Предмет дослідження – закономірності впливу рекуперації теплоти та адаптивної циркуляції повітря на енергетичну ефективність, інтенсивність і рівномірність сушіння зерна, а також на ризик конденсації в елементах сушильної системи.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Основним нормованим показником прийнято питоме споживання енергії на видалення вологи:

$$SEC = E_{\Sigma}/m_w, \tag{1}$$

де E_{Σ} – сумарна теплова й приведена електрична енергія, МДж;

m_w – маса видаленої води, кг. Спосіб приведення електроенергії зазначають окремо.

Для теплонасосних систем додатково застосовується показник видалення вологи:

$$SMER = m_w/E_{el}, \tag{2}$$

де E_{el} – кількість електричної енергії, кВт·год.

Енергетична ефективність камери:

$$\eta_d = Q_{ev}/E_{\Sigma}, \tag{3}$$

де Q_{ev} – теплота випаровування, МДж.

Коефіцієнт рециркуляції визначено за масовими витратами сухого повітря:

$$r = \dot{m}_{rec}\big/(\dot{m}_{fresh} + \dot{m}_{rec}), \tag{4}$$

де $\dot{m}_{rec}$, $\dot{m}_{fresh}$ – витрати рециркуляційного та свіжого сухого повітря, кг/с. Температурна ефективність рекуператора:

$$\varepsilon_t = (T_{fresh,out} - T_{amb})/(T_{exh,in} - T_{amb}), \tag{5}$$

де $T_{fresh,out}$, T_{amb}, $T_{exh,in}$ – температури свіжого повітря після рекуператора, довкілля та вихлопу перед ним.

Баланс вологи будують за вологовмістом x, а не безпосередньо за відносною вологістю. Для суміші свіжого й рециркуляційного повітря:

$$x_{mix} = (\dot{m}_{freshxamb} + \dot{m}_{recxexh})\big/(\dot{m}_{fresh} + \dot{m}_{rec}), \tag{6}$$

де x_{amb}, x_{exh} – вологовміст атмосферного та відпрацьованого повітря. Значення x і T_{dp} обчислюють за температурою, RH і тиском.

Умову відсутності конденсації формалізовано запасом

$$\Delta T_{dp} = T_{surface,\min} - T_{dp}, \tag{7}$$

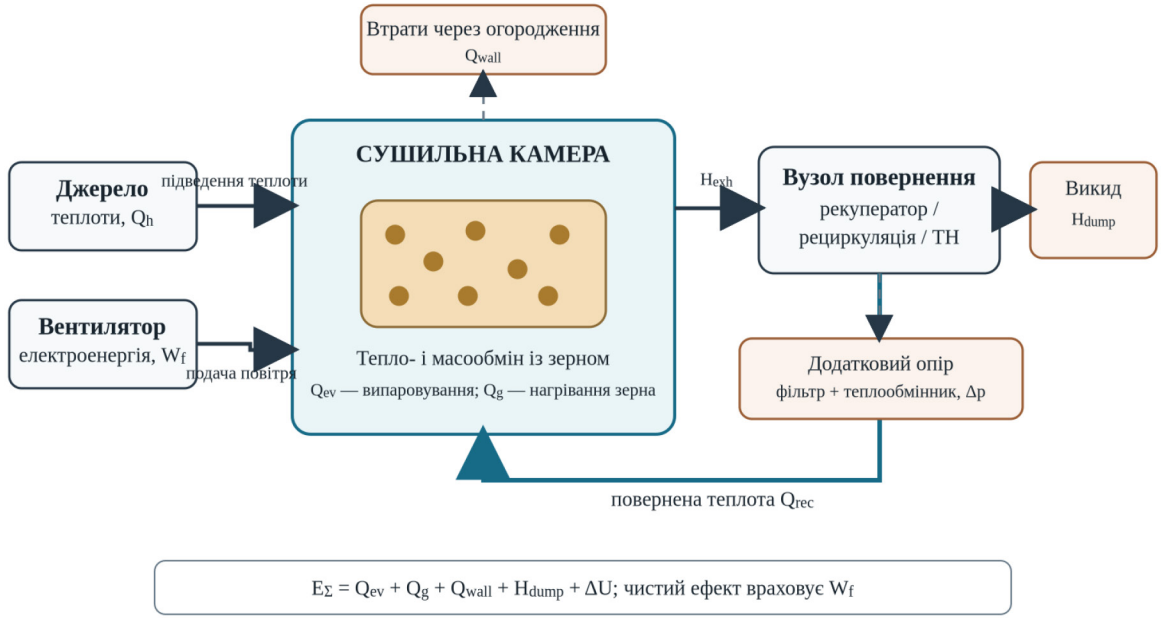


Рис. 1. Теплові потоки конвективної зерносушарки: Q_h – теплота від джерела; W_f – електрична енергія вентилятора; Q_{ev} – теплота випаровування; Q_g – нагрівання зерна; Q_{wall} – втрати через огородження; H_{exh} – ентальпійний потік вихлопу; Q_{rec} – повернена теплота

де $T_{surface,\min}$ – температура найхолоднішої поверхні. Безпечний режим потребує умови $\Delta T_{dp} \geq \Delta T_{safe} > 0$ з урахуванням похибок та інерційності.

Баланс теплоти та механізми втрат. Межа енергетичного балансу охоплює джерело теплоти, вентилятори, сушильну камеру, повітроводи та вузол рекуперації. Підведена енергія витрачається на випаровування, нагрівання зерна й конструкції, втрати через огородження та ентальпію вихлопу (рис. 1). Електроенергію вентиляторів обліковують окремо.

Температура вихлопу є недостатньою для вибору режиму: пряме змішування повертає теплоту разом із вологою, поверхневий рекуператор – переважно явну теплоту без змішування, а тепловий насос може використати й теплоту конденсації. Додатковий опір фільтра та теплообмінника враховують через потужність вентилятора:

$$P_f = \dot{V}\Delta p_\Sigma / (\eta_f \cdot \eta_m), \qquad (8)$$

де $\dot{V}$ – об’ємна витрата, м^3/с;

Δp_Σ – сумарний перепад тиску, Па;

η_f, η_m – ККД вентилятора й привода. Ефект визначають за зменшенням E_Σ, а не лише за Q_{rec}.

Порівняння способів повернення теплоти. Чотири варіанти відрізняються масообміном між потоками, поверненням прихованої теплоти, ризиком конденсації та складністю (табл. 1). Комбінована схема найбільш гнучка, оскільки розділяє попередній нагрів без перенесення вологи та кероване пряме повернення.

Таблиця 1. Порівняння способів повернення теплоти в зерносушарках

Спосіб	Характеристика		
	Повернення теплоти й вологи	**Ризики та аеродинамічний опір**	**Керування й модернізація**
Пряме змішування	Явна теплота; високе перенесення вологи	Високий ризик конденсації за вологого вихлопу; низький–середній опір	Клапани та психрометричний захист; висока придатність
Поверхневий рекуператор	Переважно явна теплота; низьке перенесення вологи	Конденсація на холодній поверхні; середній–високий Δp	Байпас, контроль поверхні й Δp; середня придатність
Тепловий насос	Явна й прихована теплота; кероване перенесення після осушення	Конденсат у випарнику; середній опір	Узгодження компресора, клапана й вентиляторів; доцільніше для нового обладнання
Комбінована схема	Рекуперація та допустима частина вихлопу; змінне перенесення вологи	Низький ризик за справного захисту; середній–високий опір	Порогове або прогнозне керування; висока придатність за модульного виконання

Примітка. Оцінки є якісним результатом порівняльного синтезу. «Ризик конденсації» стосується неконтрольованого утворення вологи у повітроводах, змішувальній камері або рекуператорі; кероване відведення конденсату у випарнику теплового насоса не належить до аварійного стану.

Для чинної сушарки доцільне поетапне встановлення рекуператора з байпасом, рециркуляційної гілки та, після оцінки навантаження, теплового насоса.

Аеродинамічна рівномірність. Середня витрата не описує локальні канали, спричинені пористістю, засміченістю й геометрією. Конструктивний рівень застосовує розподільні камери, інвертори або реверсування; керувальний – багатоточкові температурні та вологісні сигнали. Нерівномірність кінцевої вологості включають до функції цілі, інакше зменшення енергії може супроводжуватися недосушуванням або пересушуванням.

Вимірювані та керовані параметри. Датчики мають забезпечувати тепловий і вологісний баланси, контроль конденсації та опору (табл. 2). Температуру і вологість вимірюють спільно, датчики вихлопу захищають від пилу, а найхолоднішу поверхню контролюють контактно.

Керованими є параметр *r*, клапани, частота вентилятора, нагрів і, за наявності, компресор та рух зерна. Зміна *r* має супроводжуватися стабілізацією витрати або тиску.

Концептуальна схема інтегрованої системи. Як видно із схеми (рис. 2) очищений вихлоп розділяється між гарячим каналом рекуператора, рециркуляцією та скиданням. Свіже повітря попередньо нагрівається, змішується з допустимою частиною вихлопу й доводиться до завдання нагрівачем або тепловим

Таблиця 2. Сигнали та обмеження адаптивного керування циркуляцією

Група	Параметр і рекомендоване місце вимірювання	Призначення	Пов'язаний виконавчий механізм або обмеження
Довкілля	T_{amb}, RH, тиск перед забором	x_{amb}, ентальпія, точка роси	Частка свіжого повітря, нагрів
Приплив	T, RH після змішування й нагрівача	Стан агента перед шаром	Клапан, байпас, нагрівач
Вихлоп	T, RH після камери	Ентальпія, x_{exh}, допустимість повернення	Рециркуляційний і скидний клапани
Рекуператор	Температури потоків, $T_{surface,min}$, Δp	ε_t, ΔT_{dp}, забруднення	Байпас, зменшення r, очищення
Зерно	Вологість і багатоточкова температура	Стадія, рівномірність, якість	Нагрів, розвантаження, реверс
Аеродинаміка	Витрата, Δp шару та фільтра	Опір і електричні витрати	Частота вентилятора
Енергія	Паливо, теплова й електрична потужність	SEC, SMER, чиста економія	Верхній рівень

Примітка. RH – відносна вологість повітря. Розрахунок балансу вологи виконується за вологовмістом, отриманим із температури, RH та барометричного тиску. Для кожного каналу перед введенням системи в експлуатацію задають допустимий діапазон, перевірку правдоподібності, реакцію на обрив сигналу та період калібрування.

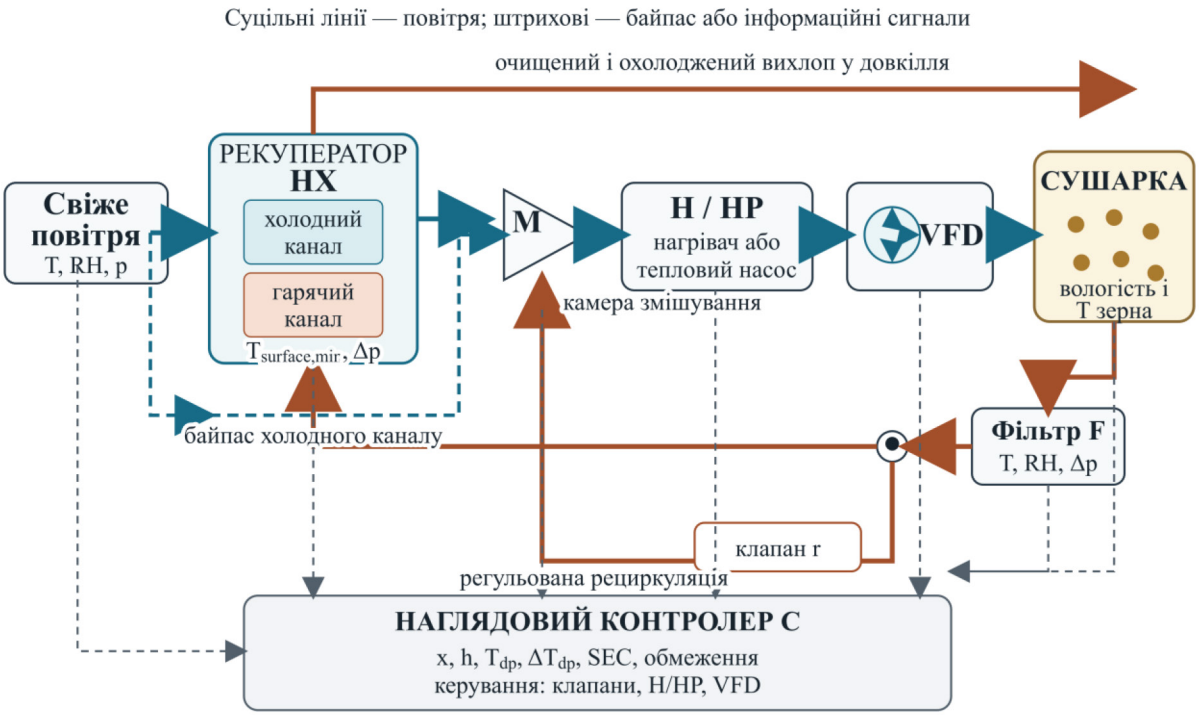


Рис. 2. Схема адаптивної рекуперації в зерносушарці: *F* – фільтр; *HX* – рекуператор; *M* – змішувальна камера; *H/HP* – нагрівач або тепловий насос; *VFD* – частотно-регульований вентилятор; *C* – наглядовий контролер; суцільні лінії – повітряні потоки; штрихові – інформаційні сигнали

насосом. VFD-вентилятор компенсує зміну опору. Рекуператор має бути доступним для очищення; піддон і дренаж потрібні через пускові стани та локальні холодні ділянки.

Алгоритм адаптивної циркуляції. Нижній рівень стабілізує температуру, витрату, тиск і тепловий насос. Наглядовий рівень перевіряє сигнали, обчислює психрометричні змінні, задає rmax, прогнозує допустимі режими та передає завдання з обмеженням швидкості зміни (рис. 3). За недостовірного сигналу датчика, надмірного аеродинамічного опору або умови $\Delta T_{dp} < \Delta T_{safe}$ система переходить у безпечний режим: частка прямої рециркуляції встановлюється $r = 0$, скидний канал відкривається, а задана витрата сушильного агента підтримується припливом свіжого повітря. Це унеможливлює повернення перезволоженого повітря та знижує ризик конденсації. На початку сушіння переважає поверхнева рекуперація; пряме повернення стає можливим після зниження вологовмісту вихлопу.

Для порівняння допустимих режимів запропоновано безрозмірний функціонал

$$J = w_{1SEC}^{*} + w_{2UM}^{*} + w_{3Pf}^{*} + P_{cond}, \qquad (9)$$

де індекси SEC^{*}, U_M^{*}, P_f^{*} – нормовані енерговитрати, нерівномірність вологості та потужність вентилятора; w_i – експериментально визначені ваги; P_{cond} виключає режими з $\Delta T_{dp} < \Delta T_{safe}$.

Результати аналітичного узагальнення. Сформовано класифікацію за масообміном і можливістю відновлення прихованої теплоти, мінімальний склад датчиків та узгоджений набір виконавчих дій. Центральним обмеженням є запас до точки роси, а безпечним станом – $r = 0$. Дворівнева архітектура допускає перехід від порогового до прогнозного алгоритму без зміни теплової схеми. Універсальний відсоток економії не встановлюється: його визначають для конкретної сушарки за SEC, нерівномірністю та додатковою вентиляторною потужністю.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порогове керування величини RH є простим, але RH змінюється під час нагрівання. Для перенесення між установками потрібні вологовміст, точка роси й температура поверхні [5]. Дворівнева архітектура узгоджується з ієрархічним MPC [11], а коректор похибки моделі може спиратися на GPR–MPC [12].

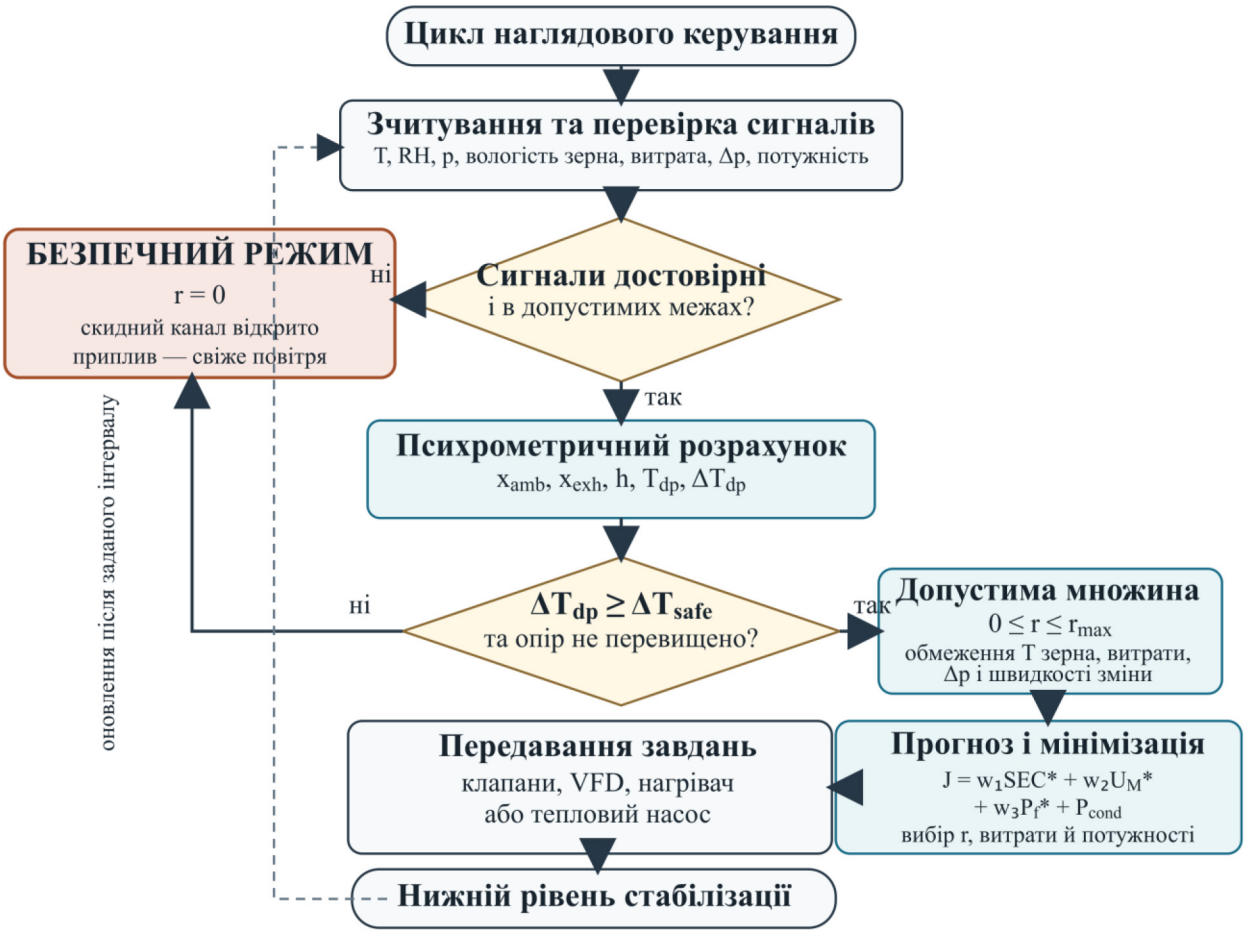


Рис. 3. Логіка вибору частки рециркуляції

Водночас аварійні обмеження мають залишатися прямими й незалежними від навченої моделі.

Рекуперація змінює динаміку теплонасосної системи та потребує спільного проєктування автоматики [14]. Керування не замінює геометрію: реверсування, чотиристоронння вентиляція та інвертори формують розподіл потоку до дії регулятора [6, 8, 9]. За сталого дефіциту повітря першочерговими є балансування або зміна конструкції.

Тепловий насос найповніше використовує приховану теплоту [13, 18], але рекуператор із регульованою рециркуляцією простіший для модернізації. Вибір залежить від річного навантаження, тарифів, електричної потужності, очищення та відведення конденсату. Опубліковані 5,8–29,7 % не є діапазоном ефекту однієї технології: натурні й модельні оцінки мають різні межі та клімат [16, 17].

Архітектура допускає сонячний попередній нагрів, досліджуваний у [19, 20], але мінливе джерело не скасовує психрометричних обмежень. Межами роботи є відсутність власного експерименту, різний масштаб установок, невраховані капітальні витрати, сезонне забруднення та довготривала похибка RH-датчиків. Ваги функціонала (9) потребують ідентифікації.

Перевірку пропонується виконати послідовно, додаючи по одному функціональному рівню (табл. 3) та порівнюючи режими за масою видаленої води. Повторність визначають за попередньою варіабельністю SEC.

Гіпотеза отримала аналітичну підтримку: адаптивне повернення узгоджується зі змінним процесом краще за сталу частку, але величина переваги й пороги мають бути встановлені експериментально.

ВИСНОВКИ

Перспективний напрям підвищення енергоефективності конвективних зерносушарок полягає не в максимізації повернення відпрацьованого повітря, а в узгодженні рекуперації явної та, за наявністю теплового насоса, прихованої теплоти з поточним вологовмістом, аеродинамічним опором і станом зерна.

Для модернізації обґрунтовано застосування комбінованої схеми з очищенням вихлопу, поверхневим рекуператором, регульованою рециркуляційною гілкою, байпасом, кінцевим нагрівачем або тепловим насосом і частотно-регульованим вентилятором. Модульна будова дає змогу окремо оцінити ефект рекуператора, прямої рециркуляції та оптимізаційного керування.

Безпечність повернення повітря слід визначати за вологовмістом і запасом температури найхолоднішої поверхні до точки роси. Порогове значення RH може використовуватися лише як локально налаштоване наближення. За недостовірного сигналу або $\Delta T_{dp} < \Delta T_{safe}$ система має переходити до нульової прямої рециркуляції.

Склад інформаційного забезпечення має охоплювати термогігрометричний стан атмосферного, припливного й вихідного повітря, температуру поверхні рекуператора, вологість і температуру зерна, витрату, перепад тиску та споживану потужність. Зміна частки рециркуляції повинна узгоджуватися з положенням байпаса, частотою вентилятора й тепловою потужністю.

Запропонована дворівнева архітектура відокремлює швидку стабілізацію температури, витрати й тиску від повільнішої оптимізації за питомим енергоспоживанням, нерівномірністю вологості та потужністю вентилятора. Конденсаційна безпека введена як жорстке обмеження, а не як другорядний критерій.

Наступним етапом має бути побудова динамічної психрометричної моделі та поетапне промислове випробування для кукурудзи й пшениці. Експеримент повинен установити ваги функції цілі, мінімальний безпечний запас до точки роси, чисту економію з урахуванням додаткової вентиляторної потужності та стійкість ефекту до погоди, забруднення й часткового завантаження.

Таблиця 3. Програма експериментальної перевірки інтегрованої системи

Етап	Конфігурація	Основна змінна	Обов'язкові результати	Критерій переходу
1	Базова сушарка без повернення теплоти	Температура, витрата, завантаження	SEC, витрата палива, електроенергія, кінцева вологість і її нерівномірність	Стабільний матеріальний та енергетичний баланс
2	Поверхневий рекуператор із байпасом, $r = 0$	Положення байпаса	ε_t, додатковий Δp, чиста економія з урахуванням вентилятора	Додатне зменшення E_Σ без конденсації
3	Рекуператор і порогова рециркуляція	Психрометричний поріг і ΔT_{safe}	Частка часу з $r > 0$, SEC, тривалість, стабільність вологи	Відсутність аварійної конденсації та погіршення якості
4	Дворівневе адаптивне керування	Ваги w_i, горизонт прогнозу, обмеження швидкості зміни	Енергетичний ефект, рівномірність, кількість перемикань, похибка прогнозу	Статистично та технологічно значуща перевага над етапом 3
5	Сезонна експлуатація	Культура, погода, забруднення, часткове навантаження	Доступність системи, деградація ε_t, потреба в очищенні, економічний строк окупності	Підтвердження стійкості ефекту поза налаштувальною вибіркою

Примітка. На всіх етапах початкову та кінцеву вологість зерна слід подавати із зазначенням вологої або сухої основи. Для режимів із різною продуктивністю порівнюють енергію на масу видаленої води, а не лише на тонну обробленого зерна.

REFERENCES

[1] Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Che Man, H., Jahari, M., Onwude, D. I. (2023). Recent advances in the drying process of grains. *Food Engineering Reviews, 15*(3), 548–576. https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7

[2] Mondal, M. H. T., Sarker, M. S. H. (2024). Comprehensive energy analysis and environmental sustainability of industrial grain drying. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 199*, 114442. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114442

[3] An, J., Xie, H., Yan, J., Wei, H., Wu, Y., Liao, X. (2024). A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. *Energy Reports, 12*, 5482–5506. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.037

[4] Yu, P., Zhu, W., Shen, C., Qiao, Y., Zhang, W., Zhu, Y., Gong, J., Cai, J. (2025). Current status of grain drying technology and equipment development: A review. *Foods, 14*(*14*), 2426. https://doi.org/10.3390/foods14142426

[5] Tabasizadeh, M., Minaei, S., Mahfeli, M., Khoshtaghaza, M. H., Zare, D. (2026). Dynamic recirculation control in deep-bed corn drying: A low-cost, sensor-driven framework for condensation-safe waste-heat recovery. *Journal of Engineering Research*. Advance online publication. https://doi.org/10.1016/j.jer.2026.05.018

[6] Yan, J., Wei, H., Wu, H., You, Z., Xie, H. (2023). Thermodynamics and non-uniformity in convective reversing drying wheat. *Applied Thermal Engineering, 231*, 120948. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120948

[7] Jia, C., Li, Y., Zhang, Y., Pan, Y., Wang, L. (2023). Thermal efficiency and heat consumption analysis in deep-bed drying. *Drying Technology, 41*(12), 1924–1932. https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2203741

[8] Chen, Z., Che, G., Wan, L., Wang, H., Qu, T., Zhang, Q. (2022). Numerical simulation and experiment of four-way ventilation mixed flow drying section for rice. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 38*(24), 237–247. https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.026

[9] Amjad, W., Chen, Z., Ambrose, K. (2024). Design assessment of grain inverters in cross-flow grain dryer via CFD–DEM numerical simulation. *Biosystems Engineering, 239*, 147–157. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.02.008

[10] Speiser, F. P., Nagy, B., Pan, T. (2024). Energetic analysis of mixed-flow grain dryers: A case study in Hungary. *Chemical Engineering Transactions, 114*, 847–852. https://doi.org/10.3303/CET24114142

[11] Li, C., Ren, J., Seth, A., Zhang, Y., Huang, J., Li, C., Cao, Y. (2025). Hierarchical model predictive control for energy consumption regulation of industrial-scale circulation counter-flow paddy drying process. *Energy, 321*, 135431. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135431

[12] Song, Q., Zhang, Y., Sun, W., Du, D., Zhang, S., Wang, A., Chen, W., Wei, X. (2026). Research on GPR-MPC intelligent control system for paddy rice drying in cross-flow circulating grain dryer. *Agriculture, 16*(5), 510. https://doi.org/10.3390/agriculture16050510

[13] Li, C., Huang, J., Chen, Y., Ji, S., Li, C., & Zhang, Y. (2025). Transient thermodynamic analysis and energy optimization of a circulation counter-flow wheat drying system utilizing a closed-loop heat pump configuration. *Energy Conversion and Management, 346*, 120508. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120508

[14] Fu, H., Shi, J., Nižetić, S., Sun, L. (2026). Modelica-based dynamic modeling and exergy analysis of a heat pump drying system incorporating exhaust waste-heat recovery. *Energy, 344*, 139834. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139834

[15] Singh, P., Hemachandran, E., Prasad, U., Singh, K. K., & Mallik, B. (2025). Numerical analysis of a gas-solid vortex dryer integrated with a waste heat recovery system. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 171*, 106037. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106037

[16] Panigrahi, S. S., Grieger, L., Singh, C. B. (2024). Analysis of in-bin low-temperature and high-temperature grain drying in Alberta: Specific energy, carbon costs and policy implications. *Energy Reports, 12*, 3341–3352. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.013

[17] Panigrahi, S. S., Singh, C. B. (2025). Thermodynamic-based theoretical energy efficiency model for high-temperature grain drying. *Biosystems Engineering, 258*, 104248. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104248

[18] 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

[19] Shabelnyk, O. V., & Kundenko, M. P. (2025). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti susharok zerna [Improving the energy efficiency of grain dryers]. In *Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh: zbirnyk tez dopovidei 19-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii mahistrantiv ta aspirantiv*, 19–21 November 2025 (p. 307). Kharkiv : National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/99013 [in Ukrainian].

[20] Polshykov, M. O., & Kundenko, M. P. (2025). Doslidzhennia enerhoefektyvnykh susharok zerna [Research on energy-efficient grain dryers]. In *Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh: zbirnyk tez dopovidei 19-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii mahistrantiv ta aspirantiv*, 19–21 November 2025 (p. 274). Kharkiv : National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/98828 [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Che Man, H., Jahari, M., Onwude, D. I. (2023). Recent advances in the drying process of grains. *Food Engineering Reviews, 15*(3), 548–576. https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7

[2] Mondal, M. H. T., & Sarker, M. S. H. (2024). Comprehensive energy analysis and environmental sustainability of industrial grain drying. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 199*, 114442. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114442

[3] An, J., Xie, H., Yan, J., Wei, H., Wu, Y., Liao, X. (2024). A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. *Energy Reports, 12*, 5482–5506. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.037

[4] Yu, P., Zhu, W., Shen, C., Qiao, Y., Zhang, W., Zhu, Y., Gong, J., & Cai, J. (2025). Current status of grain drying technology and equipment development: A review. *Foods, 14*(14), 2426. https://doi.org/10.3390/foods14142426

[5] Tabasizadeh, M., Minaei, S., Mahfeli, M., Khoshtaghaza, M. H., & Zare, D. (2026). Dynamic recirculation control in deep-bed corn drying: A low-cost, sensor-driven framework for condensation-safe waste-heat recovery. *Journal of Engineering Research*. Advance online publication. https://doi.org/10.1016/j.jer.2026.05.018

[6] Yan, J., Wei, H., Wu, H., You, Z., Xie, H. (2023). Thermodynamics and non-uniformity in convective reversing drying wheat. *Applied Thermal Engineering, 231*, 120948. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120948

[7] Jia, C., Li, Y., Zhang, Y., Pan, Y., Wang, L. (2023). Thermal efficiency and heat consumption analysis in deep-bed drying. *Drying Technology, 41*(12), 1924–1932. https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2203741

[8] Chen, Z., Che, G., Wan, L., Wang, H., Qu, T., & Zhang, Q. (2022). Numerical simulation and experiment of four-way ventilation mixed flow drying section for rice. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 38*(24), 237–247. https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2022.24.026

[9] Amjad, W., Chen, Z., Ambrose, K. (2024). Design assessment of grain inverters in cross-flow grain dryer via CFD–DEM numerical simulation. *Biosystems Engineering, 239*, 147–157. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.02.008

[10] Speiser, F. P., Nagy, B., & Pan, T. (2024). Energetic analysis of mixed-flow grain dryers: A case study in Hungary. *Chemical Engineering Transactions, 114*, 847–852. https://doi.org/10.3303/CET24114142

[11] Li, C., Ren, J., Seth, A., Zhang, Y., Huang, J., Li, C., & Cao, Y. (2025). Hierarchical model predictive control for energy consumption regulation of industrial-scale circulation counter-flow paddy drying process. *Energy, 321*, 135431. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135431

[12] Song, Q., Zhang, Y., Sun, W., Du, D., Zhang, S., Wang, A., Chen, W., & Wei, X. (2026). Research on GPR-MPC intelligent control system for paddy rice drying in cross-flow circulating grain dryer. *Agriculture, 16*(5), 510. https://doi.org/10.3390/agriculture16050510

[13] Li, C., Huang, J., Chen, Y., Ji, S., Li, C., & Zhang, Y. (2025). Transient thermodynamic analysis and energy optimization of a circulation counter-flow wheat drying system utilizing a closed-loop heat pump configuration. *Energy Conversion and Management, 346*, 120508. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120508

[14] Fu, H., Shi, J., Nižetić, S., & Sun, L. (2026). Modelica-based dynamic modeling and exergy analysis of a heat pump drying system incorporating exhaust waste-heat recovery. *Energy, 344*, 139834. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139834

[15] Singh, P., Hemachandran, E., Prasad, U., Singh, K. K., & Mallik, B. (2025). Numerical analysis of a gas-solid vortex dryer integrated with a waste heat recovery system. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 171*, 106037. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106037

[16] Panigrahi, S. S., Grieger, L., Singh, C. B. (2024). Analysis of in-bin low-temperature and high-temperature grain drying in Alberta: Specific energy, carbon costs and policy implications. *Energy Reports, 12*, 3341–3352. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.013

[17] Panigrahi, S. S., Singh, C. B. (2025). Thermodynamic-based theoretical energy efficiency model for high-temperature grain drying. *Biosystems Engineering, 258*, 104248. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104248

[18] 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

[19] Шабельник, О.В., Кунденко, М.П. (2025). Підвищення енергоефективності сушарок зерна. Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 19-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 19–21 листопада 2025 р. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 307. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/99013

[20] Польшиков, М. О., Кунденко, М. П. (2025). Дослідження енергоефективних сушарок зерна. Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 19-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 19-21 листопада 2025 р. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 274. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/98828

© Шабельник О. В., Кунденко М. П., Кошельнік О. В., Єгорова О. Ю.
Дата першого надходження статті до видання: 07.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)