



УДК 631.563:620.9:504.06

ENERGY-EFFICIENT GRAIN DRYING TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР У КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Vovk B.I. / Вовк Б.І.

c.t.s., as.prof. / канд.пед.наук, доц.

ORCID: 0000-0003-1161-7818

Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University,

Hlukhiv, Kyivska st. 24, 41400

Глухівський національний педагогічний університеті імені Олександра Довженка,

м. Глухів, вул. Київська, 24, 41400

Анотація. В роботі розглянуто сучасні енергоефективні технології сушіння зернових культур у контексті принципів сталого розвитку аграрного виробництва. Проаналізовано основні недоліки традиційних сушильних систем, зокрема високі питомі енерговитрати, нерівномірність прогрівання зерна та втрату біологічної цінності. Узагальнено результати сучасних наукових досліджень щодо впровадження технологічних рішень, спрямованих на зниження енергоспоживання: рекупераційних систем тепла, теплових насосів, комбінованих методів сушіння (інфрачервоного, мікрохвильового, сонячно-асистованого) та інтелектуальних систем керування процесом. Показано, що застосування таких технологій забезпечує скорочення споживання енергії на 15–40 % без втрати якості продукції, підвищує коефіцієнт використання теплоти сушильного агента й сприяє зменшенню вуглецевого сліду виробництва. Особливу увагу приділено можливостям адаптації енергоощадних технологій до умов українських фермерських і середніх господарств з урахуванням енергетичних та економічних обмежень. Зроблено висновок, що ефективна реалізація принципів енергоефективності у процесах сушіння вимагає комплексного підходу, який поєднує технічну модернізацію обладнання, цифровізацію управління та використання відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: енергоефективність, сушіння зернових культур, рекуперація теплоти, теплові насоси, сталий розвиток, інтелектуальне керування, сонячно-асистоване сушіння.

Вступ

Сушіння зернових культур є ключовим етапом післязбиральної обробки, що визначає якість, стабільність зберігання та технологічну придатність зерна. Традиційні сушильні системи часто характеризуються високими питомими енерговитратами, нерівномірним прогріванням і втратою біологічної цінності продукції. Такі проблеми особливо помітні під час сушіння кукурудзи та пшениці у фермерських господарствах із застарілими сушарками. Дослідження показують, що процеси сушіння серед великих агропромислових підприємств є одними з найбільш енергоємних у виробничому циклі [1; 6].

На тлі зростання вартості енергоносіїв, вимог до скорочення вуглецевих



викидів і необхідності підвищення конкурентоспроможності агровиробництва актуальним стає впровадження енергоощадних та екологічно безпечних технологій сушіння. У наукових колах і серед виробників агрообладнання дедалі більшої уваги набувають рішення, засновані на рекуперації теплоти, застосуванні теплових насосів, комбінованих методах сушіння (інфрачервоне, мікрохвильове, сонячно-асистоване) та інтелектуальному керуванні процесом [2; 3; 6]. Вимоги до енергоефективності й якості зерна формують нову парадигму: технологія сушіння має бути не лише продуктивною, а й ресурсозберігаючою.

Оскільки зерно є не лише основою для виробництва великої кількості продовольчих продуктів, а й цінною сировиною для кормової, фармацевтичної та переробної промисловості, вдосконалення технологій його сушіння набуває стратегічного значення. В Україні це питання має також економічну складову, адже вартість енергоресурсів суттєво впливає на собівартість зерна. В умовах повномасштабної війни, що спричинила коливання цін і дефіцит енергоресурсів, проблема енергоефективності технологічних процесів, зокрема сушіння зерна, набуває особливої актуальності. У цьому контексті **мета даної статті** — аналіз сучасних енергоощадних технологій сушіння зернових культур та оцінка їхнього потенціалу з позиції сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх десятиліть дослідження процесу сушіння зернових культур зосереджуються на підвищенні енергоефективності та збереженні якості сировини. Зерно є високочутливим до температурного впливу, і традиційні термічні методи сушіння (конвекційні, шахтні, барабанні) часто призводять до надмірних втрат вологи, нерівномірного нагріву та зниження схожості насіння. Крім того, на частку сушіння припадає до 30% загального енергоспоживання аграрного виробництва [1].

Проблема енергоспоживання є ключовою у контексті сталого розвитку. Застосування систем рециркуляції повітря у безперервних барабанних сушарках для переробки овочевих відходів дає змогу знизити споживання енергії на 21–38,5% і підвищити термічний ККД на 28–63% порівняно з традиційними схемами сушіння [2;3]. Однак досягнення таких показників на практиці потребує

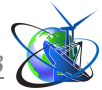


ретельного технічного налагодження та контролю параметрів повітря. Особливу увагу приділяють технологіям сонячного сушіння, які забезпечують низьку собівартість процесу та екологічну безпечність. Дослідження А. El-Sebaïi, та S. Shalaby доводять, що використання сонячних колекторів із терморегулюванням дає змогу підтримувати стабільну температуру сушіння на рівні 40–60°C, що оптимально для зернових культур [4].

Водночас швидке поширення нетермічних методів сушіння — зокрема інфрачервоного (IR), мікрохвильового (MW) та комбінованих технологій (MW–hot air, IR–hot air) — відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності процесів зневоднення зерна. За даними дослідження К. Jimoh комбіновані режими сушіння дають змогу істотно зменшити питомі енергозатрати: зокрема, застосування MW–hot air забезпечує скорочення споживання енергії до 75%, а IR–hot air — приблизно до 54%, водночас покращуючи рівномірність видалення вологи та скорочуючи тривалість сушіння [18].

Окрім технічних аспектів, важливим напрямом розвитку є цифровізація процесів сушіння. Інтелектуальні системи керування на базі штучного інтелекту, датчики вологості та алгоритми прогнозування енергоспоживання дозволяють оптимізувати параметри сушіння в реальному часі. На етапі апробації такі системи демонструють помітне скорочення коливань вологості, однак їх запровадження поки що обмежене через високу вартість обладнання [5]. Такі системи є складовою концепції «розумного агропідприємства» (Smart Farm), що відповідає принципам сталого виробництва та мінімізації вуглецевого сліду.

У контексті українських досліджень подібні тенденції знаходять практичне відображення. Так, М. Кирпа та В. Кулик зазначають, що у камерних сушарках типу СКП традиційна норма умовного палива становить близько 3,36 кг на 1 т ·% вологи ($\approx 8,56$ МДж/кг), а ККД сягає лише 30–35%. Запровадження двостадійного сушіння з рециркуляцією теплоносія та реверсуванням повітряного потоку дозволяє зменшити витрати палива на 20–26% без погіршення якості насіння [6, с. 1-6]. Подальші праці цих авторів підтвердили



ефективність «м'яких» низькотемпературних режимів (36–42°C; відносна вологість 11–12%), які забезпечують зниження енерговитрат і водночас підвищення життєздатності насіння кукурудзи [7, с. 83–88].

Інженерно-теплотехнічні дослідження М. Безродного та В. Вовка показали, що використання теплонасосної рециркуляційної схеми у шахтних сушарках дає змогу зменшити споживання зовнішньої енергії у 4 рази порівняно з традиційними системами [8, с. 8–12].

Крім того, В. Пазюк обґрунтував доцільність використання сходинково-спадних режимів сушіння (наприклад, 65/50°C із періодами темперування) для насіння ячменю та пшениці, що забезпечує скорочення енерговитрат і покращення схожості [9; 17, с. 64–70].

Таким чином, світовий науково-технологічний прогрес у галузі сушіння спрямований на поєднання трьох складових: зниження енергоспоживання, збереження якості зерна та екологічну безпечність технологічного процесу. Попри значну кількість напрацювань, у вітчизняній практиці залишається недостатньо реалізованим потенціал енергоощадних систем сушіння, адаптованих до умов фермерських і середніх господарств України, що й обґрунтовує актуальність досліджень.

Основний текст.

Підхід до енергоощадного сушіння зернових культур має ґрунтуватися на балансі «енерговитрати—якість—екологічність». Питомі витрати тепла на випаровування 1 кг води у промислових зерносушарках традиційних типів становлять орієнтовно 3,5–7,0 МДж/кг і суттєво залежать від конструкції, режимів та стану обслуговування обладнання. Тому перший напрям рішень — організаційно-технічні заходи (теплоізоляція, контроль герметичності, регламент техобслуговування вентиляторів і пальників, уникнення пересушування та надмірної рециркуляції), які зазвичай дають двозначну економію без капітальних інвестицій. Практичний алгоритм для господарств: енергоаудит сушарки зі зняттям фактичної питомої енергоемності в кВт·год/т·% зниження вологості; коригування температури й подачі агента за вологістю



вихідного повітря (індикатор ефективності випаровування); впровадження регламентів зупинок для вирівнювання вологи (tempering) і запобігання перегріву зерна. Універсальні довідники й рекомендації служб дорадництва наголошують також на простих «швидких перемогах»: калібрування вологомірів, очищення теплообмінних поверхонь, контроль витоків повітря, вирівнювання товщини шару, що разом може дати 5–15% економії енергії вже в перший сезон [1;10].

Другий напрям — теплотехнічна модернізація зі зменшенням втрат та повторним використанням теплоти. Рекуперація відпрацьованого повітря через пластинчасті чи роторні теплообмінники, а також часткова рециркуляція з контролем вологості викидів дозволяють знизити витрати палива на 10–25% залежно від початкового стану та кліматичних умов. Ефект зростає при інтеграції теплових насосів, які піднімають потенціал «низькопотенційного» тепла вихідного потоку. Для шахтної сушарки продуктивністю 25–35 т/год схема «рекуператор + повітряний тепловий насос» забезпечує підігрів припливного повітря на 10–15 °С без додаткового спалювання палива, зменшує навантаження на палиник, а окупність за комерційних тарифів зазвичай становить 2–4 роки. Українські дослідження ефективності рециркуляційних сушарок із тепловими насосами демонструють досяжність такого підходу в умовах вітчизняного ринку та клімату [8]. На технологічному рівні енерго- й ексергетичний аналіз допомагає виявити «гарячі точки» втрат — надмірну температуру агента, недосконалу аеродинаміку та нерівномірність нагріву шару — та цілеспрямовано оптимізувати вузли сушарки [11].

Третій напрям рішень — комбіновані методи інтенсифікації сушіння з керованим впливом енергії на внутрішньозернову вологу. Поєднання гарячого повітря з інфрачервоним (IR) або мікрохвильовим (MW) полем дає скорочення тривалості процесу, підвищує рівномірність видалення вологи та зменшує питомі витрати енергії. Огляд останніх років щодо сушіння зерна систематично фіксує переваги схем MW+повітря, IR+повітря, а також ролі попередніх обробок (ультразвук, діелектричне нагрівання, осмотичні попередні обробки) — вони або



пришвидшують дифузію, або зменшують температуру/час до цільової вологості без погіршення якості [12]. Новіші праці також підкреслюють, що ефект інтенсифікації слід співвіднести з економікою (вартість електроенергії для MW/IR) і з ризиками перегріву білково-крохмальної матриці — тому оптимальний режим для продовольчого зерна і насіннєвого матеріалу різняться [13].

Сонячне та сонячно-асистоване сушіння доцільне як етап попереднього зниження вологості (pre-drying) або як сезонна альтернатива для зернового насіннєвого матеріалу, де рекомендовані «м'які» температури. Сучасні наукові напрацювання показують, що системи з повітряними колекторами, тепловими акумуляторами (фазові матеріали) і/або десикантною осушкою забезпечують стабільний діапазон 40–60°C, прийнятний для сої, гороху та квасолі; економічний ефект проявляється через зменшення споживання газу/дизельного палива і стабілізацію якості (менше тріщин, краща схожість) [14; 15; 16]. Для України практичний сценарій — встановлення активного сонячного повітряного колектора на лінію попереднього підігріву з обхідним байпасом і автоматикою, що перемикає джерело тепла залежно від радіації та вологості вихідного повітря, — дозволяє «знімати» 10–20 % палива в періоди із достатньою інсоляцією.

Завершальним етапом підвищення енергоефективності є цифрова оптимізація режимів сушіння та керування якістю. Сучасні системи керування для сушарок переходять від «зі зворотним зв'язком по температурі» до багатопараметричного управління із датчиками вологості зерна/повітря, швидкості потоку, депресії, CO/O₂ у димових газах, а також із алгоритмами прогнозування (Model Predictive Control). Впровадження інтелектуального керування, зокрема адаптивних та енергоорієнтованих стратегій (energy-aware control), забезпечує утримувати цільову вологість із меншими перерегулюваннями, зменшувати пересушування і, відповідно, втрати маси, а питомі енерговитрати — на 10–20% порівняно з ручним керуванням, особливо у змінних погодних умовах [13]. Для господарств середнього масштабу достатньо встановити: онлайн-вологоміри на вході/виході; датчик відносної вологості та



температури у вихідному повітрі (індикатор ступеня насичення); простий ПІД/МРС-контролер подачі тепла та повітря. Це забезпечить перехід від «температурних карт» до «вологоорієнтованих» карт режимів.

Специфіка сушіння зернових культур вимагає особливої уваги до низькотемпературних режимів і ступінчастості процесу. Для насінневого матеріалу ефективним є двоступеневий або східчасто-спадний режим (наприклад, 65/50°C чи 60/45°C з паузами для вирівнювання вологи), який зменшує термострес і забезпечує високу життєздатність зерна. Українські публікації (ІТТФ НАН України; ВНАУ) експериментально підтверджують, що для ячменю та пшениці такі схеми підвищують схожість і знижують енерговитрати порівняно з постійнотемпературним сушінням; алгоритми вибору оптимальних режимів подаються з урахуванням початкової вологості, швидкості агента та цільової вологості [14; 17]. Подібні результати отримано і для кукурудзи насінневого призначення: дисертаційні дослідження В. Кулика підтверджують критичну роль «м'яких» температур і регламенту післясушильної обробки (темперування, сортування), що безпосередньо впливають на посівні якості [18, с. 3–4].

Економічна доцільність переходу на ресурсозберігаючі технології. Для типового господарства, яке сушить 10 тис. т кукурудзи за сезон, зниження питомого споживання на 0,6 МДж/кг випаруваної води ($\approx 15\%$ від середнього 4 МДж/кг) за рахунок рекуперації та налаштування режимів означає економію палива на десятки тисяч м³ газу або еквівалент дизелю. Додавання повітряного ТН для підігріву на 10–15°C здатне подвоїти цей ефект у пікові години, якщо тарифи на електроенергію прийнятні. Сонячно-асистоване попереднє сушіння (pre-drying) у періоди високої інсоляції дає додаткові 5–10 % економії сезонно, але ключ — автоматичне перемикання джерела тепла і обмеження температури для збереження якості [8; 15; 16].

Отримані розрахункові оцінки підтверджують, що впровадження енергоощадних технологій сушіння є не лише технічно можливим, а й економічно обґрунтованим. Для підтвердження практичної ефективності таких



рішень наведено типові приклади реалізації у виробничих умовах різних господарств. Приклад 1 (модернізація без ТН): шахтна сушарка 30 т/год, кукурудза 24→15% вологості. Встановлено пластинчастий рекуператор на вихідному каналі та датчик RH/T у вихідному повітрі; оптимізовано подачу повітря за індикатором насичення. Результат: –12% витрат палива, –0,3 п.п. пересушування, незмінна продуктивність. Розрахункова окупність — 2 сезони [10, с. 22]. Приклад 2 (ТН+ступеневий режим для зернобобових): лінія сушіння сої 18→12%. Додано повітряний ТН (COP≈3) у рециркуляційний контур та алгоритм 60/45°C з темперуванням. Результат: –20–25% енерговитрат, збереження схожості > 90 %, зменшення тріщин оболонки, окупність 3–4 роки [8; 14; 17]. Приклад 3 (сонячно-асистований pre-drying): господарство з площею колекторів 120 м² вмикає сонячний підігрів припливного повітря у вересні-жовтні; при радіації > 500 Вт/м² забезпечується +12°C до припливу, що знижує навантаження на пальник та дає до 8–12% економії палива у «сонячні» дні [15;16].

Результати аналізу свідчать, що енергоощадні технології сушіння складаються з послідовності рішень, кожне з яких має свою «нішу» застосування. Базові заходи (обслуговування, герметичність, налаштування режимів за вологістю вихідного повітря) є обов'язковими незалежно від масштабу. Рекуперація та теплові насоси доцільні на потоках середнього/великого навантаження й у господарствах із прогнозованими обсягами сушіння. Комбіновані методи (IR/MW+повітря) — для скорочення часу й підвищення рівномірності (особливо в умовах обмеженої потужності теплогенерації). Сонячно-асистовані рішення — як інструмент зниження вуглецевого сліду та витрат у періоди доступної інсоляції. Інтелектуальне керування — «клей», що з'єднує ці рішення в сталій експлуатації. Для України наявна доказова база (праці ІТТФ НАН України, ВНАУ, НТУУ «КПІ» та ін.) і практичні рекомендації, що підтверджують досяжність 15–40% економії енергії без втрати якості за умови правильної інтеграції технологій.



Висновки

Проведений аналіз підтвердив, що підвищення енергоефективності процесів сушіння зернових культур є одним із ключових напрямів сталого розвитку аграрного виробництва. Традиційні сушильні системи характеризуються значними втратами тепла, високими питомими енерговитратами та ризиком зниження якості зерна, тому впровадження інноваційних технологій є не лише технічно доцільним, а й економічно вигідним. Найбільш ефективними стратегіями зменшення енергоспоживання є поєднання організаційно-технічних заходів (герметизація, обслуговування, контроль режимів за вологістю вихідного повітря) із технологічною модернізацією обладнання. Рекупераційні системи та теплові насоси забезпечують зниження витрат палива на 20–40%, підвищуючи коефіцієнт використання теплоти сушильного агента. Комбіновані методи сушіння з використанням інфрачервоного та мікрохвильового випромінювання скорочують тривалість процесу та сприяють рівномірнішому видаленню вологи без втрати харчової і посівної якості зерна. Сонячно-асистовані системи, особливо на етапі попереднього сушіння, дозволяють частково замінити викопне паливо, зменшити вуглецевий слід і підвищити екологічну сталість агровиробництва. Важливою складовою сучасних рішень є цифровізація та інтелектуальне керування процесом сушіння, що дає можливість оптимізувати параметри в реальному часі, мінімізувати пересушування та стабілізувати енерговитрати. Узагальнення наукових і практичних даних свідчить, що в українських умовах досяжна економія енергії становить у середньому 15–40% без погіршення якості продукції. Ефективна реалізація енергоощадних технологій потребує комплексного підходу — від енергоаудиту й удосконалення існуючих систем до інтеграції рекупераційних, теплонасосних, сонячних і цифрових рішень. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку адаптивних систем керування сушінням, оптимізацію режимів для різних культур і створення енергоефективних сушарок, адаптованих до потреб фермерських і середніх господарств України.



Література:

1. Farm Energy Efficiency. Grain Drying Energy Efficiency Checklist and Tips Farm Energy Extension. URL: <https://farm-energy.extension.org/grain-drying-energy-efficiency-checklist-and-tips/> (дата звернення: 10.10.2025).
2. Iguaz, A., Lopez, A., Virseda, P. Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for vegetable wholesale by-products. *Journal of Food Engineering*. 2002. Vol. 54, No. 4. P. 289–297. ISSN 0260-8774. URL: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65dfe9e50f3e94b9e5dd8e98> (дата звернення: 23.10.2025).
3. Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Trutassanawin, S., & Jariyatontivait, W. (). Design, testing, and optimization of vibro-fluidized bed paddy dryer. *Drying Technology*, 2001.19(8), p. 1891-1908. <https://doi.org/10.1081/DRT-100107278> (дата звернення: 20.10.2025).
4. El-Sebaili, A. A., Shalaby, S. M. Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, Issue 1, pp. 37–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134> (дата звернення: 15.10.2025).
5. Bhattacharjee S., Singh R., Verma P. K. A critical review on drying of food materials – Recent progress and key challenges. *Food and Bioproducts Processing*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.09.006>.
6. Кирпа М. Я., Кулик В. О. Енергоощадні прийоми у технологіях сушіння насіння кукурудзи. *Бюлетень Інституту сільського господарства степової зони НААН України*. 2016. № 11. С. 82–87. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bisg_2016_11_19 (дата звернення: 15.10.2025).
7. Кирпа М. Я., Боденко Н. А., Кулик В. О. Енергоощадне сушіння насіння кукурудзи та його вплив на якість посівного матеріалу. *Вісник аграрної науки*. 2024. № 2. С. 83–88. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaan_2024_2_14 (дата звернення: 10.10.2025).
8. Безродний М. К., Вовк В. В. Аналіз ефективності рециркуляційної сушарки зерна з тепловим насосом. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2014. № 2(94). С. 7–13. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/8968> (дата звернення: 10.10.2025).



9. Пазюк В. М. Підвищення енергоефективності обладнання для сушіння зерен насіння. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № (09). С. 138-146 URL:

<http://tetapk.vsau.org/storage/articles/September2020/fCCER2Y8l3Vx2TXBMLtw.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).

10. Maier D. E., Bakker-Arkema F. W. Grain drying systems : report at the Facility Design Conference of the Grain Elevator & Processing Society, St. Charles (Illinois, USA), July 28–31, St. Charles, 2002. 53 p. URL: <https://fyi.extension.wisc.edu/energy/files/2016/09/Grain-drying-Systems-GEAPS-2002-secured.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).

11. Wang G., Yang H., Li H. та ін. Energy and Exergy Analyses of Rice Drying in a Novel Electric Stationary Bed Grain-Drying System with Internal Circulation of the Drying Medium. *Energies*. 2021. Vol. 14, No 23. Article 8032. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8749982/> (дата звернення: 20.10.2025).

12. Jimoh K. A., Hashim N., Shamsudin R. та ін. Recent Advances in the Drying Process of Grains. *Food Engineering Reviews*. 2023. Vol. 15. P. 548–576. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstreams/8595d4e4-e480-4bcd-b064-eb4df274f858/download> (дата звернення: 16.10.2025).

13. Yu P., Wang X., Wang Z. та ін. Current Status of Grain Drying Technology and Equipment: A Review. *Foods*. 2025. Vol. 14, No 14. Article 2426. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/14/2426> (дата звернення: 16.10.2025).

14. Yu. F. Snezhkin, V. M. Paziuk, Zh. O. Petrova & O. A. Tokarchuk Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying : article in INMATEH Agricultural Engineering, Vol. 61, No. 2, 2020. pp. 183-192. URL: [https://api.inmateh.eu/public/uploads/61-20-N10-Snezhkin-Yu.F.\(1\)-\(2\)af1a08a0-136b-4661-b1e4-24f64970d628.pdf](https://api.inmateh.eu/public/uploads/61-20-N10-Snezhkin-Yu.F.(1)-(2)af1a08a0-136b-4661-b1e4-24f64970d628.pdf) (дата звернення: 16.10.2025).

15. El-Mesery H. S., El-Seesy A. I., Hu Z., Li Y. Recent Developments in Solar Drying Technology of Food and Agricultural Products: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 157. Article 112070. URL:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121013320>.

16. VijayaVenkataRaman S., Iniyan S., Goic R. A Review of Solar Drying Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, No 5. P. 2652–2670. URL:

https://econpapers.repec.org/article/eeerensus/v_3a16_3ay_3a2012_3ai_3a5_3ap_3a2652-2670.htm.

17. Пазюк В. М. Енергоефективна сушка насіння зернових культур. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 3 (110). С. 64-70 URL: <http://tetapk.vsau.org/storage/articles/September2020/fCCER2Y8l3Vx2TXBMLtw.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).

18. Кулик В. О. Вплив способів сушіння та обробки на якість насіння гібридів кукурудзи : дис. ... канд. с.-г. наук : 06.01.05 – селекція і насінництво / Держ. установа “Інститут зернових культур” НААН України. Дніпро, 2021. 173 с. URL: https://institut-zerna.com/library/kulik/disertacia_kulik.pdf (дата звернення: 20.10.2025).

Abstract. The article examines modern energy-efficient technologies for grain drying in the context of sustainable agricultural development. The main drawbacks of traditional drying systems are analyzed, including high specific energy consumption, uneven grain heating, and loss of biological value. The study summarizes recent research results on the implementation of technological solutions aimed at reducing energy use: heat recovery systems, heat pumps, combined drying methods (infrared, microwave, solar-assisted), and intelligent process control systems. It is shown that the application of such technologies reduces energy consumption by 15–40% without compromising product quality, increases the utilization efficiency of the drying agent's heat, and contributes to lowering the carbon footprint of production. Particular attention is given to the adaptation of energy-saving technologies to the conditions of Ukrainian small and medium-sized farms, considering their energy and economic constraints. The study concludes that effective implementation of energy efficiency principles in drying processes requires a comprehensive approach combining equipment modernization, digital process control, and the use of renewable energy sources.

Key words: energy efficiency, grain drying, heat recovery, heat pumps, sustainable development, intelligent control, solar-assisted drying.

**CONTENTS****Innovative economics and management**

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-016> **3**

EVOLUTION AND TRANSFORMATION OF MANAGERIAL
TOOLS FOR PLANNING AND ORGANIZING INNOVATION
ACTIVITIES IN ENTERPRISES UNDER ECONOMIC
INSTABILITY

Gnylianska L.Y., Zamostnyi V.V.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-019> **12**

INNOVATION AS AN ESSENTIAL CHARACTERISTIC OF
THE ACTIVITIES OF MODERN BUSINESS STRUCTURES

Soliar V.V.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-024> **21**

STRATEGIC GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT
OF INTERNATIONAL TRADE AND INVESTMENT
COOPERATION OF LIGHT INDUSTRY ENTERPRISES
OF UKRAINE IN THE CONTEXT OF DIGITALIZATION

Gnylianska L.Y., Ozarko K.S., Kis S.Y.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-030> **32**

METHODOLOGICAL AND ORGANIZATIONAL ASPECTS OF
REFORMING THE PUBLIC ADMINISTRATION SYSTEM IN
UKRAINE

Karpov V. V.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-033> **41**

THE ROLE OF LEADERSHIP FACTORS IN RESTORING
THE EFFICIENT WORK OF AN ENTERPRISE

Moroz L.I.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-042> **52**

THE WAR AND DIGITAL RESILIENCE: ASSESSING THE IMPACT
OF MILITARY CONFLICT ON UKRAINE'S IT INDUSTRY

Zhyvko Z., Vysotska I.,

Polishchuk D., Neporozhnia P.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-046> **63**

MODERN COMMUNICATION TOOLS AS A FACTOR
INCREASING THE EFFICIENCY OF ADVERTISING
ACTIVITIES OF AGRICULTURAL ENTERPRISES

Kriuchko L.S., Mishustina A. S.

Revkov B. M., Mohnach M. S.



http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-048	69
SOCIAL ENTREPRENEURSHIP AS A TOOL FOR SUSTAINABLE RECOVERY OF UKRAINE'S ECONOMY IN THE POST-WAR DEVELOPMENT CONDITIONS <i>Andronik O.L., Hladchuk I. V.</i>	
http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-053	75
DIGITALIZATION OF PUBLIC FINANCE FOR ENHANCING STATE TRANSPARENCY AND ACCOUNTABILITY <i>Kachula S.V.</i>	
http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-054	87
EU TARIFF QUOTAS FOR UKRAINIAN PRODUCTS: USE, BARRIERS AND STRATEGIES OF EXPORTERS <i>Kravchynska V., Hnylytsia R.</i>	
http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-055	95
MCP-ORIENTED GENERATIVE AI ASSISTANTS: TRUSTWORTHY AND POLICY-DRIVEN ARCHITECTURE FOR FINANCIAL SERVICES <i>Tsymbal A.S.</i>	
http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-062	108
EFFECTIVE ATTRACTION AND RETENTION OF SKILLED PROFESSIONALS IN U.S. TRANSPORTATION LOGISTICS <i>Narynska Y.</i>	
http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-063	119
CORPORATE HUMAN RESOURCES: A STRATEGIC DEVELOPMENT PLANNING MECHANISM FOR POST-WAR RECOVERY <i>Bryukhovetskaya N.Ye., Iievlev V.V.</i>	
http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-073	133
TRENDS IN MEDICAL EXPENSE INSURANCE DEVELOPMENT IN UKRAINE UNDER INTERNATIONAL MOBILITY <i>Loginova A.</i>	
http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-075	147
METHODOLOGY “AGRIRISK & SUPPLY CONTINUITY METHODOLOGY” FOR FOOD SECURITY PLANNING BY PUBLIC AUTHORITIES <i>Zlochovska O.</i>	
http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-081	160
CUSTOMS REGULATION AND EXPERTISE OF FOOD PRODUCTS IN THE CONTEXT OF EUROPEAN INTEGRATION: WAYS TO HARMONIZE NATIONAL STANDARDS AND PROCEDURES <i>Chorna T. O., Mirzahaieva E. R.</i>	



Innovations in agriculture, biology

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-025> **166**

STUDY OF THE OPERATION OF A LIQUID DOSING DEVICE
WITH AN AIR-HYDRAULIC VALVE

Artiomov M.P., Kaluzhnij O.D.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-040> **176**

DEPENDENCE OF THE DURATION OF THE VEGETATIVE
PERIOD OF WINTER RAPE ON THE SOWING METHOD,
SOWING RATE AND MINERAL NUTRITION

Petrychenko V.F., Yurchuk S.S.

<http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-03-061> **188**

ENERGY-EFFICIENT GRAIN DRYING TECHNOLOGIES IN
THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Vovk B.I.



International periodic scientific journal

MODERN ENGINEERING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES

Heutiges Ingenieurwesen und
innovative Technologien

Indexed in
INDEXCOPERNICUS
high impact factor (ICV: 70.62)

Issue №41
Part 3
October 2025

Development of the original layout - Sergeieva&Co

Signed: October 30, 2025

Sergeieva&Co
Lußstr. 13
76227 Karlsruhe
e-mail: editor@modern techno.de
site: www.moderntechno.de

Articles published in the author's edition





www.moderntechno.de

e-mail: editor@moderntechno.de