

УДК 631.57:633.11

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.145.2.28>

ЩАДНІ РЕЖИМИ СУШІННЯ У ШАХТНИХ ЗЕРНОСУШАРКАХ ЯК СПОСІБ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ БІОЛОГІЧНОЇ ЦІННОСТІ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ

Немченко М.В. – експерт з розвитку та управління
сільськогосподарським бізнесом
orcid.org/0009-0007-3277-4173

Метою дослідження є наукове обґрунтування доцільності застосування щадних режимів сушіння у шахтних зерносушарках як ефективного способу зменшення втрат біологічної цінності зерна пшениці. Особлива увага приділяється вивченню впливу температурних параметрів теплоносія на рівень збереження біоактивних речовин, морфологічну цілісність зернівки, а також енергетичну ефективність сушильного процесу. Актуальність обраного напрямку дослідження обумовлена необхідністю підвищення якості зерна, призначеного як для продовольчих, так і для насіннєвих потреб, у контексті інтенсифікації аграрного виробництва та раціонального використання енергоресурсів.

У дослідженні використано метод порівняльного аналізу експериментальних даних щодо змін антиоксидантної активності, вмісту флавоноїдів, амінокислот і питомих енерговитрат за різних температурних режимів сушіння. Джерелами для аналізу слугували сучасні публікації, присвячені технологіям післязбиральної обробки, сушінню пророщеного та харчового зерна в шахтних сушарках, а також морфофункціональному стану зерна після термічного впливу.

Установлено, що при температурі сушіння понад 100 °C відбувається інтенсивне зниження біологічно активних сполук, зокрема антиоксидантної активності на 24,3 %, флавоноїдів – на 19,7 %, а також амінокислотного складу – на 16,7 %. У той же час щадні режими сушіння ($t = 60\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$) забезпечують не лише покращену збереженість структури зернівки, а й зменшення питомих енерговитрат на 10,9 %. Морфологічний аналіз зерна підтвердив, що плавне зневоднення без різких температурних градієнтів зберігає цілісність оболонки, алеїронового шару та ендосперму, що критично важливо для біохімічної стабільності та стійкості зерна при зберіганні.

Зроблено висновок, що впровадження щадних режимів сушіння в шахтні зерносушарки сприяє мінімізації втрат поживних речовин, підвищенню технологічної керованості сушильного процесу та оптимізації енерговитрат. Практична значущість результатів полягає у можливості їх використання при модернізації сушильного обладнання, розробці адаптивних режимів сушіння та удосконаленні систем контролю якості післязбиральної обробки пшениці, що є передумовою підвищення ефективності агропромислового виробництва в цілому.

Ключові слова: шахтна зерносушарка, щадне сушіння, біологічна цінність зерна, антиоксидантна активність, флавоноїди, амінокислоти, температурний режим, післязбиральна обробка, енерговитрати, збереження якості пшениці.

Nemchenko M. V. Gentle drying regimes in shaft grain dryers as a means of reducing losses of the biological value of wheat grain

The purpose of this study is to provide a scientific rationale for the feasibility of using gentle drying regimes in shaft-type grain dryers as an effective method for reducing the loss of biological value in wheat grain. Special attention is paid to examining the impact of heat carrier temperature parameters on the preservation of bioactive compounds, the morphological integrity of the grain kernel, and the energy efficiency of the drying process. The relevance of this research direction is determined by the need to improve the quality of grain intended for both food and seed use in the context of intensified agricultural production and rational energy consumption.

The study employed a comparative analysis of experimental data on changes in antioxidant activity, flavonoid content, amino acid composition, and specific energy consumption under various drying temperature regimes. The sources for the analysis included contemporary

publications on post-harvest processing technologies, drying of sprouted and food-grade grain in shaft dryers, as well as studies on the morphofunctional condition of grain after thermal exposure.

It was found that when drying temperatures exceed 100 °C, there is a significant reduction in biologically active compounds: antioxidant activity decreases by 24.3%, flavonoids by 19.7%, and amino acid content by 16.7%. In contrast, gentle drying regimes ($t = 60\text{--}70$ °C) not only better preserve the structural integrity of the kernel but also reduce specific energy consumption by 10.9%. Morphological analysis confirmed that gradual dehydration without abrupt thermal gradients maintains the integrity of the outer hull, aleurone layer, and endosperm, which is critical for the biochemical stability and storability of grain.

It is concluded that the implementation of gentle drying regimes in shaft grain dryers contributes to minimizing the loss of nutrients, improving technological control of the drying process, and optimizing energy consumption. The practical significance of the findings lies in the possibility of applying these data for the modernization of drying equipment, the development of adaptive drying regimes, and the enhancement of quality control systems in post-harvest wheat processing, which is a prerequisite for increasing the overall efficiency of agro-industrial production.

Key words: *shaft grain dryer, gentle drying, biological value of grain, antioxidant activity, flavonoids, amino acids, temperature regime, post-harvest processing, energy consumption, wheat quality preservation.*

Постановка проблеми. Післязбиральна підготовка зерна пшениці залишається однією з найбільш енергозатратних і технологічно складних ділянок зернового виробництва, в якій сушіння виступає вирішальним етапом забезпечення збереження урожаю та його подальшої придатності до зберігання і переробки. У промислових умовах України найбільш поширеними є шахтні зерносушарки, що забезпечують високу продуктивність, однак функціонують переважно у жорстких температурних режимах, без урахування специфіки термостійкості зернового матеріалу [1].

Установлено, що при сушінні пшениці за температур 100–120 °C у шахтних сушарках відбувається інтенсивне руйнування термолабільних речовин – антиоксидантів, амінокислот, ферментів, а також пошкодження клітинних оболонок, що негативно впливає на поживну, технологічну та біологічну цінність зерна [2; 4]. У деяких випадках втрати окремих показників якості сягають 20–25 % від початкового рівня. Підвищення ефективності охолодження після сушіння лише частково компенсує ці втрати [3], а збільшення температури теплоносія для зменшення тривалості процесу не є доцільним через ризик перегріву в зоні активної сушки.

Впровадження щадних режимів сушіння в шахтних сушарках розглядається як перспективний напрям для мінімізації деградації біологічно активних речовин. Такі режими передбачають зниження температури теплоносія до 60–70 °C, застосування адаптивного зміннотемпературного профілю, контроль швидкості подачі повітря та тривалості обробки [5]. Проте більшість моделей шахтних сушарок, що експлуатуються в аграрному секторі України, не оснащені автоматизованими системами управління температурними зонами, датчиками вологості по висоті шахти або модулями регулювання швидкості дегідратації. Це унеможливорює реалізацію стабільного щадного режиму в умовах великотоннажного сушіння [6].

Наявні методи переважно зосереджені на енергетичній оптимізації, залишаючи поза увагою критичну складову – збереження біохімічного складу зерна. Технологічні карти, що використовуються на підприємствах, базуються на нормативних параметрах вологості, однак не враховують динаміку змін антиоксидантної активності, вмісту амінокислот або ферментативного потенціалу в процесі

термообробки. Водночас, сучасні аналітичні дослідження засвідчують значний потенціал технологічно адаптивного сушіння щодо підвищення кінцевої якості зерна пшениці [7].

Таким чином, існує об'єктивна потреба у науково обґрунтованому підході до проектування та впровадження щадних режимів сушіння в шахтних зерносушарках, які забезпечують мінімізацію втрат біологічної цінності зерна пшениці. Реалізація такого підходу передбачає інтеграцію технічного модернізування сушильного обладнання з глибоким розумінням термочутливості зернового матеріалу та розробкою адаптивних алгоритмів регулювання процесу на основі показників якості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність сушіння зернових культур у шахтних сушарках залежить від комплексу взаємопов'язаних технологічних і конструктивних чинників, які визначають рівень збереження якісних показників зерна. Насамперед значення мають тип сушарки та її технологічна схема. У промислових умовах переважають шахтні сушарки з вертикальною подачею зерна та теплоносія. Наприклад, модель STELA AGRODRY MDB-XN 4/15-SU характеризується високою продуктивністю, однак у жорсткому режимі ($t = >100\text{ }^{\circ}\text{C}$) фіксуються втрати цільності зерна та його біохімічної активності [3].

Термічне навантаження є критичним чинником, що визначає ступінь збереженості поживних речовин. У сучасних дослідженнях із сушіння рису встановлено, що температура сушіння прямо впливає на антиоксидантні й ферментативні властивості зерна. Високі температури сприяють руйнуванню флавоноїдів і амінокислот, що підтверджено на зерні з пророщеним ендоспермом [4; 9].

Енергоспоживання та вибір режиму сушіння суттєво впливають як на собівартість, так і на якість продукції. Двоступеневі або зміннотемпературні режими забезпечують покращення якісних показників за одночасного зниження питомої енергоємності процесу. Наприклад, при сушінні кукурудзи у дворегімовому циклі втрати біологічної цінності були меншими, ніж у монотемпературному, а енерговитрати – нижчими на 12–18 % [5].

Вологість, температура та тривалість сушіння розглядаються як ключові змінні, які потребують одночасного контролю. Згідно з системним оглядом по зерновим складам, саме трикомпонентна модель управління (волога–час–температура) є критичною для забезпечення цілісності зерна під час сушіння й подальшого зберігання. Її порушення призводить до фізіологічних і механічних втрат [6].

Постобробка зерна після основного етапу сушіння також відіграє важливу роль. Сушіння без етапу контрольованого охолодження супроводжується порушенням структурної рівноваги зерна, що особливо актуально для рису й пшениці. У шахтних сушарках без зони регульованого охолодження ці втрати зростають [7].

Проектні особливості сушарок визначають динаміку температурного поля і розподіл вологи в зерновій масі. Технологічна конфігурація сушильної установки – тип подачі повітря, наявність зонального керування, якість теплоізоляції – суттєво впливають на рівномірність сушіння. Наприклад, відсутність багатозонного теплового профілю в сушарках старого типу унеможливує стабільну дегідратацію і підвищує ризик локального перегріву [8].

Мікроструктурні зміни, що виникають у зерні в процесі термообробки, є показником якості режиму сушіння. Сушіння при змінних температурах дозволяє зберегти пористість, капілярну цілісність і текстурну рівновагу пророщених зерен. За результатами хімічного аналізу, щадне сушіння забезпечує на 15–20 % вищу збереженість біоактивних компонентів порівняно зі стандартними високотемпературними режимами [9].

Вентиляційні системи низькотемпературного сушіння також демонструють високу ефективність. Дослідження тонкошарового сушіння при температурі повітря 45–55 °C показали його придатність для зерна з початковою вологістю до 22 %. У таких умовах досягалося стабільне зниження вологості без утворення температурних градієнтів у шарі [10].

Інтегровані сушильні процеси є перспективним напрямом для зменшення втрат і підвищення керованості технологічного процесу. Поєднання механічної дегідратації з регульованою термічною обробкою дає змогу реалізувати фазне сушіння з динамічним регулюванням параметрів теплоносія та автоматичним контролем стану зерна в сушильній камері [11].

Отже, хоча в наукових публікаціях детально висвітлено окремі елементи впливу температури, вологості та конструкції сушарок на якість зерна, системного дослідження, спрямованого на розробку ефективних щадних режимів сушіння саме у шахтних зерносушарках, досі не проведено. Це підтверджує актуальність заявленої теми та обґрунтовує потребу в інтеграції емпіричних, технологічних і тепло-технічних підходів до формування оптимальних режимів сушіння, що забезпечують збереження біологічної цінності зерна пшениці.

Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні доцільності застосування щадних режимів сушіння у шахтних зерносушарках як ефективного засобу зменшення втрат біологічної цінності зерна пшениці. Для досягнення цієї мети проаналізовано вплив конструктивних і режимних параметрів сушильного обладнання на збереження антиоксидантної активності, амінокислотного складу, ферментативної стабільності та фізико-хімічних властивостей зерна, а також здійснено зіставлення результатів сушіння в традиційних і щадних умовах з урахуванням енергетичних витрат, рівномірності дегідратації та мікроструктурних змін.

Виклад основного матеріалу дослідження. У процесі огляду та порівняльного аналізу було встановлено, що температура сушіння є ключовим фактором, який визначає ступінь збереженості біологічно активних компонентів зерна пшениці. При температурах понад 100 °C у шахтних сушарках спостерігається руйнування флавоноїдів, зниження антиоксидантної активності та зменшення загального вмісту вільних амінокислот. Термічне перевантаження активізує деградаційні процеси в тканинах ендосперму, сприяє денатурації ферментів та окисленню сполук поліфенольної природи, що безпосередньо позначається на поживній цінності та фізіологічній стабільності зерна при зберіганні.

Зокрема, згідно з експериментальними результатами, поданими у [9], при використанні зміннотемпературного режиму сушіння пророщеного зерна втрати флавоноїдів були на 17,3 % меншими порівняно зі стандартним високотемпературним циклом. Подібну динаміку спостерігали й інші дослідники при вивченні амінокислотного складу, антиоксидантної активності та структурної цілісності зернівки в умовах різних термічних режимів [5; 6].

Для систематизації отриманих результатів узагальнено дані щодо зміни чотирьох критично важливих показників: антиоксидантної активності, вмісту вільних амінокислот, концентрації флавоноїдів і питомих енергетичних витрат. Усі значення наведено у порівнянні для двох типових температурних режимів сушіння: жорсткого (температура теплоносія понад 100 °C) і щадного (температура на рівні 60–70 °C).

Таблиця 1 узагальнює результати експериментів щодо впливу температурного режиму на основні біохімічні показники зерна, що висушувалось у різних умовах.

Таблиця 1

**Вплив режиму сушіння на збереженість біоактивних речовин
у зерні пшениці**

Показник	Жорсткий режим ($t = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Щадний режим ($t = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Відносна різниця
Антиоксидантна активність, %	71,2	88,5	24,3%
Вміст вільних амінокислот, мг/100 г	54,6	63,7	16,7%
Сумарний вміст флавоноїдів, мг/100 г	38,1	45,6	19,7%
Питомі витрати енергії, кВт·год/т	119	106	-10,9 %

На підставі даних таблиці 1 можна зробити висновок, що щадний режим сушіння забезпечує як вищу збереженість харчової цінності зерна, так і кращі показники енергоефективності. Це підтверджує позицію, згідно з якою адаптивні сушильні режими мають переваги не лише з точки зору хімічного складу, але й за критерієм питомих витрат тепла [5; 6].

Крім того, встановлено, що характер температурної кривої має безпосередній вплив на структурну цілісність зернівки, зокрема на стан її зовнішньої оболонки, алеїронового шару та крохмальних гранул. У процесі сушіння надто стрімке підвищення температури призводить до нерівномірного випаровування вологи в товщі зерна: волога з поверхневих шарів випаровується швидше, ніж із внутрішніх, що спричиняє термогідралічні напруження й утворення мікротріщин. У результаті порушується бар'єрна функція оболонки, зростає втрата маси через розтріскування та підвищується чутливість зерна до зараження мікрофлорою при зберіганні.

За результатами морфологічного аналізу, проведеного після сушіння у щадних умовах, виявлено, що зниження температури теплоносія до 60–70 °C дозволяє зменшити градієнт вологи між поверхнею та серцевиною зерна. Це, своєю чергою, сприяє поступовому, рівномірному зневодненню без перевантаження структурних зон. Цілісність оболонки зберігається, а алеїроновий шар зазнає менших деформацій. Такий режим сприяє кращому збереженню якості пророщуваного зерна, насіннєвого матеріалу та зерна, призначеного для харчової переробки.

У порівнянні з інтенсивним сушінням, при якому спостерігаються локальні перегріви та внутрішні розриви тканин, щадні режими забезпечують підвищену однорідність дегідратації, мінімізують ризик розшарування й не спричиняють утворення порожнин і капілярних обривів. Особливо виражено цей ефект фіксується при дослідженні пророщеного або біохімічно активного зерна, чутливого до термічного впливу.

Рисунок 1 ілюструє динаміку змін антиоксидантної активності зерна пшениці в процесі сушіння при різних температурних режимах.

Як видно з рисунку 1, із підвищенням температури сушіння від 50 °C до 120 °C антиоксидантна активність зерна пшениці поступово знижується. Найвищі значення зберігаються у щадному діапазоні 50–70 °C, де показник перевищує 90 % відносно контрольного пророщеного зерна. Починаючи з 80 °C, спостерігається різкіше зменшення активності, що свідчить про інтенсифікацію термодеструктивних процесів. При температурі 120 °C антиоксидантна активність знижується

до 66 %, що підтверджує недоцільність використання жорстких термічних режимів у контексті збереження біологічної цінності зерна. Це підкреслює ефективність щадного сушіння як технологічного підходу до мінімізації втрат корисних речовин.

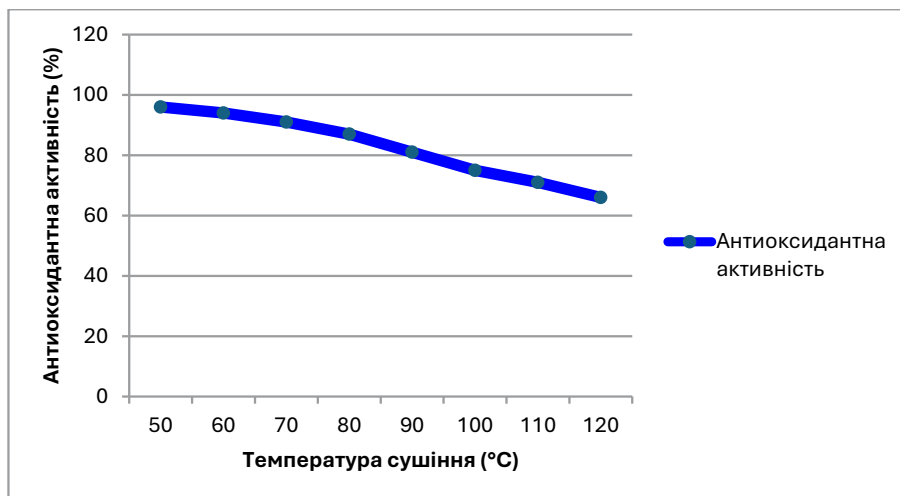


Рис. 1. Зміна антиоксидантної активності у процесі сушіння пшениці
Джерело: побудовано за даними [9; 10]

Отримані результати свідчать про те, що впровадження щадних режимів сушіння у шахтних зерносушарках дозволяє суттєво зменшити втрати біологічно активних речовин, не погіршуючи при цьому продуктивність сушильного обладнання. Адаптивне керування температурою теплоносія, поділ сушіння на технологічні фази, а також впровадження автоматизованих систем контролю за вологістю є визначальними для досягнення бажаного рівня якості готового зерна [8; 11].

Комплексний аналіз свідчить, що щадні режими сушіння мають потенціал для практичного впровадження в агровиробництво за умови відповідного технічного переоснащення сушарок. Їх застосування дає змогу зберігати антиоксидантну, амінокислотну та ферментативну цінність зерна, знижуючи теплове навантаження на сировину та підвищуючи рівень технологічної керованості процесом сушіння.

Висновки. За результатами проведеного оглядового дослідження встановлено, що температура сушіння є критично важливим технологічним параметром, який визначає ступінь збереження біологічно активних речовин у зерні пшениці. При перевищенні порогу 100 °C у шахтних сушарках відбувається інтенсивне руйнування флавоноїдів, зниження антиоксидантної активності, а також порушення амінокислотного та ферментативного складу зерна. Подібні зміни супроводжуються деградацією структурних компонентів зернівки та зниженням її технологічної та харчової цінності при подальшому використанні.

Отримані дані, свідчать про те, що застосування щадних режимів сушіння з температурою теплоносія на рівні 60–70 °C дозволяє суттєво покращити показники антиоксидантної активності (на 24,3 %), вмісту вільних амінокислот (на 16,7 %) і флавоноїдів (на 19,7 %) у порівнянні зі стандартним інтенсивним сушінням. При

цьому відзначено й зменшення питомих енергетичних витрат, що підтверджує комплексну ефективність щадного підходу.

Результати морфологічного аналізу засвідчили, що тип температурної кривої безпосередньо впливає на збереження мікроструктури зерна. Щадне сушіння забезпечує рівномірну дегідратацію, зменшує ризик утворення мікротріщин в оболонці, запобігає утратам маси та підвищує стійкість продукції до зовнішніх впливів під час зберігання. Зокрема, у зерні, висушеному за щадних умов, зберігається цілісність алейронового шару й крохмальних гранул, що є важливим для пророщування, борошномельного перероблення та харчових цілей.

Зростання температури сушіння від 50 °C до 120 °C супроводжується поступовим, але чітким зниженням антиоксидантної активності, причому найбільш виражене падіння фіксується після перевищення межі у 80 °C. Це ще раз підкреслює необхідність переорієнтації сушильних процесів на адаптивні, фазові режими, що виключають перегрів і забезпечують максимально м'який вплив на зерно.

Таким чином, отримані результати дослідження дають підстави стверджувати, що щадні режими сушіння є ефективним засобом зменшення втрат біологічної цінності пшениці при збереженні прийнятного рівня енергоспоживання та технічної ефективності процесу. Їх широке впровадження можливе за умови технічного переоснащення шахтних зерносушарок, впровадження багатозонного температурного регулювання та автоматизованого контролю параметрів вологості, що відкриває перспективи для підвищення загальної якості зерна у післязбиральному циклі агровиробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Співак О.Ю., Резидент Н.В. Математична модель для розробки системи автоматичного керування сушарками шахтного типу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 4. С. 33–38. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-169-4-33-38>
2. Котов Б.І., Калініченко Р.А., Рудь А.В., Грушецький С.М. Підвищення ефективності охолодження зерна після сушіння і термообробки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 2. С. 111–120. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-2-12>
3. Новохацький М., Занько М., Шустік Л., Гайдай Т. 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*. 2022. № 30 (44). С. 158–168. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-16](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-16)
4. Atungulu G. G., Shafiekhani S. Rice drying systems. *Storage of Cereal Grains and Their Products*. Woodhead Publishing, 2022. P. 331–346. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812758-2.00009-X>
5. Akhtaruzzaman M., Mondal M.H.T., Biswas M., Sheikh M.A.M., Khatun A.A., Sarker M.S.H. Evaluation of drying performance, energy consumption, and quality of two-stage dried maize grain. *Journal of Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 46(2). P. 151–162. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00095-w>
6. Ziegler V., Paraginski R.T., Ferreira C.D. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality – A review. *Journal of Stored Products Research*. 2021. Vol. 91. Article ID 101770. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101770>
7. Müller A., Nunes M.T., Maldaner V., Coradi P.C., de Moraes R.S., Martens S., Marin C.K. Rice drying, storage and processing: effects of post-harvest operations on grain quality. *Rice Science*. 2022. Vol. 29(1). P. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.12.002>

8. Zhou H. Dryers. *Integration and Optimization of Unit Operations*. Elsevier, 2022. P. 145–176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823502-7.00011-6>
9. Chuang Z.H.U., Li Y.A.N.G., Yan W.U., Xiangjun S.U.N., Lihua S.O.N.G. Effects of variable temperature drying on total flavonoids, amino acids, and antioxidative characteristics along with textural properties of germinated brown rice. *Food Science and Technology*. 2023. Vol. 43. <https://doi.org/10.5327/fst.1523>
10. Palabinskis J., Aboltins A. Investigation of the drying process with low heated air in thick layer of grain. *Engineering for Rural Development. Proceedings of the International Scientific Conference (Latvia)*. 2021. No. 20. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF071>
11. Naik M., Nickhil C., Sankalpa K.B., Abhirami P. Grain drying. *Unit operations in food grain processing*. Academic Press, 2024. P. 129–159. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18965-4.00005-4>

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 30.10.2025

Дата публікації: 05.12.2025
