

ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ХАРЧОВОЇ ІНДУСТРІЇ

УДК 664.8:66.047:681.5

DOI <https://doi.org/10.31359/2312.3990.2026.39.1.173>

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНЦЕНТРУВАННЯ ПЛОДОВО-ЯГІДНИХ ПЮРЕ У ВИПАРНІЙ УСТАНОВЦІ

О.Є. Загорулько, А.М. Загорулько, О.І. Черевко, О.Є. Громов

У статті розглянуто автоматизацію випарної установки для концентрування плодово-ягідних пюре. Обґрунтовано доцільність використання роторного плівкового апарата й визначено раціональні режими роботи. Доведено, що автоматизоване керування забезпечує енергоефективність процесу, стабільність теплових режимів і високу якість готової продукції.

Ключові слова: *фруктова паста, автоматизація, техніка регулювання, роторний плівковий апарат, концентрування.*

AUTOMATION OF THE FRUIT AND BERRY PUREE CONCENTRATION PROCESS IN AN EVAPORATOR

A. Zagorulko, A. Zahorulko, A. Cherevko, A. Gromov

The article considers the problem of increasing the efficiency of fruit and berry puree concentration processes at food industry enterprises by automating evaporation plants. The relevance of reducing energy consumption, ensuring stable product quality and preserving biologically active substances during heat treatment is substantiated. It is established that traditional evaporators are characterized by an insufficient level of automation, which leads to instability of temperature regimes, excess energy consumption and deterioration of organoleptic indicators of the product. Modern approaches to the automation of evaporation processes are analyzed, in particular the use of intelligent control systems and the need to create adequate mathematical models for complex heat and mass transfer processes. The use of a rotary film apparatus is proposed as an effective means of intensifying the process of concentrating high-viscosity purees. The design of an automated experimental plant and the principles of its operation using microcontroller control and frequency control of the rotor drive are described. The influence of the main technological parameters – temperature, pressure and product flow rate – on the degree of concentration is determined. Experimentally established rational operating modes, which ensure maximum evaporation intensity without deterioration of product quality.

It is proven that the implementation of an automated control system allows to stabilize thermal regimes, increase energy efficiency of the process, reduce processing time and ensure high quality of finished products. The results obtained confirm the prospects of using rotary film machines for processing pectin-containing raw materials and the need for further development of food production automation systems.

Keywords: *fruit paste, automation, control technology, rotary film machine, concentration.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Сучасні підприємства харчової промисловості, зокрема з переробки плодово-ягідної сировини, потребують підвищення ефективності процесів концентрування пюре за рахунок зниження енерговитрат, забезпечення стабільної якості продукції та збереження біологічно активних речовин [1]. Традиційні випарні установки часто характеризуються недостатнім рівнем автоматизації, що призводить до нерівномірності теплових режимів, перевитрат енергії та погіршення органолептичних показників готового продукту [2]. Відсутність ефективних систем автоматичного керування та оптимізації режимів роботи ускладнює підтримання раціональних параметрів процесу (температури, тиску, тривалості обробки), особливо при переробці високов'язких плодово-ягідних пюре. У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення та автоматизації випарних установок із визначенням оптимальних режимів їх роботи, що забезпечують інтенсифікацію процесу концентрування, підвищення енергоефективності та якості кінцевої продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень свідчить, що поряд із удосконаленням конструкцій випарних апаратів значна увага приділяється питанням їх автоматизації та оптимального керування технологічними режимами [3]. Зокрема, встановлено, що ефективність процесу випарювання значною мірою залежить від точності підтримання таких параметрів, як температура, тиск, рівень продукту та витрата теплоносія, відхилення яких призводить до зниження якості продукції та перевитрат енергії. У сучасних наукових роботах розглядаються підходи до застосування інтелектуальних систем керування, зокрема нейромережових регуляторів, які дозволяють підвищити стабільність процесу, скоротити тривалість теплового впливу та забезпечити більш точне дотримання технологічних режимів [1].

Разом із цим, результати досліджень у галузі тепломасообміну в плівкових і роторно-плівкових випарних апаратах показують, що інтенсифікація процесу випарювання супроводжується ускладненням

його математичного опису та керування, оскільки процеси протікають у турбулентній плівці з багатофазною структурою та змінними фізико-хімічними властивостями середовища. Це обумовлює необхідність створення адекватних моделей процесу, які можуть бути використані як основа для побудови систем автоматичного регулювання.

Окрім того, сучасні тенденції розвитку випарної техніки спрямовані на підвищення енергоефективності установок шляхом оптимізації режимів їх роботи, використання багатокорпусних схем, рекуперації тепла та впровадження автоматизованих систем контролю й управління. Важливим аспектом є також можливість інтеграції вимірювальних датчиків і цифрових систем моніторингу, що забезпечують безперервний контроль параметрів процесу та оперативне коригування режимів роботи [4].

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері теплообміну та конструктивного вдосконалення випарних апаратів, питання комплексної автоматизації саме роторно-плівкових або удосконалених випарних установок для концентрування плодово-ягідних пюре залишаються недостатньо висвітленими. Особливо це стосується визначення раціональних режимів роботи в умовах змінної в'язкості, складу сировини та теплових навантажень. Таким чином, існує потреба у розробленні автоматизованих систем керування випарними установками з урахуванням специфіки переробки пектиновмісної сировини, що дозволить забезпечити стабільну якість продукції, підвищити енергоефективність процесу та інтенсифікувати виробництво в цілому [5].

Пектини відомі своїми детоксикаційними властивостями, здатністю зв'язувати і виводити з організму важкі метали, радіонукліди та інші шкідливі сполуки. Незважаючи на це, аналіз сучасного ринку свідчить про обмежений асортимент продуктів із підвищеним вмістом пектину, що обумовлює необхідність інтенсифікації переробки пектиновмісної рослинної сировини. Перспективним напрямом у цьому контексті є виробництво плодово-ягідних та овочевих паст, які можуть виступати як самостійні продукти або як напівфабрикати для подальшого використання у різних харчових технологіях [6–8].

Ключовим етапом отримання паст є процес концентрування, що передбачає видалення надлишкової вологи та формування необхідної структури продукту [1]. Саме на цій стадії значною мірою визначаються органолептичні показники, збереженість вітамінів, біологічно активних речовин та загальна якість кінцевого продукту. У наукових дослідженнях відзначається, що традиційні способи концентрування,

реалізовані у вакуум-випарних апаратах періодичної або безперервної дії, хоча й забезпечують роботу за знижених температур (60...80 °С) та часткове збереження харчової цінності, мають низку суттєвих недоліків. Серед них значна тривалість процесу, високі енерговитрати, нерівномірність теплового впливу та ризик термічного пошкодження продукту, особливо у випадку високов'язких систем.

У зв'язку з цим значна увага дослідників приділяється пошуку ефективніших способів теплової обробки, серед яких особливе місце займають роторні плівкові апарати. Результати численних досліджень підтверджують, що застосування таких апаратів дозволяє істотно інтенсифікувати процеси тепломасообміну за рахунок формування тонкого шару продукту та його активної турбулізації під дією обертових робочих органів. Це сприяє значному підвищенню коефіцієнтів теплопередачі порівняно з традиційними апаратами, скороченню тривалості обробки до десятків секунд та зменшенню габаритів обладнання. Важливою перевагою є також можливість обробки високов'язких середовищ без утворення накипу чи відкладень на теплообмінних поверхнях, що забезпечує стабільність роботи обладнання та покращує санітарно-гігієнічні показники процесу.

Додаткові можливості роторних плівкових апаратів пов'язані з їх універсальністю: у них можуть одночасно реалізовуватись кілька технологічних процесів, таких як випарювання, сушіння, масообмін і навіть окремі хімічні перетворення. Використання вакууму дозволяє знизити температурний рівень обробки, забезпечити інтенсивне видалення вторинної пари та досягти значного ступеня концентрування без суттєвого погіршення якості продукту. При цьому витрати енергії на обертання ротора є незначними порівняно з отриманим ефектом інтенсифікації процесу.

Разом із тим проведений аналіз показує, що наявні наукові розробки та практичні впровадження роторних плівкових апаратів зосереджені переважно на виробництві томатної пасті шляхом концентрування соків. Питання ж переробки пектиновмісної сировини у вигляді пюре, яка характеризується вищим вмістом біологічно активних компонентів, залишається недостатньо вивченим. Відсутні систематизовані дані щодо впливу режимних параметрів роботи таких апаратів на якість кінцевого продукту та ефективність процесу. Це зумовлює необхідність подальших наукових досліджень, спрямованих на обґрунтування доцільності використання роторних плівкових апаратів для концентрування пектиновмісної плодово-ягідної сировини,

а також на визначення раціональних режимів їх роботи з урахуванням вимог до якості та енергоефективності виробництва.

Метою статті є обґрунтування доцільності автоматизації розробленої випарної установки для концентрування плодово-ягідного пюре з визначенням оптимального інтервалу навантаження апарата по продукту.

Матеріали та методи. Автоматизована експериментальна випарна установка, розроблена для досліджень, складається з моделі апарата, ротора з лопатями, електродвигуна з клинопасовою передачею, плівкового нагрівача, вакуумного насоса та конденсатора. Мікроконтролер Atmega-16PI реалізує регулювання потужності нагрівачів, частоти обертання ротора, контроль температури стінки апарата, вторинної пари та рідинних потоків.

Пульт управління РПА виконує функції:

- автоматичного керування контуром термостабілізації;
- ручного пуску електродвигунів і вакуумного насоса;
- захисту від перевантаження й короткого замикання;
- фазового регулювання швидкості обертання;
- індикації температури, тиску, частоти обертання та аварійних режимів.

У процесі концентрування фруктового пюре у роторному плівковому апараті від стабільності частоти обертання ротора залежить рівномірність формування тонкої плівки продукту на теплообмінній поверхні, а отже – інтенсивність тепломасообміну, рівномірність випаровування та якість кінцевого концентрату. Коливання частоти обертання призводять до порушення гідродинаміки плівкового шару, утворення застійних зон і локального перегріву продукту. Для забезпечення стабільної роботи апарата в системі автоматизованого керування застосовано частотний регулятор Mitsubishi Electric, який забезпечує високоточне регулювання швидкості та моменту обертання ротора. Частотний перетворювач типу Mitsubishi перетворює напругу живлення змінної частоти у керований сигнал, що дозволяє плавно змінювати швидкість обертання двигуна, стабілізуючи її незалежно від зміни навантаження. Така система забезпечує плавний пуск і зупинку ротора, стабілізацію частоти обертання при зміні в'язкості пюре, програмування технологічних режимів і керування швидкістю у широкому діапазоні (50...2000 об/хв).

Виклад основного матеріалу дослідження. У процесі концентрування структурно-механічні властивості фруктового пюре змінюються: підвищення в'язкості під час випаровування спричиняє

зростання гідродинамічного опору, що впливає на навантаження електродвигуна. Використання частотного регулятора Mitsubishi з функцією автоматичної стабілізації моменту дозволяє підтримувати сталу швидкість обертання, незважаючи на зміни в'язкості середовища. Це забезпечує сталість товщини плівки на стінках апарата (близько 1,5...2,5 мм), рівномірний розподіл температури, запобігає утворенню пригару, підвищує ефективність тепломасоперенесення та скорочує тривалість випаровування. Частотний регулятор Mitsubishi легко інтегрується у мікроконтролерну систему керування апарата (Atmega-16PI) через інтерфейс Modbus RTU або аналоговий вхід, що дозволяє реалізувати автоматичний зворотний зв'язок за сигналом з датчика частоти обертання, корекцію швидкості відповідно до температури або ступеня вакууму в апараті, а також відображення параметрів на панелі індикації. Це створює можливість побудови адаптивної системи техніки регулювання технологічних параметрів процесу концентрування. Крім технологічних переваг, використання частотного перетворювача підвищує енергоефективність приводу: електродвигун споживає енергію пропорційно необхідному навантаженню, що дозволяє зменшити витрати електроенергії на 20...30 %. Регулятори Mitsubishi мають високий ККД, захист від перевантаження, короткого замикання й перегріву, а також стабілізують частоту при коливаннях напруги живлення. Таким чином, застосування частотного регулятора Mitsubishi у приводі ротора роторного плівкового апарата є науково обґрунтованим рішенням для стабілізації обертання під час концентрування фруктових пюре, що забезпечує високу точність, енергоощадність, стабільність технологічного процесу та підвищення якості готового продукту.

Удосконалена система обігріву та автоматизованого керування РПА забезпечує оптимальний температурний режим під час концентрування плодово-ягідних мас. Використання мікроконтролера для регулювання температури й швидкості обертання підвищує точність техніки регулювання та надійність процесу. РПА є перспективним напрямом розвитку енергоефективного обладнання харчових виробництв з можливістю інтенсифікації тепломасообміну без втрати якості кінцевого продукту. Вони дозволяють встановити залежності між технологічними параметрами та показниками ефективності процесу, такими як ступінь концентрування, енергоспоживання та якість готового продукту. На основі отриманих даних формуються математичні моделі та алгоритми управління, які можуть бути реалізовані у промислових умовах.

Програма експериментальних досліджень режимів функціонування під час концентрування фруктових пюре в роторному плівковому апараті передбачала визначення залежності ступеня концентрування продукту $K = V_{\text{кон}}/V_{\text{вих}}$, де $V_{\text{кон}}$, $V_{\text{вих}}$ – об'єми отриманого концентрату та вихідної сировини відповідно, від основних параметрів процесу. До таких параметрів належать середня температура теплообмінної поверхні (t , °C) та величина вакууму в апараті (p , кПа).

У ході експериментів варіювалися наступні значення вхідних параметрів: температура теплообмінної поверхні становила 60, 70 і 80 °C, а тиск у робочому об'ємі підтримувався в межах 13–15 кПа. Температура подачі продукту знаходилася в інтервалі 50–55 °C.

Отримані залежності $K(W)$ дозволяє комплексно оцінити перебіг процесу (рис. 1). За малих витрат продукту ($W = 0,2 \dots 0,7$ мл/с) спостерігається недовантаження апарата, формуються мінімальні товщини плівки, що призводить до інтенсивного видалення вологи та підгоряння продукту на теплообмінній поверхні. У зоні підвищених витрат ($W = 1,9 \dots 2,5$ мл/с) процес характеризується нестабільністю і фактично зводиться до нагрівання продукту з незначним випаровуванням. Найбільш ефективний і стабільний режим видалення вологи реалізується в середньому діапазоні витрат ($W = 0,8 \dots 1,9$ мл/с), де спостерігається максимальна інтенсивність зміни вихідного параметра.

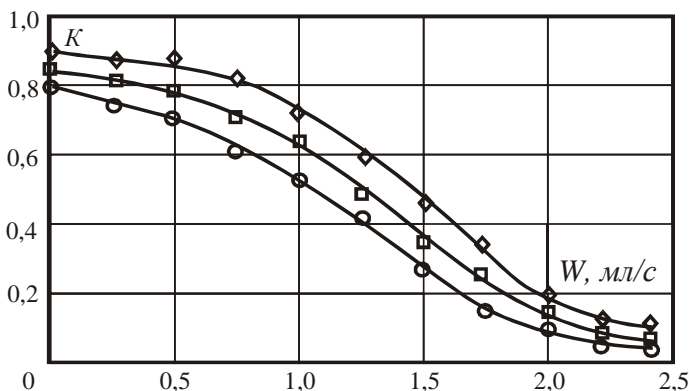


Рис. 1. Коефіцієнт розподілу K від витрати продукту $p=15$ кПа: \diamond – 60 °C; \square – 70 °C; \circ – 80 °C

Отримані експериментальні залежності дозволили встановити, що найбільш ефективне ведення процесу досягається в середній області

режимів, де забезпечується максимальна інтенсивність випаровування без погіршення якості продукту. Вона знаходиться в межах: $K_{min} = V_{кон}/V_{вих} = 0,185$; $K_{max} = V_{кон}/V_{вих} = 0,770$. При надмірних витратах спостерігається недостатнє випаровування і фактичне нагрівання продукту, тоді як при малих витратах відбувається пересушування та можливе пригорання. Це обумовлює необхідність точного регулювання параметрів процесу.

Висновки. Таким чином, результати досліджень підтверджують доцільність застосування роторних плівкових апаратів для концентрування плодово-ягідного пюре та підкреслюють важливість розроблення систем автоматизації, здатних забезпечити підтримання раціональних режимів роботи установки. Це створює передумови для підвищення енергоефективності процесу, стабілізації якості продукції та інтенсифікації виробництва. Встановлено оптимальне поверхнєве навантаження для випаровування плодово-ягідних пюре від початкового вмісту сухих речовин 8...14 % до кінцевого 28...32 %, яке знаходиться в межах 2,64...7,32 кг/(м²·хв).

Список джерел інформації/References

1. Zagorulko, A., Zahorulko, A., Kasabova, K., Chuiko, L., Yakovets, L., Pugach, A., Barabolia, O., & Lavruk, V. (2022). Improving the production technology of functional paste-like fruit-and-berry semi-finished products . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(11 (118), 43-52. – Режим доступу : <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/7032>

2. В.М. Михайлов. Створення якісно нових плодовоовочевих напівфабрикатів і кондитерських виробів на їх основі з оздоровчими властивостями. Михайлов В.М., Загорулько О.Є., Загорулько А.М., Касабова К.Р., Гордієнко І.О. // Наукові праці НУХТ, Т.25, №5, 2019, стр. 162 – 172.

V.M. Mykhailov. Stvorennia yakisno novykh plodoovochevykh napivfabrykativ i kondyterskykh vyrobiv na yikh osnovi z ozdorovchymy vlastyvostyamy. Mykhailov V.M., Zahorulko O.Ye., Zahorulko A.M., Kasabova K.R., Hordiienko I.O. // Naukovi pratsi NUKhT, T.25, №5, 2019, str. 162–172.

3. Черевко О.І. Автоматизація виробничих процесів: підручник /О.І. Черевко, Л.В. Кіпгела, В.М. Михайлов, О.С. Загорулько. – Харків: Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі, 2014. – 186 с.

Cherevko O.I. Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv: pidruchnyk / O.I. Cherevko, L.V. Kiptela, V.M. Mykhailov, O.Ye. Zahorulko. – Kharkiv: Khark. derzh. un-t kharchuvannia ta torhivli, 2014. – 186 s.

4. Zahorulko, A., Zagorulko, A., Fedak, N., Sabadash, S., Kazakov, D., & Kolodnenko, V. (2019). Improving a vacuum-evaporator with enlarged heat exchange surface for making fruit and vegetable semi-finished products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(11 (102), 6–13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178764>

Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 2026. Вип. 1 (39). ISSN: 2312-3990 (Print) 2519-2922 (Online)

5. Панасюк С. Г., Мисковець М.В. Інноваційна технологія виробництва діабетичного желеино-фруктового мармеладу. March 2023. Товарознавчий вісник 1(16):73-84. DOI: 10.36910/6775-2310-5283-2023-17-6

S. H. Panasiuk, M.V. Myskovets. Innovatsiina tekhnolohiia vyrobnytstva diabetychnoho zheleino-fruktovoho marmeladu. March 2023. Tovaroznavchyi visnyk 1(16):73–84. DOI: 10.36910/6775-2310-5283-2023-17-6

6. Kasabova, K., Samokhvalova, O., Zagorulko, A., Zahorulko, A., Babaiev, S., Bereza, O., Ponomarenko, N., Tesliuk, H., Yukhno, V. (2022). Improvement of turkish delight production technology using a developed multi-component fruit and vegetable paste. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (11 (120)), 51–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.269393>

7. Samokhvalova, O., Kasabova, K., Shmatchenko, N., Zagorulko, A., & Zahorulko, A. (2021). Improving the marmalade technology by adding a multicomponent fruit-and-berry paste. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(11 (114)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245986>

8. M. R. Abdrashitova A. R. Abushaeva M. K. Sadigova. Influence of structure-forming recipe ingredients on the quality of pumpkin marmalade. May 2024. Innovations and Food Safety. DOI: 10.31677/2311-0651-2024-43-1-29-45

Загорулько Олексій Євгенович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв ДБТУ, panamari73@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1186-3832>

Zagorulko Aleksey, PhD, Associate Professor, Department of Equipment and Engineering of Processing and Food Production, State Biotechnological University, panamari73@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1186-3832>

Загорулько Андрій Миколайович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв ДБТУ, zagorulko.andrey.nikolaevich@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7768-6571>

Zahorulko Andrii, PhD, Associate Professor, Department of Equipment and Engineering of Processing and Food Production, State Biotechnological University, zagorulko.andrey.nikolaevich@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7768-6571>

Черевко Олександр Іванович, д-р техн. наук, професор, Радник ректора ДБТУ, cherevko_O@hduht.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3424-8659>

Cherevko Oleksander, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rektor’s advisor of DBTU, cherevko_O@hduht.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3424-8659>

Громов Олексій Євгенович, аспірант, кафедра обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв ДБТУ, Gromov 92@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5314-6074>

Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 2026. Вип. 1 (39). ISSN: 2312-3990 (Print) 2519-2922 (Online)

Gromov Aleksey, PhD student in specialty 133 "Industrial engineering", Department of Equipment and Engineering of Processing and Food Production, Gromov 92@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5314-6074>

Отримано: 06.04.2026. Прийнято: 23.04.2026. Опубліковано: 18.05.2026.

УДК 664.723

DOI <https://doi.org/10.31359/2312.3990.2026.39.1.182>

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ СУШІННЯ НАСІННЕВОГО ЗЕРНА ПШЕНИЦІ

О.В. Богомолов, П.В. Гурський, С.Г. Івашченко

У статті розглянуто питання проведення одного з основних технологічних процесів перед закладанням на зберігання зернової маси – сушіння зерна. Матеріалом, для якого проводять сушіння, виступає насіннєве зерно пшениці. Особливістю висушування насіннєвого зерна є те, що це зерно висушують при меншій температурі, тому що надмірне підвищення температури може спричинити денатурацію білків і втрату схожості насіння. У статті розглянуто вибір раціональних режимів сушіння насіннєвого зерна пшениці на лабораторній сушарці конвективного типу. Сушіння проводять за різної товщини зернового шару (1,0; 1,5; 2,0 см), різної температури (25; 30; 35; 40 °C) та швидкості агенту сушіння 0,3 м/с. Подано результати процесу сушіння насіннєвого зерна пшениці залежно від температури та швидкості.

Ключові слова: сушіння, зерносушарка, насіннєве зерно, режими сушіння.

SELECTION OF RATIONAL DRYING MODES FOR WHEAT SEED GRAIN

O. Bogomolov, P. Gurskyi, S. Ivashchenko

The article considers the issue of carrying out one of the main technological processes before storing grain mass, which is grain drying. The material for which drying was performed was wheat seed grain. A feature of drying seed grain is that such grain is dried at a lower temperature because excessive temperature increase can cause protein denaturation and loss of seed germination. The article considers the analysis and carrying out of the drying process, the selection of rational modes of drying wheat seed grain in a laboratory convective dryer, as well as the study of the duration of the drying process of wheat seed grain depending on temperature and speed.

The seed drying process was carried out by blowing heated air, which circulated