



УДК: 664.723.047

DOI: 10.37128/2520-6168-2020-3-6

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СУШКА НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР**

**Пазюк Вадим Михайлович**, д.т.н., доцент, провідний науковий співробітник  
Інститут технічної теплофізики НАН України

**Paziuk Vadym Michaylovich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

*Багато дослідників в різні часи займались сушінням зернових культур для збереження харчових властивостей, що пов'язано з біохімічними властивостями матеріалів. Розроблені та вдосконалені технології сушіння зернових культур з наведеними рекомендаціями направлені на проведення процесу сушіння при високих температурах (вище 100°C). Але підвищенні вимоги до насіннєвого зерна і пов'язані з ним великі енергетичні витрати не дають змогу ефективно проводити процес сушіння, так як при великих об'ємах зерна це приводить до значного збільшення матеріальних витрат.*

*Вивчення закономірностей сушіння насіння зернових культур з огляду на підвищення енергоефективності процесу є актуальною. Енергоефективність є одним із основних параметрів, що впливає на вибір режиму сушіння. В традиційних технологіях сушіння насіннєвого матеріалу його сушать при низькотемпературних режимах, що не дає можливість значно інтенсифікувати процес за рахунок підвищення температури теплоносія, так як при цьому істотно знижується якість матеріалу.*

*Сучасний рівень техніки дає можливість більш точно дослідити та проаналізувати процеси сушіння насіння зернових культур з автоматичною обробкою і побудовою графіків кінетики сушіння. Результати попередніх дослідників проводились на існуючих зерносушарках, в яких складно оцінити і дати правильні рекомендації із сушіння насіннєвого матеріалу. Це пов'язано із особливостями проведення процесу сушіння та конструкцією зерносушарки.*

*Для адекватної оцінки режимів сушіння були проведені дослідження сушіння насіння зернових культур при низьких температурах для збереження насіннєвих властивостей матеріалу. Для підвищення енергоефективності процесу сушіння запропонований ступеневий спадний низькотемпературний режим сушіння, що забезпечує необхідну якість насіннєвого матеріалу.*

*Всі запропоновані технічні рішення із запровадження енергоефективних режимів в процесу сушіння насіння зернових культур були реалізовані в рекомендації для промислового сушіння в шахтних прямооточних зерносушарках.*

**Ключові слова:** насіння, сушіння, сушильний стенд, енергоефективність.

**Рис. 5. Літ. 12.**

---

**1. Постановка проблеми.**

Для проведення порівняння енергетичних витрат на сушіння зерна харчового призначення витрачається теплоти понад 5000 кДж/кг вип. вологи, в сучасних та модернізованих сушарках витрати теплоти можуть складати біля 3500 – 4800 кДж/кг вип. вологи, а при сушінні насіннєвого зерна витрати збільшуються на 30 – 40% і вище (залежить від заходів направлених на утилізацію та рециркуляцію відпрацьованого теплоносія, підготовки теплоносія в теплогенераторі, проведення робіт по зниження теплових втрат в зерносушарці) [1].

Знання механізму внутрішнього переносу теплоти та вологи, а також заходи направлені на розробку технології наближеної до природних процесів сушіння насіннєвого зерна із запровадження енергетично доцільних методів, дають суттєву економію енергетичних ресурсів.

Одним із факторів, що впливає на життєдіяльність насіннєвого зерна при проведенні процесу сушіння – це граничнодопустима температура нагрівання насіннєвого зерна, для визначення якої необхідне додаткове сучасне технічне оснащення. Знання граничнодопустимої температури нагрівання насіннєвого зерна дає можливість розробити енергоефективні режими сушіння.

Рекомендації різних дослідників при сушінні насіння зернових культур відрізняються, це залежить від сушильної установки на якій проводились дослідження, від точності застосування контрольно-вимірювальних приладів. Не завжди в цих дослідженнях вказувалась граничнодопустима температура нагрівання зерна.



Тому актуальність даної роботи полягає у необхідності досліджень із визначення раціональних режимів сушіння насіння зернових культур, що є необхідною умовою отримання високого врожаю.

## 2. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є створення сучасних енергоефективних режимів сушіння зернових культур із розробкою спадних ступеневих режимів сушіння.

Для досягнення мети були поставлені завдання:

- повести дослідження низькотемпературних режимів сушіння насіння зернових культур при температурі теплоносія 50 – 80°C;
- запропонувати енергоефективні режими сушіння насіння зернових культур;
- провести аналіз питомих витрат теплоти на процес сушіння зернових культур;
- розробити схему прямооточної сушильної установки для сушіння насіння зернових культур.

## 3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Багато дослідників у своїх дослідженнях не вказували граничнодопустиму температуру нагрівання насіння зернових культур, що важливо при визначенні раціональних режимів сушіння [2-9]. Запропоновані емпіричні формули направлені на визначення гранично допустимої температури зерна харчового призначення і похибка в розрахунках різних авторів складає біля 10%, що є досить високою.

В багатозонних сушарках була запропонована технологія високотемпературного сушіння насіннєвого зерна із застосуванням висхідних ступеневих режимів з наступним вентиляванням, що різко збільшувало енергетичні витрати на процес при цьому втрачаються якості насіннєвого матеріалу.

Розроблена методика проведення досліджень суттєво відрізняється від встановлених традиційних підходів до сушіння зерна і має на меті зниження енергетичних витрат за рахунок зменшення тривалості процесу сушіння.

## 4. Методика проведення досліджень

Розроблена методика із визначення раціональних режимів сушіння передбачає:

- встановлення сучасної автоматизованої системи для обробки результатів експериментальних досліджень;
- визначення гранично допустимої температури нагрівання насіння зернових культур за рахунок встановлення хромель-копелевих термоелектричних перетворювачів (ДСТУ 2837-94) з діаметром 0,2 мм, з'єднаних з комп'ютером через аналоговий цифровий перетворювач *i-7018* з конвертором-інтерфейсом *i-7520*;
- встановлення високоточних вагів AD-500 з точністю 0,02 г з'єднаних з комп'ютером через аналоговий цифровий перетворювач *i-7018* з конвертором-інтерфейсом *i-7520*;
- сушіння матеріалу в елементарному шарі ( в одне зерно) для отримання більш точних результатів кінетики процесу.

## 5. Результати досліджень

Для визначення раціональних режимів сушіння насіннєвого зерна були проведені експериментальні дослідження на конвективному сушильному стенді з автоматизованою системою зчитування та обробки інформації про час проходження процесу, температури теплоносія і матеріалу, зміну маси зразка [10].

Сушка насіннєвого зерна на конвективному сушильному стенді проводилася в елементарному шарі при наступних параметрах: температура теплоносія  $t = 50 - 80^{\circ}\text{C}$ ; швидкість теплоносія  $V = 0,5 - 1,5$  м/с; початкова вологість матеріалу  $W_{\text{п}} = 16 - 24\%$ ; вологовміст повітря  $d = 10 - 12$  г/кг с.п.

Для дослідження режиму сушіння насіннєвого зерна були обрані зернові культури наступних селекційних сортів: м'яка озима пшениця сорту «Подольська», ярий ячмінь сорту «Барвистий» і овес сорту «Зоряний».

Дослідження впливу початкової вологості, швидкості руху і вологовміст сушильного агента на тривалість сушіння насіння зернових культур показали, що зменшення початкової вологості з 24 до 16% зменшує тривалість в 3– 3,5 рази; збільшення швидкості сушки з 0,5 до 1,5 м/с - в 1,22–1,42 рази; зменшення вологовмісту теплоносія з 12 до 10 г/кг с.в. - на 17,8 - 18,8%.



Вплив на тривалість сушіння насіння зернових культур від температури теплоносія представлені на рис. 1.

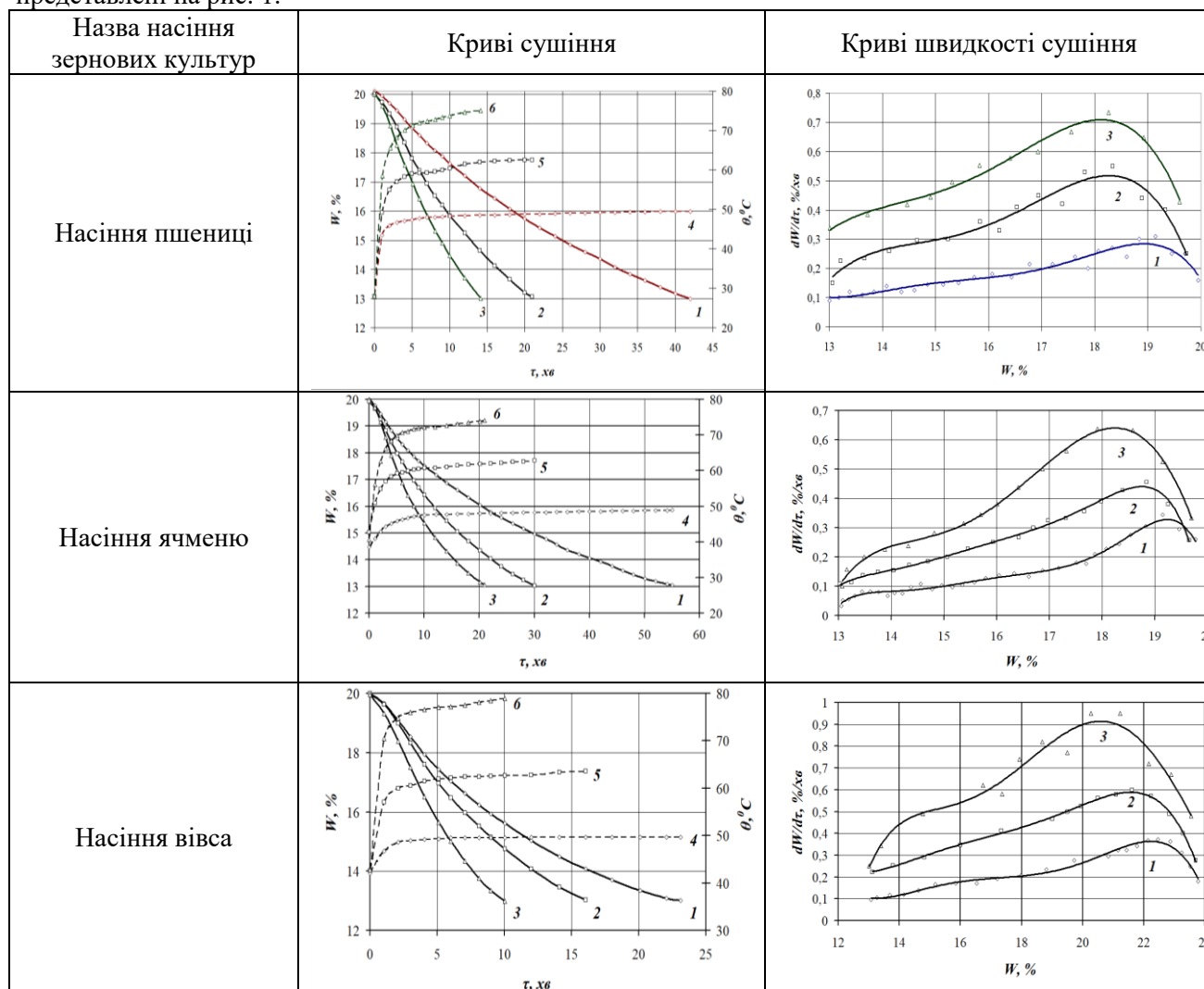


Рис. 1. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння насіння зернових культур  
 $W_{II}=20\%$ ,  $V=1,5$  м/с,  $d=10$  з/кг с.п.,  $\delta=0,002$  м:  
1,4 – 50°C, 2,5 – 65°C, 3,6 – 80°C.

Зміна температури теплоносія від 50 до 80°C зменшує тривалість сушіння пшениці в 2,8, ячменю в 2,67 і вівса в 2,4 раз. Процес сушіння насіннєвого зерна проходить в період падаючої швидкості з короткочасним підігрівом матеріалу. Зі збільшенням температури теплоносія швидкість прогрівання насіння збільшується з одночасним збільшенням випаровування вологи з матеріалу (Рис. 1).

Збільшення інтенсивності в одноступеневому режимі сушіння від впливу температури сушильного агента обмежено якісними характеристиками матеріалу (найкраща схожість зернових культур за попередніми дослідженнями становить 50°C) [11,12], тому вирішення цієї задачі можливо через введення в процес сушіння насіннєвого зерна двоступеневі спадні низькотемпературні режими.

Двоступеневі спадні режими передбачають на першій стадії прогрівання матеріалу при більш високій температурі і сушка на другому етапі зі зниженням температури теплоносія.

Запропонований двоступеневий спадний низькотемпературний режим 65/50°C дозволяє провести короткочасне прогрівання матеріалу при температурі теплоносія 65°C з наступним сушінням насіння при температурі 50°C із збереженням якості насіннєвого матеріалу.

На рис. 2 представлено порівняння кінетики сушіння насіння пшениці в одноступеневих режимах 50, 65, 80 С і двоступеневому режимі 65/50°C.

Тривалість сушіння в двоступеневому режимі 65/50°C зменшується на 83% в порівнянні з режимом сушіння 50°C.



Як видно з рис. 2, в режимі сушіння 65/50°C спочатку процес сушіння при температурі теплоносія 65°C відбувається короткочасне прогрівання матеріалу протягом 5 хвилин до температури матеріалу 59,18 °C і поступово зменшилася в кінці процесу до 54,1°C.

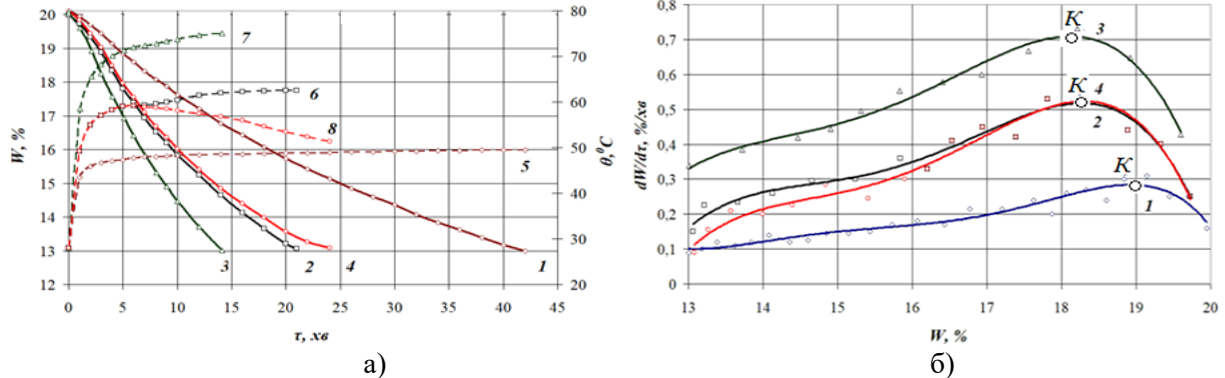


Рис. 2. Вплив температури теплоносія в одно- та двоступеневому режимі на кінетику сушіння насіння пшениці  $W_n = 20\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 0,002$  м:  
1,5 – 50°C, 2,6 – 65°C, 3,7 – 80°C, 4,8 – 65/50°C.

На початку процесу сушіння ступеневий режим сушіння наближений до температурного режиму 65°C, а потім відбувається зниження швидкості сушіння (Рис. 2, б). Представлені криві швидкості сушіння вказують на доцільність введення ступеневого режиму, що перевищує швидкість сушіння при температурі 50°C на 76%.

В результаті запропонованого енергоефективного двоступеневого спадного режиму сушіння 65/50°C, були знижені питомі відносні витрати енергії на процес сушіння насіннєвого зерна пшениці на 62% (Рис. 3).

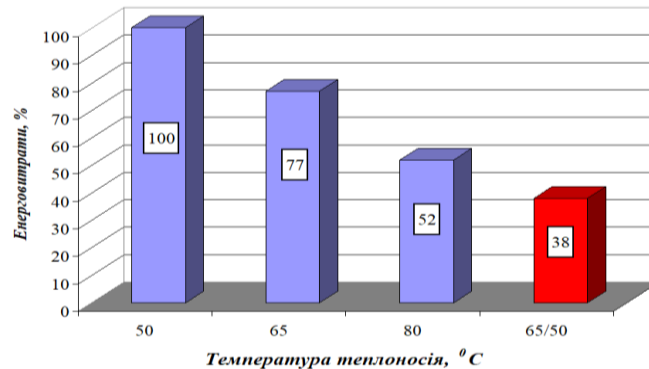


Рис. 3. Зміна енерговитрат на сушіння насіння пшениці від температури теплоносія:  
 $W_n = 20\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 0,002$  м.

На рис. 4 представлені криві сушіння насіння ячменю, пшениці та вівса від впливу ступеневого режиму 65/50°C на тривалість сушіння.

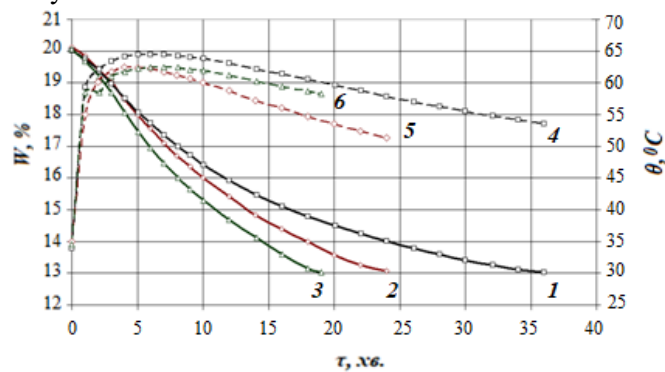
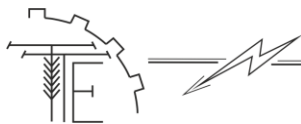


Рис. 4. Порівняння ступеневих режимів насіння ячменю, пшениці та вівса на тривалість сушіння:  $t = 65/50^\circ\text{C}$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм:  
1,4 – ячмінь, 2,5 – пшениця, 3,6 – овес



Процес сушіння представлених зернових культур в ступеневому режимі сушіння 65/50°C найшвидше відбувається для насіння вівса і складає 19 хв, найдовше для насіння ячменю 37 хв. Кінцева температура нагрівання вівса вища за температуру нагрівання представлених зернових культур. На основі проведених досліджень розроблена схема 3-х зонної шахтної сушильної установки із застосування енергоефективних ступеневих режимів сушіння (рис. 5).

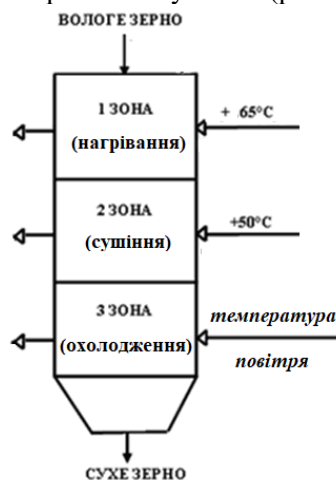


Рис. 5. Енергоефективна схема сушіння насіння зернових культур

## 6. Висновок

Рекомендовано проводити процес сушіння в 3-х зонній шахтній сушильній установці. В ній реалізовано ступеневий режим сушіння 65/50°C: нагрівання насіння при температурі теплоносія 65 °C в I зоні, сушіння при 50°C в II зоні та охолодження при температурі навколишнього середовища.

## Список використаних джерел

1. Малин Н. И. Энергосбережение в теплотехнологиях АПК: учеб.-метод. пособие. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2018. 124 с.
2. Мельник Б. Е., Малин Н. И. Справочник по сушке и активному вентилированию зерна. М.: «Колос», 1980. 148с.
3. Щитов С. В., Тихончук П. В., Кривуца З. Ф., Колзов А. В. Исследование влияния кинематических параметров на оптимизацию процесса сушки зерна. *Дальневосточный аграрный вестник. Научно-практический журнал*. 2016. №2(38). С. 98–102.
4. Щитов С. В., Кривуца З. Ф. Оптимизация энергозатрат в транспортно-технологическом обеспечении АПК: монография. Благовещенск: ДальГАУ, 2012. 151с.
5. Жидко В. И., Атаназевич В. И. Лабораторный практикум по зерносушению. М.: «Колос», 1982. 96с.
6. Резчиков В. А., Дубиничева Р. П. Математическая модель процесса интенсифицированной сушки зерна. Сборник научных трудов ВНИИЗ. М.: ВНИИЗ, 1988. Вып. 110. С. 14–20.
7. Тиц З. Л. Машины для послеуборочной обработки семян. Теория и расчет машин. М.: «Машиностроение», 1967. 448с.
8. Тарабаев Б.К. Исследование процесса сушки зерна пшеницы в псевдооживленном слое. Сборник научных трудов ВНИИЗ. М.: ВНИИЗ, 1983. С. 50–52.
9. Теленгатор М. А., Уколов В. С., Кузьмин И. И. Обработка и хранение семян. М.: «Колос», 1980. 272с.
10. Pazyuk V., Petrova Zn., Chepeliuk O. Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. *Ukrainian Food Journal*. 2018. Volume 7, Issue 1. P. 135 – 150.
11. Paziuk V. M., Liubin M. V., Yaropud V. M., Tokarchuk O. A., Tokarchuk D. M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Romania : Bucharest, 2018. Volume 56, No 3, p. 39–48.
12. Snezhkin Yu.F., Paziuk V. M., Petrova Zn. O., Tokarchuk O. A. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering*. Romania : Bucharest, 2020. Volume 61, No 2, p. 183 – 192.





## References

- [1] Malin, N. I. (2018). Energy saving in heat technologies of agrarian and industrial complex: ucheb.-method. allowance. M.: FGBNU "Rosinformagrotech". [in Russian]
- [2] Melnik, B. E., Malin, N. I. (1980). Handbook of drying and active ventilation of grain. M.: «Kolos». [in Russian]
- [3] Shchitov, S. V., Tikhonchuk, P. V., Krivutsa, Z. F., Kolzov, A. V. (2016). Investigation of the influence of kinematic parameters on the optimization of the grain drying process. *Far Eastern Agrarian Bulletin. Scientific and practical journal.* №2(38), 98–102. [in Russian]
- [4] Shchitov, S. V., Krivutsa, Z. F. (2012). Optimization of energy consumption in transport and technological support of agro-industrial complex: monograph. Blagoveshchensk: DalGAU. [in Russian]
- [5] Zhidko, V. I., Atanazevich, V. I. (1982). Laboratory workshop on grain drying. M.: «Kolos». [in Russian]
- [6] Rezhnikov, V. A., Dubinicheva, R. P. (1988). Mathematical model of the process of intensified grain drying. Collection of scientific works of VNIIZ. M. № 110, 14–20. [in Russian]
- [7] Titz, Z. L. (1967). Machines for post-harvest processing of seeds. Theory and calculation of machines. M. [in Russian]
- [8] Tarabaeu, B. K. (1983). Study of the process of drying wheat grain in a fluidized bed. Collection of scientific works of VNIIZ. M. 50–52. [in Russian]
- [9] Telengator, M. A., Ukolov, V. S., Kuzmin, I. I. (1980). Seed processing and storage. M.: «Kolos». [in Russian]
- [10] Pazyuk, V., Petrova, Zn., Chepeliuk, O. (2018). Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. *Ukrainian Food Journal.* 1(7), 135–150. [in English]
- [11] Paziuk, V. M., Liubin, M. V., Yaropud, V. M., Tokarchuk, O. A., Tokarchuk, D. M. (2018). Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering.* Romania: Bucharest. 3(56), 39–48. [in English]
- [12] Snezhkin, Yu. F., Paziuk, V. M., Petrova, Zn. O., Tokarchuk, O. A. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering.* Romania: Bucharest, 2(61), 183–192. [in English]

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СУШКА СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Многие исследователи в разное время занимались сушкой зерновых культур для сохранения пищевых свойств, что связано с биохимическими свойствами материалов. Разработаны и усовершенствованы технологии сушки зерновых культур с приведенными рекомендациями направлены на проведение процесса сушки при высоких температурах (выше 100°C). Но повышенные требования к семенному зерну и связанные с ним большие энергетические затраты не позволяют эффективно проводить процесс сушки, так как при больших объемах зерна это приводит к значительному увеличению материальных затрат.

Изучение закономерностей сушки семян зерновых культур с учетом повышения энергоэффективности процесса является актуальной. Энергоэффективность является одним из основных параметров, влияющим на выбор режима сушки. В традиционных технологиях сушки семенного материала его сушат при низкотемпературных режимах, что не дает возможности значительно интенсифицировать процесс за счет повышения температуры теплоносителя, так как при этом существенно снижается качество материала.

Современный уровень техники позволяет более точно исследовать и проанализировать процессы сушки семян зерновых культур с автоматической обработкой и построением графиков кинетики сушки. Результаты предыдущих исследователей проводились на существующих зерносушилках, в которых сложно оценить и дать правильные рекомендации по сушке семенного материала. Это связано с особенностями проведения процесса сушки и конструкции зерносушилки.

Для адекватной оценки режимов сушки были проведены исследования сушки семян зерновых культур при низких температурах для сохранения семенных свойств материала. Для повышения энергоэффективности процесса сушки предложенный ступенчатый нисходящий низкотемпературный режим сушки, обеспечивает необходимое качество семенного материала.

Все предложенные технические решения по внедрению энергоэффективных режимов в процессе сушки семян зерновых культур были реализованы в рекомендациях для промышленной сушки в шахтных прямоточных зерносушилках.

**Ключевые слова:** семена, сушки, сушильный стенд, энергоэффективность.

**Рис. 5. Лит. 12.**

**ENERGY EFFICIENT DRYING OF SEEDS OF CEREAL CROPS**

Many researchers at different times have been engaged in drying cereals to preserve their nutritional properties, which is associated with the biochemical properties of materials. The technologies for drying grain crops have been developed and improved with the given recommendations aimed at carrying out the drying process at high temperatures (above 100 ° C). But the increased requirements for seed grains and the associated high energy costs do not allow the drying process to be carried out efficiently, since with large grain volumes this leads to a significant increase in material costs.

The study of the laws of drying of seeds of cereals in view of improving the energy efficiency of the process is relevant. Energy efficiency is one of the main parameters influencing the choice of drying mode. In traditional technologies for drying seed material, it is dried at low temperatures, which does not allow to significantly intensify the process by increasing the temperature of the coolant, as this significantly reduces the quality of the material.

The state of the art makes it possible to more accurately investigate and analyze the drying processes of cereal seeds with automatic processing and plotting of drying kinetics. The results of previous researchers were conducted on existing grain dryers, in which it is difficult to evaluate and give the correct recommendations for drying the seed material. This is due to the peculiarities of the drying process and the design of the grain dryer.

To adequately assess the drying regimes, studies of drying seeds of cereals at low temperatures were carried out to preserve the seed properties of the material. To increase the energy efficiency of the drying process, a step-by-step descending low-temperature drying mode is proposed, which provides the required quality of seed material.

All the proposed technical solutions for the introduction of energy-efficient regimes in the process of drying grain seeds were implemented in the recommendations for industrial drying in mine direct-flow grain dryers.

**Key words:** seeds, drying, drying stand, energy efficiency.

**Fig. 5. Ref. 12.**

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА**

**Пазюк Вадим Михайлович** – доктор технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України (вул. Булаховського, 2, корп. 2, м. Київ., 03164, Україна, e-mail: [vadim\\_pazuk@ukr.net](mailto:vadim_pazuk@ukr.net) )

**Пазюк Вадим Михайлович** – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института технической теплофизики Национальной академии наук Украины (ул. Булаховского, 2, корп. 2, г. Киев., 03164, Украина, e-mail: [vadim\\_pazuk@ukr.net](mailto:vadim_pazuk@ukr.net) )

**Paziuk Vadym Mykhailovych** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Research Fellow of the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (2 Bulakhovsky St., Building 2, Kyiv, 03164, Ukraine, e-mail: [vadim\\_pazuk@ukr.net](mailto:vadim_pazuk@ukr.net) )