

УДК 631.365.2

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.158-166>

Ruslan Kirchuk, Prof., PhD tech. sci., **Lyudmila Zabrodotskaya**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Taras Haponiuk**, post-graduate, **Ruslan Ferents**, post-graduate
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
e-mail: kirchukruslan@lutsk-ntu.com.ua

Experimental studies and mathematical model of the rapeseed seed drying process

The article shows the features of the drying oilseed crops technology, in particular rapeseed. The results of laboratory studies on drying rapeseed are presented, and the possibility of mathematical modeling and calculation is considered. Experimental studies of the drying process were carried out and a numerical experiment was carried out to obtain a mathematical model of heat treatment and dehydration of rapeseed in a thin layer.

rapeseed, drying agent, humidity, mathematical model, drying kinetics

Formulation of the problem. In Ukraine, interest in such an oilseed crop as rapeseed increases and decreases – it all depends on the external market and weather conditions. However, be that as it may, this is a common crop for domestic elevators, so the study of post-harvest processing of rapeseed is an actual task in the future.

It is important to remember that rapeseed seeds with a moisture content above 8% must be stored with mandatory systematic (at least once a day) control of the temperature of the grain mass, recording the results in a journal. Heat transfer in seed mass is almost 100 times less than that of air, so regular temperature measurements must be taken at various points to ensure proper control. The combination of high humidity and temperature during storage can cause spoilage and self-heating. If it is not possible to dry, then it is necessary to at least provide active ventilation, since humidity and ambient temperature also adjust the shelf life. Under unfavorable circumstances, the development of mold fungi will begin immediately. Fungi that develop seed mold is a constant component of the microflora not only of rapeseed. And as soon as a nutrient medium is created or a warm and humid climate, large colonies of mold fungi are formed. Therefore, you should not hesitate, rapeseed should be stored until drying with active ventilation, and if it is not possible to form a large batch, dry immediately and in portions.

For high-quality post-harvest seed treatment, it is necessary to ensure optimal conditions for the drying process. Based on experimental data, it is possible to theoretically select rational parameters that provide the most effective and high-quality drying conditions by performing a numerical experiment for various initial conditions.

Analysis of the latest research and publications. Post-harvest treatment of rapeseed begins with cleaning. Seeds are usually purified from impurities in two stages. During the first stage, large and light impurities are separated, and in the second stage – impurities of other crops, etc. It is the best to use a cleaning machine for these purposes that combines mechanical sieving and air flow cleaning.

Rapeseed is an oilseed crop, so it is better not to load it into the grain dryer with garbage. Debris can cause fires in the grain dryer. Before drying, rapeseed should be cleaned to basic values (Fig. 1). In addition to safety, such cleaning makes it possible to save gas

consumption (you don't have to dry the garbage). Cleaning should be done in several stages. For cleaning, a 3.0 mm sieve is used to remove large impurities. Sieve with opening size 1.0 or 1.2 – for separating weed seeds.

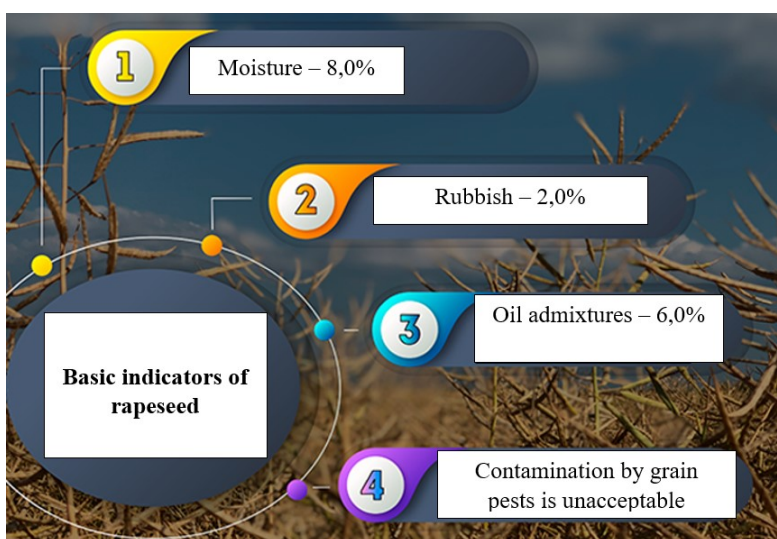


Figure 1 – Indicators of weediness in rapeseed seeds

Source: based on [1]

It is not recommended to store rapeseed for a long time at high humidity. Therefore, it is not always possible to accumulate large quantities of this crop and dry it in a stream. More often you have to do this in portions. As a rule, rapeseed is supplied for drying with different humidity levels – from 8.5% to 18–19%. When a batch of rapeseed accumulates to about 500 tons, then the grain dryer is started in the flow. Otherwise, drying is portioned [1].

Drying rapeseed is the most labor-intensive and responsible process in drying technology. Primarily because wet grain (classification of rapeseed is shown in Fig. 2) contains a high percentage of oil and protein and has a high risk of spontaneous combustion. In addition, it must be dried with extreme care so that the protein does not curl. However, there are rules that must be followed when drying with any dryer. In particular, this applies to temperature conditions.

Rapeseed is dried at a drying agent temperature of 50–60 °C, then the culture does not lose viability. Accordingly, when working with rapeseed, the dryer's productivity is 60–70% lower compared to drying grains. If up to 6% of moisture can be removed from sunflowers in one pass, then everything needs to be done in stages and 2–3% of moisture must be removed in the first pass. In the future, the amount of interest withdrawn can be increased, since the rapeseed will be less wet [2–6].

Attention should be paid to the fluidity of rapeseed. Rapeseed is like “water”, prone to fluidity, so before loading the grain dryer, you must check and eliminate any cracks, loose connections, etc. This is especially important for shaft dryers, since the junction of the boxes with the walls of the shaft may not be tight. and increased gaps between the bends of the boxes and the walls of the shafts can lead to material losses. It is also necessary to adjust the unloading mechanism.

Saving energy resources when drying rapeseed is the main objective of the study. The main disadvantages of existing types of dryers include uneven drying of the material, uncontrollability of drying duration, and ineffective use of the energy potential of the drying

agent. It is possible to partially eliminate these disadvantages by using the proposed rapeseed dryer.

Formulation of the objective. The purpose of the work is to study the kinetics of the rapeseed seed drying process, describe it theoretically, create a mathematical model and automate the calculation process, which will allow us to determine the most optimal initial drying parameters.

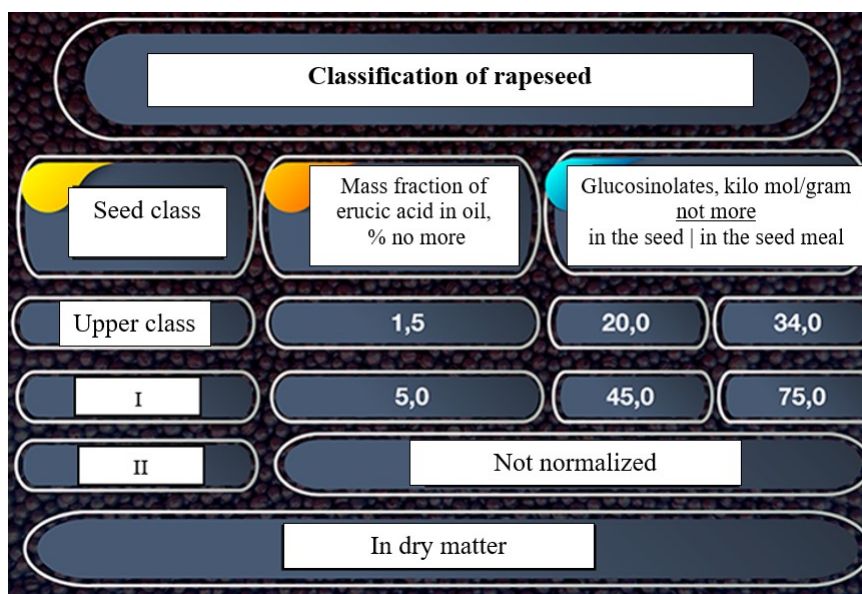


Figure 2 – Classification of rapeseed

Source: based on [1]

Presentation of the main material. For an experimental study of the process of drying rapeseeds, a developed laboratory installation was used (Fig. 3). The installation consists of a fan, heater, flexible connection, drying chamber with cassettes for material.

The installation works as follows: atmospheric air is supplied by a fan to the heater, heated to a temperature set by the regulator and supplied via a flexible connection to the drying chamber, in which numbered cassettes with samples are placed one above the other. The drying agent moves through cassettes with rapeseed samples installed in the specified sequence from bottom to top.

For drying, samples of material with a known initial moisture content and mass were poured into the cassettes.

Drying was carried out for an initial relative humidity of the material of 11% and 15.5% at a heated air temperature of 60–65°C and 45–50°C, respectively. At regular intervals, the mass values in each cassette were recorded, according to which the humidity was determined and graphs of changes in humidity over time were constructed (Fig. 4).

To calculate the process of drying rapeseeds, a stepwise method was used [3,8,9], described by a system of differential equations:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = - \frac{\gamma_M \cdot C_M}{\gamma_{II} \cdot C_{II}} \cdot \frac{\partial \theta}{\varepsilon \cdot \partial \tau} - \frac{\gamma_M \cdot r'}{\gamma_{II} \cdot C_{II} \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{100}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\gamma_{II} \cdot \varepsilon}{10 \cdot \gamma_M} \cdot \left(\frac{\partial d}{\partial t} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial t}{\partial x} = - \frac{\alpha_q \cdot \gamma_M}{\gamma_{II} \cdot C_{II} \cdot \varepsilon} \cdot (t - \theta); \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K \cdot (W - W_p), \quad (4)$$

where t – drying agent temperature °C;
 d – moisture content of the drying agent, g/kg of dry air;
 W – material moisture, %;
 θ – grain temperature °C;
 V – speed of drying agent, m/s;
 C_{II} – heat capacity of material and air, kJ/kg °C;
 e – porosity of the material layer;
 r' – latent heat of vaporization of water, kJ/kg;
 α_q – heat transfer coefficient, kcal/kg·h, °C;
 γ_M – volume mass of material, kg/m³;
 γ_{II} – specific gravity of air, kg/m³;
 K – drying coefficient, 1/h;
 W_p – equilibrium grain moisture %;
 x – spatial coordinate, m;
 τ – time, h.



Figure 3 – Installation for studying the process of drying rapeseeds

Source: developed by the authors

These equations reflect the law of conservation of energy and matter during the drying process, the law of heat and mass transfer between the material and the drying agent. Based on equations (1–4), the drying process of a thin layer of material over a period of time Δt is described by an algebraic system of equations:

$$\Delta t + \frac{C_M \cdot \gamma_M \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_{II} \cdot C_{II}} \cdot \frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} - \frac{\gamma_M \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_{II} \cdot C_{II}} \cdot \frac{r'}{100} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau}; \tag{5}$$

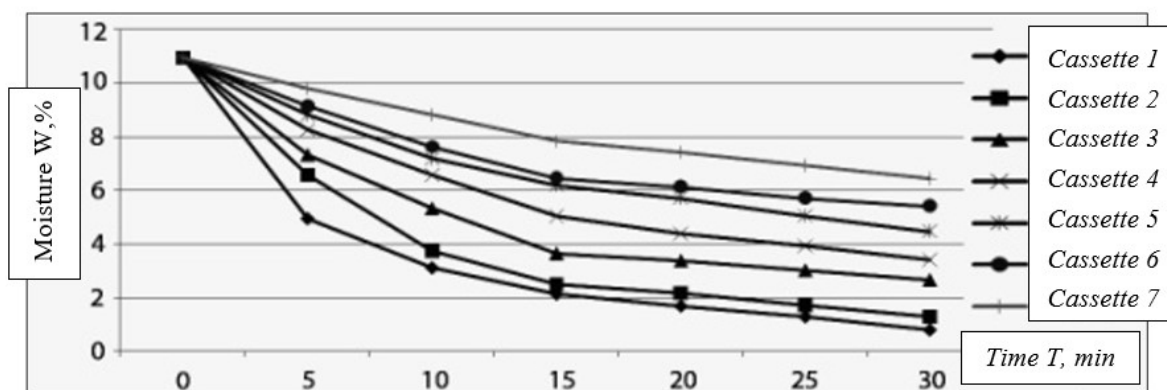
$$\Delta d = -\frac{10 \cdot \gamma_M \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_{II}} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta \tau}; \tag{6}$$

$$\Delta t = -\alpha_q \cdot \frac{\gamma_M \cdot \delta}{3600 \cdot V \cdot \gamma_{II} \cdot C_{II}} \cdot (\theta - t); \tag{7}$$

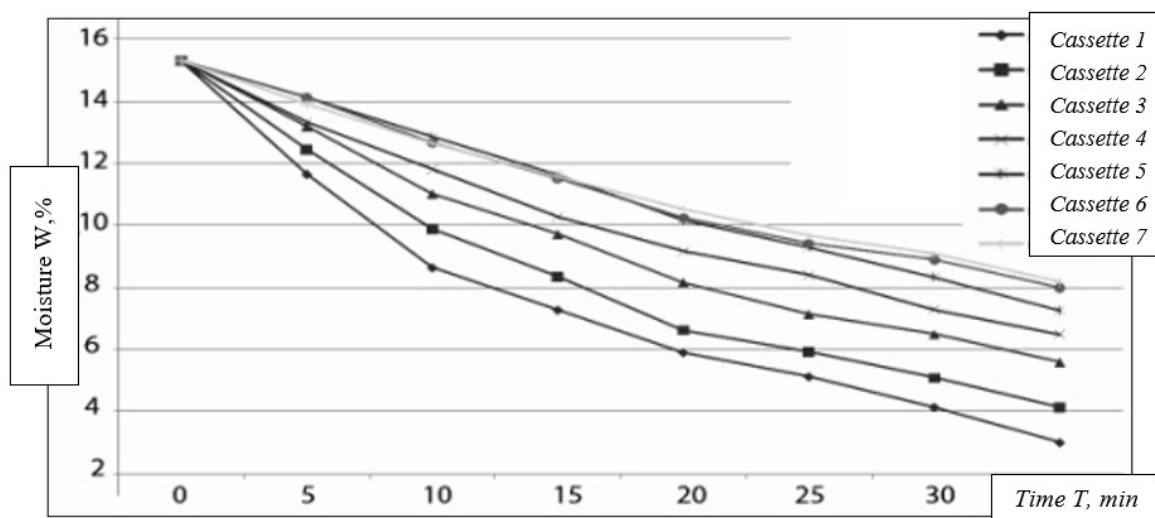
$$\Delta W = -K \cdot (W - W_p) \cdot \Delta \tau, \tag{8}$$

where δ – thickness of thin layer, m.

When calculating, the average diameter of one seed is taken as the thickness of the thin layer. The drying coefficient K [8, 9] depends on the properties of agricultural materials and the drying regime. It was established based on experimental data obtained during drying of rapeseeds (Fig. 4.).



a



b

Figure 4 – Change in seed moisture content during drying in a pilot plant (a) with an initial humidity of 11% and a drying agent temperature of 60–65°C and (b) with an initial humidity of 15.5% and a drying agent temperature of 45–50°C

Source: developed by the authors

For a thin layer of material, its temperature and the temperature of the drying agent are related by the relation:

$$\theta = \frac{t_{i-1} - t_i}{2}, \tag{9}$$

where t_{i-1} , t_i – the temperature of the drying agent at the entrance to the i -th layer and at the exit from it, °C.

Equation (8) allows you to exclude equations (3) and (7) from the calculation, and carry out the calculation without taking into account the heat transfer coefficient and temperature difference.

Thus, for the i -th thin layer in the time interval $(j-1) \cdot \Delta\tau - j \cdot \Delta\tau$ the solution of system (5) – (8) for the material parameters initial at time $(j-1) \cdot \Delta\tau$: humidity $W_{i,j-1}$, j -ii temperature $\theta_{i,j-1}$, as well as the parameters of the drying agent at the entrance to the i -th layer (temperature $t_{i-1,j}$, moisture content $d_{i-1,j}$) determines the parameters of the drying agent at the exit from this layer and the grain at the moment of time $j \cdot \Delta\tau$.

$$t_{i,j} = (1 - A) \cdot t_{i-1,j} + A \cdot \theta_{i,j-1} - B \cdot K \cdot (W_{i,j-1} - W_p) \cdot \Delta\tau;$$

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} + \frac{K}{10,2} \cdot (W_{i,j-1} - W_p);$$

$$W_{i,j} = W_{i,j-1} - K \cdot (W_{i,j-1} - W_p) \cdot \Delta\tau;$$

$$\theta_{i,j} = \frac{t_{i-1} - t_i}{2};$$

where

$$A = \frac{C_M}{102 \cdot C_{II} \cdot \Delta\tau + 0,5 \cdot C_M}; \quad B = \frac{0,01 \cdot r'}{102 \cdot C_{II} \cdot \Delta\tau + 0,5 \cdot C_M}.$$

The calculation of the drying process of a dense layer of rapeseed seeds is carried out according to the scheme presented in Fig. 5.

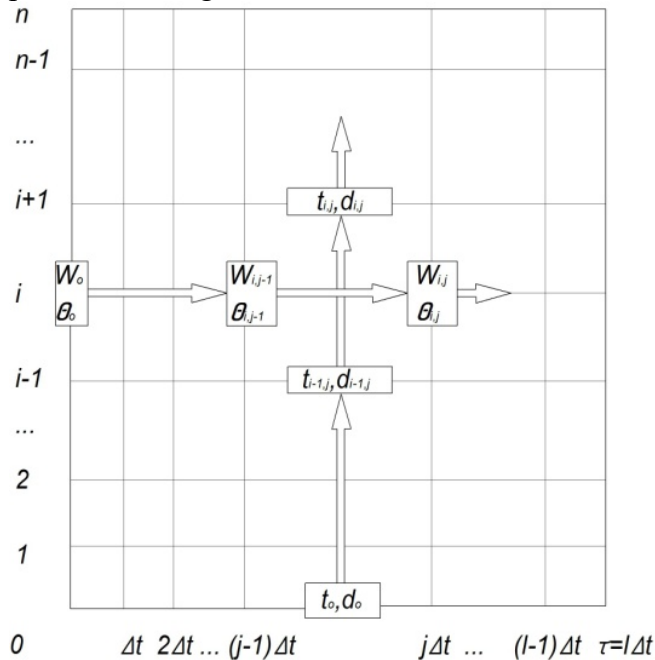


Figure 5 – Schematic diagram for calculating the drying process in a dense layer using the stepwise method

Source: developed by the authors

The described calculation method requires a large amount of computational work, which creates significant difficulties in mass calculations. A numerical experiment was carried out based on the developed software using Free Pascal/Lazarus IDE (Fig. 6).

The proposed model allows you to set the initial calculation parameters: the initial humidity and temperature of the material, the height of its layer and the thickness of the thin layer, the final humidity, moisture content, temperature and speed of movement of the drying agent are specified. As a result of the calculation, the results were obtained (Fig. 6.a): humidity and temperature of the material, as well as moisture content and temperature of the drying agent for each thin layer of material at specified intervals. Based on the data obtained, graphs were generated (Fig. 6.b).

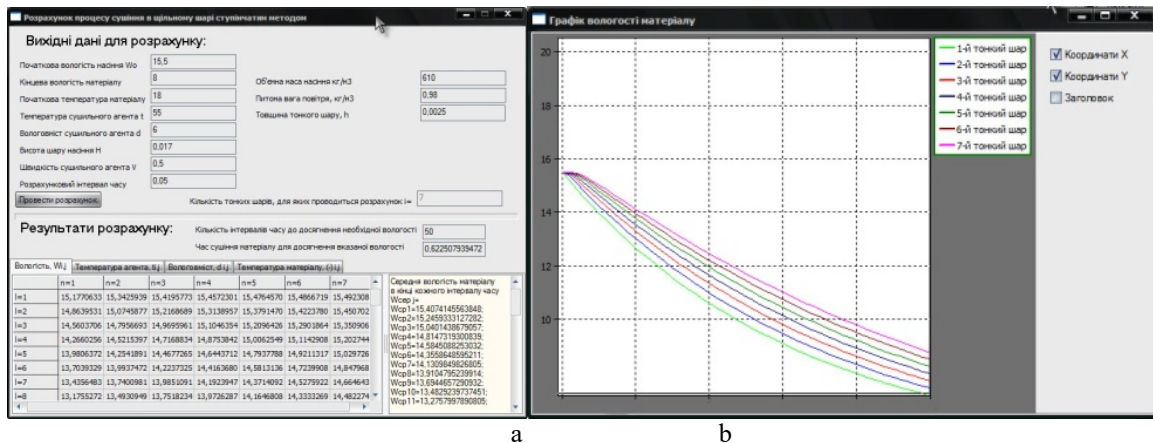


Figure 6 – Calculation of the drying process using the stepwise method:
a) calculation; b) plotting changes in humidity over thin layers of material

Source: developed by the authors

Conclusions. Based on the results of this work, experimental dependences of changes in the moisture content of rapeseed seeds over time were obtained for different temperatures of the drying agent and the initial moisture content of rapeseed seeds, on the basis of which the drying coefficient was determined; the possibility of theoretical calculation of the process of drying rapeseeds was considered, as a result of which an automatic calculation was implemented using a stepwise method using a computer, which makes it possible to make calculations, based on the results of which rational drying parameters can be adopted for a given crop.

The well-known stepwise calculation method can be applied to calculate the kinetics of the drying process using a computer and for other agricultural materials, for which it is necessary to first take into account their thermophysical properties and determine experimentally unknown coefficients. The reliability of the calculations is confirmed by comparison with experimental data from a study of the process of drying seed material.

Bibliography

1. Воробйова І. ПроСушка Рапса . Журнал «Elevatorist.com». URL: <https://elevatorist.com/spetsproekt/148-prosushka-kak-sushit-raps> (дата звернення 05.11.23)
2. Пазюк Д.В., Шеманська Є.І., Пазюк В.М. Рациональні режими сушіння насіння ріпаку. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. №3 (114).С.98-103. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-11.
3. Станкевич Г. М., Страхова Т. В., Атаназевич В. І. Сушіння зерна. К.: Либідь, 1997. 352 с.
4. Snezhkin Yu. F., Paziuk V. M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O. A. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering. Romania: Bucharest*. 2020. № 2, vol. 61. P. 183–192.

5. 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*. 2018. Vol. 56, no.3. Pp. 39- 48, Bucharest/Romania.
6. Pazyuk V., Petrova Zn., Chepeliuk O. Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. *Ukrainian Food Journal*. 2018. Vol. 7, Issue 1. Pp. 135-150. Kyiv.
7. Берегова О. М., Станкевич Г. М. Дослідження процесу сушіння насіння ріпаку *Вісник харківського державного університету сільського господарства*. 2001. Вип. 5. С.282 – 287.
8. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: монографія. Луцьк: ЛДТУ, 2002. 165 с.
9. Гайвась Б. Математичне моделювання конвективного сушіння матеріалів з урахуванням механотермодифузійних процесів. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2010. Вип.12. С. 9-37.
10. Вдосконалення сушарки насіння ріпаку / Л.Ю. Забродоцька, В.Л. Петров, Р.В. Кірчук, А.В. Хомич. *Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст.* 2019. №43 С. 69-79. DOI: <https://doi.org/10.36910/agromash.vi43.203>

References

1. Vorobyova, I. (2023). ProSyshka Rapsa [ProDrying Rapeseed]. *«Elevatorist.com»*. Retrieved from <https://elevatorist.com/spetsproekt/148-prosushka-kak-sushit-raps> [in Ukrainian].
2. Pazyuk, D., Shemanska, E. & Pazyuk, V. (2021). Ratsionalni rezhymy sushinnia nasinnia ripaku [Rational methods of drying rapeseed]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK – Technology, energy, transport of agricultural industry, Issue 3(114)*, 98-103 [in Ukrainian].
3. Stankevych, H.M., Strakhova, T.V. & Atanazevych, V.I. (1997). *Sushinnia zerna [Grain drying]*. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].
4. Snezhkin, Yu.F., Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O. & Tokarchuk, O.A. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering.Romania: Bucharest, № 2, vol. 61*, P. 183–192 [in English].
5. 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, Vol. 56, no.3*, Pp. 39-48 [in English].
6. Pazyuk, V., Petrova, Zn. & Chepeliuk, O. (2018). Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. *Ukrainian Food Journal, Vol. 7, Issue 1*. Pp. 135-150 [in English].
7. Berehova, O. & Stankevych, H. . (2001). Doslidzhennia protsesu sushinnia nasinnia ripaku [Research on the process of drying rapeseed]. *Visnyk kharkivskoho derzhavnoho universytetu silskoho hospodarstva – Bulletin of Kharkiv State University of Agriculture, Issue 5*, 282 – 287 [in Ukrainian].
8. Didukh, V.F. (2002). *Pidvyshchennia efektyvnosti sushinnia silskohospodarskykh materialiv [Improvements in the drying efficiency of agricultural materials]*. Lutsk: Lutsk National Technical University [in Ukrainian].
9. Haivas, B. (2010). Matematychnе modeliuвання konvektyvnoho sushinnia materialiv z urakhuvanniam mekhanotermodyfuziinykh protsesiv [Mathematical modeling of convective drying of materials taking into account mechano-thermo-diffusion processes]. *Fizyko-matematychnе modeliuвання ta informatsiini tekhnologii – Physico-mathematical modeling and information technologies. Issue 12*, 9-37 [in Ukrainian].
10. Zabrodotska, L.Iu., Petrov, V.L., Kirchuk, R.V. & Khomych, A.V. (2019) Vdoskonalennia susharky nasinnia ripaku [Improvement of rape seed dryer]. *Silskohospodarski mashyny : zb. nauk. st. – Agricultural machines : Journal of scientific articles . Issue 43*, 69-79 [in Ukrainian].

Р.В. Кірчук, проф., канд. техн. наук, **Л.Ю. Забродоцька**, доц., канд. техн. наук, **Т.О. Гапонюк**, асп., **Р.В.Ференц**, асп.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

Експериментальні дослідження та математична модель процесу сушіння насіння ріпаку

Загалом, до такої олійної культури як ріпак інтерес у світі то збільшується, то знижується – все залежить від зовнішнього ринку та погодних умов. Цедосить поширена культура для вітчизняних елеваторів, тому дослідження процесів післязбирального обробітку ріпаку є актуальним завданням. Метою роботи є дослідити кінетику процесу сушіння насіння ріпаку, описати її теоретично, створити математичну модель і автоматизувати процес розрахунку, що дасть змогу визначити найбільш раціональні початкові параметри сушіння.

Для проведення експериментальних досліджень процесу сушіння насіння ріпаку було розроблено та використано лабораторну установку. Отримані експериментальним чином параметри процесу сушіння були використані при математичному моделюванні та проведенні числового експерименту. Математична модель сушіння тонкого шару ріпаку ґрунтується на застосуванні відомої теорії тепло-масообміну та методу ступінчатого розрахунку процесу сушіння. Достовірність розрахунків підтверджуються співставленням з результатами експерименту дослідження процесу сушіння насінневого матеріалу.

За результатами роботи отримано експериментальні залежності зміни вологості насіння ріпаку від часу для різних температур сушильного агенту і початкової вологості насіння, на основі яких визначено коефіцієнт сушіння. Створено математичну модель процесу сушіння насіння ріпаку, в результаті чого реалізовано автоматичний розрахунок ступінчатим методом за допомогою ЕОМ, що дає можливість провести обчислення, за результатами яких можна приймати раціональні параметри сушіння для даної культури.

Дану модель можливо застосувати для розрахунку кінетики процесу сушіння і для інших сільськогосподарських матеріалів, для чого необхідно попередньо врахувати їх теплофізичні властивості і визначити експериментально невідомі коефіцієнти.

ріпак, сушильний агент, вологість, математична модель, кінетика сушіння

Одержано (Received) 14.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 03.12.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК 631.17

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.166-175>

О.А. Бурлака, доц., канд. техн. наук, **А.О. Келемеш**, доц., канд. техн. наук,
О.В. Горбенко, доц., канд. техн. наук

Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна

e-mail: anton.kelemesh@pda.u.edu.ua

Елементи організації операційних технологій в рослинництві з урахуванням аграрних ризиків

Тематика представленої статті охоплює системне оцінювання операційних технологій в галузі рослинництва, де одним з ключових факторів є імовірність недоотримання запланованих кінцевих результатів виробництва під впливом аграрних ризиків. Обґрунтування та вибір оптимальної технології вирощування та збирання певної групи сільськогосподарських культур є складною багатокритеріальною техніко-організаційною задачею. На практиці досить часто спостерігаються випадки, коли максимальні технічні, економічні організаційні, технологічні зусилля та витрати у рослинництві не приносять очікуваного запланованого результату щодо ефективності сільськогосподарського виробництва. При цьому постає актуальне практичне та прагматичне питання: чи доцільно в складних економічних та політичних умовах економіки країни використовувати максимум ресурсного, технічного та технологічного забезпечення виробничих процесів у рослинництві, якщо співвідношення «витрати – отриманий результат» може бути набагато менше очікуваних планових показників, і, при цьому, має місце значний вплив некерованих людиною факторів щодо вирощування та збирання сільськогосподарських культур, таких, як наприклад, агрокліматичні ризики. Вважаємо, що в такому варіанті, більш доцільно обирати технології навіть з меншим потенціалом ресурсного забезпечення, направлені на збільшення економічної стійкості виробництва у випадках настання збиткових виробничих результатів під впливом агрокліматичних ризиків.

В даній публікації планування виробничих процесів щодо організації операційних технологій в рослинництві розглянемо на прикладі порівняння та вибору оптимального, за умови врахування агрокліматичних ризиків, варіанту, на прикладі вирощування та збирання озимої пшениці.

технологія, рослинництво, ризик, технологічний процес, оптимізація, критерій

© О.А. Бурлака, А.О. Келемеш, О.В. Горбенко, 2023