

СОКОЛОВСЬКА ОЛЕНА

Одеський національний технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4326-1932>e-mail: sokolovskaya_alena@ukr.net

ВАЛЕВСЬКА ЛЮДМИЛА

Одеський національний технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0511-5643>e-mail: ludmila_valev@ukr.net

АЕРОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗЕРНА КІНОА

Робота присвячена визначенню аеродинамічних властивостей зерна кіноа. Для ефективного проведення післязбиральної обробки та вибору і застосування оптимальних режимних параметрів відповідного технологічного обладнання необхідною умовою є знання фізико-технологічних властивостей зернової маси. Правильний розрахунок і використання цих властивостей дозволяє скоротити втрати, визначити комплекс операцій для поліпшення якості партій зерна й знизити витрати у всіх галузях народного господарства, пов'язаних з виробництвом і використанням зерна. Одним із вагомих критеріїв при організації очищення та сушки зерна є визначення аеродинамічних властивостей зернової маси які визначають поведінку зерна в повітряному потоці

Ключові слова: зерно кіноа, швидкість повітряного потоку, парусність, опір шару зерна, аеродинамічні властивості.

SOKOLOVSKA OLENA, VALEVSKA LIUDMYLA

Odesa National University of Technology

AERODYNAMIC PROPERTIES OF QUINOA GRAIN

Quinoa is an unconventional agricultural crop for Ukraine, but it is very popular. Due to its unique chemical composition, quinoa is used in dietary and functional products.

Quinoa contains about 20% protein, making it an excellent dietary supplement for people who do not consume animal products. The amino acid composition of quinoa proteins is very balanced and characterized by a high content of essential amino acids. A feature of the fatty acid composition of quinoa grains is its high content of polyunsaturated fatty acids, including linoleic fatty acid and linoleic acid, which belongs to ω -3 and ω -6 fatty acids.

In connection with the growing popularity of quinoa and its suitability for cultivation in our natural climate and soil conditions, the development of technology for its storage and processing is urgent. One of the main stages of justifying the choice of quinoa grain storage and processing technology is the determination of its aerodynamic properties.

Aerodynamic properties of grain are characterized by such indicators as buoyancy, floating speed and aerodynamic resistance of the grain layer, which must be taken into account when designing installations for ventilation of grain mass as well as grain dryers. We determined the indicated indicators and established their dependence on grain moisture, layer height and air flow speed.

The conducted research allows to model with sufficient accuracy the aerodynamic characteristics of amaranth grain depending on its humidity and can be used to optimize the processes of cleaning, drying and active ventilation, selection of effective mode parameters of the corresponding equipment.

Keywords: quinoa grain, air flow velocity, windability, grain layer resistance, aerodynamic properties.

В останні роки спостерігається підвищений інтерес до нових зернових культур таких як льон, чіа, кіноа, через їх різноманітне використання. Ці зернові культури відносяться до дрібнонасінневих культур. Дрібнонасінневі зернові культури мають особливості процесів післязбиральної обробки та зберігання. Це в першу чергу пов'язано геометричними розмірами і малої маси 1000 зерен [1, 2]. Слід зазначити, що технологічні властивості вказаних культур суттєво відрізняються від зерна традиційних зернобобових та олійних культур, що потребує їх детального вивчення.

У зв'язку з розширенням асортименту дрібнонасінневих культур, поява нових районуваних сортів, збільшення їх виробництва привели до необхідності уточнення і вивчення їх фізичних, технологічних і фізіологічних властивостей, та корегування технологічних режимів їх післязбиральної обробки і зберігання.

Традиційні методи зберігання (попереднє очищення, сушка, остаточне очищення і зберігання в елеваторі або зерноскладі) пов'язані з втратами зерна на кожному з етапів. Разом з тим, як показує практика, використання активного вентилявання, зрештою, на 25...30 % економічніше за теплову обробку зерна – втрати сухої речовини під час дихання зерна при температурі 20 °C втричі більше, ніж при 10 °C [1-3].

Аеродинамічні властивості зерна – це особливості його поведінки в повітряному потоці. Зерно, що рухається у повітрі, зустрічає опір, значення якого залежить від ряду факторів. Тиск повітряного потоку на тіло, що перебуває в ньому, залежить від маси тіла, його розмірів, форми, стану поверхні, відносної швидкості руху й розташування зерна, а також від стану повітряного середовища. Аеродинамічні властивості зерна і його домішок використовують при очищенні й сортуванні зернової маси.

Аеродинамічні властивості, які можуть бути виражені двома показниками: парусністю та швидкістю витання. Парусність – це відношення площі найбільшого розрізу зернівки до її маси. Цей показник виражає здатність зерна протистояти повітряному потоку. Але більш точно і практично аеродинамічні властивості зерна характеризуються швидкістю витання, яка визначається швидкістю вертикального повітряного

поток, що підтримує зернівку в плаваючому стані. Інколи цей показник називають «критичною швидкістю». Якщо швидкість повітряного потоку менша за швидкість витання, то зернина падає вниз, а якщо більша - виноситься повітряним потоком. Цей показник широко використовується при очистці та сортуванні, актованому вентиляванні зерна [1–5].

При активному вентиляванні здійснюється примусове продування зернових мас повітрям через щілини міжзернового простору. Проходячи через шар зерна, повітря залежно від вологості і температури може охолоджувати зерно (якщо температура зерна вища за температуру повітря), підігрівати зерно (якщо температура зерна нижча за температуру повітря), підсушувати зерно (якщо парціальний тиск водяної пари, що міститься в повітрі, нижче за парціальний тиск водяної пари повітря в міжзерновому просторі і на поверхні зерна) і зволожувати зерно (якщо парціальний тиск водяної пари, що міститься в повітрі, вище за парціальний тиск водяної пари повітря в міжзерновому просторі і на поверхні зерна).

До моменту збирання зерно часто ще не досягає повної фізіологічної зрілості, яка настає тільки після деякого періоду післязбирального дозрівання, що відбуває при зберіганні. Перед закладкою на тривале зберігання зерно таких нестійких в зберіганні культур, необхідно піддати попередньому очищенню і сушінню до масової частки вологи 7..8 %, причому для цього доцільно застосовувати активне вентилявання. Гладка поверхня, округла форма і невеликий діаметр зернівки цих культур обумовлюють знижену шпаруватість насипу — в середньому 30 % від загального об'єму насипу (у пшениці 40..50, у вівса 55 %). При механізованому завантаженні в склади насип додатково ущільнюється ще на 2..3 %, а при зберіганні і продуванні унаслідок природного ущільнення відбувається подальше зменшення шпаруватості. Все це істотно підвищує (більш ніж в 2 рази) опір насипу зерна переміщенню через неї повітря в порівнянні із зерном пшениці, ячменю і інших культур [1-5].

Впровадження оптимальних режимів і способів збереження зернових мас із застосуванням вентилявання, пов'язано з визначенням характеристик зерна і аеродинамічного опору зернового шару, необхідних для визначення витрат повітря, а також енергетичних витрат.

Метою досліджень є визначення аеродинамічних властивостей зерна кіноа, які необхідні для проектування установок активного вентилявання та очищення.

Методика дослідження

Для дослідження швидкості витання зерна треба розглянути рух зернини у вертикальному висхідному потоці. На зернину діють сила земного тяжіння і сила аеродинамічного впливу потоку. Розбіжність центра ваги зернини й центра прикладання аеродинамічної сили викликає момент, який приводить зернину в стан витання.

Швидкість витання зерна визначали за допомогою лабораторного повітряного класифікатора.

Установка складається з конічної труби, вентилятора і осадової камери. Для регулювання витрати повітря, що продувається через установку, встановлена діаграма. Зміна швидкості повітряного потоку визначається U-подібними манометрами. Швидкість повітря по манометрі визначається в перерізі труби на відстані одного діаметра від колектора.

Відповідно до рівняння Бернуллі [1] середню швидкість повітряного потоку в повітропроводі в залежності від вхідного колектора визначали за формулою

$$v = \sqrt{\frac{2H_c}{\rho \left(1 + \lambda \frac{b}{D} + \zeta_k \right)}} \quad (1)$$

де ρ — густина повітря, г/см³;

H_c — статичний надлишковий тиск у другому перерізі, Па;

λ — коефіцієнт опору (для прямих круглих повітропроводів $\lambda \approx 0,013 + 0,001/D$);

D — діаметр повітропроводу, м;

b — розрахункова довжина прямої ділянки повітропроводу (від вхідного колектора до місця виміру тиску), м;

ζ_k — коефіцієнт опору вхідного колектора.

Для лабораторної установки $\lambda = 0,0334$; $D = 0,0487$ м; $b = 0,05$ м; $\zeta_k = 0,1067$.

Відомо [1], що залежність між швидкістю витання $v_{\text{вит}}$ та коефіцієнтом парусності K_p виражається наступним чином:

$$v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{g}{K_p}} \quad (2)$$

де g — прискорення вільного падіння, м/с.

Визначення аеродинамічного опору шару зерна проводили на лабораторній установці, яка складається з прямолінійної ділянки повітропроводу, повітря нагнітається вентилятором. Швидкість повітряного потоку, статичний та динамічний тиск контролювали за допомогою мікроманометрів.

Нами було досліджено швидкість витання та аеродинамічний опір зернового шару дрібнонасіненних культур (сорго, льону, гірчиці, ріпаку та маку) в діапазоні зміни їх вологості $w = 10..22$ %. Аеродинамічний опір визначали при висоті шару зерна 100..300 мм і швидкості повітряного потоку 1..6 м/с.

Для отримання математичної моделі опису залежності аеродинамічного опору проводили трифакторний експеримент ПФЕ-23. За основні фактори, що впливають на аеродинамічний опір, обрали: висоту насипу 100...300 мм, швидкість повітряного потоку 1...6 м/с та вологість зерна 10...22 %.

Обговорення результатів

Кіноа є відомою як дуже корисна зернова культура, багата на білок та поживні речовини. Хоча кіноа не є традиційною культурою в Україні, останнім часом її вирощують на деяких ділянках у зв'язку зі зростанням попиту на цю зернову культуру та її популярність серед любителів здорового способу життя [6-8].

Деякі фермери в Україні експериментують з вирощуванням кіноа на своїх ділянках, особливо в умовах сприятливого клімату та ґрунтових умов. Кіноа може бути вирощена в умовах помірного клімату, але вона більш придатна для вирощування в теплих регіонах з добре дренованими ґрунтами.

Хоча кіноа є привабливою культурою через свої корисні властивості, важливо враховувати, що вирощування, обробка та зберігання зерна кіноа може вимагати певної експертизи та досвіду, оскільки вона може виявитися вразливою до деяких хвороб та шкідників, а також вимагає специфічних агротехнічних прийомів. Також важливо враховувати попит на кіноа на ринку та здатність виробляти продукцію відповідно до стандартів якості.

Розробка оптимальних режимів обробки і зберігання зерна кіноа є важливою задачею для забезпечення якості продукту та його тривалості зберігання.

Таблиця 1

Фізико-технологічні властивості зерна кіноа [7, 8]

Найменування показника	червоне	біле	чорне
Масова частка вологи, %	9,6	10,0	9,8
Натура (об'ємна маса), кг/м ³	595	580	588
Маса 1000 зерен, г	3,36	3,48	3,42
Істинний об'єм 1000 зерен, см ³	3,5	3,5	3,5
Шпаруватість, %	38,0	41,6	39,8
Щільність укладання, %	62,0	58,4	60,2
Забезпеченість повітрям, м ³ /т	0,64	0,69	0,68
Кут природнього укусу,	31	32	31
Коефіцієнти зовнішнього тертя спокою:			
по пластмасі	0,2424	0,2654	0,2856
по сталі	0,2489	0,2752	0,3010
по гумі	0,2554	0,2760	0,3125
Коефіцієнт зовнішнього тертя в русі	0,4282	0,4068	0,4154
Геометричні характеристики:			
Довжина	2,0	1,8	1,7
Ширина	1,8	1,7	1,6
Товщина	1,1	1,1	1,0
об'єм зернини, мм ³	2,65	2,23	1,82
площа зовнішньої поверхні, мм ²	8,27	7,33	6,40
еквівалентний діаметр мм	1,72	1,62	1,52
питома поверхня, мм ² /мм ³	3,12	3,28	3,51
сферичність	0,89	0,89	0,89

Результати досліджень швидкості витання та парусності наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Середні значення швидкості витання та коефіцієнта парусності зерна кіноа

Найменування показника	червоне	біле	чорне
Швидкість витання, м/с	5,83	5,54	5,18
Коефіцієнт парусності, 1/м	0,28	0,31	0,36

Швидкість витання залежить від форми та розмірів зернівки, так найменшу швидкість витання має зерно чорного кіноа [1, 2, 4].

Також нами проведено аналіз залежності швидкості витання та коефіцієнта парусності від вологості, з отриманих даних можна зробити висновок, що із збільшенням вологості у діапазоні 10...22 % швидкість витання зерна зростає, хоча ці значення різняться не значно. Проведена математична обробка

результатів досліджень показує, що залежність швидкості витання від вологості зерна має лінійний характер.

Данні швидкості витання зерна кіноа дозволяють встановити швидкість повітряного потоку, при якій можна проводити їх активне вентилявання.

Для отримання математичної моделі опису залежності аеродинамічного опору проводили трифакторний експеримент ПФЕ-23. За основні фактори, що впливають на аеродинамічний опір, обрали: висоту насипу 100...300 мм, швидкість повітряного потоку 1...6 м/с та вологість зерна 10...22 % [9].

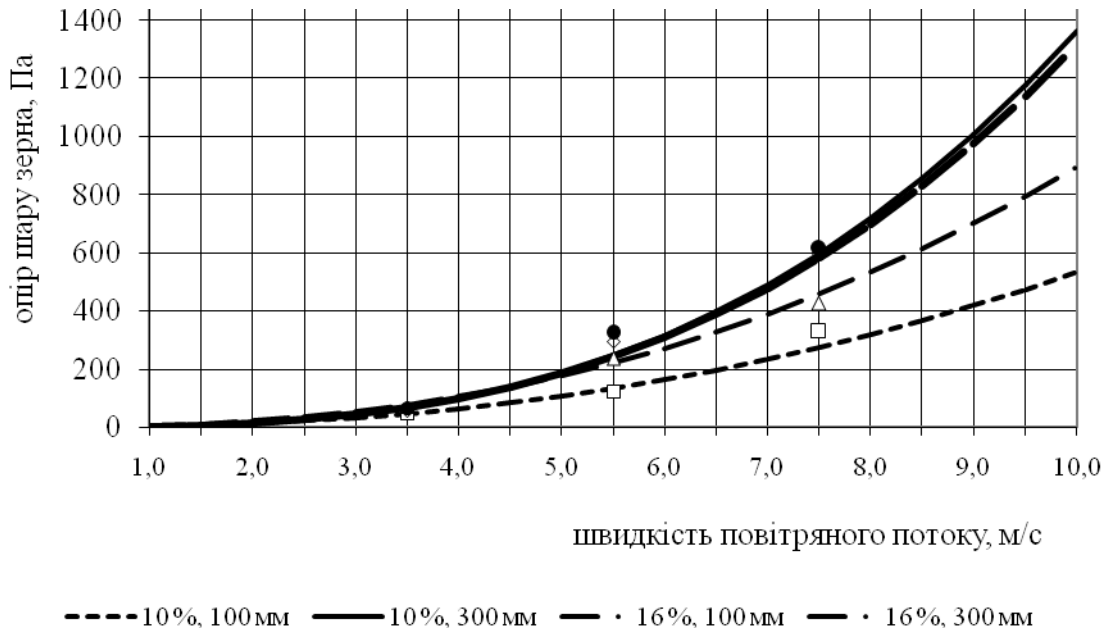


Рис. 1. Залежність опору шару від швидкості подачі повітряного потоку для насіння кіноа

На рис. 1. наведена залежність опору шару від швидкості подачі повітряного потоку для насіння кіноа при вологості зерна 10, 16 і 22 % та висоті шару 100 і 300 мм.

Зі збільшенням товщини шару і вологості зерна збільшується опір шару зерна, а тому збільшувалися і витрати повітря на подолання опору шару зерна, що продувається. Аналогічна залежність спостерігається для інших досліджуваних культур.

Так як в практиці післязбиральної обробки найчастіше використовується для вентилявання всіх зернових культур швидкість повітряного потоку $v = 3$ м/с, то в табл. 3 наведено результати дослідження опору шару зерна кіноа при швидкості повітряного потоку $v = 3$ м/с.

Таблиця 3

Результати дослідження опору шару зерна кіноа

Вологість w , %	Висота шару зерна h , мм	Опір шару зерна H_w , Па
10	100	30,21
22	100	41,46
10	300	78,86
22	300	121,74

Характер впливу вологості на аеродинамічний опір до кінця невідомий. Аналізуючи результати наших досліджень, зміна аеродинамічного опору в залежності від вологості при висоті шару 100 мм змінюється не суттєво, а при висоті шару 300 мм – зростає. Тому можна стверджувати, що при висоті насипу 100 мм щільність укладання суттєво не змінюється, тому збільшення зерна в діаметрі не впливає на опір зернового шару. При висоті насипу 300 мм зростає щільність укладки за рахунок власної висоти тому й спостерігається підвищення аеродинамічного опору.

Для узагальнення залежності опору шару зерна кіноа від його вологості і товщини шару був проведений множинний регресійний аналіз[9], статистична оцінка та отримане наступне емпіричне:

$$H_w = 5,83 - 2,09h - 0,10w + 0,016hw \quad (S = 0,11 \cdot 10^{-5});$$

w — вологість зерна, %

Оскільки виконується умова $F_p < F_{кр}$, то одержані рівняння адекватні експериментальним даним. Таким чином, рівняння з надійністю $p = 0,95$ адекватно описує залежність аеродинамічного опору.

Дані залежності при рівні значимості 5 % адекватно описують експериментальні дані у вивченому діапазоні зміни факторів вологості зерна ω та висоти шару зерна $H_{ш}$. Більш наочне уявлення про характер залежності, яка існує між опором шару зерна і досліджуваними факторами – вологістю та товщиною шару зерна – дає поверхня відгуку, побудована за наведеним вище рівнянням.

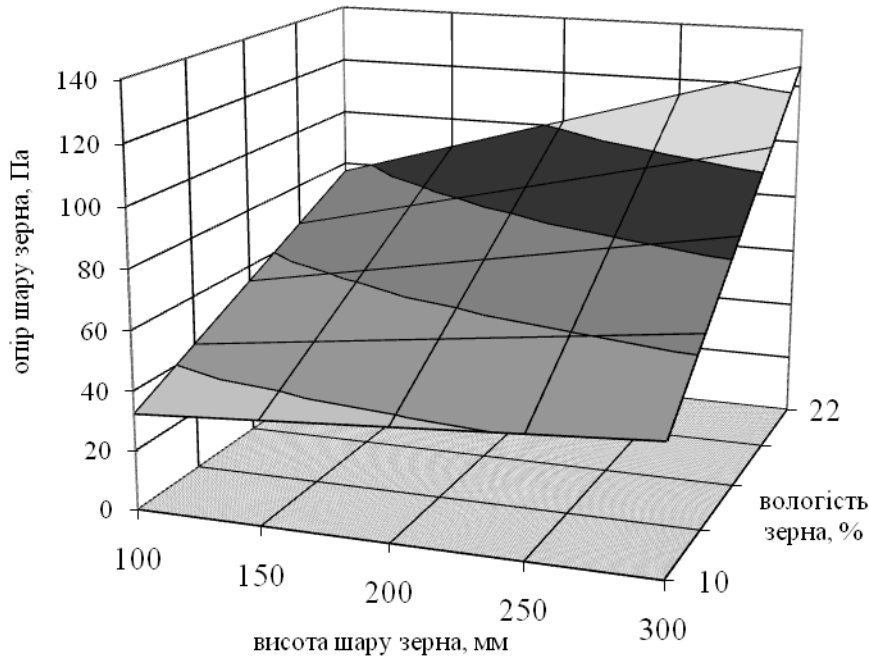


Рис. 2. Залежність опору шару зерна кіноа від вологості і висоти шару

Аналіз побудованої поверхні показує нелінійний характер залежності опору зерна від досліджуваних факторів, що свідчить про наявність істотного взаємовпливу розглянутих факторів.

Висновки

Результати досліджень показали, що швидкість витання зростає із збільшенням вологості у діапазоні 10...22 %, а коефіцієнт парусності зменшується.

Аеродинамічний опір зерна кіноа зростає зі збільшенням висоти насипу, вологості та щільності укладки, вмісту дрібної фракції та швидкості повітряного потоку. Встановлено залежності опору шару зерна від вологості зерна (10...22%) і висоти шару зерна (100...300 мм). Запропоновано емпіричні рівняння у натуральних змінних для визначення опору шару зерна кіноа в діапазоні зміни вологості 10...22 % вологості зерна і висоти шару зерна 100...300 мм.

Проведені дослідження дозволяють із достатньою точністю моделювати аеродинамічні характеристики зерна кіноа в залежності від його вологості та можуть бути використані для оптимізації процесів очищення, сушки та активного вентилявання, підбору ефективних режимних параметрів відповідного обладнання.

Література

1. Станкевич Г.М., Овсянникова Л.К., Соколовська О.Г. Обробка та зберігання дрібнонасіневих олійних культур : монографія. Одеса : КП ОМД, 2016. 128 с.
2. Овсянникова Л.К. Особливості технології післязбиральної обробки дрібнонасіневих культур. *Зернові продукти і комбікорми*, Vol. 17, І. 3. 2017. С. 11-20.
3. Пузік Л. М., Пузік В. К. Технологія зберігання і переробки зерна : навчальний посібник. Харків : ТОЧКА, 2013. 312 с.
4. Станкевич Г.М., Овсянникова Л.К., Соколовська О.Г. Дослідження аеродинамічних властивостей та активного вентилявання дрібнонасіневих культур. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка «Механізація с/г виробництва та переробки с/г продукції»*. Харків, 2010. Вип. 103. С. 409.
5. Гапонюк О.І., Остапчук М.В., Станкевич Г.М. Активне вентилявання та сушіння зерна. Одеса : ВМВ, 2014. 326 с.
6. Валевська Л.О., Соколовська О.Г., Шуляньська А.О. Біологічна цінність зернових суперфудів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Том 31 (70) № 1. 2020. Ч. 2. С. 116-120.

7. Valevskaya L., Sokolovskaya O. Determination of physical and technological properties of quino grain - the main stages of justification of storage and processing technology. Grain Products and Mixed Fodder's. 2021. V. 21, I/1 (81). P. 4-8. DOI: <https://doi.org/10.15673/gpmf.v21i1.2089>

8. Соколовська О.Г. Валецька Л.О. Очищення зерна кіноа – важливий етап післязбиральної обробки Вісник Хмельницького національного університету Серія: «Технічні Науки». № 5, 2021 (301). С. 225-229.

9. Остапчук М.В., Станкевич Г.М. Математичне моделювання на ЕОМ : підруч. Одеса : Друк, 2006. 313 с.

References

1. Stankevych H.M., Ovsianynkova L.K., Sokolovska O.H. Obrobka ta zberihannia dribnonasinnievkykh oliinykh kultur : monohrafiia. Odesa : KP OMD, 2016. 128 s.

2. Ovsianynkova L.K. Osoblyvosti tekhnolohii pisliazbyralnoi obrobky dribnonasinnievkykh kultur. Zemovi produkty i kombikormy, Vol. 17, I. 3. 2017. S. 11-20.

3. Puzik L. M., Puzik V. K. Tekhnolohiia zberihannia i pererobky zerna : navchalnyi posibnyk. Kharkiv : TOChKA, 2013. 312 s.

4. Stankevych H.M., Ovsianynkova L.K., Sokolovska O.H. Doslidzhennia aerodynamichnykh vlastyvostei ta aktyvnoho ventyliuvannia dribnonasinnievkykh kultur. Visnyk KhNTUSH im. Petra Vasylenka «Mekhanizatsiia s/h vyrobnytstva ta pererobky s/h produktsii». Kharkiv, 2010. Vyp. 103. S. 409.

5. Haponiuk O.I., Ostapchuk M.V., Stankevych H.M. Aktyvne ventyliuvannia ta sushinnia zerna. Odesa : VMV, 2014. 326 s.

6. Valevska L.O., Sokolovska O.H., Shulianska A.O. Biolohichna tsinnist zemovykh superfudiv. Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: tekhnichni nauky. Tom 31 (70) № 1. 2020. Ch. 2. С. 116-120.

7. Valevskaya L., Sokolovskaya O. Determination of physical and technological properties of quino grain - the main stages of justification of storage and processing technology. Grain Products and Mixed Fodders. 2021. V. 21, I/1 (81). R. 4-8. DOI: <https://doi.org/10.15673/gpmf.v21i1.2089>

8. Sokolovska O.H. Valevska L.O. Ochyshchennia zerna kinoa – vazhlyvyi etap pisliazbyralnoi obrobky Herald of Khmelnytskyi national University. № 5, 2021 (301). S. 225-229.

9. Ostapchuk M.V., Stankevych H.M. Matematychno modeliuвання na EOM : pidruch. Odesa : Druk, 2006. 313 s.