

УДК 582.663.2

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.108.24>

ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ЗЕРНА АМАРАНТУ НА ЙОГО ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Станкевич Г.М. – д.т.н., професор, завідувач

кафедри технології зберігання зерна,

Одеська національна академія харчових технологій

Валентюк Н.О. – асистент кафедри польових та овочевих культур,

Одеський державний аграрний університет

Козут І.М. – к.с.-г.н., доцент кафедри польових та овочевих культур,

Одеський державний аграрний університет

Проведення удосконалення та інтенсифікації процесів теплової і волого-теплової обробки зерна, а також вибір ефективних методів і оптимальних режимів процесу сушіння, створення конструкцій теплообмінних апаратів неможливі без урахування й аналізу теплофізичних властивостей зерна як об'єкта обробки. Відомо, що кількісною мірою теплофізичних властивостей продуктів і матеріалів, що безпосередньо визначає характер перебігу теплових процесів, є їхні теплофізичні характеристики (ТФХ) – питома теплоємність (c), коефіцієнти теплопровідності (λ), температуропровідності (a) та тепла активності (ϵ).

У статті представлені результати дослідження теплофізичних властивостей зернової маси амаранту. Для визначення теплофізичних властивостей зерна амаранту з численних методів, що наведені у науковій літературі, обрали найпростіший зондовий метод вистигаючої пластини. Цей метод заснований на розв'язанні задачі про розповсюдження в необмеженому тілі температури, що віддається протягом деякого часу заздалегідь нагрітою пластиною.

Визначено значення питомої теплоємності, коефіцієнтів теплопровідності, температуропровідності та теплової активності зерна амаранту у визначеному діапазоні вологості (9,4–19,6%) та температури (5–25°C). Проведено регресійний аналіз сумісної дії вказаних факторів із статистичною оцінкою отриманих результатів та запропоновано рівняння залежності теплофізичних характеристик зернової маси амаранту від його вологості та температури. Доведено, що коефіцієнти теплопровідності, температуропровідності та теплової активності зерна амаранту мають прямий зв'язок із його температурою та вологістю, тобто зі збільшенням вказаних факторів значення цих коефіцієнтів збільшуються у встановлених залежностях. Результати проведених експериментальних досліджень дають змогу надалі обґрунтувати оптимальні режими теплової обробки зерна амаранту, що має на меті забезпечити його надійне зберігання до наступної цільової переробки без погіршення показників якості.

Ключові слова: зерно амаранту, теплофізичні характеристики зерна, коефіцієнти теплопровідності, температуропровідності, теплової активності, питома теплоємність.

Stankevych H.M., Valentiuk N.O., Kohut I.M. The influence of the humidity and the temperature of an amaranth grain on its thermophysical abilities

The conduction of improvement and intensification of processes of thermal and humidity-thermal treatment of grain as well as a choice of effective methods and optimal conditions of drying processes and a creation of heat exchange machines is impossible without the consideration of analysis of grain thermophysical abilities as an object of a process. It is known, that the quantitative measure of thermophysical abilities of products and materials, that directly defines the manner of the heat treatment process is their thermophysical characteristics (TPC), that includes density of thermal capacity (c), index of thermal conductivity (λ), temperature conductivity (a), and thermal activity (ϵ).

The results of thermophysical abilities of an amaranth grain mass research are given in the article. The simplest probe technique of cooling plates was chosen among the other techniques given in the scientific literature, to define thermophysical abilities of an amaranth grain. The technique is based on a solving a task with spreading the temperature in an unbounded body that evaporates during a period of time from the previously heated plate.

The meaning of density of thermal capacity, the index of thermal conductivity, the temperature conductivity and thermal activity of amaranth grain in the defined range of humidity (9.4–19.6%) and the temperature (5–25°C) is defined. The regressive analysis of the given factors interaction with the statistic evaluation of the given results is conducted. The equation of dependence of thermophysical characteristics of an amaranth grain mass from its humidity and temperature is suggested. A direct connection of thermal conductivity, temperature conductivity and thermal activity indexes of amaranth grain with its temperature and humidity have been proved. Consequently, with the increase of the given factors the meaning of these indexes increases in the established relations. The results of the conducted experimental researches give an opportunity to substantiate optimal modes of thermal treatment of an amaranth grain, which has a goal to provide its safe preservation until the next intended treatment without the loss of qualities.

Key words: amaranth grain, thermophysical characteristics of a grain, indexes of thermal conductivity, temperature conductivity, thermal activity, density of thermal capacity.

Постановка проблеми. Умови сучасності диктують необхідність постійного пошуку нових рішень для виробництва харчової продукції високої якості, що забезпечує збалансоване харчування населення. Одним із способів, спрямованих на розширення асортименту продукції, що виробляється, і забезпечення високих вимог до якості харчових продуктів є використання нетрадиційних видів сировини. Нині багато країн проявляють інтерес до стародавньої культури – амаранту. Багатьма дослідженнями доведено, що амарант є цінною зерновою культурою, має збалансований амінокислотний склад. Крім того, до відмінностей цієї культури належить наявність в олії сквалену, який, за даними проведених досліджень, активно бере участь у нормалізації мікроциркулярних процесів кровообігу, будучи джерелом кисневого забезпечення. Також варто згадати, що вітамін Е в амарантовій олії знаходиться в токотрієнольній формі, активність якої в рази перевищує токоферольну [1; 4; 8; 12; 13].

Продукти переробки амаранту, крім виробництва функціональних продуктів харчування, використовуються в медичній, косметичній промисловості. Зелена маса амаранту – в годівлі сільськогосподарських тварин [5; 6].

Аналіз досліджень та публікацій. Дослідженням властивостей амаранту та його вирощуванням у різні роки займалася досить велика кількість як зарубіжних, так і вітчизняних учених. Так, агротехнологією вирощування займалися Д.П. Войташенко, Т.І. Гопцій, С.Г. Когут, В.Я. Щербаков, Д.М. Brenner, D.K. Early, C.S. Kauffman, Robert L. Myers. Вивченню біохімічних властивостей зерна та листостебельної маси амаранту присвятили свої дослідження Г.І. Височина, С.І. Кадошніков, С.В. Кадиров, Silva Grobelnik Mlakar, R. Bressani, L.A. Garcia-Vela, O. Paredes-Lopez. Задачами технології первинної обробки, переробки та зберігання зерна амаранту займалися О.В. Кольтюгіна, І.Ф. Костиков, Л.А. Мирошниченко, Л.К. Овсянникова, С.В. Смирнов, С.Н. Соколов, Г.М. Станкевич, І.М. Черноусов, J.S Roberts, E.K. Ronoh. Доцільність використання у виробництві харчових продуктів і напоїв встановлювали А.К. Казумян, Ю.А. Росляков, А.В. Стура, С.В. Кадиров, Т.І. Шнейдер, Е.В. Петрова, Monica W. Mburu, R.M. Saunders, R. Bressani. Можливістю використання зернової та листостебельної маси амаранту у фармацевтичній промисловості займалися І.М. Коренська, Е.Н. Офіцеров, R. Railey та ін.

Експериментальними дослідженнями, які були проведені різними авторами, доведено, що за хімічним складом, поживною цінністю зерно амаранту дещо відрізняється від традиційно вирощуваних та використовуваних в Україні зернових культур [1; 4]. Встановлено, що амарантова олія із вмістом майже 76% ненасичених кислот відкриває надзвичайно широкий спектр її застосування як у харчовій, так і фармацевтичній промисловості та косметології [4; 12]. Крім того, вміст білка,

кальцію, заліза, фосфору в амаранті значно вищий, ніж у традиційних зернових культурах, що також підкреслює доцільність використання цієї культури у виробництві функціональних продуктів харчування. Вміст у зерні амаранту значної кількості протеїнів (13–19%) додає йому найбільший збіг з теоретично розрахованим ідеальним білком. Доведено, що загальний вміст мінеральних речовин у різних видів амаранту, як правило, вищий, ніж у зерні злаків [4; 12; 13].

Постановка завдання. У науковій літературі є чимало публікацій, присвячених вивченню агротехнології вирощування амаранту, біохімічних показників зерна та листя, його використання у виробництві різних продуктів харчування. Однак питання, що стосуються дослідження теплофізичних властивостей зернової маси амаранту (котрі значною мірою залежать не тільки від хімічного складу, а й вологості та температури матеріалу), які дали б змогу підібрати адекватні режими його теплової обробки, висвітлені не досить. Все вищесказане і визначило мету нашого дослідження – визначити питому теплоємність, коефіцієнти теплопровідності, температуропровідності і теплової активності зерна амаранту залежно від його температури і вологості.

З численних методів визначення ТФХ матеріалів нами був використаний порівняно простий і досить точний зондовий метод вистигаючої пластини [2; 3; 9–11], заснований на розв'язанні задачі про розповсюдження в необмеженому тілі температури, що віддається протягом деякого часу заздалегідь нагрітою пластиною. При цьому вважають, що напрям теплового потоку в центральній частині пластини перпендикулярний до її поверхні, а температура в цій ділянці залежить тільки від однієї координати x [3; 11].

Основним елементом установки (рис. 1), яка розроблена на кафедрі технології зберігання зерна Одеської національної академії харчових технологій, є вимірювальний осередок, виготовлений з термоізолюючого матеріалу розміром $20 \times 15 \times 15$ см, у середині якої перпендикулярно до її довжини розташовується зонд 4 – латунна пластина розміром $15 \times 15 \times 0,3$ см. Її центральна частина, розміром $5 \times 5 \times 0,3$ см, вирізана й обрамлена ебонітовою рамкою 5 шириною 0,3 см для відділення від навколишніх її частин пластини. Останні виконують роль «захисного кільця» стосовно центральної частини пластини.

У зв'язку з нерівномірністю окремих зерен за вологістю, неможливістю формування партій у досліджуваному діапазоні початкової вологості, а також із труднощами збереження вологого зерна досліди проводили на штучно зволоженому зерні. Для цього зерно зволожували з наступним його відлежуванням для рівномірного розподілу вологи в матеріалі.

Витрати води, необхідні для зволоження зерна, визначають за формулою:

$$\Delta m = M_0 (w_n - w_k) / (100 - w_k), \quad (1)$$

де M_0 – маса зерна, що міститься у вимірювальному осередку, г;

w_n – початкова вологість зерна, %;

w_k – кінцева вологість зерна, %.

Діапазон зміни вологості зерна для дослідження його теплофізичних властивостей становив $w = 14,6\text{--}19,5\%$.

Методика проведення дослідів полягала у тому, що латунну пластину попередньо нагрівали до температури, яка на $18\text{--}20^\circ\text{C}$ перевищувала температуру досліджуваного матеріалу, вводили її в матеріал і через кожні 3 хвилини контролювали температуру матеріалу і пластини. Досліди проводили в трикратній повторності. Температуру матеріалу і пластини вимірювали за допомогою хромель-копелевих термоелектродів (термопар) завтовшки 0,2 мм у комплексі

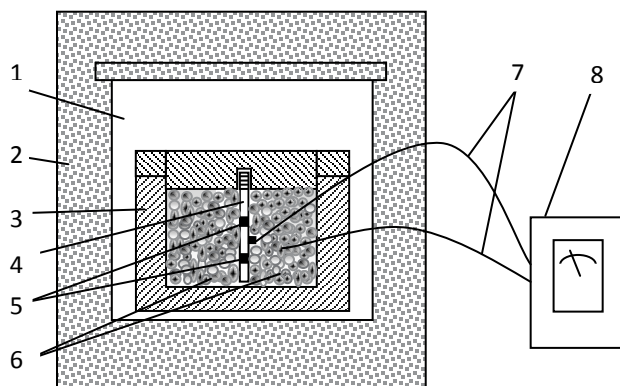


Рис. 1. Схема експериментальної установки для визначення теплофізичних характеристик зерна: 1 – термокамера; 2 – теплоізоляційний матеріал; 3 – вимірювальна камера, 4 – латунна пластинка (зонд); 5 – ебонітова рамка; 6 – насіння; 7 – терморпарі; 8 – потенціометр.

з потенціометром ПП-63. Підігрів матеріалу і пластини до заданої температури вимірювального осередку проводили в термокамері SPT-200. Для забезпечення заданих значень вологості матеріалу його штучно зволожували і витримували протягом трьох діб для рівномірного перерозподілу вологи.

Визначення теплофізичних характеристик зерна на описаній експериментальній установці проводили за такими розрахунковими формулами:

$$\alpha = 3336 \cdot 10^{-9} / \tau_{max} \quad (2)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ_{max} – час з початку досліду до настання максимального значення температури в точці виміру, хв.

$$\ln(c \cdot \gamma) = 11,63 + \ln(\Delta T_n / \Delta T_m), \quad (3)$$

де c – питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{Дж})$;

γ – об'ємна маса матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ΔT_n – зміна температури протягом досліду, $^{\circ}\text{C}$;

ΔT_m – зміна температури в даній точці дослідженого матеріалу за час досліду, $^{\circ}\text{C}$.

$$\lambda = \alpha \cdot c \cdot \gamma, \quad (4)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \gamma}, \quad (5)$$

де ε – коефіцієнт теплової активності, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

У формулу (4) для визначення коефіцієнта температуропровідності входить значення τ_{max} . Як правило, це значення знаходять з графіків залежності температури матеріалу від часу. Проте для матеріалів, що характеризуються порівняно високими теплоізоляційними властивостями, визначення τ_{max} графічним методом пов'язано з великими похибками, що виникають через відсутність чітко вираженого максимуму температури матеріалу в процесі досліду (максимум «розмитий»). Тому для підвищення точності визначення τ_{max} експериментально одержану залежність зміни температури зерна θ_3 від часу досліду τ було апроксимовано квадратичним поліномом вигляду:

$$\theta_3 = b_0 + b_1 \cdot \tau + b_2 \cdot \tau^2, \quad (6)$$

на підставі якого обчислювали екстремальне значення τ_{\max} і відповідне йому значення θ_3 , використовувані для розрахунку $\Delta\theta_3$ у формулі для визначення питомої теплоємності. Коефіцієнти полінома b_0 , b_1 та b_2 визначали методом найменших квадратів [7].

Перед початком досліду температуру пластини доводять до величини, що перевищує температуру зерна на 18–20°C, потім її вводять у зернову масу. У цей момент відлічують по приладу значення ЕРС, що розвивається термопарами № 1 (робочий спай, прикріплений до зернівки) і № 2 (робочий спай, прикріплений до пластини), пускають у хід секундомір.

Після цього відлік робили через кожні три хвилини під час вимірювання ЕРС пластини і через кожну 1 хвилину під час вимірювання ЕРС зерна. Потім за граду-йованими графіками термопар визначали температуру зерна і пластини.

З графічних побудов змін температури зерна в часі знаходять τ_{\max} . Його значення підставляють у формулу (2) для обчислення коефіцієнта теплопровідності α . Потім за формулою (3) визначають значення питомої теплоємності c . Значення γ можна обчислити для різних моментів часу, бо, як показав аналіз експериментальних даних, усі ці значення трохи відрізняються один від одного. Величини λ і ϵ знаходять розрахунковим шляхом за формулами (4) і (5).

Для отримання узагальнених емпіричних залежностей теплофізичних характеристик зерна амаранту в дослідженій ділянці зміни їх початкової вологості проводили обробку експериментальних даних послідовним множинним регресійним аналізом з наступною статистичною оцінкою результатів [7].

Виклад основного матеріалу дослідження. Відомо, що для техніко-технологічних розрахунків, що стосуються процесів нагрівання, сушіння та охолодження, необхідно знати теплофізичні характеристики, що залежать від температури t , вологості w та виду зернової культури [2; 3; 9–11].

Питома теплоємність показує, яка кількість тепла необхідна для нагрівання одиниці маси матеріалу на один градус. Теплопровідність характеризує теплопровідну здатність зерна. Температуропровідність показує швидкість зміни температури в зерні, його теплову інерцію. Коефіцієнт теплосасвоєння (теплової актив-

Таблиця 1
Теплофізичні характеристики насіння амаранту ($n = 3$, $p \geq 0,95$)

Вологість, w , %	Температура, θ , °C	Питома теплоємність c , Дж/(кг · К)	Коефіцієнт температуропровідності, $\alpha \cdot 10^{-9}$ м ² /с	Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·К)	Коефіцієнт теплової активності ϵ , Дж/(м ² · К · с – 0,5)
9,4	5	1531,12	113,08	0,138	411,65
	15	1507,69	126,84	0,153	429,30
	25	1484,25	136,16	0,162	437,88
14,1	5	1435,71	145,04	0,168	441,53
	15	1392,20	165,97	0,187	457,99
	25	1357,40	175,58	0,192	459,29
19,6	5	1329,86	178,40	0,195	461,26
	15	1310,31	184,31	0,198	461,95
	25	1280,97	193,95	0,204	463,27

ності) характеризує відвід теплоти з поверхні всередину тіла (або підведення теплоти зсередини до поверхні), тобто це комплексна характеристика матеріалу, що враховує його теплоаккумуляційну здатність і теплоінерційні властивості [3; 9–11].

У результаті дослідження отримано значення теплофізичних характеристик амаранту, а саме питому теплоємність, коефіцієнти температуропровідності, теплопровідності і теплової активності, які наведено у табл. 1.

На основі отриманих даних отримано рівняння та побудовано графіки залежності теплофізичних характеристик зерна амаранту від його вологості та температури (рис. 2).

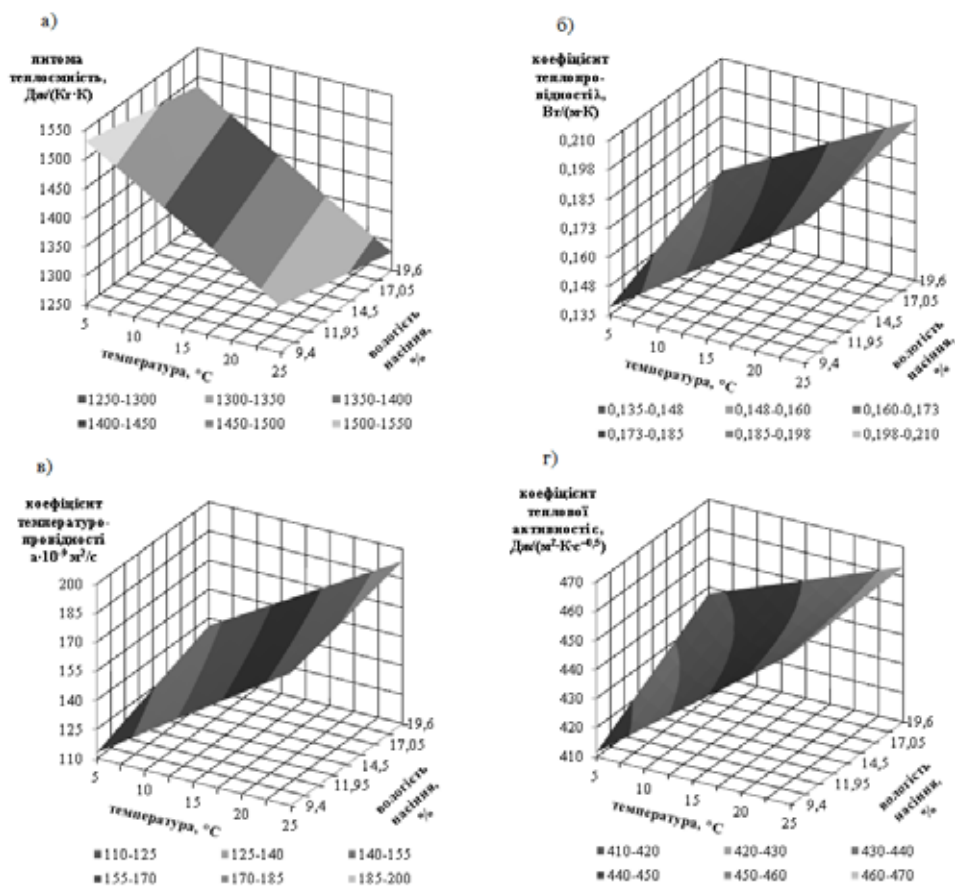


Рис. 2. Залежність теплофізичних характеристик насіння амаранту від його вологості та температури:

а – залежність питомої теплоємності зерна амаранту від його вологості та температури;
б – залежність коефіцієнта температуропровідності зерна амаранту від його вологості та температури;

в – залежність коефіцієнта теплопровідності зерна амаранту від його вологості та температури;

г – залежність коефіцієнта теплової активності зерна амаранту від його вологості та температури.

Проведений регресійний аналіз зі статистичною оцінкою отриманих результатів дав змогу отримати рівняння залежностей теплофізичних властивостей насіння амаранту від його вологості та температури, які мають вигляд:

– питома теплоємність:

$$c = 1727,85 - 19,68w - 2,25\theta - 0,01w\theta, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (7)$$

– коефіцієнт температуропровідності:

$$\alpha \cdot 10 - 9 = 45,39 + 6,59w + 1,50\theta - 0,04w\theta, \text{ м}^2/\text{с} \quad (8)$$

– коефіцієнт теплопровідності:

$$\lambda = 0,077 + 0,006w + 0,002\theta - 0,001w\theta, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) \quad (9)$$

– коефіцієнт теплової активності:

$$\varepsilon = 353,79 + 5,46w + 2,46\theta - 0,12w\theta, \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с} - 0,5). \quad (10)$$

Висновки і пропозиції.

1. Проведені дослідження та множинний регресійний аналіз зі статистичною оцінкою отриманих результатів дали змогу отримати рівняння та побудувати графіки залежностей теплофізичних властивостей зерна амаранту, а саме питомої теплоємності, коефіцієнтів температуропровідності, теплопровідності та теплової активності від його вологості та температури, що дасть змогу обґрунтувати режими сушіння та активного вентилявання.

2. Результати дослідження теплофізичних властивостей зерна амаранту у зазначеному діапазоні його температури і вологості свідчать про наявний вплив як кожного фактора окремо, так і сумісної дії факторів на досліджувані показники.

Так, питома теплоємність зерна амаранту зменшується як у разі збільшення його температури, так і у разі збільшення вологості. За сумісної дії обох факторів питома теплоємність зменшується у встановленій залежності (7).

Коефіцієнти теплопровідності, температуропровідності та теплової активності зерна амаранту мають прямий зв'язок із його температурою та вологістю, тобто зі збільшенням указаних факторів значення цих коефіцієнтів збільшуються у встановлених залежностях (8), (9), (10).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Амарант України. Amaranth of Ukraine. URL: <http://amaranth.narod.ru/index-7.html>.
2. Атаназевич В.И. Сушка зерна. Москва : Лабиринт, 1997. 255 с.
3. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы. Москва : Колос, 1984. 304 с.
4. Гопцій Т.І. Амарант: біологія вирощування, перспективи використання, селекція : монографія. Харків : Харк. держ. аграр. ун-т. 1999. 273 с.
5. Железнов А.В. Амарант – хлеб, зрелище и лекарство. Химия и жизнь. 2005. № 6. С. 56–61
6. Кадыров С.В. и др. Зерновой амарант – перспективная культура ЦЧР. Сб. науч. трудов «Повышение урожайности полевых культур». Воронеж : ВГАУ, 2004. С. 47–49.
7. Остапчук М.В., Станкевич Г.М. Математичне моделювання на ЕОМ : підручник. Одеса : Друк, 2006. 313 с.
8. Офицеров Е.Н. Амарант – перспективное сырье для фармацевтической промышленности. Материалы докладов 1-ой Российской научно-практической конференции «Актуальные проблемы инноваций с нетрадиционными растительными ресурсами и создания функциональных продуктов». Химия и компьютерное моделирование. Бултеровские сообщения. 2001, № 5.
9. Станкевич Г.М. Страхова Т.В, Атаназевич В.І. Сушіння зерна : підручник. Київ : Либідь, 1997. 351 с.

10. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Шувалов С.Є. Сушіння зерна: Лабораторні роботи : навчальний посібник. Київ : Либідь, 1997. 136 с.
 11. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов : справочное пособие. / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская, В.С. Уколов. Под ред. А.С. Гинзбурга. Москва : Пищевая пром-сть, 1975. 224 с.
 12. Чиркова Т.В. Амарант – культура XXI века. СОЖ, 1999. № 10. С. 22–27.
 13. Paredes-Lopez O. Amaranth, Biology, Chemistry and Technology. 1994. Chapter 10, CRC Press. P. 185–205.
-