

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-2-13>

УДК 633.34:664.0

І. А. Колесніченко¹, аспірант

ORCID: 0009-0007-9302-208X

О. В. В'юник², ст. викл.

ORCID: 0000-0002-6413-5567

¹Полтавський державний аграрний університет²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: olga.viunyk@tsatu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОСТІЙКОСТІ ТА ФОРМ ЗВ'ЯЗКУ ВОЛОГИ В НАСІННІ РИЦИНИ МЕТОДАМИ ТЕРМІЧНОГО ТА ТЕРМОГРАВІМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗІВ

Анотація. У роботі розглянуто особливості термостійкості насіння рицини та форми зв'язку вологи в його структурі з використанням методів термічного і термогравіметричного аналізів. Показано, що під час теплової обробки насіння рицини відбуваються складні фізичні та фізико-хімічні процеси, пов'язані з видаленням вільної, капілярно зв'язаної та адсорбційно утримуваної вологи, а також зі зміною стану органічних компонентів матеріалу. Обґрунтовано, що дослідження втрати маси залежно від температури та швидкості нагрівання дає змогу оцінити термічну стійкість насіння, виділити характерні температурні інтервали дегідратації та встановити енергетично різні форми зв'язку вологи. Особливу увагу приділено значенню цих характеристик для обґрунтування режимів сушіння, теплової підготовки і подальшої переробки насіння рицини. Отримані положення можуть бути використані під час розроблення технологій сушіння, математичного моделювання тепломасообміну та оцінки допустимих температурних меж обробки олійної сировини.

Ключові слова: насіння рицини, термостійкість, волога, форми зв'язку вологи, термічний аналіз, термогравіметричний аналіз, сушіння, тепла обробка, дегідратація, олійна сировина.

Постановка проблеми. Насіння рицини є цінною технічною олійною сировиною, якість і технологічна придатність якої значною мірою залежать від умов теплової підготовки перед сушінням, пресуванням або екстрагуванням [1–3]. У процесі нагрівання в матеріалі відбувається не лише видалення вологи, а й зміна структурного стану окремих компонентів, що може впливати на вихід олії, її якість, енерговитрати процесу та стабільність зберігання насіння [1–3].

Для науково обґрунтованого вибору режимів теплової обробки недостатньо знати лише загальну вологість сировини. Важливо встановити, у яких формах волога перебуває в насінні рицини, наскільки міцно вона зв'язана з твердою фазою, у яких температурних інтервалах відбувається її видалення та за яких умов починаються небажані термічні зміни органічної речовини. Саме тому актуальним є дослідження термостійкості та форм зв'язку вологи в насінні рицини методами термічного і термогравіметричного аналізів.

Проблема полягає в тому, що в багатьох роботах теплову підготовку насіння оцінюють переважно за кінцевою вологістю або загальними сушильними характеристиками, без достатнього врахування природи зв'язку вологи з матеріалом. Для насіння рицини, яке має складну капілярно-пористу структуру, щільну оболонку та високий вміст олії, такий підхід є недостатнім. Тому виникає потреба у поглибленому дослідженні термічної поведінки цього матеріалу з використанням сучасних методів аналізу, що дозволяють відстежувати зміну маси зразка та швидкість її втрати в процесі нагрівання.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних дослідженнях насіння рицини розглядають як перспективну олійну культуру для технічного використання і значну увагу приділяють питанням його сушіння, волого-теплової обробки та підготовки до вилучення олії [1, 2]. Встановлено, що



технологічні властивості насіння, а також ефективність його переробки залежать від вологості, щільності, пористості, геометричних параметрів і умов нагрівання [2, 4].

Окремий напрям наукових робіт стосується дослідження фізичних властивостей насіння рицини залежно від вологості. У таких працях показано, що зі зміною вологовмісту змінюються розміри насіння, насипна та істинна щільність, пористість шару, а також умови тепло-і масопереносу [4]. Ці результати є важливими для технології сушіння, однак вони не дають повної інформації про енергетичний стан вологи та характер її зв'язку з компонентами насіння.

У роботах, присвячених сушінню насіння рицини, встановлено, що підвищення температури сушильного агента інтенсифікує видалення вологи, але водночас може впливати на якість сировини і спричиняти небажані структурні зміни [5]. Тому поряд із кінетикою сушіння важливого значення набуває оцінка термостійкості насіння, тобто його здатності зберігати основні технологічні властивості в певному інтервалі температур.

Термічний аналіз і термогравіметрія широко застосовуються для дослідження рослинної сировини, оскільки дозволяють визначати характерні температурні інтервали видалення вологи, оцінювати інтенсивність дегідратації, встановлювати стадії пароутворення та диференціювати окремі форми зв'язку вологи [6–8]. Проте саме щодо насіння рицини у відкритих джерелах недостатньо узагальнених даних, де форми зв'язку вологи аналізувалися б системно з позицій термогравіметричного підходу [2, 6].

Формулювання мети статті. Метою роботи є встановлення особливостей термічної поведінки насіння рицини, визначення характерних температурних інтервалів видалення вологи та оцінка форм її зв'язку з матеріалом за результатами термічного й термогравіметричного аналізів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- 1) проаналізувати фізичні та технологічні особливості насіння рицини як об'єкта теплової обробки;
- 2) охарактеризувати основні форми зв'язку вологи в капілярно-пористих біологічних матеріалах;
- 3) обґрунтувати доцільність використання методів термічного та термогравіметричного аналізів для дослідження насіння рицини;
- 4) встановити температурні інтервали видалення вільної, капілярно зв'язаної та міцнозв'язаної вологи;
- 5) оцінити термостійкість насіння рицини в процесі нагрівання;
- 6) визначити практичне значення отриманих результатів для вибору режимів сушіння і теплової підготовки насіння до переробки.

Основна частина. Насіння рицини як об'єкт термічного та термогравіметричного дослідження. Насіння рицини є складною багатокомпонентною біологічною системою, у якій поєднуються тверда органічна основа, жирова фаза, волога різних форм зв'язку, а також внутрішній поровий простір. Саме ця багатокомпонентність зумовлює специфіку його поведінки під час нагрівання [1, 2]. На відміну від простих гомогенних тіл, у насінні рицини підвищення температури супроводжується не лише зростанням теплового стану, а й низкою супутніх процесів: видаленням поверхневої та капілярної вологи, десорбцією міцнозв'язаної вологи, структурними змінами біополімерів, а за вищих температур – термічним руйнуванням органічних компонентів. Це робить насіння рицини зручним і водночас складним об'єктом для дослідження методами термічного аналізу.

З погляду технології сушіння особливий інтерес становлять саме ті температурні інтервали, в яких відбувається видалення вологи без істотного пошкодження олійної сировини. Для рицини це особливо важливо через високий вміст олії та наявність щільної оболонки, які впли-



вають на внутрішню міграцію вологи та на швидкість вирівнювання температурного поля. Попередні дослідження фізичних властивостей насіння рицини показують, що зі зміною вологості змінюються розміри насінини, насипна та істинна щільність, а також пористість шару, тобто ті характеристики, які безпосередньо впливають на тепломасообмін під час нагрівання.

Для біологічних матеріалів, подібних до насіння рицини, важливо враховувати, що волога в них не є однорідною за енергетичним станом [7–10]. Одна її частина може бути видалена вже на початкових стадіях нагрівання, тоді як інша потребує вищої температури через сильніший зв'язок з внутрішньою структурою матеріалу [7, 8]. Саме тому визначення загальної вологості саме по собі ще не дає повного уявлення про поведінку насіння в процесі сушіння. Для обґрунтування режимів теплової обробки необхідно встановити форми зв'язку вологи та відповідні температурні інтервали її видалення. Таке завдання найдоцільніше розв'язувати методами TG, DTG і, за потреби, DTA/DSC.

Теоретичні уявлення про форми зв'язку вологи в насінні рицини. У капілярно-пористих біологічних матеріалах, до яких належить і насіння рицини, прийнято виділяти кілька основних форм перебування вологи: вільну, капілярно зв'язану, осмотично або структурно утримувану та адсорбційно зв'язану. Вільна волога найменш міцно утримується матеріалом і відносно легко видаляється на початкових етапах сушіння. Капілярно зв'язана волога розташована у порах і мікрокапілярах, тому її видалення визначається не лише температурою, а й поровою структурою, поверхневим натягом і градієнтом парціального тиску. Найбільш енергетично стійкою є адсорбційно зв'язана або міцно зв'язана волога, яка взаємодіє з полярними центрами біополімерів і видаляється лише при більш інтенсивному нагріванні.

Для насіння рицини питання форм зв'язку вологи має додаткову специфіку через поєднання гідрофільних компонентів сухої речовини з гідрофобною олійною фазою. Олія не утримує воду так само, як полісахаридна або білкова матриця, проте впливає на внутрішню міграцію вологи, екранує частину капілярного простору та змінює теплові властивості насінини. Саме тому термогравіметрична крива насіння рицини може мати не одну, а кілька ділянок втрати маси, що відображають видалення різних форм вологи та подальші термодеструктивні процеси органічної речовини. Це положення узгоджується з сучасними уявленнями про багатостадійність дегідратації та термоперетворення природної біомаси.

Кількісно вологовміст матеріалу визначають через співвідношення маси вологи до маси вологого або сухого матеріалу. Найчастіше використовують такі вирази:

$$W_{e.o} = \frac{m_0 - m_c}{m_0} 100\%, \quad (1)$$

$$W_{c.o} = \frac{m_0 - m_c}{m_c} 100\%, \quad (2)$$

де m_0 – початкова маса зразка, кг;

m_c – маса абсолютно сухої речовини, кг.

Під час термогравіметричного аналізу вологовтрату в момент часу або за певної температури можна описати як:

$$\Delta m(T) = m_0 - m(T), \quad (3)$$

де $m(T)$ – маса зразка за температури T .

Для зручності результати часто подають у вигляді відносної маси:

$$\eta(T) = \frac{m(T)}{m_0} 100\%. \quad (4)$$



Саме функції $m(T)$, $\Delta m(T)$ або $\eta(T)$ є базою для подальшої інтерпретації форм зв'язку вологи в матеріалі.

Сутність термічного та термогравіметричного аналізів. Термічний аналіз охоплює сукупність методів, за допомогою яких вивчають зміну властивостей речовини при програмованому нагріванні або охолодженні. Для дослідження насіння рицини найбільший інтерес становлять термогравіметричний аналіз (TG), диференціальна термогравіметрія (DTG) та диференціальний термічний аналіз або диференціальна сканувальна калориметрія (DTA/DSC). Метод TG дозволяє реєструвати зміну маси зразка залежно від температури або часу, DTG – визначити швидкість втрати маси, а DSC/DTA – фіксувати теплові ефекти, що супроводжують дегідратацію, плавлення, структурні переходи або термічний розклад.

Загальний вигляд швидкості втрати маси описують похідною:

$$\frac{dm}{dT}, \quad (5)$$

а в практиці DTG часто аналізують величину:

$$DTG(T) = -\frac{1}{m_0} \frac{dm}{dT} 100\%, \quad (6)$$

яка характеризує інтенсивність дегідратації або деструкції за одиницю температурного інтервалу.

Інтенсивність процесу видалення вологи можна також подати через час:

$$v = \frac{dm}{d\tau}, \quad (7)$$

де τ – час нагрівання.

Застосування цих методів до насіння рицини дає можливість встановити:

- початок випаровування вільної вологи;
- температурний інтервал основного зневоднення;
- ділянки, де втрата маси пов'язана вже не з водою, а з термічним руйнуванням органічної речовини;
- межу термостійкості матеріалу, після якої сушіння переходить у небажану зону термічної деструкції.

Для матеріалів рицинового походження основна зона термічного розкладання органічної частини в інертному середовищі описувалась приблизно в області 150–400°C, що важливо враховувати як верхню межу, до якої технологічне сушіння не повинно навіть наближатись [5].

Інтерпретація TG- і DTG-кривих насіння рицини. Під час нагрівання насіння рицини типова термогравіметрична крива має ступінчастий характер. На першій стадії, як правило, відбувається видалення поверхневої та слабкозв'язаної вологи. Для біологічних матеріалів ця ділянка найчастіше відповідає помірному температурному інтервалу, де втрата маси ще не супроводжується суттєвим руйнуванням органічної матриці. На другій стадії спостерігається видалення капілярно утримуваної та частини слабкоадсорбованої вологи, причому пік DTG на цій ділянці вказує на температуру максимальної швидкості зневоднення. Подальше підвищення температури може призводити до переходу в область, де фіксуються не лише процеси десорбції міцнозв'язаної вологи, а й початкові явища термічної деструкції окремих органічних компонентів.

З погляду технології сушіння особливо важливо відокремити ділянку дегідратації від ділянки деструкції. Якщо температура сушіння обрана надто високою, процес перестане бути власне сушінням і починає супроводжуватися небажаними змінами якості сировини. Для

рицини це може означати погіршення умов подальшого вилучення олії, локальні зміни структури ядра, збільшення термічного навантаження на жирову фазу та зниження технологічної стабільності насіння. Тому межу термостійкості доцільно пов'язувати з температурою, вище якої на TG/DTG-кривих починається стійка втрата маси, уже не зумовлена лише водою. Для рицинової біомаси основні процеси розкладу фіксувалися значно вище типових сушильних температур, але це не виключає необхідності контролювати режим нагрівання в практичних умовах.

Для кількісної оцінки ступеня перетворення часто використовують величину конверсії:

$$\alpha_T = \frac{m_0 - m(T)}{m_0 - m_f}, \quad (8)$$

де m_f – кінцева маса залишку після завершення аналізу.

Для ділянки саме дегідратації можна записати окремо:

$$\alpha_w = \frac{m_0 - m(T)}{m_0 - m_d}, \quad (9)$$

де m_d – маса зразка після видалення вологи, але до початку суттєвої термічної деструкції сухої речовини.

Такі показники зручні для порівняння різних зразків насіння рицини, які відрізняються початковою вологістю, масою або умовами попередньої підготовки.

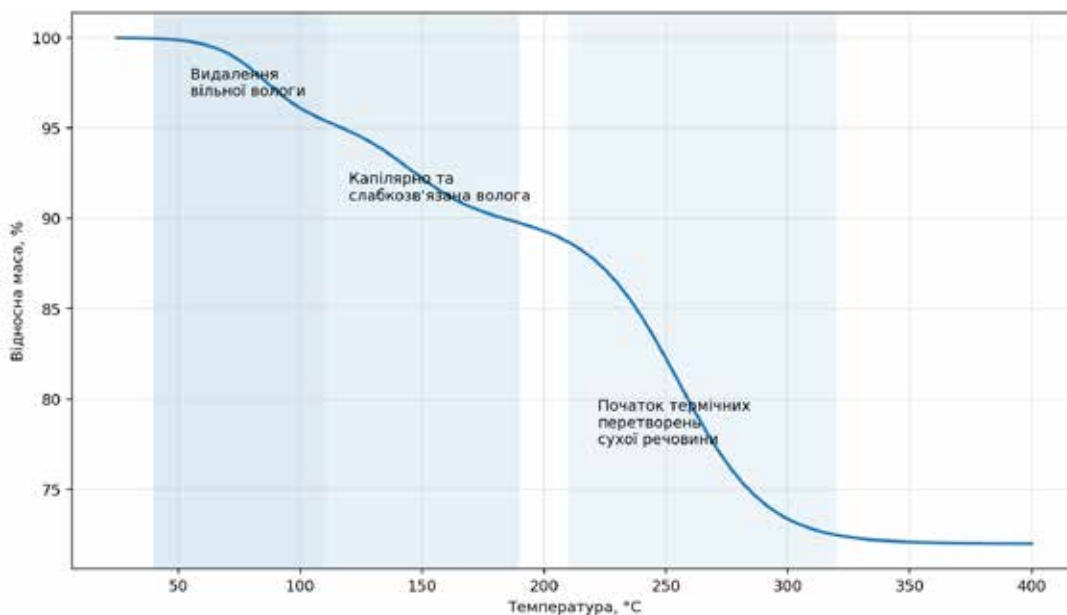


Рис. 1. Типова термогравіметрична крива (TG) насіння рицини з виділенням ділянок видалення вільної, капілярно зв'язаної та міцнозв'язаної вологи

Оцінка термостійкості насіння рицини. Термостійкість матеріалу доцільно трактувати як здатність зберігати свої основні структурні та технологічні властивості в заданому інтервалі температур без істотного необоротного руйнування. Для насіння рицини це поняття має подвійне значення. З одного боку, необхідно забезпечити достатнє теплове навантаження для ефективного видалення вологи. З іншого – не допустити переходу в температурну область, де починаються незворотні зміни органічної матриці та погіршуються технологічні характеристики сировини.

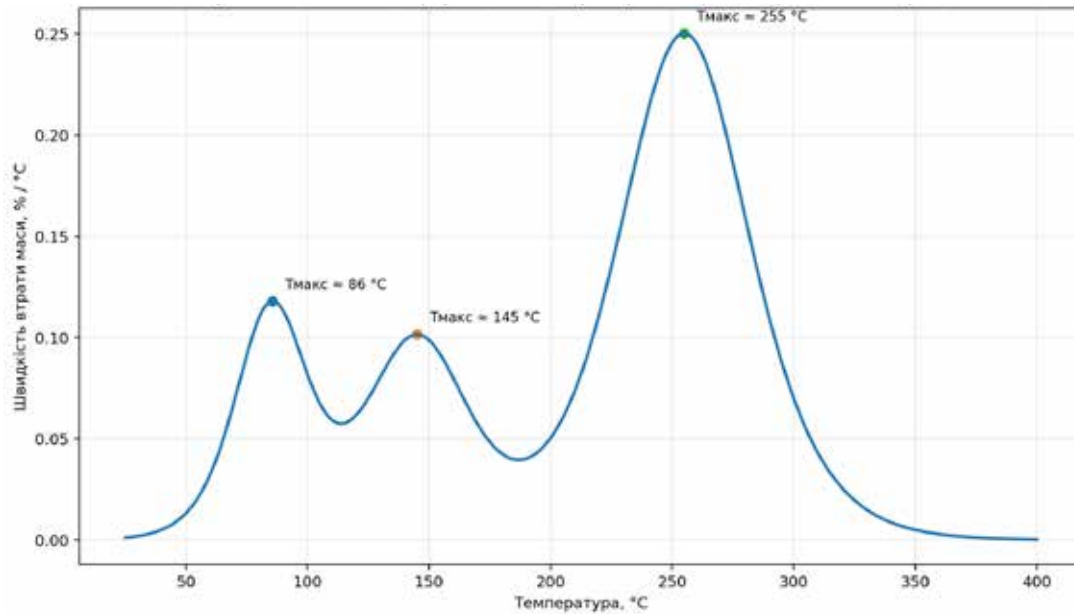


Рис. 2. Диференціальна термогравіметрична крива (DTG) насіння рицини; пік відповідає температурі максимальної швидкості видалення вологи

Практично термостійкість можна оцінювати за кількома критеріями. Першим критерієм є температура початку помітної втрати маси: T_{onset} , тобто точка, в якій TG-крива починає стабільно відхилятися від горизонтальної ділянки. Другим критерієм є температура максимального піка на DTG-кривій: T_{Max} , що характеризує найбільшу швидкість протікання конкретної стадії процесу. Для оцінки безпечної зони сушіння доцільно аналізувати саме область нижче температури, де фіксуються ознаки деструкції сухої речовини.

У загальному вигляді залежність швидкості термоперетворення можна записати через кінетичне рівняння неізотермічного процесу:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = k(T) f(\alpha) \quad (10)$$

де $f(\alpha)$ – функція механізму процесу;

$k(T)$ – температурна константа швидкості.

Температурну залежність константи швидкості зазвичай подають рівнянням Арреніуса:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (11)$$

де A – передекспоненційний множник;

E – енергія активації, Дж/моль;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура, К.

Чим сильніше зв'язана волога, тим вищої енергії потребує її видалення, а отже, тим більша ймовірність переходу до області, де вже починаються небажані зміни сухої речовини. Саме тому термогравіметричний аналіз є зручним інструментом для визначення межі між корисним тепловим впливом і шкідливим термічним перевантаженням.

Формалізація форм зв'язку вологи за результатами термогравіметрії. Для технологічного опису процесу доцільно пов'язувати окремі ділянки TG- та DTG-кривих з формами перебування вологи в насінні. Якщо позначити масові втрати на різних стадіях як Δm_1 , Δm_2 , Δm_3 , то сумарна втрата маси, пов'язана з видаленням вологи, може бути представлена як:



$$\Delta m_w = \Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3 \quad (12)$$

де Δm_1 – втрата маси за рахунок вільної вологи;

Δm_2 – втрата маси за рахунок капілярно зв'язаної вологи;

Δm_3 – втрата маси за рахунок адсорбційно або структурно зв'язаної вологи.

Тоді частка окремої форми вологи в загальній волозі може бути визначена як:

$$\varphi_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta m_w} 100\%, \quad i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Такий підхід дозволяє не лише якісно, а й кількісно порівнювати різні партії насіння рицини за характером зв'язку вологи. Наприклад, якщо зразок після попереднього підсушування має меншу частку Δm_1 , але відносно велику Δm_3 , це означає, що основна частина вологи, що легко видалається, вже усунута, а подальше сушіння вимагатиме більшого енергетичного впливу.

Висновки. У роботі встановлено, що насіння рицини є складним капілярно-пористим олійним матеріалом, для якого теплова обробка супроводжується не лише видаленням вологи, а й зміною стану окремих структурних компонентів. Це зумовлює необхідність оцінювання не тільки загальної вологості сировини, а й форм зв'язку вологи, що визначають енергетичні витрати на її видалення та допустимі межі нагрівання.

Показано, що методи термічного та термогравіметричного аналізів є інформативними для дослідження насіння рицини, оскільки дають змогу простежити зміну маси зразка під час нагрівання, визначити температурні інтервали дегідратації та розмежувати стадії видалення вільної, капілярно зв'язаної і міцнозв'язаної вологи. Використання TG- і DTG-кривих дозволяє оцінити інтенсивність втрати маси, встановити характерні температури початку процесу та максимуму швидкості зневоднення, а також своєчасно виявити перехід до області термічної деструкції.

Узагальнення літературних даних показало, що фізичні властивості насіння рицини істотно залежать від вологості: зі зміною вологовмісту змінюються геометричні параметри насіння, насипна та істинна щільність, пористість шару й умови тепломасообміну. Це підтверджує, що при сушінні рицини волога перебуває у неоднорідному енергетичному стані, а тому її видалення відбувається поетапно.

Встановлено, що термостійкість насіння рицини доцільно оцінювати як здатність зберігати технологічні властивості в певному температурному інтервалі без переходу до необоротних термічних змін органічної речовини. Для практики сушіння це означає необхідність вибору таких режимів нагрівання, які забезпечують ефективне видалення вологи, але не наближають матеріал до температурної області інтенсивного пароутворення.

Отримані положення мають практичне значення для обґрунтування раціональних режимів сушіння та попередньої теплової підготовки насіння рицини перед вилученням олії. Результати можуть бути використані для вдосконалення технології підготовки сировини, зниження енерговитрат, а також для подальшого математичного моделювання процесів тепломасообміну в насінні рицини.

Список використаних джерел

1. Patel V. R., Dumancas G. G., Viswanath L. C. K., Maples R., Subong B. J. J. Castor oil: properties, uses, and optimization of processing parameters in commercial production. *Lipid Insights*. 2016. Vol. 9. P. 1–12. DOI: 10.4137/LPI.S40233.
2. Sorokova N., Bandura V., Yaroshenko L. et al. Mathematical modeling of heat and mass transfer during moisture–heat treatment of castor beans to improve the quality of vegetable oil. *Agriculture*. 2022. Vol. 12, No. 9. Article 1356. DOI: 10.3390/agriculture12091356.
3. Дідур, В., Дідур, В., Чебанов, А., Асєєв, А. Оптимізація параметрів волого-теплової обробки м'ятки при виділенні олії із насіння рицини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь : ТДАТУ, 2018. Вип. 8, том 2. URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/15>



4. Gharibzahedi S. M. T., Mousavi S. M., Ghahderijani M. A survey on moisture-dependent physical properties of castor seed (*Ricinus communis* L.). *Australian Journal of Crop Science*. 2011. Vol. 5, No. 1. P. 1–7.
5. Ojediran J. O., Olaniran A. F., Adesina B. S. et al. Thin-layer drying characteristics of castor (*Ricinus communis*) seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2011. Vol. 35, No. 5. P. 647–655. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2011.00514.x.
6. Kaur R., Gera P., Jha M. K., Bhaskar T. Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of castor (*Ricinus communis*) residue using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*. 2018. Vol. 250. P. 422–428. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.11.077.
7. Chen C., Li D., Song J. et al. TG-DSC method applied to drying characteristics and heat requirement of cotton stalk during drying. *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 128. P. 138–146.
8. Wang H., Li Y., Li A. et al. Classification and physical characteristics of bound water in loess based on thermal analysis. *Cold Regions Science and Technology*. 2020. Vol. 174. Article 103059.
9. Дідур В.В., Білокінь Я.В., В'юник О.В., Дашивець Г.І. Теплофізична модель процесу прес-екструзії олійних культур. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки : електронне наукове фахове видання. / ТДАТУ; гол. ред. д.т.н., проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : Видавничий дім «Гельветика», 2025. Вип. 15, т. 2. С. 32–36. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-4>*
10. Mbah GO, Amulu NF, Onyiah MI. Effect of process parameters on the yield of oil from castor seed. *Am J Eng Res*. 2014;3(5):179–186.

Дата першого надходження статті до видання: 14.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 25.05.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



I. Kolesnichenko¹, O. Viunyk²

¹*Poltava State Agrarian University*

²*Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university*

RESEARCH ON THERMOSTABILITY AND MOISTURE BONDING FORMS IN CASTOR SEEDS USING THERMAL AND THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS METHODS

Summary

Castor seeds are a valuable technical oil raw material, the quality and technological suitability of which largely depend on the conditions of heat treatment before drying, pressing or extraction. During the heating process, not only moisture is removed from the material, but also the structural state of individual components changes, which can affect the oil yield, its quality, energy consumption of the process and the stability of seed storage. It has been established that the technological properties of seeds, as well as the efficiency of their processing, depend on humidity, density, porosity, geometric parameters and heating conditions. The paper investigates the thermal stability of castor seeds and the forms of moisture binding in their structure using thermal and thermogravimetric analysis methods. It is shown that during heating, castor seeds undergo complex physical and physicochemical transformations associated with the removal of free, capillary-bound and strongly bound moisture, as well as with the onset of thermal changes in the organic matrix. The use of TG and DTG curves makes it possible to determine the characteristic temperature ranges of dehydration, to estimate the rate of mass loss and to identify the transition from drying to undesirable thermal degradation. The study also confirms that the physical properties of castor seeds depend on moisture content, which affects heat and mass transfer during thermal treatment. The obtained results can be used to substantiate rational drying regimes, improve pre-treatment conditions before oil extraction and develop mathematical models of heat and mass transfer in castor seeds.

Keywords: castor seeds, heat resistance, moisture, forms of moisture bonding, thermal analysis, thermogravimetric analysis, drying, heat treatment, dehydration, oilseeds.