

ДЕРИВАТОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНА СОРГО ДЛЯ ПОППІНГУ

Жигунов Д.О., проф., д-р техн. наук, Тимчак Д.О., здобувач ОНС «Доктор філософії»
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. У статті розглянуто особливості процесу отримання повітряного зерна сорго за допомогою НВЧ-обробки з урахуванням впливу початкової вологості зерна на показники виходу та якості готового продукту. Встановлено, що під час виробництва поп-сорго вирішальну роль відіграють поп-властивості сировини, серед яких найбільш важливими є вихід готового продукту, а також його органолептичні та товарні характеристики, зокрема зовнішній вигляд, запах і смак.

Для підтвердження отриманих результатів було проведено дериватографічний аналіз, який дозволив простежити залежність процесів теплової деструкції та структурних змін у зерні від рівня вологості перед обробкою. Отримані результати дослідження підтвердили важливість оптимального режиму зволоження для забезпечення ефективного попінгу зерна сорго.

Експериментальні дані показали, що найбільший вихід повітряного зерна можливо отримати при вологості 15,0 %, що забезпечило показник на рівні 91,6 %. При зниженні вологості до 13,0 % вихід становив 87,9 %, тоді як збільшення вологості зерна перед обробкою мало негативний вплив на ефективність процесу: при 17,0 % показник зменшився до 70,6 % (зниження на 23 %), а при 19,0 % – до 50,1 % (зменшення на 46 %). Це може пояснюватися тим, що за надлишкової вологи частина енергії витрачається на випаровування, а процеси утворення внутрішнього тиску та розриву оболонки зернини відбуваються менш інтенсивно.

Органолептична оцінка підтвердила, що зерно з початковою вологістю 15,0 % забезпечувало найкращі споживні властивості готового продукту – рівномірність розкриття, приємний смак і запах. При цьому, зразки, отримані при вологості 17,0 та 19,0 %, характеризувалися наявністю підгорілих частинок, що погіршувало товарні властивості, збільшувало кількість відходів і створювало потенційну небезпеку для здоров'я споживачів через можливе утворення канцерогенних сполук, зокрема акриламід.

Таким чином, результати досліджень свідчать, що оптимальним для НВЧ-обробки сорго з метою отримання якісного повітряного продукту є рівень початкової вологості зерна 15,0 %, що забезпечує не лише максимальний вихід, а й високі товарні характеристики готової продукції.

Ключові слова: дериватографія, зерно сорго, повітряне зерно, попінг, поп-сорго, надвисокочастотна обробка, технологія виробництва повітряного сорго

Вступ. Упродовж останніх років на світовому ринку спостерігається стійка тенденція до зростання попиту на харчову продукцію, виготовлену із застосуванням технології попінгу зернової сировини. Показовим прикладом є виробництво попкорну, обсяги якого у 2011–2016 роках зросли приблизно на 20 % [1]. Сучасний темп зростання ринку зернових продуктів, отриманих в результаті попінгу, становить від 5,6 % до 7,5 % на рік [2]. Цей стійкий ріст може бути обумовлений кількома факторами.

По-перше, спостерігається зростання попиту на зручні та готові до вживання закуски, що відповідають сучасним тенденціям здорового харчування. По-друге, технологія попінгу дозволяє зберігати поживні властивості зерна, зокрема високий вміст клітковини та низький вміст жиру, що робить такі продукти привабливими для споживачів, які прагнуть до здорового способу життя.

Загалом, технологія попінгу зернової сировини сьогодні розглядається як перспективний напрямок у виробництві здорових та функціональних харчових продуктів. Попінг забезпечує поліпшення засвоюваності крохмалю, підвищує органолептичні властивості готового продукту та сприяє зменшенню вмісту патогенних мікроорганізмів завдяки термічній обробці [3].

Водночас, для успішного впровадження технології у виробництво необхідне детальне вивчення фізико-хімічних та термічних характеристик зернової сировини. Це дозволяє не лише оптимізувати параметри процесу попінгу, а й розробити якісні продукти із заданими споживчими властивостями, що відповідають сучасним вимогам ринку та споживачів.

Літературний огляд. Попінг являє собою інтенсивний короткотривалий термічний процес, що поєднує явища клейстеризації крохмалю та його структурного розширення під дією високотемпературного впливу [4]. Механізм цього процесу полягає у швидкому випаровуванні вологи, що міститься в ендоспермі, з утворенням насиченої пари, яка створює надлишковий тиск усередині зернівки, призводячи до руйнування перикарпію та різкого збільшення об'єму ендосперму. Внаслідок цього формується пориста структура продукту з покращеними органолептичними та функціонально-технологічними характеристиками. Поряд з цим відбувається часткова стерилізація та зменшення мікробіологічного обсіменіння сировини, підвищується біодоступність крохмалю внаслідок його клейстеризації, а також спостерігається часткова деградація харчо-

вих волокон [5].

Отримане в результаті попінгу повітряне зерно є готовим та самостійним продуктом, але може застосовуватися також в якості сировини у виробництві закусок, спеціалізованих харчових продуктів, а також як основа для створення функціональних та дієтичних харчових систем. Водночас здатність зернової сировини до попінгу обумовлена сукупністю морфологічних та фізико-хімічних параметрів, і притаманна вона не всім видам зернових культур. Традиційно для отримання повітряного зерна використовують кукурудзу та рис [3]. Дослідження щодо застосування інших культур, зокрема сорго, представлені нечисленними науковими повідомленнями [3, 4, 6].

Сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) належить до провідних зернових культур світу, поступаючись за масштабами вирощування та виробництвом кукурудзі, пшениці, рису та ячменю [7]. У ряді країн Африки, Азії та Індії зерно сорго є базовою продовольчою культурою, тоді як в Україні останніми роками демонструє зростаючу динаміку посівних площ, переважно в умовах степової зони. Найбільші площі зосереджені у посушливих регіонах – Миколаївській, Херсонській, Одеській та Дніпропетровській областях [8]. Встановлена здатність зерна сорго до попінгу визначає доцільність подальших досліджень щодо оптимізації технологічних параметрів цього процесу [4, 6, 9].

Серед технологічних методів отримання повітряного зерна застосовують традиційне «сухе» нагрівання, обробку розігрітою сілью, термообробку у псевдозрідженому шарі гарячого повітря, обсмаження в олії та вплив електромагнітного випромінювання надвисокої частоти (НВЧ) [3]. Останній метод набуває дедалі більшого поширення завдяки скороченню тривалості обробки, збереженню поживних речовин та рівномірності прогрівання об'єму продукту [10, 11].

НВЧ-обробка широко використовується для термічної підготовки, розморожування, сушіння, знезараження [12, 13] та попінгу зернових культур, зокрема кукурудзи, рису, сорго, гречки та амаранту [3, 5, 6, 14-16]. Її переваги зумовлені об'ємним нагріванням продукту внаслідок поглинання енергії електромагнітних хвиль із частотою 300 МГц – 300 ГГц, що забезпечує високу рівномірність температурного поля та мінімізує термічну деградацію біологічно цінних компонентів.

Дослідження термічних перетворень у процесі попінгу зерна сорго потребує використання інструментальних методів, здатних фіксувати комплексні масові та теплові зміни у функції температури та часу. Дериватографічний аналіз, який поєднує термогравіметричні (TG), диференційно-термічні (DTA) та диференційно-температурно-гравіметричні (DTG) вимірювання, є ефективним методом для оцінювання фізико-хімічних характеристик та кінетики термічних процесів у зерновій сировині [17]. Його застосування у дослідженні повітряного зерна сорго дозволяє встановити критичні температури фазових переходів, визначити етапи термічного розкладання та сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації параметрів технології попінгу.

Метою роботи є встановлення термічних характеристик зерна сорго, придатного для виробництва повітряного зерна, за допомогою дериватографічного аналізу з метою оптимізації параметрів процесу попінгу та підвищення якості готового продукту.

Матеріали і методи досліджень. Для проведення досліджень було використано зерно сорго сорту «Фулгус» з різною вологістю 13,0; 15,0; 17,0; 19,0 %, об'ємною масою 870 г/л та масою 1000 зерен 32 г. За органолептичними показниками якість досліджуваного зерна відповідала вимогам чинної нормативної документації — ДСТУ 4962:2008 «Сорго. Технічні умови». Усереднений хімічний склад зерна характеризувався вмістом 73 % крохмалю, 8 % сирого протеїну та 2 % сирій клітковини.

Дослідження форм зв'язку вологи у зернівці сорго виконували методом диференціально-термічного аналізу (DTA) на дериватографі «Паулік-Паулік-Ердей» моделі Q-1500D. Для аналізу використовували кварцеві тиглі з вагою зразка близько 1 г. В якості еталонного матеріалу застосовували попередньо прожарений при температурі 1800 °C оксид алюмінію (Al_2O_3). Температурний режим нагріву передбачав лінійне збільшення температури зі швидкістю 2,5 °C/хв до максимальної межі 250 °C.

Під час досліджень реєстрували термоаналітичні криві, що відображали зміну температури (T), втрату маси зразка (TG), диференційно-термічний сигнал (DTA), а також швидкість зміни маси (DTG). Такий підхід дозволяє визначити кінетичні параметри процесу, а також характер і температурні інтервали формування зв'язку вологи з компонентами зерна.

Отримані дані використовували для оцінки термічної стабільності зерна сорго, визначення критичних температурних меж клейстеризації та деградації, що є необхідними для оптимізації технології попінгу та покращення якості повітряного зерна.

Обробку НВЧ-опроміненням здійснювали у мікрохвильовій печі Samsung (Корея) із робочою частотою 2450 МГц при потужності 700 Вт за тривалості процесу 150 с. Після проведення процесу попінгу, повітряні зерна були відділені від «не зірваних» зерен. Зерна вважалися повністю «зірваними», якщо при візуальному огляді не було виявлено «не зірваного» ендосперму. Вихід повітряного зерна визначали за методикою [16].

Визначення органолептичних показників якості повітряних зерен проводили відповідно чинної нормативної документації (ДСТУ 2903:2005 Концентрати харчові. Сніданки сухі. Загальні технічні умови).

Результати досліджень та їх обговорення. Застосування термогравіметричного аналізу та суміжних методів для дослідження змін характеристик зерна сорго, призначеного для попінгу, є ключовим етапом у

комплексних дослідженнях фізико-хімічних та біологічних властивостей цього продукту. Такі дослідження мають важливе значення як для розширення фундаментальних знань про харчові продукти, що забезпечують життєдіяльність людини, так і для розробки оптимальних технологічних режимів виробництва високоякісної харчової продукції. У рамках роботи було проведено чотири контрольні експерименти, результати яких наведені на рис. 1-4.

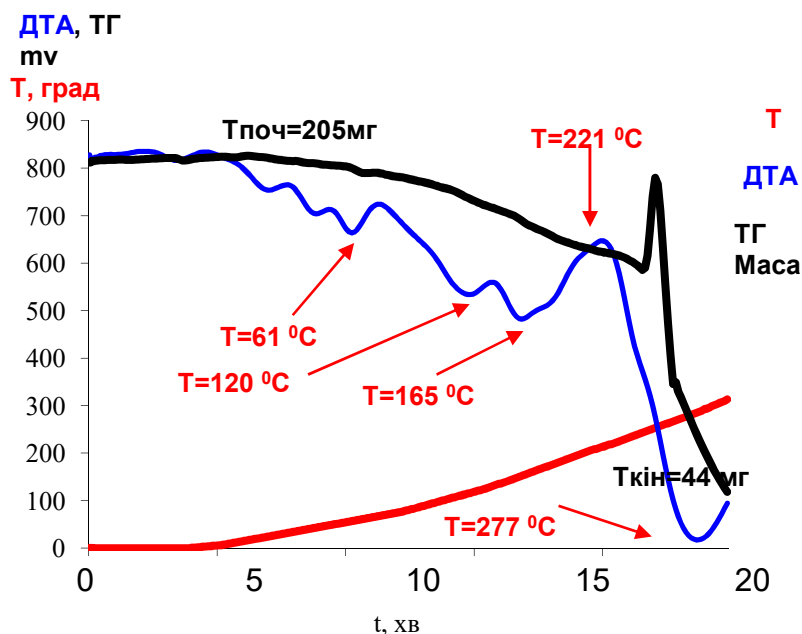


Рис. 1 – Дериватограма зразку зерна сорго з початковою вологістю 13,0 %

При використанні наважки зерна сорго масою 205 мг і вологості 13,0 %, під час нагріву в межах заданих температур спостерігаються три ендотермічні піки на диференціально-термічних кривих (ДТА) при температурах 61°C, 120°C і 165°C. Ці піки відображають додаткове поглинання теплової енергії зв'язаною вологою, процес спучування та підготовки зерна до явища попінгу, що відбувається при температурі близько 221°C із формуванням повітряного зерна. Подальше розтріскування зерна супроводжується викидом частинок за межі платинового тигля та зміною маси зразка, що фіксується термогравіметрично (ТГ) (рис. 1). Після завершення процесу залишається близько 44 мг сухого залишку, що відповідає ступеню перетворення натищеного зерна сорго на повітряне зерно у 78,5 % від початкової маси при заданій вологості.

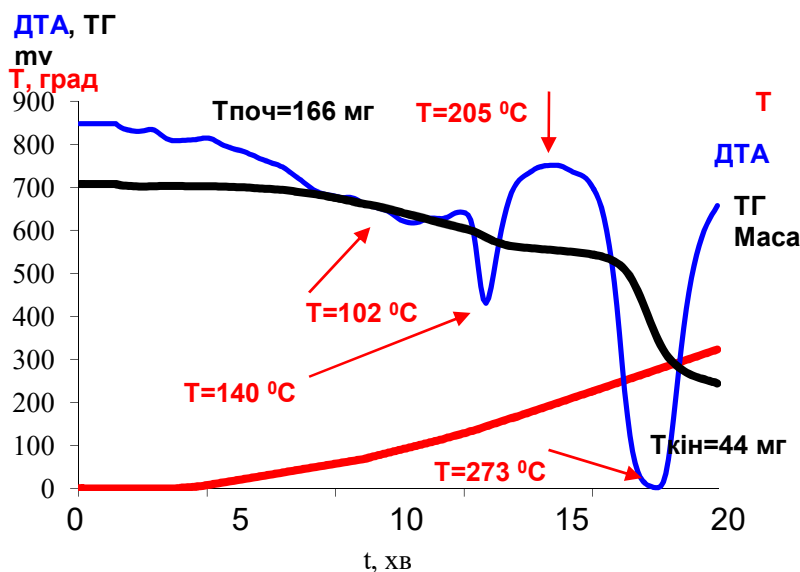


Рис. 2 – Дериватограма зразку зерна сорго з початковою вологістю 15,0 %

При збільшенні вихідної вологості зерна до 15,0 % (рис. 2) спостерігається подібна термічна поведінка, однак температура явища попінгу зміщується у бік зниження до приблизно 205°C. Це, на нашу думку,

пов'язано з підвищенням парової фази в зерні, що підтверджується появою більш низькотемпературних ендотермічних піків при 102°C та 140°C. Даний факт сприяє зниженню енергетичних витрат у процесі виробництва повітряного зерна із зерна сорго. Ступінь перетворення у цьому випадку становить 73,5 % маси.

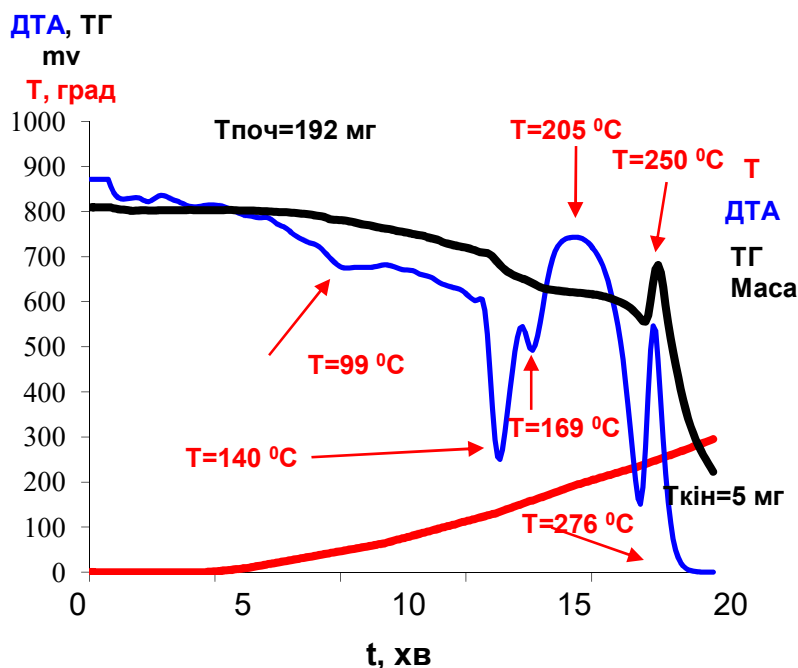


Рис. 3 – Дериватограма зразку зерна сорго з початковою вологістю 17,0 %

При подальшому збільшенні вологості зерна до 17,0 % (рис. 3) термічні процеси залишаються майже аналогічними до випадку 15,0 % вологості, однак додатково фіксується ще один ендотермічний ефект при температурі 169°C, який інтерпретується як нагрів капілярно зв'язаної води із залученням її до термофізичних процесів. Ця особливість сприяє суттєвому підвищенню ступеня перетворення зерна сорго на попінг – до 97,45 % маси.

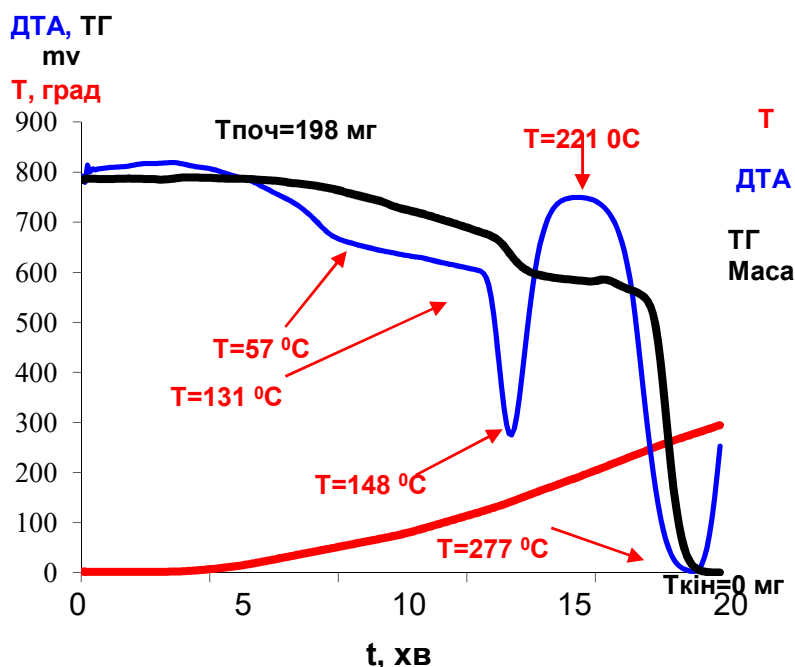


Рис. 4 – Дериватограма зразку зерна сорго з початковою вологістю 19,0 %

Оптимальними умовами за даного дослідження для формування повітряного зерна сорго вважається вологість на рівні 19,0 %, температура явища попінгу 221°C, а також наявність значущих ендотермічних ефектів при 57°C, 131°C і 148°C (рис. 4). При цих параметрах досягається максимальний ступінь перетворення –

100 %. Подальше підвищення температури призводить до виникнення процесів згоряння отриманого повітряного продукту, що підтверджується даними термогравіметричного аналізу (ТГ).

При виробництві повітряного зерна велику роль грають так звані поп-властивості зерна, зокрема вихід повітряного зерна, та товарні властивості готового продукту, тобто зовнішній вигляд, смак і запах повітряного зерна. Для підтвердження отриманих даних дериватографії було проведено дослідження процесу поп-пінгу зерна сорго при тих самих рівнях вологості. Отриманий повітряний продукт було оцінено за показником виходу повітряного зерна (рис. 5) та органолептичними властивостями.

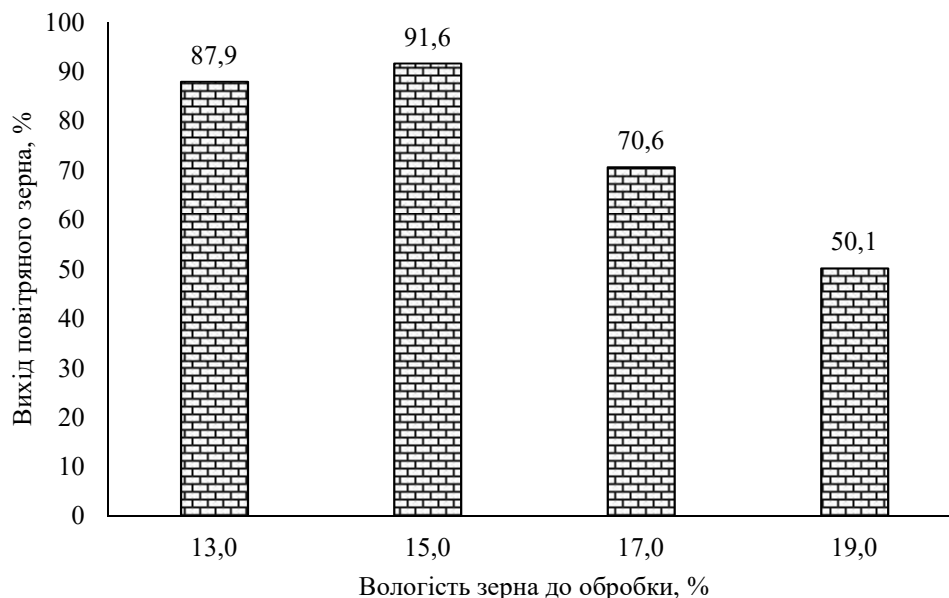


Рис. 5 – Вихід повітряного зерна при НВЧ-обробці

Як видно з даних на рис. 5, найбільшого виходу повітряного продукту вдалося досягти при вологості зерна сорго до НВЧ-обробки на рівні 15,0 %. Подальше збільшення вологості до 17,0 та 19,0 % перед обробкою призводило до різкого зниження показника на 23 та 46 % відповідно, що вказує на негативний вплив надлишкової кількості води. Це пояснюється тим, що у більш вологому зерні процеси утворення внутрішнього тиску та розриву оболонки відбуваються менш інтенсивно, а частина енергії витрачається на випаровування надлишкової води.

При цьому зерно сорго з початковою вологістю 15,0 % забезпечує не лише максимальний вихід, але й кращі товарні характеристики повітряного продукту – рівномірність розкриття, приємний смак і запах, що робить його більш конкурентоспроможним у порівнянні з продуктом, отриманим із зерна з нижчою або вищою вологістю. Зразки поп-сорго, які отримані з зерна з вологістю 17,0 та 19,0 % мали різну ступінь підгорілого продукту, що негативно впливає на товарні властивості, збільшує кількість відходів та несе потенційну небезпеку для здоров'я споживачів через утворення канцерогенних речовин, зокрема акриламід [18].

Встановлений раціональний рівень вологості в 15,0 % можна рекомендувати як контрольний параметр при промисловій підготовці зерна сорго до обробки НВЧ-енергією. Це дозволяє досягати максимального виходу готової продукції та стабільних органолептичних властивостей, що важливо для масштабування технології у харчовій промисловості.

Висновки. Проведені дослідження підтвердили ефективність застосування дериватографічного аналізу для комплексної оцінки термічних властивостей зерна сорго, що є ключовим етапом у розробці оптимальних параметрів технології попінгу. Встановлено, що вологість зерна суттєво впливає на температуру та характер фазових переходів, що визначають успішність процесу формування повітряного зерна. Зі збільшенням вологості спостерігається зниження температури явища попінгу, що свідчить про зміну термофізичних властивостей зерна і дозволяє оптимізувати енергетичні витрати при обробці.

Дослідження показали, що при вологості зерна близько 19,0 % досягається максимальний ступінь перетворення в нативного зерна в повітряне зерно (100 %), що є важливим показником для промислового застосування технології попінгу при кондуктивному нагріванні. Виявлення додаткових ендотермічних ефектів у процесі нагріву свідчить про складну взаємодію води з компонентами зерна, що впливає на кінетику термічних перетворень.

Оптимальна початкова вологість зерна сорго перед НВЧ-обробкою становить 15,0 %, що забезпечує максимальний вихід повітряного продукту. Збільшення вологості до 17,0 % і 19,0 % знижує цей показник на

23 % та 46 % відповідно, а також погіршує товарні властивості через нерівномірне розкриття і появу підгорілих зерен.

Зіставлення даних дериватографії та експериментів з НВЧ-поппінгу демонструє тісний взаємозв'язок між термічними характеристиками зерна та його поп-властивостями. Оптимальна вологість забезпечує найбільш сприятливий режим руйнування крохмальних і білкових структур, що сприяє формуванню якісного готового продукту.

Отримані результати дозволяють сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо регулювання вологості зерна сорго перед поппінгом, що сприятиме підвищенню якості та стабільності кінцевого продукту. Крім того, застосування НВЧ-обробки та подальший контроль термодинамічних параметрів процесу можуть стати перспективними напрямками для вдосконалення виробництва повітряного зерна сорго з покращеними функціональними характеристиками.

Таким чином, дослідження сприяють розширенню наукової бази щодо термічних перетворень зерна сорго та закладають фундамент для подальшої розробки інноваційних технологій у харчовій промисловості, орієнтованих на виробництво високоякісних і здорових зернових продуктів.

References

1. Bischof T. From grains and nuts to convenient snack bars. Diagram. The Buhler magazine. 2017. №175. P. 34–35.
2. United States Popcorn Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-states-popcorn-market>
3. Mishra, G., Joshi, D. C., & Panda, B. K. (2014). Popping and puffing of cereal grains: a review. *Journal of grain processing and storage*, 1(2), 34-46.
4. Nathakattur Saravanabavan, S., Manchanahally Shivanna, M., & Bhattacharya, S. (2013). Effect of popping on sorghum starch digestibility and predicted glycemic index. *Journal of food science and technology*, 50(2), 387-392.
5. Kuyanov Yu. Yu., Mykolenko S. Yu. Tekhnolohichni aspekty otrymannia «zirvanykh» zeren NVCh vypyrominiuvanniam // Kharchova promyslovist. 2017. №22. S. 40–48.
6. Mishra, G., Joshi, D. C., & Mohapatra, D. (2015). Optimization of pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology. *Journal of food science and technology*, 52(12), 7839-7849.
7. Hossain, M. S., Islam, M. N., Rahman, M. M., Mostofa, M. G., & Khan, M. A. R. (2022). Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100300.
8. Bazaluk, O., Havrysh, V., Fedorchuk, M., & Nitsenko, V. (2021). Energy assessment of sorghum cultivation in Southern Ukraine. *Agriculture*, 11(8), 695.
9. Mishra, G., Joshi, D. C., Mohapatra, D., & Babu, V. B. (2015). Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum. *Journal of cereal science*, 65, 19-24.
10. Swarnakar, A. K., Mohapatra, M., & Das, S. K. (2022). A review on processes, mechanisms, and quality influencing parameters for puffing and popping of grains. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16891.
11. Schambri, P., Brunet, S., Bailly, J. D., Kleiber, D., & Levasseur-Garcia, C. (2021). Effect of popcorn (*Zea mays* var. *evarta*) popping mode (microwave, hot oil, and hot air) on fumonisins and deoxynivalenol contamination levels. *Toxins*, 13(7), 486.
12. Buffler, Charles R. Microwave Cooking and Processing : Engineering Fundamentals for the Food Scientist. Van Nostrand Reinhold, 1993.
13. Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., Han, Z., & Cheng, J. H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 58-69.
14. Furmanova Yu. P. Tekhnolohiia kharchovoho produktu iz zerna hrechky: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: spets. 05.18.02 «Tekhnolohiia zernovykh, bobovykh, krupiiannykh produktiv i kombikormiv, oliinykh i lubiiannykh kultur». Kyiv: NUKhT. 2012. 20 s.
15. Lara, N., & Ruales, J. (2002). Popping of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*) and its effect on the functional, nutritional and sensory properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 797-805.
16. Tymchak, D. O., Kuianov, Y. Y., & Mykolenko, S. Y. (2018). Production of popped Sorghum with using microwave treatment. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 18(2).
17. Sadaka, S., & Atungulu, G. (2018). Grain sorghum drying kinetics under isothermal conditions using thermogravimetric analyzer. *Bioresources*, 13(1), 1534-1547.
18. Bocharova O. V., Yehorova A. V., Herko A. Otsiniuvannia bezpechnosti popkornu // Zernovi produkty i kombikormy. 2012. № 4. S. 34–36.

DERIVATIVE ANALYSIS OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SORGHUM GRAIN FOR POPPING

Zhygunov D., Dr. of Technical Sciences, Professor, Tymchak D., postgraduate
Odesa National University of Technology, Odesa

Abstract. The article examines the peculiarities of obtaining popped sorghum grains by means of microwave (MW) treatment, with special attention to the influence of the initial grain moisture content on yield indicators and the quality of the final product. It was established that in the production of popped sorghum, the popping properties of the raw material play a decisive role. Among these, the most important are the yield of the finished product, as well as its organoleptic and commercial characteristics, in particular appearance, aroma, and taste.

To verify the obtained results, derivatographic analysis was carried out. This made it possible to trace the relationship between the processes of thermal destruction and structural transformations in the grain and the moisture level prior to treatment. The research findings confirmed the crucial role of an optimal pre-moistening regime for ensuring efficient sorghum popping.

Experimental data demonstrated that the highest yield of popped sorghum was achieved at a moisture content of 15.0 %, resulting in a yield of 91.6 %. When the moisture was reduced to 13.0 %, the yield decreased to 87.9 %. On the other hand, increasing the grain moisture before MW treatment had a negative impact on process efficiency: at 17.0 %, the yield dropped to 70.6 % (a 23 % reduction), while at 19.0 % it further decreased to 50.1 % (a 46 % reduction). This can be explained by the fact that under conditions of excessive moisture, part of the absorbed microwave energy is consumed by water evaporation. As a result, the processes of building internal pressure and rupturing the pericarp of the grain become less intensive, thus reducing the degree of expansion.

The organoleptic evaluation confirmed that sorghum with an initial moisture content of 15.0 % provided the best consumer properties of the final product, namely uniform grain popping, pleasant taste, and aroma. In contrast, samples obtained at moisture levels of 17.0 % and 19.0 % were characterized by the presence of burnt particles. This not only worsened the commercial properties of the product and increased the proportion of waste, but also posed a potential health risk for consumers due to the possible formation of carcinogenic compounds, including acrylamide.

Thus, the conducted research indicates that the optimal initial moisture level of sorghum grain for microwave treatment is 15.0 %. This regime ensures not only the maximum yield of popped grains, but also provides high commercial and consumer quality characteristics of the finished product. The combined use of experimental yield assessment, organoleptic evaluation, and derivatographic analysis confirms that maintaining the correct moisture level is a key factor in obtaining a safe, high-quality popped sorghum product suitable for further food use.

Keywords: derivatographic analysis, sorghum grain, popped grain, popping, pop-sorghum, microwave processing, technology of popped sorghum production

Список використаної літератури

1. Bischof T. From grains and nuts to convenient snack bars. Diagram. The Buhler magazine. 2017. №175. P. 34–35.
2. United States Popcorn Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-states-popcorn-market>
3. Mishra, G., Joshi, D. C., & Panda, B. K. (2014). Popping and puffing of cereal grains: a review. *Journal of grain processing and storage*, 1(2), 34-46.
4. Nathakattur Saravanabavan, S., Manchanahally Shivanna, M., & Bhattacharya, S. (2013). Effect of popping on sorghum starch digestibility and predicted glycemic index. *Journal of food science and technology*, 50(2), 387-392.
5. Куянов Ю. Ю., Миколенко С.Ю. Технологічні аспекти отримання «зірваних» зерен НВЧ випромінюванням // Харчова промисловість. 2017. №22. С. 40–48.
6. Mishra, G., Joshi, D. C., & Mohapatra, D. (2015). Optimization of pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology. *Journal of food science and technology*, 52(12), 7839-7849.
7. Hossain, M. S., Islam, M. N., Rahman, M. M., Mostofa, M. G., & Khan, M. A. R. (2022). Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 8, 100300.
8. Bazaluk, O., Havrysh, V., Fedorchuk, M., & Nitsenko, V. (2021). Energy assessment of sorghum cultivation in Southern Ukraine. *Agriculture*, 11(8), 695.
9. Mishra, G., Joshi, D. C., Mohapatra, D., & Babu, V. B. (2015). Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum. *Journal of cereal science*, 65, 19-24.

10. Swarnakar, A. K., Mohapatra, M., & Das, S. K. (2022). A review on processes, mechanisms, and quality influencing parameters for puffing and popping of grains. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(10), e16891.
11. Schambri, P., Brunet, S., Bailly, J. D., Kleiber, D., & Levasseur-Garcia, C. (2021). Effect of popcorn (*Zea mays* var. *everta*) popping mode (microwave, hot oil, and hot air) on fumonisins and deoxynivalenol contamination levels. *Toxins*, 13(7), 486.
12. Buffler, Charles R. *Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamentals for the Food Scientist*. Van Nostrand Reinhold, 1993.
13. Ekezie, F. G. C., Sun, D. W., Han, Z., & Cheng, J. H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 58-69.
14. Фурманова Ю.П. Технологія харчового продукту із зерна гречки: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.18.02 «Технологія зернових, бобових, круп'яних продуктів и комбікормів, олійних и луб'яних культур». Київ: НУХТ. 2012. 20 с.
15. Lara, N., & Ruales, J. (2002). Popping of amaranth grain (*Amaranthus caudatus*) and its effect on the functional, nutritional and sensory properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(8), 797-805.
16. Tymchak, D. O., Kuianov, Y. Y., & Mykolenko, S. Y. (2018). Production of popped Sorghum with using microwave treatment. *Grain Products and Mixed Fodder's*, 18(2).
17. Sadaka, S., & Atungulu, G. (2018). Grain sorghum drying kinetics under isothermal conditions using thermogravimetric analyzer. *Bioresources*, 13(1), 1534-1547.
18. Бочарова О. В., Єгорова А.В., Герко А. Оцінювання безпечності попкорну // Зернові продукти і комбікорми. 2012. № 4. С. 34-36.

Отримано в редакцію 06.07.2025
Прийнято до друку 02.09.2025

Received 06.07.2025
Approved 02.09.2025