

DOI: 10.31319/2519-2884.48.2026.20

УДК 662.917 : 662.918

Суха І.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-5579-2047, e-mail: irinasuha3@gmail.com

Мікац О.М., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

e-mail: aerospace.nni@ust.edu.ua

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Sukha Iryna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Educational and Scientific Institute “Aerospace Institute”

Mikats Oleh, Postgraduate student

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro

РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ БЕЗПОЛУМЕНЕВИХ НАГРІВАЧІВ ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ПАЙКІВ НА ОСНОВІ ВТОРИННОЇ І ДОСТУПНОЇ СИРОВИНИ

Досліджено процеси розроблення та оптимізації складів безполумєневих нагрівачів їжі на основі системи «алюміній – оксид кальцію – вода» з додаванням карбонату натрію. Обґрунтовано актуальність використання таких систем для забезпечення автономного розігріву харчових продуктів, зокрема в умовах польового застосування та забезпечення військових підрозділів. Досліджено механізм багатостадійних екзотермічних реакцій, що включають гідратацію оксиду кальцію, утворення лужного середовища та активацію корозії алюмінію з виділенням значної кількості тепла і водню. Встановлено вплив складу суміші на тепловиділення, швидкість реакції та температурний профіль нагрівача. Експериментально підтверджено нерівномірний розподіл температури в об'ємі нагрівача та встановлено оптимальний вміст алюмінію в межах 45–65 %, що забезпечує ефективний тепловий ефект і безпечність експлуатації. Отримані результати можуть бути використані для створення економічно ефективних та екологічно безпечних безполумєневих нагрівачів їжі на основі доступної сировини.

Ключові слова: безполумєневий нагрівач їжі; алюміній; оксид кальцію; екзотермічна реакція; тепловиділення; водень; термогенний агент; індивідуальні пайки.

The article investigates the development and optimization of flameless food heater compositions based on the aluminum–calcium oxide–water system with the addition of sodium carbonate. The relevance of such systems for autonomous food heating, particularly under field conditions and for military supply, is substantiated. The mechanism of multistage exothermic reactions is studied, including calcium oxide hydration, alkaline medium formation, and activation of aluminum corrosion accompanied by significant heat and hydrogen generation. The influence of mixture composition on heat release, reaction rate, and temperature profile is determined. Experimental results confirm a non-uniform temperature distribution within the heater volume and establish the optimal aluminum content in the range of 45–65 %, ensuring both effective heat generation and operational safety. The obtained results can be applied to the development of cost-effective and environmentally friendly flameless food heaters based on accessible raw materials.

Keywords: flameless food heater; aluminum; calcium oxide; exothermic reaction; heat generation; hydrogen; thermogenic agent; individual rations.

Постановка проблеми

Принцип функціонування безполумєневих нагрівачів харчових продуктів ґрунтується на реалізації екзотермічних реакцій у системі «алюмінієвий порошок – оксид кальцію – вода», що супроводжуються інтенсивним виділенням теплової енергії. У процесі взаємодії реагентів генерується кількість тепла, достатня для ефективного нагрівання харчових продуктів, зокрема індивідуальних пайків, без застосування відкритого полум'я.

З огляду на економічні та екологічні чинники, а також з урахуванням потреб забезпечення Збройних Сил України значною кількістю безполумєневих нагрівачів їжі, актуальним є розроблення їх складів на основі доступної та вторинної сировини. Такий підхід дає змогу знизити собівартість продукції, мінімізувати залежність від імпортних матеріалів і сприяти раціональному використанню ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зростання споживання харчових продуктів і зміна способу життя зумовили підвищення попиту на готові до вживання продукти харчування [1]. У сучасних умовах особливого значення набуває забезпечення автономного харчування в польових умовах, що є критично важливим для військових підрозділів. Під час широкомасштабного вторгнення потреби Збройних Сил України у швидкому, безпечному та незалежному від зовнішніх джерел енергії розігріві їжі суттєво зросли, що актуалізує застосування безполумєневих нагрівачів їжі.

Безполумєневі нагрівачі їжі як елемент функціональних систем пакування забезпечують можливість розігріву харчових продуктів без використання відкритого полум'я та електроенергії, що є особливо важливим в умовах бойових дій та обмежених ресурсів. Вони характеризуються оперативною готовністю до використання [2], енергоефективністю [3] та екологічністю [4]. Основою їх функціонування є екзотермічні хімічні реакції, які активуються водою та супроводжуються виділенням тепла [1].

Технології безполумєневого нагріву харчових продуктів розробляються вже понад півстоліття. Ще у 1950 році були проведені дослідження, які дали змогу отримати ефективну реакційну суміш оксиду кальцію (CaO) з водою (H_2O) для нагрівання супів та інших рідких харчових продуктів у банках, що стало основою для створення відповідних систем військового призначення [5]. Подальший розвиток технологій включав створення у 2006 році вставного модуля для таких систем [6], який складався з твердих і рідких реагентів, зокрема оксиду кальцію в поєднанні з інгібітором на основі воску. Однак такі рішення потребували значного об'єму або маси термогенного агента через схильність оксиду кальцію до реакцій гідратації та карбонізації під час взаємодії з водою та вуглекислим газом.

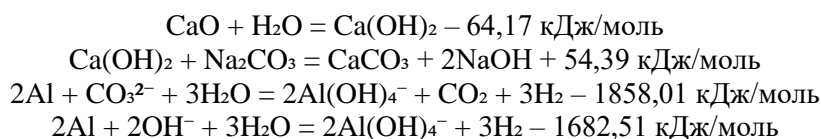
З метою нагрівання твердих харчових продуктів у гнучкій упаковці були розроблені системи на основі магнієво-залізного (Mg-Fe) сплаву [7]. Проте суттєвим недоліком таких нагрівачів є тривалий час реакції за температури води нижче 10°C . Для підвищення ефективності було запропоновано використання порошкової суміші сплаву Mg-Fe з хлоридом натрію (NaCl) [8], що дало змогу скоротити час запуску реакції та підвищити швидкість тепловиділення. Водночас такі нагрівачі характеризуються нерівномірним розподілом температури, високою вартістю та неефективним використанням металевих ресурсів після застосування [9, 10]. У зв'язку з цим готові до вживання страви, що використовують безполумєневі нагрівачі їжі на основі Mg-Fe , застосовуються переважно для оперативного забезпечення армії та окремих гуманітарних місій.

В умовах широкомасштабного вторгнення в Україну особливої актуальності набуває використання безполумєневих нагрівачів їжі як складової індивідуальних раціонів харчування військовослужбовців, оскільки вони забезпечують можливість швидкого розігріву їжі без демаскувальних факторів, таких як відкритий вогонь або дим. Крім того, такі системи підвищують автономність підрозділів та ефективність організації харчування в польових умовах.

Завдяки простому виробничому процесу, компактності та низькій вартості суміш алюмінію та оксиду кальцію є одним із найбільш поширених компонентів термогенного агента в безполумєневих нагрівачах їжі [1], що робить її перспективною основою для подальших досліджень і практичного впровадження в умовах масового використання.

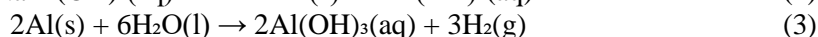
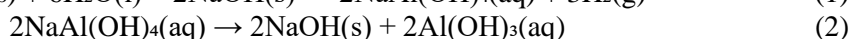
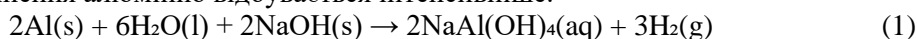
Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розроблення та оптимізація складів безполумєневих нагрівачів їжі, принцип дії яких базується на реакціях корозії алюмінію та гідратації оксиду кальцію. Перспективним варіантом є порошкова суміш, що містить алюміній, оксид кальцію та карбонат натрію. Активація такого складу здійснюється шляхом додавання води, яка ініціює каскад реакцій, більшість з яких є екзотермічними:



Виклад основного матеріалу

Хоча алюміній реагує з водою з утворенням Al(OH)_3 і H_2 , цей процес гальмується наявністю пасивувального аморфного шару Al_2O_3 товщиною 2—5 нм. Для подолання цього обмеження використовують дві основні стратегії: кислотні або лужні водні середовища, в яких оксиди алюмінію є розчинними, а також механічне подрібнення для видалення оксидного шару. У лужних розчинах розчинення алюмінію відбувається інтенсивніше.



NaOH , що витрачається в реакції (1), регенерується в реакції (2), завершуючи загальний процес, описаний реакцією (3). Однак пасивація плівками Al(OH)_3 та Al_2O_3 може зменшувати інтенсивність гідролізу приблизно на 30 %, що супроводжується зниженням виходу H_2 приблизно на 33 % [8].

Проводилось дослідження впливу складу екзотермічної суміші на кількість теплоти, що виділюється при реакції взаємодії кальцій оксида, алюмінія та натрій карбоната. Визначення кількості теплоти здійснювалось за допомогою ізоперіболічного метода з використанням калориметра Parr 6755 (Combined Solution). Кваліфікація реагентів, використаних при дослідіах, не нижче «х.ч.». Крім того, розроблені суміші були випробувані для підігріву пайка в реторт-пакеті – гречана каша з м'ясом, розміром $150 \times 200 \times 50$ мм. Маса використаного зразка екзотермічної суміші дорівнювала 100 г. Температуру на верхній та нижній поверхні нагрівача, а також в центральній точці та на верхній поверхні пайка вимірювали за допомогою термометра зі щупом UKC TP 101.

Вплив концентрації реагентів на кількість теплоти, що виділяється під час реакції, наведено в таблиці.

Таблиця. Вплив складу екзотермічної суміші на масу води, необхідної для активації, та кількість теплоти, що виділяється

<i>CaO, %</i>	<i>Al, %</i>	<i>Na₂CO₃, %</i>	<i>H₂O, г</i>	<i>Кількість теплоти, кДж</i>
80	15	5	30,5	316,01
80	10	10	31,35	252,63
80	5	15	31,9	189,25
60	25	15	30,06	556,48
60	20	20	30,6	490,65
60	15	25	31,1	429,71
40	35	25	29,3	796,94
40	30	30	29,85	733,5
40	25	35	30,4	670,2

У безполумєневих нагрівачах їжі спостерігаються зміни температури в центральній точці, а також на верхній і нижній поверхнях. На початковій стадії температури в точках вимірювання — у центрі, на верхній та нижній поверхнях нагрівача — швидко зростають до 110—130 °С протягом 30—90 с залежно від складу суміші. Після цього температура в центральній точці та на верхній поверхні пайка різко знижується до 94—97 °С, далі зберігається на відносно сталому рівні з повільною тенденцією до зменшення до 800 с, а потім остаточно знижується. Температура

на нижній поверхні також характеризується плавним зменшенням у період від досягнення максимального значення до 960 с. У кінцевому підсумку температура знижується до 60 °С.

Динамічний температурний профіль у поперечному перерізі безполуменового нагрівача їжі досліджувався за допомогою інфрачервоної термографії. Термографічні зображення чітко демонструють, що розподіл температури в різних зонах нагрівача є нерівномірним. Спостерігається поступове зниження температури від центру до поверхні. Це підтверджує, що температура в центральній частині постійно є найвищою, тоді як на нижній поверхні вона залишається найнижчою.

Гарячі гази, включаючи водяну пару, що утворюються внаслідок внутрішніх реакцій у безполуменовому нагрівачі, під час роботи безперервно піднімаються вгору та виходять через його верхню частину. При цьому верхня частина продовжує поглинати тепло від гарячих газів, підтримуючи відносно високу температуру. Натомість тепло, що утворюється в нижній частині нагрівача, постійно втрачається: гарячі гази виходять і передають тепло воді, що зумовлює нижчу температуру порівняно з верхньою частиною. Низька температура нижньої поверхні пояснюється інтенсивними тепловтратами через теплопровідність від нагрівача до води.

Хімічна реакція між алюмінієвим порошком і чистою водою потребує температури вище 80 °С. На початковому етапі використання оксид кальцію взаємодіє з водою, яка швидко проникає в нагрівач, супроводжуючись виділенням тепла. Утворений гідроксид кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ покриває частинки алюмінію. Цей процес призводить до підвищення температури всередині нагрівача та зростання рН середовища, що створює умови для ініціювання екзотермічної реакції алюмінію. Реакція відбувається на поверхні алюмінієвого порошку і супроводжується виділенням значної кількості водню.

Аналіз експериментальних результатів свідчить, що механізм реакцій у безполуменових нагрівачах їжі є складним і багатостадійним. Утворені водень і нагріта водяна пара дифундують назовні через шар $\text{Ca}(\text{OH})_2$, що покриває частинки, унаслідок чого формується пориста структура та відбувається швидке збільшення об'єму. Газ, що безперервно утворюється, заповнює пори в середньому шарі матеріалу, який має більш щільну та менш пористу структуру, перешкоджаючи подальшій дифузії розчину, що містить гідроксид-іони. Це може бути причиною неповного перебігу реакцій у внутрішніх шарах, виникнення ефекту шарування та нерівномірного розподілу температури.

У процесі реакції утворюється широкий спектр продуктів, вміст яких суттєво змінюється залежно від температури. Для оцінювання температурного впливу було проаналізовано вміст шести основних продуктів: H_2 , H_2O (пара), H_2O (рідина), $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ та Al_2O_3 .

Встановлено, що зі зростанням температури понад 60 °С частка утвореного водню поступово зменшується, тоді як вміст водяної пари збільшується, а концентрації інших продуктів залишаються відносно стабільними. При підвищенні температури до 120 °С вміст $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ зростає і перевищує вміст водню. Це свідчить про пригнічення екзотермічної реакції термогенного агента за таких умов, що пояснює швидке зниження температури нагрівача після досягнення максимального значення.

Значна частина теплової енергії витрачається на фазовий перехід води з рідкого стану в газоподібний, що призводить до втрат тепла разом із паром, яка виходить із нагрівача. Унаслідок цього температура системи не може тривалий час утримуватися на рівні понад 100 °С.

Для встановлення ефективності розробленого складу було проаналізовано дев'ять безполуменових нагрівачів їжі на основі системи $\text{Al}-\text{CaO}$ для розігріву харчових продуктів.

Нагрівачі з вмістом 70 % Al і 30 % CaO , а також 40 % Al і 60 % CaO були досліджені щодо їх екзотермічного ефекту. Для системи з 70 % Al і 30 % CaO час реакційного відгуку був надзвичайно коротким: підвищення температури починалося вже через 60 с, а температура понад 80 °С підтримувалася більше 13 хв. Проте такі системи виявилися непридатними для практичного використання через небезпеку експлуатації.

Для системи з 40 % Al і 60 % CaO реакційний відгук був значно повільнішим: підвищення температури починалося приблизно через 200 с, а максимальна температура досягала

лише 42 °С, що є недостатнім для ефективного розігріву їжі. З огляду на це встановлено, що оптимальний вміст алюмінію у термогенних сумішах має становити 45—65 %.

Для подальшої перевірки придатності та точності моделі було підготовлено нагрівачі з п'ятьма різними співвідношеннями Al:CaO — 45:55, 50:50, 55:45, 60:40 та 65:35.

Було розраховано ступінь перетворення та масу кожного шару термогенного агента для зазначених співвідношень. Встановлено, що зі збільшенням вмісту алюмінію ступінь перетворення у середньому шарі зростає, тоді як його маса зменшується. Слід зазначити, що не всі співвідношення компонентів призводять до формування чіткої тришарової структури після використання. Для нагрівачів із вмістом CaO понад 45 % спостерігалось формування одного або двох шарів, при цьому ступінь перебігу реакції залишався низьким.

Це пояснюється тим, що утворення значної кількості Ca(OH)₂ призводить до покриття поверхні частинок алюмінію, що ускладнює їх взаємодію з водою або гідроксид-іонами та спричиняє неефективне використання реагентів. Отримані результати підтверджують узгодженість експериментальних даних із припущеннями моделі щодо механізму тепловиділення.

Висновки

Встановлено, що система «Al–CaO–H₂O–Na₂CO₃» забезпечує інтенсивне тепловиділення завдяки каскаду екзотермічних реакцій, що робить її ефективною основою для створення безполумєневих нагрівачів їжі.

Доведено, що визначальним фактором активації реакції алюмінію є формування лужного середовища, яке руйнує пасивуючий оксидний шар та забезпечує перебіг гідролізу з виділенням водню. Показано, що збільшення вмісту алюмінію сприяє підвищенню теплового ефекту та ступеня перетворення, однак надлишок алюмінію може призводити до небезпечного перебігу реакцій. Встановлено, що оптимальний вміст алюмінію у складі термогенного агента становить 45—65 %, що забезпечує раціональне поєднання ефективності та безпечності.

Виявлено, що температурний режим нагрівача характеризується швидким досягненням високих температур із подальшим їх зниженням унаслідок тепловтрат, зокрема через випаровування води. Підтверджено нерівномірність температурного розподілу в об'ємі нагрівача, що зумовлено особливостями тепломасообміну та утворенням газоподібних продуктів. З'ясовано, що утворення шару Ca(OH)₂ на поверхні частинок алюмінію обмежує доступ реагентів і знижує ефективність перебігу реакцій.

Отримані результати підтверджують доцільність використання доступної та вторинної сировини для створення економічно ефективних і екологічно безпечних безполумєневих нагрівачів їжі.

Список використаної літератури

1. Barrett, A.H., Cardello, A.V. Military food engineering and ration technology, DEStech Publications Inc, Lancaster, 2012 ISBN-13:978–1605950495.
2. Bhosale, R. R., Kumar, A., Sutar, P. Thermodynamic analysis of solar driven SnO₂/SnO based thermochemical water splitting cycle. *Energy Conversion and Management*. 2017. 135, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.067>
3. Bounie, D., Arcot, J., Cole, M., Egal, F., Juliano, P., Mejia, C., Rosa, D., Sellahewa, J. The role of Food Science and Technology in Humanitarian response. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 103, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.006>
4. Bumbudsanpharoke, N., Ko, S. Packaging technology for home meal replacement: Innovations and future prospective. *Food Control*, 2022, 132, Article 108470. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108470>
5. Caldwell, W. A., Gillies, J. Development of self-heating food can. *Industrial Chemist*, 1950, 26, 301–304.
6. Chen, W.-H., & Syu, Y.-J. Hydrogen production from water gas shift reaction in a high gravity (Hige) environment using a rotating packed bed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35, 10179–10189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>

7. David, E., Kopac, J. Hydrolysis of aluminum dross material to achieve zero hazardous waste. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 209–210, 501–509. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.064>
8. Deng, Z.-Y., Ferreira, J. M., Tanaka, Y., & Ye, J. Physicochemical mechanism for the continuous reaction of γ -Al₂O₃-modified aluminum powder with water. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90, 1521–1526. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01546.x>
9. Dukhan, N., Al-Rammahi, M. A., Suleiman, A. S. Fluid temperature measurements inside metal foam and comparison to Brinkman–Darcy flow convection analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 67, 877–884. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.055>
10. Ferreira Rodrigues, J., Cunha dos Santos Filho, M. T., Aparecida de Oliveira, L. E., Brandenburg Siman, I., Barcelos, Ade, de Paiva Anciens Ramos, G. L., Almeida Esmerino, E., Gomes da Cruz, A., Arriel, R. A. Effect of the COVID-19 pandemic on food habits and perceptions: A study with Brazilians. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 116, 992–1001. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.005>

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF FLAMELESS HEATERS FOR INDIVIDUAL SOLDERING BASED ON SECONDARY AND AVAILABLE RAW MATERIALS

Abstract

The article investigates the development and optimization of flameless food heater compositions based on the aluminum–calcium oxide–water system with the addition of sodium carbonate. The relevance of such systems for autonomous food heating, particularly under field conditions and for military supply, is substantiated. Modern approaches to thermogenic agents are analyzed, and the advantages of aluminum–calcium compositions over existing analogues are identified. The mechanism of multistage exothermic reactions is studied, including calcium oxide hydration, alkaline medium formation, and activation of aluminum corrosion accompanied by significant heat and hydrogen generation. The influence of mixture composition on heat release, reaction rate, and temperature profile is determined. It is shown that thermal characteristics depend on component ratios as well as mass transfer and heat losses associated with water evaporation. Experimental results confirm a non-uniform temperature distribution within the heater volume and establish the optimal aluminum content in the range of 45–65%, ensuring both effective heat generation and operational safety. The obtained results can be applied to the development of cost-effective and environmentally friendly flameless food heaters based on accessible raw materials.

References

- [1] Barrett, A.H., & Cardello, A.V. (2012). *Military food engineering and ration technology*, DEStech Publications Inc, Lancaster. ISBN-13:978–1605950495.
- [2] Bhosale, R. R., Kumar, A., & Sutar, P. (2017). Thermodynamic analysis of solar driven SnO₂/SnO based thermochemical water splitting cycle. *Energy Conversion and Management*, 135, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.067>
- [3] Bounie, D., Arcot, J., Cole, M., Egal, F., Juliano, P., Mejia, C., Rosa, D., & Sellahewa, J. (2020). The role of Food Science and Technology in Humanitarian response. *Trends in Food Science & Technology*, 103, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.006>
- [4] Bumbudsanpharoke, N., & Ko, S. (2022). Packaging technology for home meal replacement: Innovations and future prospective. *Food Control*, 132, Article 108470. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108470>
- [5] Caldwell, W. A., & Gillies, J. (1950). Development of self-heating food can. *Industrial Chemist*, 26, 301–304.

- [6] Chen, W.-H., & Syu, Y.-J. (2010). Hydrogen production from water gas shift reaction in a high gravity (Hige) environment using a rotating packed bed. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 10179–10189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123317>
- [7] David, E., & Kopac, J. (2012). Hydrolysis of aluminum dross material to achieve zero hazardous waste. *Journal of Hazardous Materials*, 209–210, 501–509. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.064>
- [8] Deng, Z.-Y., Ferreira, J. M., Tanaka, Y., & Ye, J. (2007). Physicochemical mechanism for the continuous reaction of γ -Al₂O₃-modified aluminum powder with water. *Journal of the American Ceramic Society*, 90, 1521–1526. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01546.x>
- [9] Dukhan, N., Al-Rammahi, M. A., & Suleiman, A. S. (2013). Fluid temperature measurements inside metal foam and comparison to Brinkman–Darcy flow convection analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 877–884. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.055>
- [10] Ferreira Rodrigues, J., Cunha dos Santos Filho, M. T., Aparecida de Oliveira, L. E., Brandenburg Siman, I., Barcelos, Ade, de Paiva Anciens Ramos, G. L., Almeida Esmerino, E., Gomes da Cruz, A., & Arriel, R. A. (2021). Effect of the COVID-19 pandemic on food habits and perceptions: A study with Brazilians. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 992–1001. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.005>

Надійшла до редколегії 11.02.2026

Прийнята після рецензування 16.03.2026

Опублікована 26.03.2026