

**ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**



*X МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА  
КОНФЕРЕНЦІЯ*

**«ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ»**

*ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ*

**08-12 вересня 2025 р.**

**м. Одеса, Україна**

ББК 36.81 + 36.82  
УДК 663 / 664

I-66

I-66 Інноваційні енерготехнології: матеріали X міжнародної науково-практичної конференції (8–12 вересня 2025 р.). – Одеса: ОНТУ, 2025. – 36 с.

Матеріали, занесені до збірника, друкуються за авторськими оригіналами.  
За достовірність інформації відповідає автор публікації

## ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

Голова, ректор університету д.е.н., проф.	Л.В. Іванченкова
Заст. голови, проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків к.т.н., доцент	О.В. Ольшевська
Заст. голови з організаційних питань, завідувач кафедри ПОтаЕМ, д.т.н., проф.	О.Г. Бурдо
Відповідальний секретар, к.т.н., асистент	Н.В. Ружицька
Секретар, PhD, доцент	І. В. Сиротюк

### Члени оргкомітету:

к.т.н., доц. <b>О.М. Всеволодов</b>	зав. лаб. <b>В.В. Петровський</b>	інженер <b>С.А. Малашевич</b>
к.т.н., доц. <b>І.І. Яровий</b>	інженер <b>В.О. Славинська</b>	аспірант <b>М.Ю. Молчанов</b>
д.т.н., проф. <b>І.В. Безбах</b>	зав. лаб. <b>В.Ю. Юрлов</b>	аспірант <b>І. М. Аль-Хамад</b>

Одеський національний технологічний університет  
вул. Канатна, 112, г. Одеса, Україна, 65039  
Тел. 8(048) 712-41-29, 712-41-75  
Факс +724-86-88, +722-80-42, +725-47-83  
e-mail: [terma\\_onaft@ukr.net](mailto:terma_onaft@ukr.net)  
сайт: [www.ontu.edu.ua](http://www.ontu.edu.ua) , [www.nanofood.com.ua](http://www.nanofood.com.ua)

# Секція 1. ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 662.8:628.4:633.15

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАЛИВА НА ОСНОВІ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА РЕШТОК КУКУРУДЗИ

**Корінчевська Т.В.**, к.т.н., ст. досл., **Михайлик В.А.**, к.т.н., с.н.с.,  
**Снежкін Ю.Ф.**, д.т.н., професор  
*Інститут технічної теплофізики НАН України*

Утилізація відходів є нагальною необхідністю для України. Перспективним напрямком вирішення цієї проблеми може бути переробка відходів на альтернативне паливо. Найпоширенішими компонентами такого палива є горючі складові твердих побутових відходів та відходи сільськогосподарської діяльності рослинного походження.

В роботі досліджено 6 складів експериментального палива, компонентами якого є картон (20–35%), поліетилен (25–40%), віскозна тканина (10–15%), поживні рештки кукурудзи (20–30%).

Термічні властивості палива досліджували в ході контрольованого нагрівання зразків до 1000 °С в дериватографі Q-1000. Були визначені етапи термічного розкладання палива (дегідратація, розкладання органічних і мінеральних речовин), вологість та зольність палив, оцінено кінетику розкладання органічних речовин. Теплотворну здатність вимірювали за стандартизованою методикою для твердих палив.

Встановлено, що дегідратація закінчується за 151–162 °С. Вміст води залежить від складу зразка, а саме від кількості більш вологих компонентів (картону та решток кукурудзи). Одразу після дегідратації реєструється розкладання органічних речовин, яке завершується за 522–539 °С. Термічне розкладання органічних речовин в композитному паливі відбувається в декілька стадій, що відрізняються інтервалами температур і швидкістю розкладання. Дослідження кінетики розкладання дозволило визначити швидкість деструкції органічних речовин на різних стадіях та їх загальну середню швидкість. Деструкція палива завершується розкладанням мінеральних речовин. На даному етапі в інтервалі 628–727 °С розкладаються природні утворення з  $\text{CaCO}_3$  та  $\text{MgCO}_3$ , що присутні у деяких компонентах палива (картоні).

В результаті варіювання складом експериментального палива відзначено таку зміну термічних показників: вологість (від 3,17 до 5,83 %); вміст органічних речовин (від 92,39 до 95,68 % сухого матеріалу); вміст мінеральних речовин (від 1,21 до 3,72 % сухого матеріалу); зольність (від 2,65 до 4,19 %); серед-

ня швидкість розкладання (від 1,83 до 1,98 % сухого матеріалу/хв.); нижча теплота згорання (від 22,96 до 26,92 МДж/кг).

На підставі результатів проведених досліджень була розроблена технологія виробництва композитного палива на основі горючих компонентів твердих побутових та сільськогосподарських відходів рослинного походження, що включає етапи приймання та сортування, сушіння та двостадійне подрібнення.

УДК 629.5.03

## ІМІТАЦІЯ РУХУ ГІДРОБІОНТІВ У БІОМІМЕТИЧНИХ РУШІЯХ: ОГЛЯД ТИПІВ ТА СФЕР ВИКОРИСТАННЯ

Воїнов О. П., д.т.н., проф., Самохвалов В. С., к.т.н., доц., Кобалава Г. О.,  
к.т.н., доц.

*Херсонський навчально-науковий інститут національного університету  
кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон*

**Вступ.** Сучасний морський транспорт усе більше орієнтується на біоміметичні технології, що наслідують принципи руху морських живих організмів - риб, медуз, кальмарів тощо. Такі підходи дають змогу розробляти маневрені та екологічно чисті рушійні системи з високим ККД та низьким рівнем шуму для їх застосування в морських роботах, плавучих платформах, для екологічного моніторингу. **Проаналізуємо основні типи біоміметичних рушіїв.**

### 1. Горизонтально-осцилюючі рушії типу «тунець» [1].

Рушій імітує рух тунця та схожих швидкоплавних риб, у яких хвіст та задня частина тіла здійснюють **синусоїдальні горизонтальні коливання**. Висока швидкість створюється серводвигунами, які керують хвостовим плавцем. Осциляція корпусу забезпечує поступальний рух з високим ККД – до 85%; найбільш ефективні при **прямолінійному русі**. Використовують в підводних морських дронах, автономних роботах, при гідроакустичному зондуванні.

### 2. Вертикально-осцилюючий рушій типу «дельфін/кит» [2].

Рушій імітує рух дельфіна або кита: хвостовий плавник (флук) здійснює вертикальні коливання назустріч і вперед від тулуба. Цей рух генерує підйомну силу, яка перетворюється у поступальний рух водного апарата. Сервоприводи гнучко змінюють кут хвоста у вертикальній площині. Хвіст складається з декількох шарнірів, що повторюють плавні вигини подібно до хребта тварин. Висока маневреність, у тому числі підйом, повороти; плавний тихий рух із швидкістю до 1–2 тіла в секунду дозволяють використовувати їх у підводних дронах для вивчення поверхні водойм; роботах для дослідження коралових рифів, затоплених структур; гідрофільтрації, екологічному моніторингу.

### 3. Мультизв'язні конструкції з активними плавниками [3].

Тіло складається з **декількох зчленованих сегментів**, які можуть згинатись незалежно один від одного. Плавники та хвіст мають незалежні

актуатори. Сегменти корпусу і активні плавники послідовно деформуються. Активні **грудні, спинні або черевні плавники**, які керуються мікроконтролером. Висока маневреність (може здійснювати повороти майже на місці); можливість точно регулювати рух, плисти як вперед, так і назад дозволяють використовувати їх для досліджень в замкнених водоймах, у маневрових підводних апаратах, біо-інженерних експериментах, освітніх та наукових проектах.

#### **4. М'які хвостові рушії на основі матеріалів з пам'яттю форми (SMA) [4].**

**SMA** або **електроактивні полімери** змінюють форму під впливом електричного струму або температури. Деформація викликає вигин хвоста, що створює поступальний рух, як у справжніх риб. Безшумна робота, м'який рух; висока гнучкість і біосумісність дозволяють **використовувати їх в роботах** для біосистем, мікророботах, медичних приладах, стелс-технологіях.

#### **5. Осцилюючий хвіст з сервоприводом [5].**

**Конструкція хвостового пропульсивного механізму з одним рухомим хвостом**, що коливається навколо фіксованої осі. Серводвигуни задають коливання хвоста ліворуч/праворуч. Двигун з одним плавцем на кінці гнучкого корпусу; легка модифікація; висока енергоефективність забезпечують їх застосування у демонстраційних моделях в біомеханіці, освітніх, комерційних проектах.

#### **6. Плавцевий рушії (MPF) [6].**

Плавці рухаються у формі хвилі в вертикальній і/або горизонтальній площині, генеруючи підйом і тягу аналогічно до руху скатів, морських черепах чи пінгвінів. Плавник піднімається, - створюється підйомна сила, опускається - рухається вперед. Один або декілька плавців керуються серводвигунами або електрогідравлікою. Рух формується за допомогою алгоритмів генерації хвиль (CPG), що задають амплітуду й фазу коливань. Висока маневреність: точні повороти, регулювання висоти; енергоефективність при повільному режимі руху; компактна конструкція забезпечують їх застосування в підводних роботах ROV/AUV для обстеження коралових лісів, затоплених споруд; у навчальних роботах, природоохоронному моніторингу.

#### **7. Реактивний (джет-рух) [7].**

Імітує відстиснення води, як у медуз, кальмарів або осетрових: вода всмоктується в порожнину, а потім виштовхується форсовано, утворюючи реактивний струмінь. Використовуються п'єзоелектричні/гідравлічні або мембранні насоси. Контроль над частотою ущільнення порожнини дозволяє керувати швидкістю і тягою. Тихий рух; висока енергоефективність, особливо в режимі резонансу; обмежена швидкість, компактні розміри забезпечили застосування в м'яких роботах при дослідженні крихких екосистем; оснащенні для сенсорної зборки під водою з малою дисіпацією енергії.

**Висновки.** Біоміметичні рушії відкривають нові горизонти для створення екологічно чистого та енергоефективного водного транспорту. Наведені приклади можуть бути основою для створення нових поколінь автономних підводних апаратів, які діють без традиційних гвинтів і мінімізують негативний

ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ.

**Список використаної літератури**

1. MDPI Robotics/- URL: <https://www.mdpi.com/2313-7673/8/3/318>.
2. Design and Analysis of a Bionic Gliding Robotic Dolphin.- URL: [https://www.mdpi.com/2313-7673/8/2/151?utm\\_source](https://www.mdpi.com/2313-7673/8/2/151?utm_source).
3. ResearchGate, Mechanical structure of the multi-link robotic fish.- URL: [https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-structure-of-the-multi-link-robotic-fish-with-a-pair-of-pectoral-fins\\_fig17\\_221786946](https://www.researchgate.net/figure/Mechanical-structure-of-the-multi-link-robotic-fish-with-a-pair-of-pectoral-fins_fig17_221786946).
4. ResearchGate, Soft biomimetic fish propulsion system.- URL: <https://www.researchgate.net/publication/339197885>.
5. ResearchGate, Tail propulsion system for underwater robots.-URL: <https://www.researchgate.net/publication/220380677>.
6. Pectoral Fin Propulsion Performance Analysis of Robotic Fish with Multiple Degrees of Freedom Based on Burst-and-Coast Swimming Behavior Stroke Ratio/- URL: [https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11117486/?utm\\_source](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11117486/?utm_source).
7. A Review of Locomotion, Control, and Implementation of Robot Fish.- URL: [https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-022-01726-w?utm\\_source](https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-022-01726-w?utm_source).

УДК 66.011

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ КУЛЬОК  
СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ БОРНОЇ КИСЛОТИ, ТЕТРАБОРАТУ  
НАТРИЮ, АМОНІЮ ТЕТРАФТОРБОРАТУ МЕТОДОМ  
КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СЕРЕДОВИЩІ COMSOL  
MULTIPHYSICS  
FINITE ELEMENT MODELING OF THE DISSOLUTION OF  
SPHERICAL BORIC ACID, SODIUM TETRABORATE, AND  
AMMONIUM TETRAFLUOROBORATE PARTICLES IN  
COMSOL MULTIPHYSICS**

**Кузик О. О.**, аспірант, **Атаманюк В. М.**, д-р техн. наук, професор,  
**Гумницький Я. М.**, д-р техн. наук, професор  
*Національний університет «Львівська Політехніка»*  
**Kuzyk O. O.**, PhD student, **Atamanyuk V.M.**, ScD, prof,  
**Gumnitskii Ya. M.**, ScD, prof  
*Lviv Polytechnic National University*

***Анотація.** У цій роботі представлено узагальнену теорію розчинення твердої сферичної частки з урахуванням примусового конвекції у розчиннику, що дозволяє формулювати задачу через чотири безрозмірні параметри. Особливу увагу приділено випадку малого числа Рейнольдса, для якого розроблено асимптотичні та чисельні методи, зокрема, реалізовані у програмі Comsol Multiphysics. Отримані результати підтверджують здатність моделі адекватно описувати вплив конвекції на кінетику розчинення, включно зі зміною форми частинок. Порівняння математично розрахованих значень числа Шервуда з теоретично передбаченими показало відмінність не більше ніж на 3%, що свідчить про високу точність та надійність запропонованого підходу.*

**Ключові слова:** розчинення, моделювання, масообмін, Comsol Multiphysics.

**Abstract.** This work presents a generalized theory of the dissolution of a solid spherical particle, taking into account forced convection in the solvent, which allows the problem to be formulated in terms of four dimensionless parameters. Special attention is given to the case of low Reynolds numbers, for which asymptotic and numerical methods were developed and implemented in **Comsol Multiphysics**. The results confirm the model's ability to accurately capture the effect of convection on dissolution kinetics, including particle shape changes. Comparison of the calculated Sherwood numbers with theoretical predictions showed deviations of no more than 3%, indicating high accuracy and reliability of the proposed approach.

**Keywords:** dissolution, modeling, mass transfer, COMSOL Multiphysics

Процес розчинення твердих сферичних частинок є типовою задачею, що має широке практичне значення в різних галузях – від фармацевтики та харчової промисловості до виробництва хімікатів, мийних засобів і лакофарбових матеріалів. У фармацевтичній технології встановлено, що розчинення частинок діючої речовини є одним із визначальних етапів, що впливають на ефективність твердих лікарських форм. У цьому контексті математичне моделювання виступає важливим інструментом, який доповнює експериментальні дослідження.[1,2]

У цьому дослідженні розроблено модель розчинення твердих частинок без використання низки традиційних припущень, притаманних рівнянням Нойеса–Вітні та Нернста–Бруннера, зокрема — без постуляції існування дифузійного шару та без застосування кореляції Ранца–Маршалла[4]. Модель побудована на основі законів збереження маси, імпульсу та концентрації розчиненої речовини в динаміці процесу. Початковий аналіз присвячено випадку примусової конвекції (частинка омивається потоком розчинника), але отримана постановка охоплює й випадки нерухомої рідини та природної конвекції, що виникає внаслідок зміни густини розчинника при розчиненні. Таким чином, запропонована методологія має ширший і прозоріший опис процесу порівняно з переважною більшістю попередніх досліджень, які здебільшого обмежувалися дифузійно-контрольованим режимом.[3]

Хоча початково розглядається сферична частинка, модель допускає значні відхилення від сферичної форми, зумовлені впливом конвекції, а також поширюється на випадки, коли початкова форма частинок є довільною. Для розв'язання поставленої задачі використано поєднання асимптотичного аналізу і чисельного моделювання у середовищі **Comsol Multiphysics**. Асимптотичні розв'язки застосовуються для перевірки точності чисельних результатів у певних граничних випадках, тоді як чисельний підхід забезпечує рішення там, де аналітичний аналіз є неефективним.

Процес розчинення твердих речовин у рідких середовищах є багатofакторним фізико-хімічним явищем, яке супроводжується міжфазним масоперенесенням та зміною форми і розмірів твердої фази. Для його кількісного моделювання використовують математичні підходи, що ґрунтуються на системі диференціальних рівнянь матеріального балансу та співвідношеннях, які описують кінетику масоперенесення.

Чисельне моделювання виконувалося у середовищі **COMSOL Multiphysics** із використанням модулів *Chemical Species Transport* та *Laminar*

*Flow*, що дозволяють поєднати опис процесів масоперенесення та гідродинаміки. Постановка задачі реалізовувалася у тривимірній (3D) сферично-симетричній геометрії.

У роботі розроблено узагальнену математичну модель розчинення твердої сферичної частинки в умовах примусової конвекції, що описується через чотири безрозмірні параметри та враховує вплив гідродинамічних і дифузійних факторів. Для випадку малих чисел Рейнольдса отримано аналітичні (асимптотичні) розв'язки та проведено чисельне моделювання із застосуванням **Comsol Multiphysics**, яке дозволило ефективно реалізувати постановку задачі з рухомою межею у поздовжньо-симетричній геометрії. Модель апробовано на прикладі розчинення кульок борної кислоти, тетраборату натрію та амонію тетрафторборату. Отримані результати підтверджують здатність моделі адекватно описувати вплив конвекції на кінетику розчинення, включно зі зміною форми частинок. Порівняння математично розрахованих значень числа Шервуда з теоретично передбаченими показало відмінність не більше ніж на 3%, що свідчить про високу точність та надійність запропонованого підходу. Представлений підхід має переваги над існуючими моделями завдяки універсальності (охоплює як дифузійно-, так і конвективно-доміновані режими) та можливості врахування значних відхилень від сферичної форми частинки у процесі розчинення.

#### Список літератури

1. Dokoumetzidis and P. Macheras, "A century of dissolution research: From Noyes and Whitney to the biopharmaceutics classification system," *Int. J. Pharm.* 321, 1–11 (2006).
2. J. Siepman and F. Siepman, "Mathematical modeling of drug dissolution," *Int. J. Pharm.* 453, 12–24 (2013).
3. J. Q. Feng, "Diffusion-controlled quasi-stationary mass transfer for an isolated spherical particle in an unbounded medium," *Chem. Eng. Commun.* 200, 65–76 (2013)

УДК 662.5

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ШРОТУ МОРКВИ ДИКОЇ INVESTIGATION OF KINETIC REGULARITIES OF FILTRATION DRYING OF WILD CARROT POMACE

Атаманюк В. М., д.т.н., проф., Денисюк А. Р., аспірантка  
Національний університет «Львівська політехніка», Львів  
Atamaniuk V. M., Doctor of Technical Sciences, professor, Denysiuk A. R.,  
PhD student  
*Lviv Polytechnic National University, Lviv*

**Анотація.** В Україні рослинні відходи фармацевтичної промисловості становлять вагомую частку загального обсягу відходів. Серед них особливе місце посідає шрот моркви дикої, що утворюється після вилучення з рослинної сиро-

вини цільових біологічно активних компонентів методом екстрагування. У більшості випадків такі відходи потрапляють на сміттєзвалища, де в процесі гниття виділяють шкідливий фільтрат, який чинить суттєвий негативний вплив на стан довкілля [1]. Це зумовлює актуальність пошуку екологічно безпечних і ресурсоефективних методів їх утилізації та переробки.

Одним із перспективних напрямів утилізації шроту моркви дикої є виробництво паливних брикетів – альтернативного, екологічно чистого твердого палива [2]. Технологія їх виготовлення передбачає попереднє висушування біомаси до вологості не вище 14% мас [3]. Такий підхід не лише забезпечує тривале зберігання сировини без втрати її якості, а й сприяє отриманню палива з підвищеними енергетичними характеристиками.

Для реалізації цього завдання обрано фільтраційний метод сушіння, який зарекомендував себе як високоефективний підхід для зневоднення подрібненої рослинної сировини у стаціонарному шарі [4].

**Abstract.** In Ukraine, plant waste from the pharmaceutical industry constitutes a significant share of the total waste volume. Among them, a special place is occupied by wild carrot pomace, generated after extracting target biologically active components from plant raw materials. In most cases, such waste is disposed of at landfills, where, during decomposition, it produces harmful leachate that has a considerable negative impact on the environment. This highlights the relevance of developing environmentally safe and resource-efficient methods for their utilization and processing.

*One promising approach to the utilization of wild carrot pomace is the production of fuel briquettes — an alternative, environmentally friendly solid fuel. The production technology involves preliminary drying of the biomass to a moisture content not exceeding 14% by weight. This approach not only ensures long-term storage of the raw material without quality loss but also contributes to obtaining fuel with enhanced energy characteristics.*

*To achieve this goal, the filtration drying method was chosen, as it has proven to be a highly efficient approach for dewatering crushed plant materials in a stationary layer.*

**Ключові слова:** шрот моркви дикої, фільтраційне сушіння, кінетика, енергоефективність, стаціонарний шар.

**Keywords:** wild carrot pomace, filtration drying, kinetics, energy efficiency, stationary layer.

Кінетику фільтраційного сушіння шроту моркви дикої, зокрема динаміку видалення вологи та зміну швидкості сушіння залежно від поточного вологовмісту, досліджували на експериментальній установці, описаній у [5]. Експерименти виконували за різних режимів теплового агента: температури (40, 50, 60, 70, 80 °C) та швидкості (1,2; 1,7; 2,2; 2,6; 3,1 м/с), а також за різних висот стаціонарного шару шроту (40, 60, 80, 100 мм). Процес сушіння проводили до досягнення кінцевої вологості матеріалу на рівні 5%.

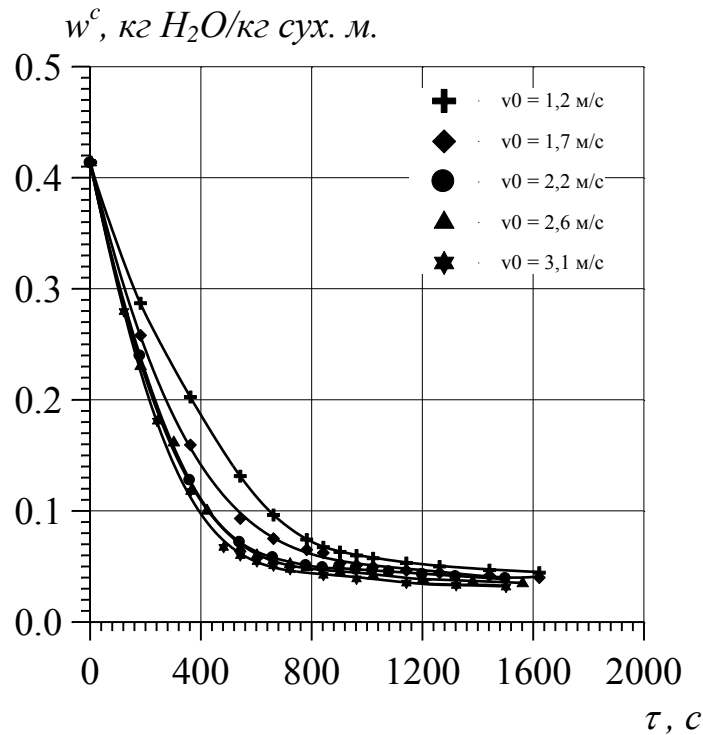


Рис. 1 – Графічне відображення впливу швидкості теплового агента на час сушіння

**Висновок.** У роботі досліджено кінетику фільтраційного сушіння шроту моркви дикої. Експериментально встановлено вплив температури та швидкості руху теплового агента крізь стаціонарний шар шроту, а також висоти шару на швидкість сушіння. Показано, що підвищення температури та швидкості теплового агента сприяє інтенсифікації процесу сушіння. Визначено оптимальні режими сушіння шроту моркви дикої.

#### Список літератури:

1. Wójcik, W., & Pawłowska, M. (Eds.). (2021). Biomass as raw material for the production of biofuels and chemicals. Routledge.
2. Clauser, N. M., González, G., Mendieta, C. M., Kruyeniski, J., Area, M. C., & Vallejos, M. E. (2021). Biomass waste as sustainable raw material for energy and fuels. *Sustainability*, 13(2), 794. <https://doi.org/10.3390/su13020794>
3. Guibunda, F. A., Waita, S., Nyongesa, F. W., Snyder, G. J., & Chaciga, J. (2024). Optimizing biomass briquette drying: A computational fluid dynamics approach with a case study in Mozambique. *Energy*, 360, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.100012>
4. Potapov, V., Yakushenko, Ye., & Hrytsenko, O. (2021). Experimental studies of the kinetics of filtration drying temperature under increased pressure. *Scientific Works*, 85(1).
5. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v85i1.2064>
6. Атаманюк, В. М., & Гумницький, Я. М. (2013). Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т «Львівська політехніка». ISBN 978-617-607-397-0

УДК 66.047

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ МІЖ СУШИЛЬНИМ  
АГЕНТОМ ТА МАТЕРІАЛОМ ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО  
СУШІННЯ СІРНИКОВОЇ СОЛОМКИ**  
**RESEARCH ON HEAT TRANSFER BETWEEN THE DRYING  
AGENT AND THE MATERIAL DURING FILTER DRYING OF  
MATCH SPLINTS**

**Атаманюк В. М.**, д.т.н., професор, **Кузьмінчук Т. А.**, аспірант  
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів  
**Atamanyuk V. M.**, SciD, Prof., **Kuzminchuk T.A.**, postgraduate student  
Lviv Polytechnic National University, Lviv

*Досліджено процес теплообміну між сушильним агентом та сірnikовою соломкою під час фільтраційного сушіння. Встановлено, що збільшення швидкості руху сушильного агента крізь шар матеріалу підвищує коефіцієнт теплообміну, що інтенсифікує процес сушіння.*

*The heat transfer process between the drying agent and match splints during filtration drying was investigated. It was found that increasing the velocity of the drying agent through the material layer increases the heat transfer coefficient, thereby intensifying the drying process.*

**Ключові слова:** фільтраційне сушіння, стаціонарний шар, сірnikова соломка, виробництво сірників, теплообмін, сушильний агент

**Keywords:** filtration drying, stationary layer, match splints, match production, heat transfer, drying agent

Раціональне енерговикористання є однією з ключових цілей сталого розвитку. З роками потреба в енергії зростає, що радикально впливає на клімат. Окрім того збільшується вартість енергії. Тому для виробництв одним з ключових питань є підвищення енергоефективності обладнання. Як стверджують автори [1], енергоефективність можна покращити на 10-30% використовуючи вже наявні технології на виробництві. Для впровадження ощадливого виробництва важливим кроком є пошук шляхів вдосконалення обладнання або пошуку альтернативних способів мінімізації споживання енергії [2].

Сушіння сірnikової соломки є одним з найбільш важливих та одночасно енерговитратних процесів виробництва сірників. Вологу сірnikову соломку висушують в тунельних сушарках у стаціонарному шарі висотою 15 сантиметрів. Такий спосіб сушіння потребує суттєвих енергетичних затрат. Оскільки сушильний агент рухається лише над матеріалом, а волога дифундує з нижніх шарів до теплового агенту. Внаслідок цього сушильний агент насичується вологою лише частково, а його температура на виході із сушарки знаходиться в межах 50-70°C.

Для сушіння сірnikової соломки запропоновано фільтраційне сушіння, як один з високоефективних та низькотемпературних методів. Цей метод

забезпечує велику поверхню контакту сушильного агента з матеріалом, що ефективно впливає на швидкість сушіння.

Для проектування установки фільтраційного сушіння важливо знати значення коефіцієнтів теплообміну, що дасть змогу визначити втрати тепла.

Принцип експериментальних досліджень описано в [3].

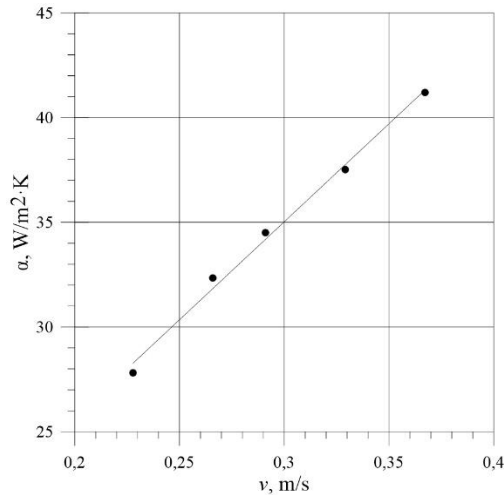


Рис. 1. – Залежність коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від дійсної швидкості руху теплового агента крізь шар сірникової соломки

Одержані дані вказують на те, що зі збільшенням швидкості сушильного агента зростає коефіцієнт тепловіддачі. Це зумовлено збільшенням кількості теплоти, яке вноситься за одиницю часу.

#### Висновки

Досліджено вплив швидкості сушильного агента крізь шар дисперсного матеріалу на значення коефіцієнту теплообміну. Зі збільшенням швидкості сушильного агента коефіцієнти теплообміну між сушильним агентом та сірниковою соломкою зростають, що буде інтенсифікувати сушіння, оскільки теплота швидше передається в середину матеріалу, що буде прискорювати дифузію.

#### Список використаних джерел

1. Cavallaro, F., Ciraolo, L., Mavrotas, G., & Pechak, O. (2013). Assessment and simulation tools for sustainable energy systems. *Green Energy and Technology*, 129, 333–356.
2. Salah, S. A., & Mustafa, A. (2021). Integration of energy saving with lean production in a food processing company. *Journal of Machine Engineering*, 21(4), 118–133. <https://doi.org/10.36897/jme/142394>
3. Kuzminchuk T. A., Atamanyuk V. M. (2025). Heat transfer process during filtration drying of match splints. *Environmental problems* №1, с 72-78. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.072>

## Секція 2. ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

UDC 664.8.047

### RESEARCH ON DRYING PUMPKIN SHAVINGS

**Novikova Yu.P.**, Doctor of Philosophy, **Petrova Zh.O.**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor  
*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

The demand for functional foods that provide the human body with macro- and micronutrients and reduce the risk of various diseases is growing worldwide every year. Functional foods include products that contain one or more biologically active ingredients. Carotenoids are one of the most common functional ingredients in the food and pharmaceutical industries due to their rich nutritional value and functional properties [1]. Carotenoids are mainly found in fruits, berries, vegetables, microorganisms and some marine organisms [2].

Pumpkins (*Cucurbita*) are divided into two groups: edible and fodder. The number of recognised pumpkin species (*Cucurbita*) ranges from 13 to 30. The most popular ones grown worldwide are *Cucurbita moschata*, *Cucurbita ficifolia*, *Cucurbita maxima*, *Cucurbita pepo* and *Cucurbita mixta Pangalo* [3]. Muscat pumpkin, or musk pumpkin (*Cucurbita moschata*), has been widely cultivated in many countries since ancient times. It is rich in vitamin A, vitamin B, vitamin C, various minerals, carotene, eight types of amino acids necessary for the human body, and also contains trace elements such as phosphorus, potassium, calcium, magnesium, zinc and silicon [4].

Pumpkin is a seasonal product, with the pumpkin season lasting from autumn to early winter. Drying is the most common and oldest method of preservation. Pumpkins were dried using various methods, such as sun drying, convective drying, microwave drying, infrared drying, and various combined methods. Convective drying is the most common, but the demand for combined methods is constantly growing. To improve the energy efficiency of drying and maintain high material quality, we used combined methods. Therefore, the aim of this work is to process pumpkin pulp by drying and determine the effect of combined modes on the process.

The study of persimmon drying kinetics was conducted on an experimental convective stand equipped with an automatic information collection and processing system [5]. The drying modes studied were stepwise 100/65 °C and combined 3800W/m<sup>2</sup> +65 °C, with a heat carrier speed of 3.0 m/s. Drying was carried out until the moisture content of the material reached 6±0.3%. Figure 1 shows the change in moisture content and temperature in the middle of a layer of grated pumpkin pulp. As can be seen from Fig. 1, the use of the specified modes makes it possible to reduce the drying time compared to convective drying at 65 °C to 116 minutes for the step

mode and to 130 minutes for the combined mode. At the beginning of the study, under a combined regime of  $3800 \text{ W/m}^2 + 65 \text{ }^\circ\text{C}$  (curve 2' in Fig. 1), the temperature of the material was raised to  $58 \text{ }^\circ\text{C}$  for 24 minutes, after which the infrared lamps were turned off, and the temperature decreased to  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Then, the material temperature began to gradually increase to  $64.8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Under the  $100/65 \text{ }^\circ\text{C}$  step mode (curve 1' in Fig. 1), at the beginning of the process, it can be observed that the heating process slows down for 8 to 30 minutes, but this does not affect the reduction in material moisture content. When the temperature reaches  $58 \text{ }^\circ\text{C}$  at 38 minutes, the heating process continues to  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ , after which it drops to  $59 \text{ }^\circ\text{C}$ . The material then gradually reaches a temperature of  $62.6 \text{ }^\circ\text{C}$ . When drying pumpkin shavings, the duration of the stepwise method is 1.1 times shorter than that of the combined method.

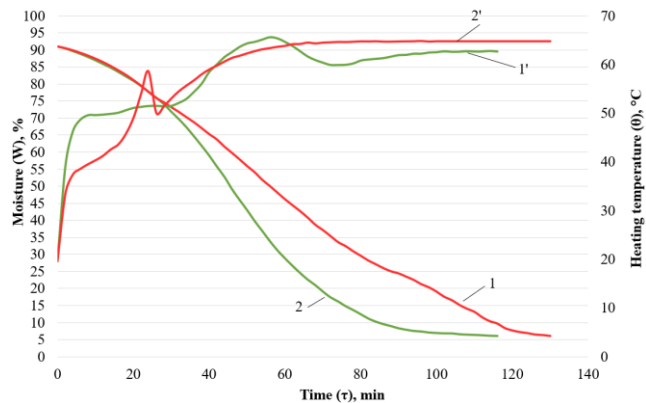


Fig. 1. Change in moisture (1, 2) and temperature inside the layer (1', 2') of pumpkin shavings in a layer  $\delta \approx 5 \text{ mm}$  over time:

1 –  $100/65 \text{ }^\circ\text{C}$ , 3 m/s; 2 –  $3800\text{W/m}^2 + 65 \text{ }^\circ\text{C}$ , 3 m/s

## References

1. Meléndez-Martínez A.J., Stinco C.M., Mapelli-Brahm P. Skin Carotenoids in Public Health and Nutricosmetics: The Emerging Roles and Applications of the UV Radiation-Absorbing Colourless Carotenoids Phytoene and Phytofluene // *Nutrients*. 2019., 11, 1093.
2. Li Y., Zhao Y., Zhang H., Ding Z., Han J. The Application of Natural Carotenoids in Multiple Fields and Their Encapsulation Technology: A Review // *Molecules*. 2024., 29, 967. <https://doi.org/10.3390/molecules29050967>
3. Oyeleke, A. W., Oluwajuyitan, D. T., Oluwamukomi, O. M., & Enujiugha, N. V. (2019). Amino acid profile, functional properties and in-vitro antioxidant capacity of Cucurbita maxima and Cucurbita mixta fruit pulps and seeds. *European Journal of Nutrition and Food Safety*, 10(4), 224-241. <https://doi.org/10.9734/ejnf/s/2019/v10i430117>.
4. Men, X., Choi, S. I., Han, X., Kwon, H. Y., Jang, G. W., Choi, Y. E., Park, S. M., & Lee, O. H. (2020). Physicochemical, nutritional and functional properties of Cucurbita moschata. *Food science and biotechnology*, 30(2), 171–183. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00835-2>
5. Petrova, Z., Snieszkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 159-166. <https://doi.org/10.12911/22998993/137676>

УДК: 66.047.3.086.2:621.577:536.7

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНЕВОДНЕННЯ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ДЕГІДРАТОРІВ ТА ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Грещук А.В.

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна

**Анотація.** У роботі аналізується актуальність розробки комбінованої системи для зневоднення розчинів, що ґрунтується на електродинамічних дегідраторах та теплових насосах. Обґрунтовано, що традиційні методи зневоднення, такі як випарювання та конвекційна сушка, мають суттєві недоліки, включаючи низьку енергоефективність, ризик термічного пошкодження продукту та низьку фінальну концентрацію. Запропонована двоступенева комбінована система дозволяє підвищити енергоефективність і якість продукту. Перший етап (тепловий насос) ефективно видаляє основну масу вологи, а другий етап (мікрохвильовий вплив) дозволяє досягти високої кінцевої концентрації, запобігаючи при цьому утворенню граничного шару. Наведено фізичну, параметричну та математичну моделі об'єкта досліджень. Використання методів теорії подібності допоможе розробити інженерну методику для розрахунку установок.

**Вступ.** Протягом багатьох років зневоднення вважалося одним з найдавніших методів консервації харчових продуктів. Ця технологія використовувалася ще доісторичними народами для сушіння насіння, а пізніше — північноамериканськими індіанцями для м'яса, японцями для риби. Комерційне виробництво зневоднених продуктів, зокрема спагеті, почалося у Франції в 1795 році після розробки технології дегідратації гарячим повітрям. Сучасні методи зневоднення стали особливо актуальними під час Другої світової війни, оскільки дозволяли транспортувати великі партії продуктів на значні відстані завдяки зменшенню об'єму продукції приблизно в 15 разів. Згодом переваги зменшеного обсягу оцінили туристи та організації, що надають допомогу під час надзвичайних ситуацій. Зневоднення має прямий вплив на економічну ефективність та якість продукції. Видалення води значно уповільнює ріст мікроорганізмів та перебіг хімічних реакцій, що є основними причинами псування. Це дозволяє подовжити термін зберігання продуктів без консервантів, що відповідає сучасним споживчим запитам. Крім того, дегідратація допомагає зберегти поживну цінність, смак, аромат та зовнішній вигляд продуктів. Зменшення маси та об'єму продукції спрощує її зберігання і транспортування, знижуючи логістичні витрати. Проте традиційні методи зневоднення, такі як конвекційна сушка та випаровування, є дуже енерговитратними та мають низьку ефективність. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки та впровадження інноваційних, енергоефективних і ресурсозберігаючих технологій дегідратації.

**Аналіз літературних джерел та формулювання наукової гіпотези.** Установки для зневоднення на базі електродинамічних дегідраторів та теплових насосів включають 2 етапи: Перший етап: Теплонасосна установка. На початкових стадіях зневоднення, коли вміст вологи в продукті високий, процес випаровування води вимагає відносно невеликих витрат енергії. У цьому випадку

тепловий насос є ідеальним рішенням. Його основний принцип полягає в перенесенні теплової енергії з одного місця в інше, що дозволяє ефективно осушувати повітря та регенерувати тепло, значно знижуючи загальні енергетичні витрати порівняно з традиційним нагріванням. Тепловий насос ефективно видаляє основну масу вологи, готуючи продукт до наступного, більш складного етапу.

Другий етап: Мікрохвильовий вплив. У міру зниження вологості вода, що залишилася, утримується в капілярах і порах продукту. Для її видалення традиційні методи вимагають високих температур і великих витрат енергії. При цьому існує ризик термічного пошкодження і появи присмаку «варіння». Мікрохвильова технологія вирішує цю проблему, оскільки вона передає енергію безпосередньо молекулам води, які починають вібрувати та перетворюватися на пару всередині продукту. Це забезпечує об'ємне, а не поверхневе нагрівання, що повністю унеможливорює утворення термічного граничного шару та зберігає нативні властивості сировини.

Таким чином, тепловий насос забезпечує енергетичну ефективність на початковому етапі, а мікрохвильова технологія гарантує високу якість і фінальну концентрацію продукту, що недосяжно для традиційних підходів. Такий принцип є перспективним та повинен усунути негативний вплив усіх параметрів, що впливають на формування теплового граничного шару, і гарантувати стабільну паропродуктивність у широкому діапазоні концентрацій розчину. Відбувається генерація і відведення бульбашок пари з усього об'єму рідини. В результаті виключаються умови термічного псування продукту, оскільки граничний шар відсутній. Готовий продукт досягає високої концентрації, зберігає нативні властивості сировини.

**Моделювання процесів дегідратії продукту.** Технічна ідея установки комбінованої системи зневоднення розчинів на базі електродинамічних де-гідраторів та теплових насосів наведена на (рис.1).

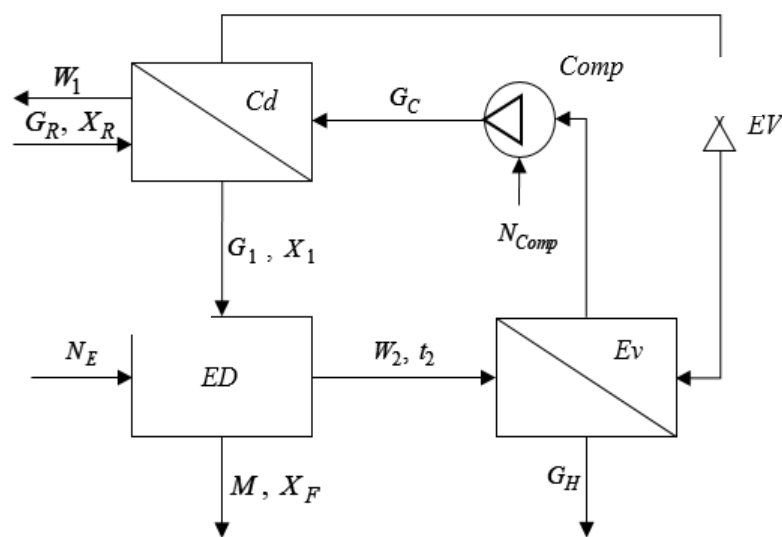


Рис.1 – Схема комбінованої системи зневоднення розчинів на базі електродинамічних де-гідраторів та теплових насосів [1].

Основними елементами системи є: Cd — конденсатор теплового насоса, Ev — випарник теплового насоса, Comp — компресор, EV — розширювальний клапан,  $N_{Comp}$  — електрична потужність компресора,  $G_C$  — потік охолоджуючої рідини, ED — електродинамічний дегідратор,  $N_E$  — електрична потужність ED,  $G_R$  — потік сировини,  $X_R$  — концентрація сировини,  $G_1$  — потік зневодненого розчину,  $X_1$  — концентрація зневодненого розчину,  $M$  — потік готового продукту,  $X_F$  — концентрація готового продукту,  $W_1, W_2$  — потік вторинної пари,  $t_2$  — температура вторинної пари,  $G_H$  — потік гідролату.

Енергетичні взаємодії між елементами розглянемо на основі I закону термодинаміки і класичного рівняння Фур'є-Кірхгофа. У даній системі робота не виконується, тому перший закон термодинаміки для цього завдання запишеться у вигляді:

$$Q_{cm} + Q_V = \Delta U \quad (1.1)$$

де  $Q_{cm}$  — кількість теплоти, передане через поверхню контакту (S);

$Q_V$  — кількість теплоти, що поглинається розчином від електромагнітних джерел енергії;

$\Delta U$  — зміна внутрішньої енергії розчину.

Теплові потоки  $Q_{cm}$ ,  $Q_V$  та змінення внутрішньої енергії тіла визначається за рекомендаціями, наприклад [1.33]:

$$Q_{cm} = \int_S \int_0^\tau dQ d\tau, \quad Q_V = \int_V \int_0^\tau q_V dV d\tau, \quad \Delta U = \int_V \int_0^\tau c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV d\tau \quad (1.2)$$

де  $q_V$  — питома потужність внутрішніх джерел теплоти, Вт/м<sup>3</sup>.

Використовуючи рівняння Фур'є, перетворимо співвідношення (1.2), і запишемо в циліндричній системі координат:

$$\int_S \int_0^\tau dQ d\tau = \int_V \int_0^\tau \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] dV d\tau \quad (1.3)$$

А далі, підставивши (1.3) у (1.1), отримаємо:

$$\int_V \int_0^\tau \left[ c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) - \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) - q_V \right] dV d\tau = 0 \quad (1.4)$$

Якщо підінтегральний вираз дорівнює нулю, то інтеграл також буде дорівнювати нулю за умови, коли всі характеристики в (1.4) будуть безперервними функціями координат і часу [1.14].

Таким чином:

$$c_V \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_V \quad (1.5)$$

Встановили (1.5) просторово-часовий зв'язок між потужністю та зміною значення температури в будь-якій точці об'єму тіла. Зазвичай, коефіцієнти теплопровідності вважаються постійними, в результаті чого рівняння (1.5) спрощують та отримують лінійне диференціальне рівняння в окремих похідних другого параболічного типу.

Закономірності (1.5) є загальними для всіх 3 зон установки. На їх основі для кожної зони моделі необхідно конкретизувати. Для 1 зони (рис. 1.7) приймемо індекси «1». Тоді в робочому об'ємі: об'єм продукту  $V_1$ ; енергія, що споживається продуктом  $N\eta\tau$ ; температури –  $t_1$ . Діапазон тисків  $P_a \leq P \leq P_n$ .

Процес протікає в 2 етапи. Для 1 етапу (нагрів продукту від початкового значення температури  $t_1 = t_n$  до температури випарювання  $t_1 = t_b$ ) і для 2 етапу (випаровування).

На першому етапі випарювання не відбувається ( $W = 0$ ), оскільки енергія витрачається лише на нагрівання продукту.

Для висот  $0 \leq Z \leq Z_1$ ; радіусів  $0 \leq r \leq r_1$ :

Вихідні умови ( $\tau = 0$ ):  $t_1 = t_n$ ;  $V_1 = V_n$ .

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \left( \frac{\partial^2 t_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t_1}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} \right) + \frac{N\eta}{V_1 c_1 \rho_1} \quad (1.6)$$

де  $\alpha = \frac{\lambda}{(c_1 \rho)}$  – температуропровідність, м<sup>2</sup>/с.

Безпосередньо випарювання характеризується постійною температурою фазового переходу ( $t_n = \text{const}$ ). Значення внутрішньої енергії розчину підвищується за рахунок поглинання всієї підведеної енергії ( $N\eta\tau$ ). Відбувається зміна теплоємності при переході рідкої фази в парову. В результаті – підвищення концентрації розчину. Рівняння балансу енергії набуде вигляду:

$$N\eta\tau = V_e t_e (c_1 \rho_1 - c_2 \rho_2) \quad (1.7)$$

Вихід пари зменшує обсяг рідини в робочому обсязі:

$$V_1(\tau) = V_n - V_e(\tau) \quad (1.8)$$

Гідродинамічна ситуація в робочому обсязі відображається рівнянням Нав'є-Стокса. В умовах досліджуваної задачі (рис. 1.7) можливо обмежитися одновимірним записом по осі Z:

$$\rho_1 \cdot \omega_1 \cdot \frac{\partial \omega_1}{\partial z} = \rho_1 \cdot g - \frac{\partial P_1}{\partial z} + \mu_1 \cdot \frac{\partial^2 \omega_1}{\partial z^2} \quad (1.9)$$

Друга зона (сепаратор) заповнена паровою розчину, температури пари –  $t_2$ , об'єм пари  $V_2$ , пара енергію не поглинає ( $N = 0$ ). Таким чином, при  $0 \leq r \leq r_1$ ;  $Z_1 \leq Z \leq Z_2$  модель є аналогічною (1.6) за умови заміни  $t_1$  на  $t_2$  та  $\alpha_1$  на  $\alpha_2$ . Аналогічно (1.9) виражається гідродинамічна ситуація в сепараторі.

Для зони 3, яка представляє стінку реакційного обсягу, температури матеріалу –  $t_3$ , об'єм  $V_3$ , стінка енергію не поглинає ( $N = 0$ ). Таким чином, при  $r_1 \leq r \leq r_3$ ;  $0 \leq Z \leq Z_3$  модель є аналогічною (1.6) при заміні  $t_1$  на  $t_3$  та  $\alpha_1$  на  $\alpha_3$ , а гідродинамічна ситуація – відношенню (1.9) [1].

**Обговорення результатів досліджень.** На основі сформульованої науково-технічної гіпотези розроблено принципову схему двоступеневого електродинамічного дегідрататора з тепловим насосом. На останньому ступені за рахунок електричної енергії  $Ne$  формується потік електромагнітної енергії, який, взаємодіючи з полярними молекулами розчину, переводить їх у пару. У резуль-

таті концентрація розчину ( $X_k$ ) підвищується і готовий продукт у кількості ( $M$ ) відводиться з установки. Вторинна пара ( $W_2$ ) надходить у випарник ( $I$ ) теплового насоса, конденсується і відводиться з установки у вигляді потоку гідролата ( $G_g$ ). Енергія конденсації передається робочому тілу ( $G_x$ ) теплового насоса і, за допомогою компресора ( $K_m$ ), трансформується на більш високий рівень температур. Це дає змогу в конденсаторі теплового насоса ( $K_d$ ) здійснювати випарювання із сировини, витрата якої ( $G_c$ ) а концентрація ( $X_c$ ). Частково зневоднений розчин із концентрацією ( $X_1$ ) у кількості ( $G_1$ ) подається в останній ступінь [1].

Таблиця 1 – Порівняння традиційних і запропонованого показників енергоефективності різних технологій зневоднення

Технології	Споживання на 1 кг видаленої вологи		Потужність		
	енергії, Е, МДж	палива, 1 кг	прямих потоків	реверсивних потоків	Загалом
Традиційне сушіння	4—10	0,1—0,25	0,4—0,1	0	0,2
Сушіння в ЕМП	3	0,15—0,25	0,5—0,8	0	0,4
Випаровування + традиційне сушіння	3—6	—	0,3—0,4	0	0,3—0,4
Традиційне випаро- вування	3	—	0,5	0	0,5
Двоступеневий де- гідратор з тепловим насосом	1,5	—	0,4	0,2	0,6

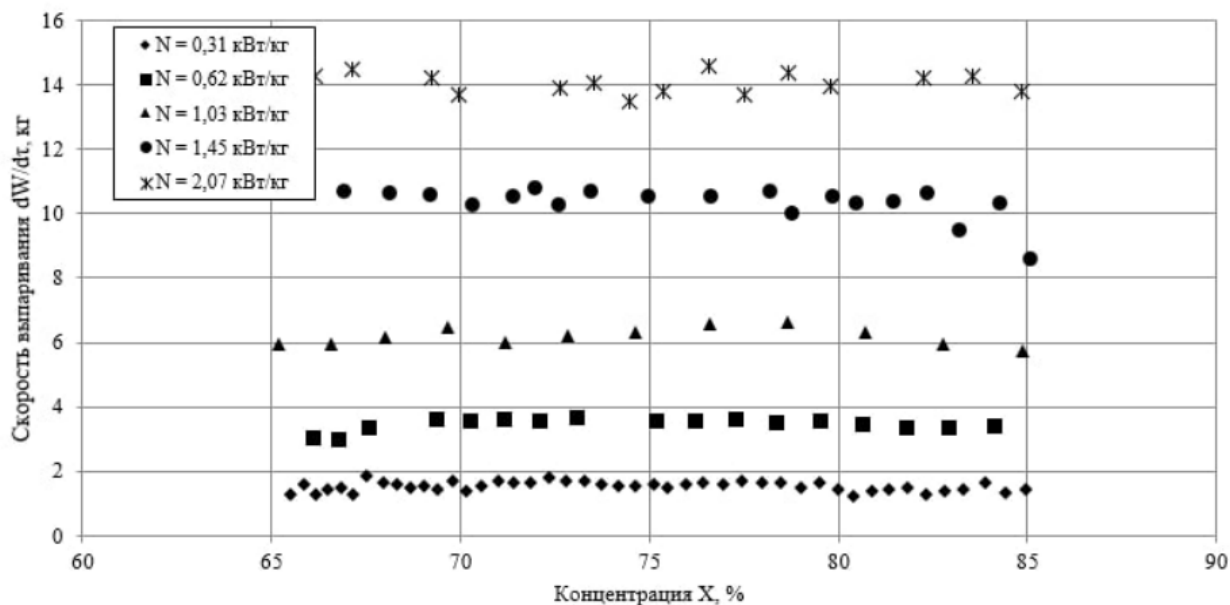


Рис. 2 – Кінетика зневоднення у двоступеневій установці

Видно, що в 1 ступені видалено 14,5 кг води, а концентрація підвищилася на 0,5%. У 2 ступені видалено 8 кг води, а концентрація підвищилася в 4 рази (з 0,2 до 0,8). Зі збільшенням числа теплонасосних ступенів енергетична ефективність установки підвищуватиметься [2].

**Висновки.** Комбіноване використання електродинамічних систем і теплових насосів є новим технічним рішенням у проблемі вдосконалення обладнання для дегідратації. Традиційне обладнання, яке виробляє концентрати, базується на процесах теплопередачі (при випарюванні розчинів) і

дифузії (при подальшому їх сушінні). Механізми процесу випарювання обмежують кінцеві концентрації продукту, а масообміну – вимагають високих витрат енергії. Використання розглянутого аналогу з застосуванням теплового насосу та технології мікрохвильової сушки дозволяє оптимізувати витрати енергії та збільшити фінальну концентрацію продукту, тим самим позначаючи свою актуальність та перспективність дослідження.

#### Список літератури

1. Burdo, O. G., Terziev, S. G., Sirotyuk, I. V., Slavinskaya, V. A., & Sit, M. L. (Год). Multistage Electrodynamic Dehydrator with Heat Pumps Problemele Energeticii Regionale №3 2024
2. Бурдо О.Г., Гаврилов А.В., Сиротюк І.В., Ружицька Н.В., Гончаров Д.С. Електродинамічні апарати для концентрування розчинів. *Electronic Processing of Materials*, 57(4), 66–75. 2021
3. Бурдо О.Г., Тришин Ф.А., Терзієв С.Г., Гаврилов А.В., Сиротюк І.В. (2020). Електродинамічні технології – ефективне рішення проблем харчової індустрії. *Electronic Processing of Materials*, 56(3-4), 74–88. DOI: 10.5281/zenodo.3970438.
4. Бурдо О.Г. Еволюція сушильних установок. Одеса: Полиграф, 2010. 368 с.
5. Das D., Gupta A.K., Mishra P. Drying of citrus grandis (pomelo) fruit juice using block freeze concentration and spray drying. *Acta Alimentaria*, 2020, 49(3), 295-306. <https://doi.org/10.1556/066.2020.49.3.8>
6. Mas M., Dewi D., Surjawan I., Arista D., Amelia V., Surjadi A. Kho K. Production of red fruit (*Pandanus conoideus*) oil powder using spray drying and freeze drying. *International Journal of Food Engineering*, 2023, 19(5), 211-224. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2022-0285>
7. Rahman M. S. *Handbook of Food Preservation*. CRC Press, 2020. 1024 p.
8. X. Liu, X. Wu, J. Sang et al., Research on the heat supply prediction method of a heat pump system based on timing analysis and a neural network, *Energy and Built Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2024.02.005>

УДК 664.8.047

## КІНЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ БАТАТУ

Гусарова О.В.<sup>1,2</sup> к. т. н., Дабіжа Н.О.<sup>2</sup>, к. т. н., Малащук Н.С.<sup>2</sup>, Ph.D.

<sup>1</sup> НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», м. Київ

<sup>2</sup> Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Батат є важливою економічною культурою в багатьох країнах. За обсягами виробництва він посідає п'яте місце серед найважливіших продовольчих культур у тропіках і сьоме у світі після пшениці, рису, кукурудзи, картоплі, ячменю та маніюки. Усі частини рослини: коренеплоди, листки та лоза використовуються для виробництва харчових продуктів, кормів для тварин тощо [1].

Більша частина сухої маси батату складається з вуглеводів, переважно крохмалю (60...70%) і цукрів (сахароза, фруктоза, глюкоза), а також пектинів, целюлози і геміцелюлози. Вміст сухих речовин у коренеплодах становить 20...30%. У бататі наявні вітаміни у т.ч. каротиноїди, фолієва, аскорбінова та

пантотенова кислоти, феноли, антоціани, мінеральні речовини (солі заліза, калію, магнію) [1, 2].

Батат переробляють на пюре, сік, консерви, заморожують та сушать. Для сушіння рослинної сировини застосовуються як традиційні методи зневоднення так і з комбінованим енергопідведенням. Висушений батат використовують для виробництва чипсів, снєків, пластівців, порошків, натуральних барвників тощо [1, 2].

Сушіння слід проводити таким чином, щоб зберегти корисні речовини сировини, забезпечити високі органолептичні властивості продукту та водночас зробити процес енергоефективним і економічно вигідним.

**Метою роботи** є дослідження кінетики конвективного сушіння батату до низької залишкової вологості за різних температур, розрахунки критерію оптимізації процесу та густини теплових потоків на поверхні матеріалу і розроблення енергоефективних режимів зневоднення.

**Об'єкт та методи дослідження.** Для проведення досліджень використовували коренеплоди батату з помаранчевим кольором сировини, які були придбані в місцевій торгівельній мережі. Коренеплоди нарізали кружальцями діаметром 63...65 мм завтовшки 3...5 мм, а також подрібнювали у вигляді стружки. Кружальця батату сушили в одиничному шарі, стружку – насипним шаром 84×47×8 мм. Процес проводили до досягнення матеріалом низької вологості 6...7%.

Дослідження закономірностей кінетики процесу сушіння батату проводили на експериментальному конвективному сушильному стенді. Стенд обладнаний автоматизованою системою збору та обробки інформації, що включає комп'ютер, цифрові ваги AD-500 та спеціально розроблену автоматизовану програму, канал вимірювання температури, що складається з аналогово-цифрового перетворювача та інтерфейсу [2].

Сушіння кружалець та стружки батату здійснювали при швидкості руху сушильного агента 1,5 м/с та вологовмісті 11 г/кг сухого повітря за температур 100, 80, 60 °С, а також за стадійним режимом 80/60 °С.

Визначення початкового і кінцевого вмісту вологи здійснювали за ДСТУ 7804:2015.

**Результати.** З підвищенням температури сушильного агента з 60 до 80 °С тривалість процесу сушіння кружалець батату скоротилась в 1,4 рази, а при температурі 100 °С – в 1,7. Проте, через 15...20 хв при температурі сушильного агента 100 °С спостерігалось перевищення температури матеріалу понад 60 °С, що призводить до втрат біологічно активних речовин та погіршення органолептичних показників продукту. Тобто інтенсифікація процесу сушіння підвищенням температури обмежена термолабільними властивостями сировини.

Узагальнюючи результати експериментальних досліджень, одержані залежності критерію оптимізації та густини теплових потоків на поверхні матеріалу від вологовмісту батату в процесі сушіння за різних температур. За аналізом одержаних залежностей обґрунтована необхідність зниження температури на завершальній стадії та доведена доцільність використання стадійних режимів зневоднення.

За даними з кінетики теплообміну визначені питомі витрати теплоти на випаровування 1 кг води під час сушіння кружалець батату за різних температурних режимів. Встановлено, що найбільш енергоефективним є стадійний режим за температур сушильного агента 80/60 °С.

Спосіб подрібнення матеріалу є ще одним суттєвим параметром впливу на кінетику сушіння та підвищення ефективності процесу. Сушіння стружки батату в шарі висотою 8 мм при стадійному режимі 80/60 °С скорочує процес в 1,3 рази, аніж сушіння кружалець при тій же висоті. Отже, спосіб подрібнення дає змогу додатково інтенсифікувати процес сушіння, за умови, що технологія отримання готового продукту допускає подрібнення матеріалу.

**Висновки.** Грунтуючись на результатах експериментальних та теоретичних досліджень, встановлено, що для одержання сушених продуктів із батату з низькою залишковою вологістю необхідно використовувати режими зневоднення при яких температура поверхні не перевищує 60 °С. Двостадійний режим 80/60 °С інтенсифікує процес зневоднення батату та забезпечує належні органолептичні показники матеріалу.

#### Література:

1. Truong V. D., Avula R. Y., Pecota K. V., Yencho G. C. Sweetpotato Production, Processing, and Nutritional Quality // Edited by Muhammad Siddiq and Mark A. Handbook of Vegetables and Vegetable Processing, Volume II. 2018. John Wiley & Sons Ltd. Published. P. 811 – 838. ISBN: 9781119098928. |Online ISBN: 9781119098935. DOI:10.1002/9781119098935.
2. Husarova. O. V., Semko T. V., Paziuk V. M., Bandura V. N., Osadchuk P. I., Enakiev Y. I. Increase in Convective Intensity Drying of Sweet Root Fruits // 2024 9th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria. 2024. pp. 1-6. DOI: 10.1109/EEAE60309.2024.10600550.

УДК 665.3.061

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСТРАГУВАННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИМИ ВІДНОВЛЮВАНИМИ ЕКСТРАГЕНТАМИ

**Запорожець Д.О.**, аспірант, **Ружицька Н.В.**, к.т.н., асистент  
*Одеський національний технологічний університет, м. Одеса*

В олійножировій промисловості в якості екстрагентів переважно використовують продукти переробки нафти: екстракційні бензини, нефрас, гексан. Нафта є не відновлюваним природним ресурсом, в той час, як у світі склалась стійка тенденція до переходу на відновлювані ресурси, такі як біопаливо, біоетанол. Крім того, вуглеводневі екстрагенти, такі, як гексан, є вибухонебезпечними. Гексан у деяких країнах визнано нейротоксином, а також речовиною, яка пошкоджує озоновий шар [1].

В якості альтернативи гексану та іншим нафтопродуктам пропонують наступні екстрагенти: надкритичні рідини (CO<sub>2</sub>, пропан, етан, хладони), проте,

розчинність олії в CO<sub>2</sub> невисока, етан та пропан вибухонебезпечні, а технологія потребує забезпечення тиску 7 МПа [2].

Також а якості екстрагента пропонується етанол – екстрагент, який одержують бродінням цукровмісної біомаси. Окрім відновлюваності, етанол характеризується нижчою токсичністю. Проте через невисоку розчинність олії в етанолі, існуючі технології передбачають використання абсолютного етанолу [2].

Етанол вилучає олії за сировини за двома механізмами: розчинення та емульгування.

Оскільки абсолютний етанол потребує особливих умов зберігання і транспортування, за рахунок інтенсифікації емульгування олії, пропонується застосування 96% етанолу та водноспиртових розчинів нижчих концентрацій.

В результаті серії експериментальних досліджень з екстрагування макухи соняшника, встановлено, що задіяння механізму механодифузії в умовах дії мікрохвильового поля, дозволяє досягти переходу в екстракт кількостей соняшникової олії, які у 1,6 рази перевищують розчинність олії в екстрагенті за даної температури. Розчином з вмістом етанолу 90 % вдалось вилучити до 88% олії, яка містилась в макусі соняшника. Перевагою 96...90% розчинів етанолу полягає в тому, що вони легко відновлюються після екстрагування.

#### Література

1. Raimundo, Keila & Silva, Thainá & Silva, Ana & Sakai, Otávio. (2020). Efficiency of ethanol and hexane extraction of sunflower oil from seeds of plants inoculated with *Azospirillum brasilense* and fertilized with sewage sludge. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão* (ISSN: 2525-4782). 5. 10.21575/25254782rmetg2020vol5n71323.
2. Інноваційні технології комплексної переробки насіння соняшнику : монографія / П. Ф. Петік, В. В. Гірман, В. Ю. Папченко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Київ : Аграрна наука, 2018. – 176 с.

### Секція 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

УДК 631.565:539.97:004.94:331.45

#### ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ТРАВМООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА APPLICATION OF SIMILARITY THEORY IN MODELING INJURY-SAVING GRAIN TRANSPORTATION TECHNOLOGIES

Мірських Р. В., аспірант

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Mirskykh R., PhD student

Odesa National University of Technology, Odesa

**Анотація.** Використання методів теорії подібності і розмірності для визначення ключових параметрів, що впливають на травмування зернівки є проміжним етапом між теорією та експериментом і забезпечує зв'язок між комплексами величин, що характеризують процес і спрощують планування та проведення експерименту. Розроблено структурну модель процесу травмування зернівки в процесі транспортування. Визначено, що найбільший вплив на пошкодження мають  $\rho$ ,  $F$ ,  $\mu_{\text{нов}}$ : густина оболонки зернівки, динамічна сила впливу на зернівку та твердість поверхні дотику зернівки до елементів технологічного обладнання.

**Ключові слова:** теорія подібності, моделювання, критеріальне рівняння, травмування зерна, травмоощадні технології.

**Abstract.** The application of similarity and dimensional analysis methods for identifying the key parameters influencing grain kernel damage constitutes an intermediate stage between theoretical analysis and experimental investigation. This approach establishes a relationship between dimensionless parameter complexes that characterize the process and facilitates both the design and implementation of experimental studies. A structural model of the grain kernel damage process during transportation has been developed. It was determined that the most significant factors affecting kernel damage are the density of the kernel shell, the dynamic impact force acting on the kernel, and the hardness of the contact surface between the kernel and the elements of technological equipment.

**Keywords:** similarity theory, mathematical modeling, grain damage, criterion equation injury-saving technologies.

Експериментально-аналітичне моделювання процесів на рівні фізичних фактів та законів в межах оперативного управління процесом потребує врахування взаємозв'язків параметрів, чинників та компонентів, що приймають участь у технологічному процесі. Аналізуючи різні дослідження, можна зробити висновок, що при плануванні експерименту найбільш важливу роль має вибір параметрів процесу. При цьому прийняті параметри мають відображати всі основні фактори процесу, але їх кількість повинна бути мінімальною, що зменшить кількість дослідів, але підвищить достовірність критерію відгуку. Тому застосування методів теорії подібності і розмірності критеріальних величин забезпечує функціональний зв'язок між комплексами параметрів, що характеризують процес на рівні фізичних моделей.

При переміщенні зерна по транспортних та технологічних лініях на ступінь його травмування найбільший вплив мають конструкції, механізми та робочі органи засобів для транспортування та доробки (очищення, протруєння) зерна, які здійснюють механічну дію ударно-циклічного характеру. При цьому відбувається зштовхування зернівок між собою, тертя зерна як між собою, так і об поверхню робочих органів, з якими зернівка контактує. Значна кількість технологічних процесів відбувається за умови швидкісного гравітаційного руху матеріалу [1].

Для оцінки ступеня пошкодження зерна  $l$  потрібно дослідити параметри, що впливають на процес. Згідно рис. 1 можемо визначити залежність:

$$l = f(F_m) + f(E_i) + f(V_{am}) \quad (1)$$

Застосувавши теорію подібності та елементи методики квантифікації, у вигляді критеріального рівняння можна записати наступне:

$$l = f(E, \rho, R_z, S, F, \mu_{пов}, R, M) \quad (2)$$

або 
$$\Delta l = F(\pi_1; \pi_2; \pi_3; \pi_4; \pi_5) \quad (3)$$

Всі вибрані параметри мають фізичний зміст, відображають диференціацію, різнобічність та гнучкість по відношенню до впливу на  $l$ , є керованими.

Як основні одиниці вираження було прийнято  $M, L, T$ : масу, видовження зернівки і час впливу на зернівку. В таблиці 1 вказано розмірності параметрів робочого процесу. Таким чином, ми маємо 12 незалежних параметрів  $a$  та  $b$ , що дорівнює 3.  $\pi = a - b = 12 - 3 = 9$

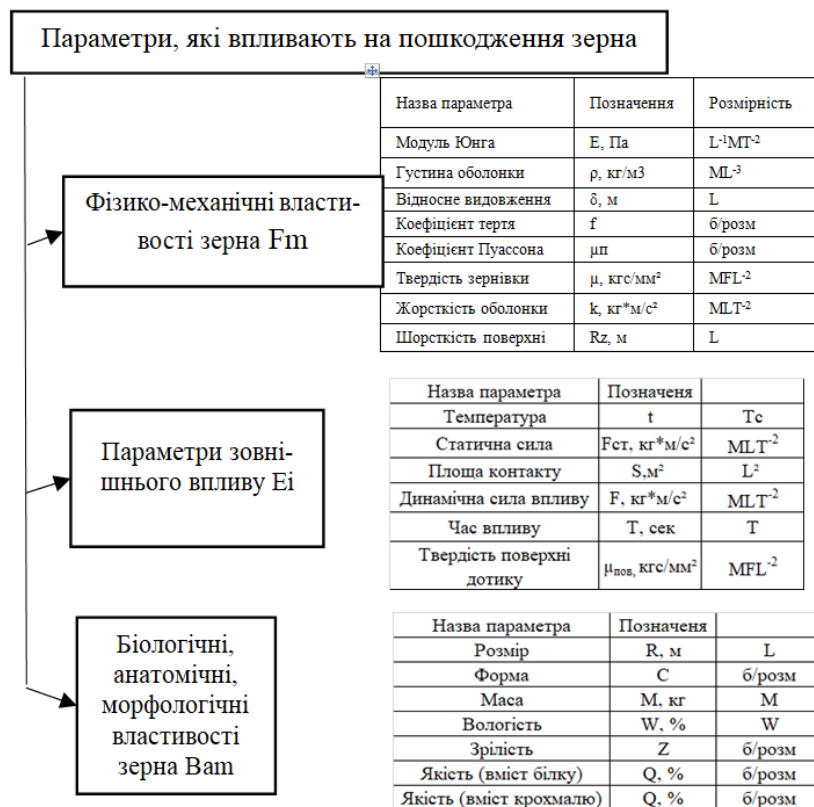


Рис. 1 – Структурна модель параметрів, що впливають на пошкодження зерна

Таблиця 1 – Розмірність параметрів роботи транспортної системи

Параметри	E	$\rho$	Rz	S	F	$\mu_{пов}$	R	M	1
M	1	1	0	0	1	1	1	1	0
L	-1	-3	1	2	1	3	0	0	1
T	0	0	0	0	-2	-2	0	0	0

З табл. 1 беремо основні параметри нашого процесу:  $\rho$ , F,  $\mu_{пов}$ . Правильність вибору цих параметрів підтверджує визначник, що складається з розмірностей цих параметрів та не дорівнює 0 [2].

$$\Delta = \begin{vmatrix} \rho & F & \mu_{пов} \\ M & 1 & 1 \\ L & -3 & 1 \\ T & 0 & -2 \end{vmatrix} = 4 \quad (4)$$

Для спрощення аналізу і моделювання процесу зведемо  $\pi$ -критерії (3) до безрозмірних комбінацій [3].

$$\pi_1 = \rho^{\varphi_{11}} F^{\varphi_{12}} \mu_{пов}^{\varphi_{13}} E \quad (5)$$

$$\pi_2 = \rho^{\varphi_{21}} F^{\varphi_{22}} \mu_{пов}^{\varphi_{23}} R_z \quad (6)$$

$$\pi_3 = \rho^{\varphi_{31}} F^{\varphi_{32}} \mu_{пов}^{\varphi_{33}} S \quad (7)$$

$$\pi_4 = \rho^{\varphi_{41}} F^{\varphi_{42}} \mu_{пов}^{\varphi_{43}} R \quad (8)$$

$$\pi_5 = \rho^{\varphi_{51}} F^{\varphi_{52}} \mu_{пов}^{\varphi_{53}} M \quad (9)$$

Суть  $\pi$ -критеріїв – це комбінації безрозмірних змінних, які допомагають спростити аналіз складних процесів та явищ і пов'язати їх з ключовими параметрами. Якщо кожен  $\pi$ -критерій записати в розмірному вигляді, вирішити систему рівнянь через показники ступенів, то рівняння процесу пошкодження зерна в безрозмірній формі (2) можна навести у наступному вигляді:

$$\Delta l = f\left(\frac{F^4 \mu_{пов}^3 E}{\rho^8}; \frac{R\sqrt{F}}{\sqrt{\mu_{пов}}}; \frac{FS}{\mu_{пов}}; \frac{\sqrt[3]{\rho L}}{\sqrt[3]{\mu_{пов} F}}; \frac{M \sqrt{\mu_{пов}^3} \sqrt[3]{\rho^7}}{\sqrt{F^3}}\right) \quad (10)$$

Проаналізувавши (10), ми можемо побачити набір критеріїв, які допомагають спростити аналіз складних процесів та явищ і пов'язати їх з ключовими параметрами. Ми бачимо вплив різних факторів на процес, які не залежать від одиниць вимірювання, що робить їх корисними для виявлення основних закономірностей процесу. У нашому випадку це  $\rho$ , F,  $\mu_{пов}$ : густина оболонки зернівки, динамічна сила впливу на зернівку та твердість поверхні дотику зернівки до елементів технологічного обладнання.

#### Список літератури.

1. Mirskykh R. IMPLEMENTATION OF TRAUMA-PROTECTING TECHNOLOGICAL LINES FOR TRANSPORTATION OF GRAIN CROPS. Grain Products and Mixed Fodder's. Vol. 25, Issue 2. P. 33–39. DOI:10.15673/gpmf.v25i2.3126.

2. Lviv Polytechnic National University, Dmytriv V., Sahan O. et al. Avtomatizaciâ virobničih procesiv u mašinobuduvanni ta priladobuduvanni. Vol. 57, 2023. P. 13–20. DOI:10.23939/istcipa2023.57.013.
3. Степаненко С. П., Мироненко В. Г., Погорілий С. П. ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ПОШКОДЖЕННЯ ЗЕРНА В ПРОЦЕСАХ СЕПАРАЦІЇ. Scientific bulletin of the Tavria State Agrotechnological University. Vol. 14, Issue 1. DOI:10.32782/2220-8674-2024-24-1-1.

УДК 532.6:66.021

## ВПЛИВ ЕФЕКТУ МЕХАНОДИФУЗІЇ НА ВИКИДИ РІДИНИ З МАКЕТУ КАПІЛЯРА СИРОВИНИ В ЗБІЛЬШЕНОМУ ВИГЛЯДІ

Молчанов М. Ю., аспірант

Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

З розвитком сучасних технологій зростає науковий та практичний інтерес до методів, що забезпечують інтенсифікацію процесів обробки сировини із застосуванням джерел електромагнітної енергії. Використання електромагнітних, зокрема мікрохвильових (МХ), інфрачервоних (ІЧ) та комбінованих технологій дає змогу суттєво прискорити процеси екстрагування, сушіння та випарювання завдяки адресному підведенню енергії до полярних молекул сировини.

Застосування МХ-технологій дозволяє підвищити ефективність екстракційних процесів навіть за кімнатних температур, покращити масообмінні характеристики обладнання, знизити енергетичні витрати та підвищити екологічність технологічних операцій.

Під час екстрагування в умовах мікрохвильового впливу стає можливим вилучення з рослинної сировини не лише розчинних, але й слабозчинних та нерозчинних компонентів. Це здійснюється не стільки за рахунок хімічної взаємодії між екстрагентом та екстрактивними речовинами, скільки завдяки механічному впливу, обумовленому внутрішнім тиском, що формується у сировині під час дії мікрохвильового поля.

Механодифузія розглядається як процес утворення парових бульбашок усередині рідини, що заповнює капіляри сировини, із подальшим підвищенням тиску в них. Під дією цього тиску парова бульбашка виходить із капіляра, спричиняючи переміщення до міжфазної поверхні розчинних, слабозчинних і нерозчинних компонентів. Таким чином, рушійною силою механодифузії є різниця тисків. Для ініціювання процесу необхідно, щоб механічний потік подолав сили в'язкості, локальних опорів, гідростатичного тиску та поверхневого натягу [1].

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \left[ \frac{\lambda \cdot l}{d} + \sum \xi \right] + \rho \cdot gl + \frac{\sigma}{d} \quad (1)$$

Застосування мікрохвильових (МХ) технологій у процесах екстрагування, випарювання та сушіння забезпечує можливість створення апаратів для переробки рослинної та біологічної сировини з отриманням широкого спектра високо-

якісних біологічно активних речовин медичного, харчового та кормового призначення. Використання МХ поля сприяє підвищенню ефективності енергоперетворення, зниженню питомих енергетичних витрат та забезпеченню екологічної безпеки технологічних процесів [1].

Але проведення експериментальних досліджень на впливу ефекту механодифузії на рослинній сировині ускладнене багатьма факторами: по перше кожен шматок рослинної сировини індивідуальний і не може мати як ідентичні капілярі так і їх кількість що зробить результати не точними, по друге візуалізація ефекту буде ускладнена через надто малі викиди рідини, по третє не має можливості дослідити саме один капіляр і те як на нього впливають параметри МХ поля. Тому дослідження проводились на одному а пізніше на пучку скляних радіопрозорих капілярів заповнених підфарбованою рідиною. Ці капіляри імітують прямий капіляр сировини але у значно збільшеному вигляді для можливості визначення впливу параметрів МХ поля і візуалізації ефекту.

Експериментальні дослідження показали, що інтенсивність прояву ефекту механодифузії переважно визначається потужністю МХ поля. Додатковими чинниками, що впливають на ефективність процесу, є геометричні параметри капілярної структури сировини (діаметр і кількість капілярів), в'язкість рідини в капілярах, орієнтація капілярів відносно напрямку дії електромагнітного випромінювання, а також початкова температура рідкої фази в системі.

Визначено що напрямок капілярів відносно напрямку роботи магнетрона діє на тип процесу видалення рідини, в залежності від кута тип може бути ламінарним (рис. 1) та турбулентним (рис. 2).

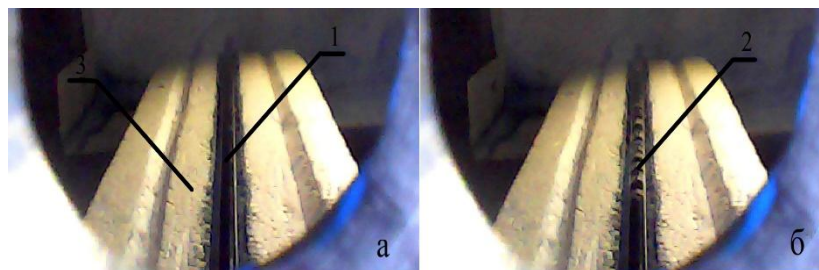


Рис. 1 – Утворення бульбашок у капілярі з кутом напрямку  $0^\circ$ :  
а – початок експерименту, б – середина експерименту  
(1 – капіляр заповнений рідиною, 2 – парові бульбашки, 3 – радіопрозорий тримач капіляра).

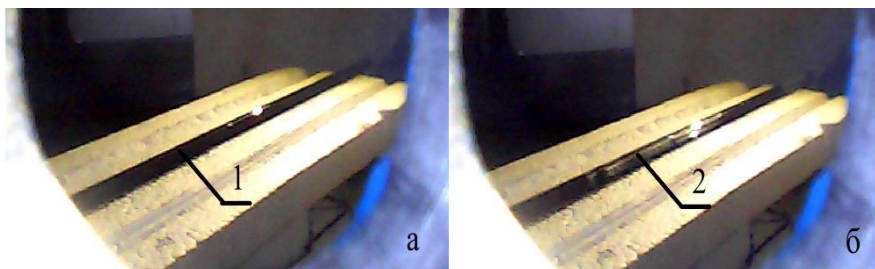


Рис. 2 – Утворення бульбашок у капілярі з кутом напрямку  $45^\circ$ :  
а – початок експерименту, б – середина експерименту.  
(1 – капіляр заповнений рідиною, 2 – об'єм капіляра з утвореною паровою перед викидом).

Формулюється гіпотеза що використання технологій МХ підведення енергії в апаратах для екстрагування дозволить реалізувати інноваційний спосіб адресної доставки енергії безпосередньо до полярних молекул сировини для ініціювання ефекту механодифузії. Очікується отримання екстрактів більш високої концентрації, ніж традиційно, без термічного псування, внаслідок невеликих температур та з меншими витратами енергії та часу на процес обробки.

Обов'язковим критерієм для обробки сировини даним методом є наявність у сировині вологи, зв'язаної в середині чи приведеної ззовні.

Для визначення впливу різних параметрів на процес механодифузії проведено ряд експериментів. Як капіляри були прийняті два набори скляних радіо прозорих трубок 2,3 – 3 мм та 3 – 4 мм. по 30 штук у пучку заповнені підфарбованою рідиною. Для вимірювання даних параметрів використовувалось наступне устаткування: пірометр GM320 та лабораторні ваги Radwag. Для візуального нагляду використовувався ендоскоп вміщений в МХ камеру.

При проведенні досліджень на пучках капілярів 2,3 – 3 мм та 3 – 4 мм визначались загалом приведена енергія, до пучка, спочатку методом зміни потужності магнетрона, потім методом зміни маси рідини у пучку, зміна маси пучка, маси видаленої рідини, величини одиничних викидів видаленої рідини, витраченої енергії загалом та на видалення рідини. Усі дані ваги отримувались у часі методом установки пучку на підвішену пластину вагів. Для визначення саме параметрів пов'язаних з викидами початкова температура пучка бралась приблизно 40 С°, на графіках питомих енерговитрат виділена лише та частина де процес вже йде, для більш крупного відображення даних.

При проведенні експериментальних досліджень визначено наступне:

- процес механодифузії має початок та затухання, на піках викидів питомі енерговитрати досить малі і складають 1,3 – 1,4 мДж/кг, що свідчить про резонансність припинення обробки щойно пройшов пік викидів;
- Перед початком має сенс довести температуру капілярів до певного рівня аби не витрачати енергію лише на нагрів сировини поки не виникне ефект механодифузії;
- Найбільші за об'ємом викиди спостерігаються на піку ефекту, так само як і їх послідовна кількість, в цей час питомі енерговитрати найнижчі, із затуханням і відповідно зменшенням викидів питомі енерговитрати значно збільшуються.

Ці спостереження говорять що даний процес механодифузії є енергоефективним і перспективним при правильному використанні, через свої можливості викиду рідини може використовуватись не лише для екстрагування де він допоможе витягнути більшу частину компонентів сировини за менший час, а й у процесі дегідратації де від допоможе витягнути рідину з глибини сировини на її поверхню за менший проміжок часу ніж традиційно і вже потім перетворити її на пару або дати можливість іншому модулю зробити це.

УДК 66.011:66.04:665.52

## МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕФІРНИХ ОЛІЙ

**Бурдо О.Г.** д.т.н, професор, **Славинська В.О.** інженер кафедри “ПОтаЕМ”,  
**Славинський Р.Л.** аспірант, **Грищенко Р.О.**, аспірант кафедри  
*Одеський національний технологічний університет, м. Одеса*

Перспективним напрямком ефективної організації процесу виробництва ефірних олій є використання МХ-енергії електромагнітного поля. Завдяки накладенню ЕМП на взаємодіючі фази при отриманні олії вдається отримати концентрований поліекстракт, скоротити тривалість технологічного процесу і істотно інтенсифікувати його, знижуючи при цьому питомі енерговитрати. Для визначення ефективних режимів процесу і параметрів установок, що його реалізують, необхідно мати математичний опис (математичну модель).

Представлена математична модель враховує недоліки раніше відомих моделей і показує, наскільки добре вона відповідає експериментальним даним, отриманим в ході роботи пілотної установки кафедри “ПО та ЕМ” ОНТУ. Метою роботи є отримання математичної моделі процесу вилучення олії в електромагнітному полі надвисокої частоти для інтенсифікації його параметрів за даними експериментальних досліджень. Запропонуємо параметричну та фізичну моделі процесу отримання ефірних олій у системі «сировина - електромагнітне поле». Нестационарна модель тепломасопереносу формується у двовимірному просторі з координатами точок (Z, X).

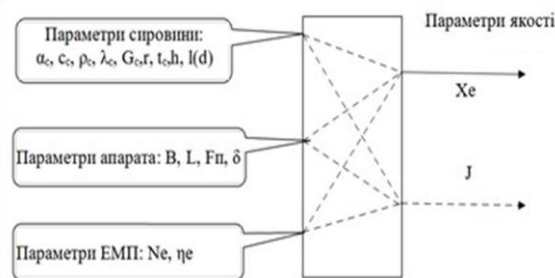


Рис.1 – Параметрична модель.

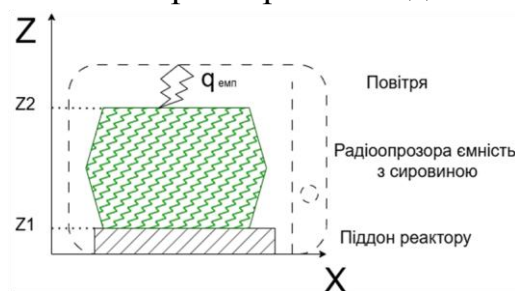


Рис.2 – Фізична модель.

Опишемо процеси що протікають за допомогою рівнянь:

Нестационарна модель тепломасопереносу формується у двовимірному просторі з координатами точок (Z, X). Опишемо процеси що протікають за допомогою рівнянь:

1) При  $Z > Z_2$  (повітря):

$$\text{Рівняння Нав'є — Стокса: } \rho_{\text{нос}} \omega_{\text{нос}} \left( \frac{d\omega_{\text{нос}}}{dx} + \frac{d\omega_{\text{нос}}}{dz} \right) = \rho_{\text{нос}} g - \frac{dP_{\text{нос}}}{dx} - \frac{dP_{\text{нос}}}{dz} + \mu_{\text{нос}} \left( \frac{d^2\omega_{\text{нос}}}{dx^2} + \frac{d^2\omega_{\text{нос}}}{dz^2} \right)$$

$$\text{Рівняння енергії: } \frac{dt}{d\tau} = \alpha \left( \frac{d^2t_{\text{нос}}}{dx^2} + \frac{d^2t_{\text{нос}}}{dz^2} \right) + \frac{q_v}{c_{\text{нос}} \rho_{\text{нос}}} \quad (2)$$

В зв'язку з тим, що внутрішніх джерел тепла у повітрі немає, то складовою:

$$\frac{q_v}{c_{\text{нос}} \rho_{\text{нос}}} \quad (3)$$

необхідно знехтувати, тоді вищенаведена формула прийме наступний вигляд:

$$\frac{1}{\rho_{\text{нос}}} + \frac{d\rho_{\text{нос}}}{dt} + \frac{d\omega_{\text{нос}}}{dy} + \frac{d\omega_{\text{нос}}}{dz} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Рівняння суцільності: } \frac{dt}{d\tau} = \alpha \left( \frac{d^2t_{\text{нос}}}{dx^2} + \frac{d^2t_{\text{нос}}}{dz^2} \right) \quad (5)$$

2) При  $Z = Z_2$  (межа контакту фаз «повітря — рослинна сировина»):

В цьому діапазоні діють електромагнітні джерела згідно з граничних умов II роду:

2.1) В рослинній сировині при  $Z_2 > Z > Z_1$

$$\text{Рівняння енергії: } \frac{dt}{d\tau} = \alpha \left( \frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d^2t}{dz^2} + \frac{q_{\text{емн}}}{c_{\text{pc}} \rho_{\text{pc}}} \right) \quad (6)$$

$$\text{Рівняння Фіка: } \frac{dW}{d\tau} = D \left( \frac{d^2W}{dx^2} + \frac{d^2W}{dz^2} \right) + \frac{dW}{dz^2} v_z \quad (7)$$

2.2) При  $Z < Z_1$  (на межі контакту «піддону реактору — повітря»)

$$\text{Рівняння Нав'є — Стокса: } \frac{dt}{d\tau} = \alpha \left( \frac{d^2t_{\text{нос}}}{dx^2} + \frac{d^2t_{\text{нос}}}{dz^2} \right) + \frac{q_v}{c_{\text{нос}} \rho_{\text{нос}}} \quad (8)$$

$$\text{Рівняння енергії: } \rho_{\text{нос}} \omega_{\text{нос}} \left( \frac{d\omega_{\text{нос}}}{dx} + \frac{d\omega_{\text{нос}}}{dz} \right) = \rho_{\text{нос}} g - \frac{dP_{\text{нос}}}{dx} - \frac{dP_{\text{нос}}}{dz} + \mu_{\text{нос}} \left( \frac{d^2\omega_{\text{нос}}}{dx^2} + \frac{d^2\omega_{\text{нос}}}{dz^2} \right) \quad (9)$$

$$\text{Рівняння суцільності: } \frac{1}{\rho_{\text{нос}}} + \frac{d\rho_{\text{нос}}}{dt} + \frac{d\omega_{\text{нос}}}{dy} + \frac{d\omega_{\text{нос}}}{dz} = 0 \quad (10)$$

Вищенаведені рівняння (1 — 10) являють собою нестационарне двовимірне поле температур по висоті продукту (координата Z), так і по ширині розташування продукту (координата X).

Граничні умови на межах розділу приведені у таблиці 1.

## Граничні умови об'єкту досліджень

Граничні умови	Модель ГУ	Координати розташування згідно з рис.2.6	Місце розташування
II роду	$q_v = q_{емп} = \text{const} \quad (11)$	$Z_1 > Z > Z_2$	Рослинна сировина
III роду	$\frac{dt_{пос}}{dt} = -\frac{a_{пос}}{\lambda_{рс}} (t_{рс} - t_{пос}) \quad (12)$	$Z = Z_2$	Межа контакту «рослинна сировина - повітря»
	$\frac{dt_{пос}}{dt} = -\frac{a_{пос}}{\lambda_{пр}} (t_{пр} - t_{пос}) \quad (13)$	$Z < Z_1$	Межа контакту «піддон реактору — повітря»
IV роду	$\lambda_{рс} \frac{dt}{dn} \Big _{СТ1} = \lambda_{пр} \frac{dt}{dn} \Big _{СТ2} \quad (14)$	$Z = Z_1$	Межа контакту «піддон реактору — рослинна сировина»

Наведені рівняння (1 — 14) представляють собою нестационарну модель поєднаних масообмінних процесів перенесення та тепло аеродинамічних процесів.

**Висновки**

1) Для вирішення завдання вважатимемо, що потік маси визначається ефективним специфічним коефіцієнтом масовіддачі  $\beta_p$  та різницею тисків у капілярі  $P_k$  (надлишковий тиск у капілярі) і  $P_0$  (тиск навколишнього середовища). Як ми знаємо неможливе іншого рішення даної моделі ніж аналітичне. Відтак подальші дослідження повинні бути спрямовані на спрощення поставленої моделі за допомогою теорії подоби.

2) Запропонований метод параметричної ідентифікації математичного опису динаміки екстрагування дозволяє визначити кінетичні коефіцієнти процесу з експериментального досвіду на діючій установці.

**Список використаної літератури**

1. Elizabeth Lainez-Cerón, Nelly Ramírez-Corona, Aurelio López-Malo, Avelina Franco-Vega «An overview of mathematical modeling for conventional and intensified processes for extracting essential oils.» *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, June. 2022, p. 109032, [doi:10.15673/swonaft.v88i1.2978](https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2978).
2. Maharaj, S.; McGaw, D. «Mathematical model for the removal of essential oil constituent during steam distillation extraction.» *Processes* 2020, August, p. 400, [doi.org/10.3390/pr8040400](https://doi.org/10.3390/pr8040400).
3. Araújo dos Santos, Ana Carolina. «Mathematical modeling of the extraction process essential oils schinus terebinthifolius raddi using supercritical fluids.» *Journal of bioengineering and technology applied to health*, v. 2, 4, 2020, p. 130-35, [doi:10.34178/jbth.v2i4.91](https://doi.org/10.34178/jbth.v2i4.91).
4. Khaled J. Hamid, Badoor M. Kurji, Khalid M. Abed, «Extraction and mass transfer study of cupressus sempervirens l. oil by hydro-distillation method», *Materials today: Proceedings*, v. 42, part 5, 2021, p. 2227-2232, [doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.308](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.308)

## ЗМІСТ

### Секція 1

#### ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАЛИВА НА ОСНОВІ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА РЕШТОК КУКУРУДЗИ <b>Корінчевська Т.В., Михайлик В.А., Снежкін Ю.Ф.</b> .....	5
ІМІТАЦІЯ РУХУ ГІДРОБІОНТІВ У БІОІМІТЕТИЧНИХ РУШІЯХ: ОГЛЯД ТИПІВ ТА СФЕР ВИКОРИСТАННЯ <b>Воїнов О. П., Самохвалов В. С., Кобалава Г. О.</b> .....	6
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ КУЛЬОК СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ БОРНОЇ КИСЛОТИ, ТЕТРАБОРАТУ НАТРІЮ, АМОНІЮ ТЕТРАФТОРБОРАТУ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СЕРЕДОВИЩІ COMSOL MULTIPHYSICS <b>Кузик О. О., Атаманюк В. М., Гумницький Я. М.</b> .....	8
ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ШРОТУ МОРКВИ ДИКОЇ <b>Атаманюк В. М., Денисюк А. Р.</b> .....	10
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ МІЖ СУШИЛЬНИМ АГЕНТОМ ТА МАТЕРІАЛОМ ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СІРНИКОВОЇ СОЛОМКИ <b>Атаманюк В. М., Кузьмінчук Т. А.</b> .....	13

### Секція 2

#### ІННОВАЦІЙНІ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

RESEARCH ON DRYING PUMPKIN SHAVINGS <b>Novikova Yu.P., Petrova Zh.O.</b> .....	15
ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗНЕВОДНЕННЯ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ДЕГІДРАТОРІВ ТА ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ <b>Грещук А.В.</b> .....	17
КІНЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ БАТАТУ <b>Гусарова О.В., Дабіжа Н.О., Малащук Н.С.</b> .....	22
ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСТРАГУВАННЯ РОСЛИННИХ ОЛІЙ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИМИ ВІДНОВЛЮВАНИМИ КСТРАГЕНТАМИ <b>Запорожець Д.О., Ружицька Н.В.</b> .....	24

### Секція 3

#### МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЙ

ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ТРАВМООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА <b>Мірських Р. В.</b> .....	26
ВПЛИВ ЕФЕКТУ МЕХАНОДИФУЗІЇ НА ВИКИДИ РІДИНИ З МАКЕТУ КАПЛЯРА СИРОВИНИ В ЗБІЛЬШЕНОМУ ВИГЛЯДІ <b>Молчанов М. Ю.</b> .....	29
МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЕФІРНИХ ОЛІЙ <b>Бурдо О.Г., Славинська В.О., Славинський Р.Л., Грищенко Р.О.</b> .....	32