

## Розробка апарата з індукованим тепломасообміном для сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини

А. В. Пак, М. І. Погожих, А. О. Пак

*Обґрунтована необхідність пошуку рішень проблем ефективного використання енергетичних ресурсів під час процесів тепло- та масообміну, які широко застосовуються в харчовій і переробній промисловості та є дуже енергозатратними. Відзначено перспективність застосування індукованих процесів таких як ефект індукованого тепломасообміну, який характеризується високою енергоефективністю і екологічністю.*

*Проведено моделювання процесів сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини з газонепроникними включеннями за її горизонтальної та вертикальної орієнтації. Встановлено, що характер даного ефекту за умови наявності газонепроникних включень в твердій фазі всередині термостата не відрізняється від характеру ефекту індукованого тепломасообміну за умов відсутності таких включень.*

*Доведено, що під час ефекту індукованого тепломасообміну особливості перетікання процесу будь-якого виділеного об'єму внутрішнього середовища термостата відбивається на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Відзначено, що дана ознака «штучності» та керованості даного ефекту робить можливим виконання визначених технологічних операцій з обробки різної сировини в одному апараті без її змішування.*

*Запропоновано технічне рішення апарата із застосуванням ефекту індукованого тепломасообміну для сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини з використанням отриманих експериментальних результатів та встановлених теоретичних висновків. Продуктивність розробки за гідротермічною обробкою круп складає 18 кг/год, а енерговитрати –  $8,1 \cdot 10^6$  Дж на кг сушеної продукції. Кінцевою продукцією при цьому є швидковідновлювані каші, які не потребують варіння. Відзначено, що економічна привабливість застосування розробленого апарату з ефектом індукованого тепломасообміну для сушіння та гідротермічної обробки полягає у можливості зменшення енерговитрат на дані технологічні операції на 30 %*

*Ключові слова: ефект індукованого тепломасообміну, сушіння, гідротермічна обробка, кінетика температури, фазовий портрет*

### 1. Вступ

Проблеми ефективного використання енергетичних ресурсів у нинішніх умовах їх дефіциту є надзвичайно актуальними питаннями сьогодення. Особливо це стосується процесів тепло- та масообміну, які широко застосовуються в харчовій і переробній промисловості та є дуже енергозатратними [1].

Дослідження у напрямку підвищення енергоефективності процесів тепло-масообміну [2] показують невичерпність та можливість подальшого удосконалення процесів тепломасообміну: шляхом інтенсифікації [3], зменшення питомих енерговитрат [4], удосконалення обладнання та підвищення якості виробленої продукції [5]. Потенціальні можливості вирішення означених завдань обумовлюють актуальність досліджень, що проводяться у даному напрямку.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Однією із актуальних проблем промисловості є раціональне використання та зменшення втрат сільськогосподарської продукції. Найбільш поширеною сільськогосподарською продукцією є зерно, у зв'язку з цим зернопереробна галузь є однією з провідних в агропромисловому комплексі [6].

Зернові продукти забезпечують біля 60 % добової потреби організму в білках та 40 % калорійності раціону. При цьому крупа у харчовому раціоні людини складає від 8 до 13 % від загального споживання зернових [7]. Останнім часом велику популярність набули напівфабрикати високого ступеня готовності [8], що не потребують варіння, сировиною для яких є зернові. Виробництво напівфабрикатів високого ступеня готовності із зернових суттєво розширює асортимент блюд із даної сировини [9].

Найчастіше на підприємствах переробної промисловості з виробництва напівфабрикатів високого ступеня готовності із зернових застосовують нижчеописані способи.

Вихідною сировиною для одного із найбільш поширених способів, наведених в роботі [10], є крупа. На першому етапі її зволожують та піддають термообробці за температури 110...145 °С. Далі сировину темперують та зволожують зі зниженням температури до 70...90 °С. Після цього здійснюють плющення крупи до товщини пластівців, висушують і примусово охолоджують.

Для іншого із найбільш поширених способів, наведеного в роботі [11], виробництва напівфабрикатів високого ступеня сировиною є колоте ядро вівса. Колоте ядро вівса очищають від домішок і зволожують. Потім проводять гідротермічну обробку в пропарнику періодичної дії за підвищеного тиску пари. Після цього здійснюють сушіння на вальцьовій сушарці за температури 150 °С з одночасним плющенням і охолодженням отриманого продукту. Перевагами наведених способів є відносна простота технології виробництва кінцевої продукції. Однак їх недоліками є високі енерговитрати. Середні енерговитрати на процес за даними способами – 11...14 МДж на кг сушеної продукції.

Відомий спосіб отримання пластівців безпосередньо з зерна [12]. Очищене від домішок зерно занурюють у киплячу воду. Далі сировину відволожують та підсушують в "киплячому" шарі повітрям з температурою 100 °С до визначеної вологості. Після цього сировину пропарюють за підвищеного тиску пари та повторно підсушують крупу в "киплячому" шарі повітрям з температурою 100 °С. Оброблену таким чином сировину плющать на гладких вальцях в пластівці та висушують до кінцевого вологовмісту. Недоліком даного способу також є високі енерговитрати. Середні енерговитрати на процес в даному способі – 14...16 МДж на кг сушеної продукції.

За останній час достатньо широкого розповсюдження на підприємствах з виробництва напівфабрикатів високого ступеня готовності набув спосіб екструдкування вихідної сировини [13]. За даним способом зернові обробляють шляхом нагрівання і екструдкування. Екструдований продукт потім подрібнюють та змішують з інгредієнтами, які мають високу чутливість до температури. Після цього суху суміш гранулюють, отримуючи вологі гранули, які остаточно висушують. Перевагою в даній технології є короткий час отримання кінцевої продукції, недоліком є високі енерговитрати. Середні енерговитрати на процес в даному способі – 13...16 МДж/кг сушеної продукції.

Таким чином, до кожного із описаних способів входить процес гідротермічної обробки. При цьому основним недоліком є те, що витрати енергії на даний процес вищі, ніж витрати енергії на виробництво зерна.

Крім того, кінцевим продуктом вищеописаних способів є пластівці, порошки або спучені зерна. Основним із недоліків такої продукції є те, що після відновлення такі каші далекі за консистенцією від каш, приготованих традиційним способом, тобто зварених у воді.

Варіантом подолання відповідних недоліків з точки зору зменшення енерговитрат та підвищення якості отримуваної продукції є спосіб та апарат, що працюють з використанням ефекту індукованого тепломасообміну (ІнТМО) [14]. Кінцевою продукцією за даного способу є швидковідновлювані каші, що не потребують варіння. Швидковідновлювані каші, отримані гідротермічною обробкою зернових з ІнТМО, мають високу якість. При цьому енерговитрати апарату з використанням ІнТМО для гідротермічної обробки зернових складають  $8,1 \cdot 10^6$  Дж на кг сушеної продукції. Основним недоліком апарату є низька продуктивність. Збільшити його продуктивність у даній конструкторській реалізації не представляється можливим через недостатню кількість експериментальних даних щодо особливостей організації ефекту ІнТМО.

Все це дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення досліджень характеру ефекту ІнТМО за різної його організації. Отримані результати дозволять розширити можливості застосування апаратів з ІнТМО для гідротермічної обробки та сушіння не лише зернових, а й інших вологогих матеріалів.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою дослідження є підвищення енергоефективності харчових, хімічних та фармацевтичних виробництв шляхом застосування інноваційного ефекту ІнТМО для виконання технологічних операцій сушіння та гідротермічної обробки вологих матеріалів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести моделювання процесів сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини з газонепроникними включеннями за її горизонтальної орієнтації;
- провести моделювання процесів сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини з газонепроникними включеннями за її вертикальної орієнтації;
- з використанням результатів дослідження розробити енергоефективний апарат безперервної дії із застосуванням ефекту ІнТМО для виконання технологічних операцій сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини.

#### 4. Матеріали і методи, що використовувались під час моделювання ефекту ІнТМО

##### 4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Для моделювання процесів сушіння та гідротермічної обробки із застосуванням ефекту ІнТМО використовувалась установка, представлена на рис. 1. Цифрами на рис. 1 позначені:

- 1 – термостат;
- 2 – трубки, через які продувається потік повітря оточуючого середовища;
- 3 – вологий матеріал, що складається із трьох фаз: газоподібної, рідкої та твердої;
- 4 – термопари;
- 5 – обтюратори.

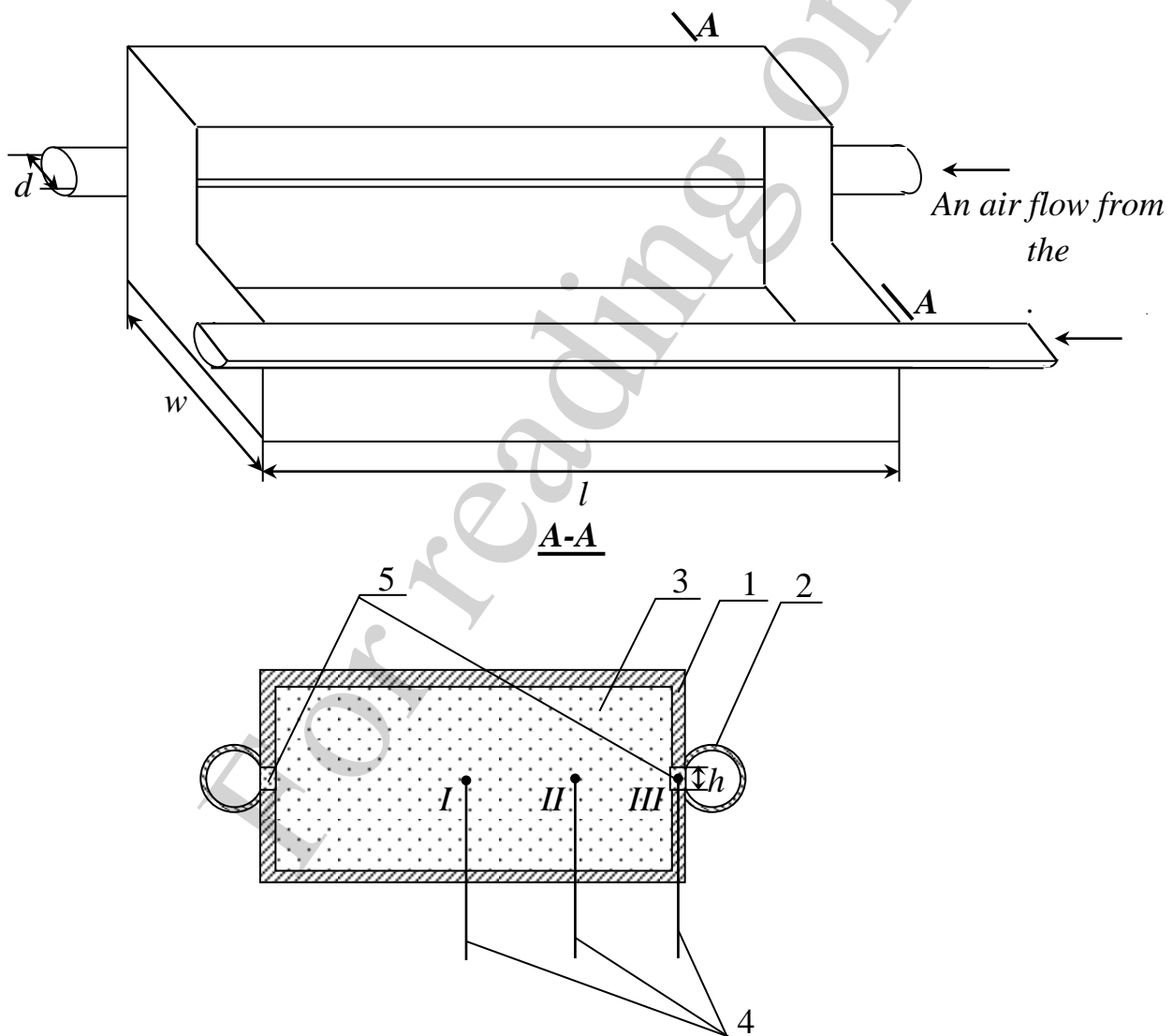


Рис. 1. Схема апарата для моделювання процесів сушіння та гідротермічної обробки з використанням ефекту ІнТМО з характерними розмірами, мм:  $l=100$ ;  $w=20$ ;  $d=10$ ;  $h=1$

Під час моделювання як вологий матеріал (3) всередині термостата використовувалась синтетична повсть. Схема розміщення та розміри шматочків повсті наведені безпосередньо перед експериментом описаним далі в роботі. Обтюратор виконаний із синтетичної повсті визначеної товщини. Функція створення флуктуації газового середовища в об'ємі обтюратора забезпечувалась потоком повітря через трубки (2). Трубки закріплені вздовж обтюраторів на поверхні термостата. Термостатування проводилось шляхом кондуктивного підведення теплоти від нагрівальної поверхні до зовнішньої поверхні термостату.

#### 4. 2. Методики, що використовувались під час моделювання ефекту ІнтМО

Дослідження характеру ефекту ІнтМО проводилось за атмосферного тиску та температури термостата 60...70 °С. Реєстрація сигналів від термопар проводилась з використанням аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів фірми DCON Utility (країна-виробник USA).

Організація ефекту ІнтМО детально описана в роботі [15]. Судити про «запуск» ефекту ІнтМО, можна виходячи з характеру кінетики температури в різних точках всередині термостата, яку отримують реєстрацією сигналу від термопар (рис. 2).

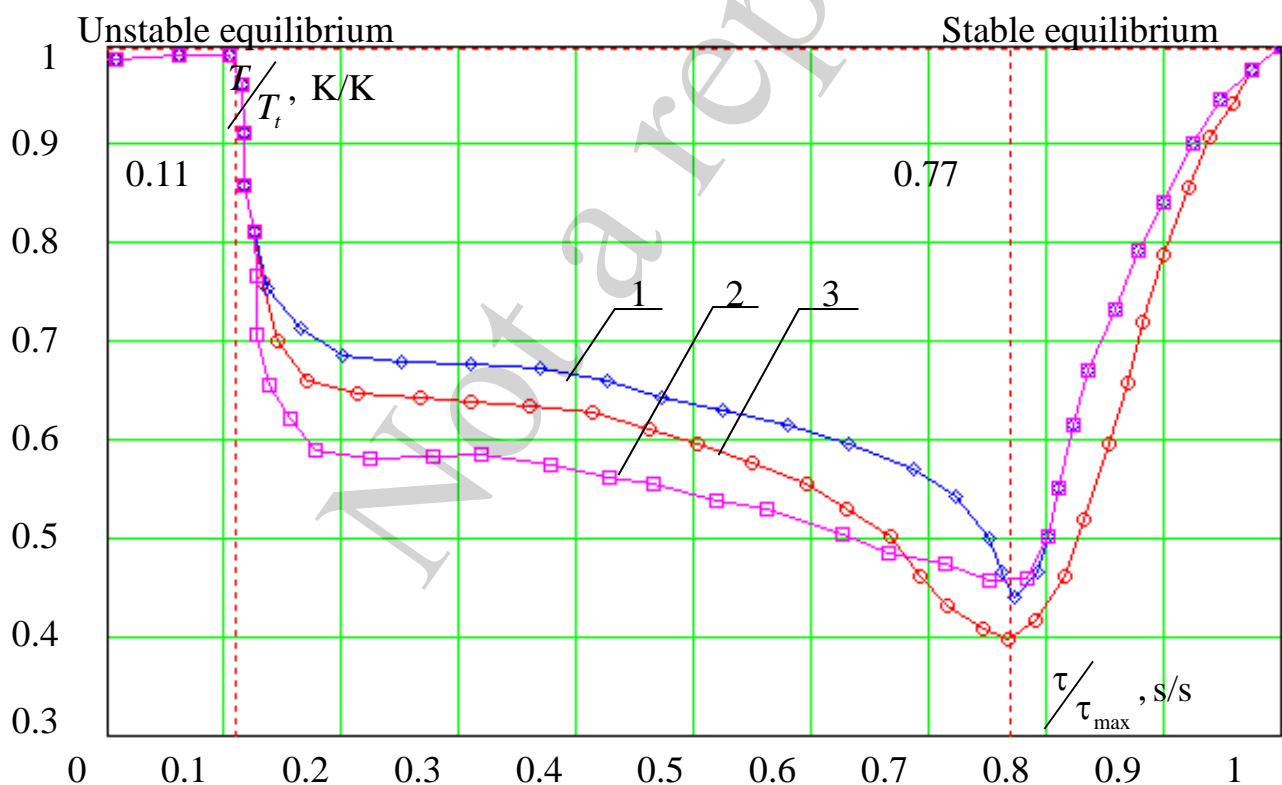


Рис. 2. Кінетика температури тіла під час ефекту ІнтМО, отримана від термопар: 1 – I; 2 – II; 3 – III

«Запуску» ефекту ІнтМО на термограмі відповідає падіння температури тіла, відокремлене першою пунктирною лінією на рис. 2. Після видалення рідкої фази всередині термостата (мінімум кінетики температури – друга пунктир-

на лінія), температура тіла починає знову наближатися до температури термостата. Ефект ІнТМО закінчується за умови, коли маса рідини в термостаті буде дорівнювати нулю. Це означає, що система досягла рівноваги.

Для аналізу характеру ефекту ІнТМО застосовується метод фазового портрету детально описаний в роботі [16]. Для більшої наочності наводиться фазовий портрет ефекту ІнТМО лише в двох узагальнених координатах. Першою узагальненою координатою є температура  $T$  волого матеріалу у внутрішньому середовищі термостата, пронормована на температуру термостата  $T_{\text{терmostat}}$ . Другою узагальненою координатою – функція  $\Psi(T, w_{\text{evapor}})$ . Вона дорівнює відношенню енергії, поглинутої внутрішнім середовищем термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем на випаровування. Координата  $\Psi(T, w_{\text{evapor}})$  обрана безрозмірною з метою отримання зручного масштабу для виявлення характеру поведінки системи та особливих точок фазового портрету під час ІнТМО.

На фазовому портреті ефекту ІнТМО протягом еволюції системи між точками динамічної та стійкої рівноваги виконується умова  $dT < 0$ . Це означає, що має місце, так званий, дефіцит теплоти всередині термостата [15]. Обумовлюється він тим, що розсіювання енергії на фазовий перехід рідини I-роду відбувається з більшою швидкістю ніж підведення теплоти від стінок термостата. Відбувається самоорганізація дисипативних структур в вологій сировині всередині термостата. За умови протікання ІнТМО прирощення температури знову змінить свій знак лише у випадку недостатньої для подальшої самоорганізації дисипативних структур кількості рідкої фази. Мається на увазі те, що рідка фаза в термостаті закінчиться. При цьому має місце локальний мінімум температури на шляху до встановлення в системі температури термостата. Приклад побудови фазового портрету для ефекту ІнТМО наведений як результат моделювання процесів сушіння та гідротермічної обробки для вологої сировини з газонепроникними включеннями.

## **5. Результати моделювання ефекту ІнТМО за різної його організації**

### **5.1. Моделювання ефекту ІнТМО вологої сировини з газонепроникними включеннями за її горизонтальної орієнтації**

Моделювання ефекту ІнТМО для сировини з газонепроникними включеннями проводилось у термостаті, який наведено на рис. 1. Площа стінок термостата, що обмежують його внутрішній виділений об'єм, складала –  $7,5 \cdot 10^3$  мм<sup>2</sup>, а площа зовнішньої поверхні об'єкторів –  $1,9 \cdot 10^2$  мм<sup>2</sup>. Співвідношення між площами дорівнює 40:1. Три прямокутні шари вологого матеріалу розміром  $95 \times 5 \times 22$  мм розміщувались паралельно нагрівальним поверхням як показано на рис. 3.

Між шарами сировини штучно створювались границі розділу із паронепроникного матеріалу. Для створення таких границь між шарами використовувалась алюмінієва фольга у вигляді прямокутних листків площею  $95 \times 22$  мм. Товщина алюмінієвої фольги дорівнювала 0,02 мм.

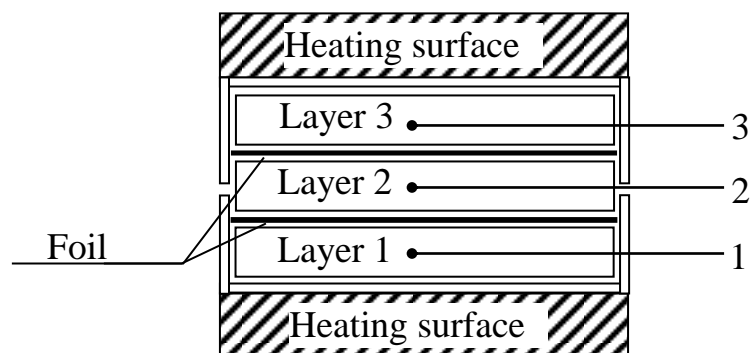


Рис. 3. Схема розміщення термопар та листів алюмінієвої фольги між шарами вологого матеріалу під час моделювання ІнТМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1, 2, 3 – термопари у відповідних шарах вологого матеріалу

Очевидно, проникнення газу або рідини між шарами можливе лише через щілини між внутрішньою поверхнею стінок термостата, що обмежують його внутрішній виділений об'єм та краями листків фольги. Один шар сировини (шар II) контактує з оточуючим середовищем через зазори в стінках термостата. Функції обтюратора виконує частина даного шару сировини, яка безпосередньо прилягає до зазору.

На рис. 4 наведено кінетику температури шарів вологого матеріалу під час ефекту ІнТМО за даної організації експерименту.

Кінетики температури для різних шарів вологого матеріалу мають типовий для ефекту ІнТМО характер. Наявне нагрівання матеріалу та досягнення температурою локального максимуму, який відповідає точці біфуркації. Далі відбувається зменшення температури з часом та досягнення нею локального мінімуму. На останньому умовному етапі відбувається нагрівання матеріалу до температури термостата. Локальний мінімум температури відповідає досягненню модельною сировиною гігроскопічного стану, що відповідає кінцевому періоду процесу тепломасообміну в термостаті.

Як видно з рис. 4, першим локального мінімуму температури, який відповідає гігроскопічному стану матеріалу, досягає шар 2. Одночасно з цим, для кінетики температури шарів 1 та 3 має місце різка зміна кута їх нахилу до осі, на якій відкладено тривалість ІнТМО. Через 0,1 частку від загальної тривалості процесу кінетики температури шарів 1 та 2 також досягають локальних мінімумів, тобто ці шари також досягають гігроскопічного стану. Далі внутрішнє середовище нагрівається до температури термостата. Виходячи з результату експерименту видно: різні шари досягли рівноважного вологовмісту з різницею тривалості в 10 % від загальної тривалості процесу тепломасообміну, хоча між ними був розміщений паронепроникний бар'єр.

Отримане підтверджує феноменологічну гіпотезу ефекту ІнТМО та доводить, що границя розділу «навколишнє середовище – внутрішнє середовище

термостата» знаходиться в об'ємі обтюратора, а газове середовище всередині термостата є суцільним.

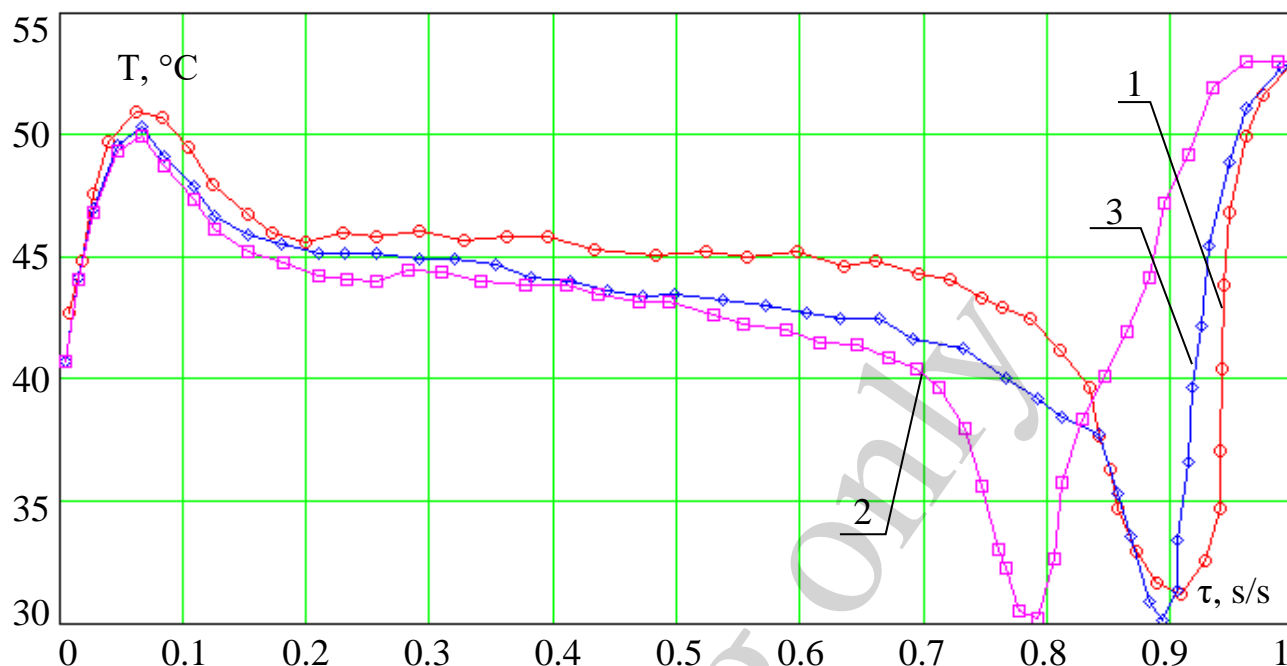


Рис. 4. Кінетика температури шарів вологого матеріалу під час моделювання ефекту ІнтМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1 – шар 1; 2 – шар 2; 3 – шар 3

## 5. 2. Моделювання ІнтМО вологої сировини з газонепроникними включеннями за її вертикальної орієнтації

Моделювання ефекту ІнтМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями проводилось шляхом вертикального розміщення бар'єрів між шарами вологого матеріалу. Всього було розміщено п'ять шарів, між якими розміщували листки фольги прямокутної форми, як наведено на рис. 5.

Фазові портрети ефекту ІнтМО для трьох шарів, отримані при цьому, наведені на рис. 6. Фазові портрети отримувались лише для трьох шарів. Оскільки в роботі [15] з дослідження даного ефекту доведено, що має місце площинна симетрія ІнтМО у тепломасообмінному модулі в формі паралелепіпеду за однакових зовнішніх умов на стінках з обтюраторами. Тобто, очевидно, фазові портрети ефекту ІнтМО для шарів 1 та 5 співпадають, те ж стосується і шарів 2 та 4.

За такої організації структури внутрішнього середовища термостата, тобто за такого розміщення шарів вологого матеріалу та елементів паронепроникного матеріалу фазові портрети ефекту ІнтМО мають певні особливості (рис. 6). Основною відмінністю наведених фазових портретів від фазових портретів для інших реалізацій ефекту ІнтМО [16] є наявність двох петель з частиною фазової траєкторії у негативній області площини з координатами  $k_{\psi} \cdot \Psi(T, w)$  та

$$\frac{T}{T_{\text{термостат}}} \cdot$$



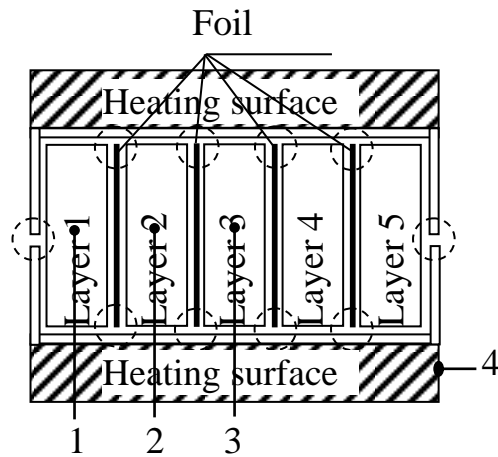


Рис. 5. Схема розміщення термопар та листів алюмінієвої фольги між шарами вологого матеріалу під час моделювання ефекту ІнтМО за вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1, 2, 3, 4 – термопари

Для такої організації структури внутрішнього середовища термостата має місце розділення системи на підсистеми. Роль обтюраторів у даному дослідженні виконують частини вологого матеріалу, які прилягають до зазору між паронепроникними частинами термостата (позначені обведенням на рис. 5). Тобто на границі внутрішнього середовища термостата з навколишнім середовищем паронепроникними частинами є стінки тепломасообмінного модуля, що обмежують внутрішній об'єм термостата, на поверхні яких зроблений зазор. У внутрішньому середовищі такими паронепроникними стінками є внутрішня частина стінок термостата та листки алюмінієвої фольги. Функції зазорів при цьому виконують щілини між листками фольги та стінками термостата.

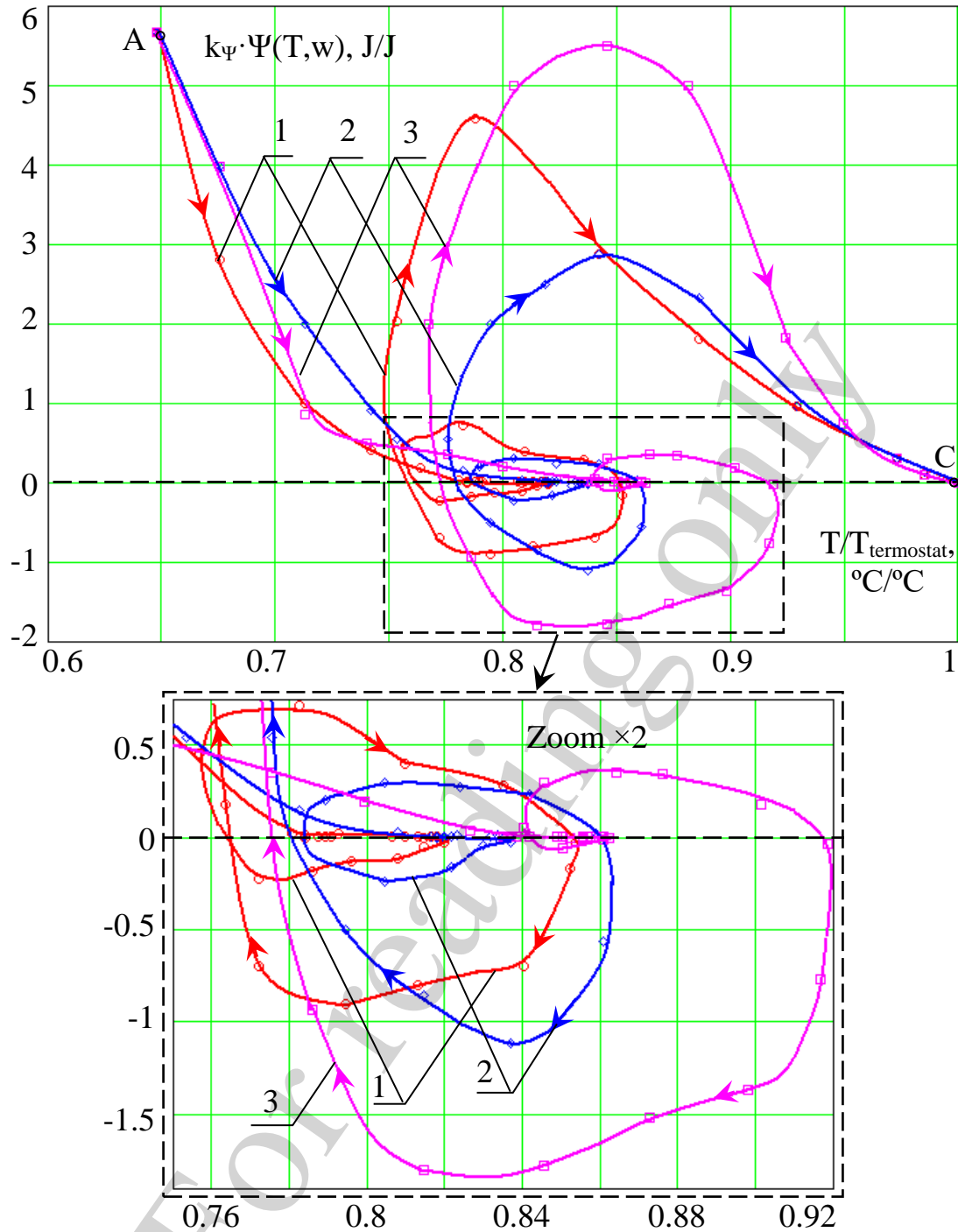


Рис. 6. Фазові портрети ефекту ІнтМО за вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1 – шар 1, шар 5; 2 – шар 2, шар 4; 3 – шар 3 (з рис. 7)

## 6. Обговорення результатів моделювання ефекту ІнтМО за різної його організації

Моделюванням процесів сушіння та гідротермічної обробки з ІнтМО вологої сировини з газонепроникними включеннями за її горизонтальної орієнтації доведено феноменологічну гіпотезу ефекту ІнтМО. А саме її тези:

– границя розділу «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» знаходиться в об’ємі обтюратора;

– газове середовище всередині термостата є суцільним.

Мається на увазі наступне.

Внутрішній виділений об’єм термостата, в якому протікає ефект ІнтМО, обмежений його внутрішніми стінками із паронепроникного матеріалу з високою теплопровідністю. Внутрішні стінки термостата є поверхнями, через які організовується теплообмін з його внутрішнім середовищем, тобто теплообмінними поверхнями. Внутрішнє середовище термостата сполучається із зовнішнім середовищем через обтюратори, які виконані на внутрішніх стінках термостата. Необхідними умовами до конструкції термостата є те, що теплообмінні поверхні повинні бути принаймні на порядок більшими за зовнішню площу обтюраторів термостата [15]. При цьому термостат технічно реалізується як деякий тепломасообмінний модуль. Визначена теплоємність стінок даного модуля (у відповідності до необхідних умов реалізації ефекту ІнтМО) забезпечується або теплоємністю середовища (оточуюче середовище), в якому знаходиться даний модуль, або нагрівальними поверхнями, які контактують із стінками модулю.

Виходячи з таких вимог, очевидно, що границя розділу за масообміном «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата» є об’єм обтюратора. При цьому газове середовище всередині термостата вважається суцільним за парціальним тиском пари рідини.

При цьому розміри, конструкція внутрішнього виділеного об’єму термостата, способи та ступінь заповнення його сировиною є параметрами порядку, які обумовлюють вихідні вимоги для конструювання апаратів з використанням ефекту ІнтМО.

Моделюванням процесів сушіння та гідротермічної обробки з ІнтМО вологої сировини з газонепроникними включеннями за її вертикальної орієнтації встановлено наступне. Термостат з розміщеними всередині нього шарами вологого матеріалу та листками алюмінієвої фольги (рис. 5) можна розглядати як послідовно та паралельно поєднані між собою умовні термостати. Умовна еквівалентна схема такого з’єднання термостатів наведена на рис. 7.

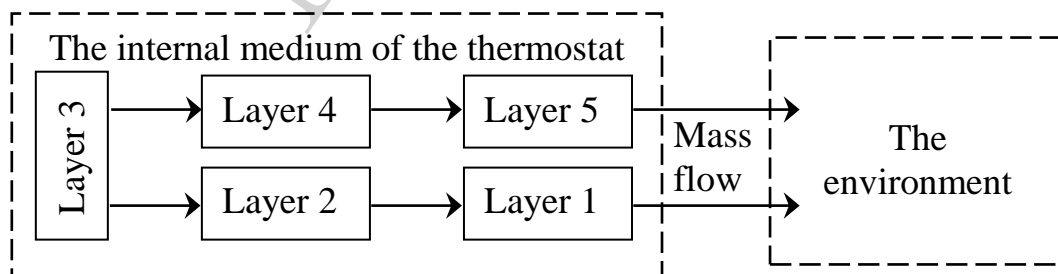


Рис. 7. Еквівалентна схема внутрішньої частини термостата з рис. 5

Виникнення флуктуації об’ємної концентрації молекул води внутрішнього суцільного газового середовища термостата в обтюраторі на границі розділу

«оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата» спричиняє флуктуацію концентрації молекул води суцільного газового середовища всередині термостата. Відповідно, в обтюляторах на границі розділу між умовними термостатами також виникають флуктуації. Виходячи з цього, «запуск», «зрив», «протікання» або «закінчення» ефекту ІнтМО в будь-якому із умовних термостатів буде відбиватися на характері протікання тепломасообміну у всій системі. Дане ствердження наочно підтверджують фазові портрети наведені на рис. 6.

На наведених фазових портретах ефекту ІнтМО для кожного шару вологого матеріалу (умовного термостата) мають місце дві петлі з частиною фазової траєкторії у другій чверті фазової площини. В даній частині фазової площини фазова траєкторія має негативний знак за координатою  $k_{\Psi} \cdot \Psi(T, w)$ . Дана частина фазової траєкторії (у негативній площині) відповідає протіканню ефекту ІнтМО. При цьому слід вважати, що перша петля має місце через «запуск», «протікання» та «закінчення» ефекту ІнтМО очевидно у шарах 1 та 5. Обтюратори даних шарів вологого матеріалу знаходяться на границі розділу «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата». Друга петля має місце через перебіг ефекту ІнтМО у внутрішніх умовних термостатах, тобто у шарах – 2, 3 та 4.

Таким чином, має місце розщеплення фазового портрету ефекту ІнтМО в даній динамічній системі за даних умов організації експерименту, а саме:

- за даної організації структури внутрішнього середовища термостата (попереднє з'єднання умовних термостатів);
- за даних властивостей матеріалу, із яких виконано обтюратор і шари модельної сировини;
- за даної енергії потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів.

Наявність дворівневого розщеплення (відсутність трирівневого розщеплення) за умови трьох послідовно з'єднаних умовних термостатів пояснюється наступним чином. У відповідності до феноменологічної гіпотези ефекту ІнтМО [15] потік маси в об'ємі обтюраторів «індукується» часовою

$\left( \frac{\partial x_{ind}}{\partial \tau} \right)$  і просторовою

$\left( \frac{\partial \langle n_{ind} \rangle}{\partial x_{ind}} \right)$  флуктуаціями, граничні значення яких обумовлені енергією активації

ефекту ІнтМО. Під час послідовного переходу між умовними термостатами потужність флуктуацій зменшується через дисипацію їх величин в об'ємі термостата. Очевидно, за умови зменшення в об'ємі чергового обтюлятора часової і просторової флуктуацій відносно граничних значень (необхідних для «запуску» і «протікання» ефекту ІнтМО), ефект ІнтМО в даному черговому умовному термостаті не «запускається». Відповідно, у даному черговому обтюраторі «запуск» ІнтМО можливий лише за виконання необхідних умов для його реалізації.

Якщо система рухається за одним із шляхів еволюції за постійного зовнішнього впливу на неї, то можливе наступне. Необхідні умови для «запуску» або повторного «запуску» ефекту ІнтМО в умовному черговому термостаті із послідовної низки починають виконуватись через зменшення дисипації потужності флуктуацій у попередніх умовних термостатах. Дисипація часової та просторо-

вої флуктуації може зменшуватись через зменшення кількості рідкої фази, для якої можливий фазовий перехід I роду за даних умов. Саме цей шлях еволюції системи наведений на фазовому портреті на рис. 6.

Іншим шляхом «запуску» ефекту ІнтМО в умовному черговому термостаті із послідовної низки є зміна зовнішнього впливу на систему, таким чином, щоб необхідні вимоги почали виконуватись. Одним із способів є збільшення роботи потоку повітря оточуючого середовища, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора. Однак збільшення енергії потоку може порушити необхідні умови, що висуваються до властивостей обтюратора, крім того тягне за собою додаткові енерговитрати. Таким чином, під час будь-якого зовнішнього впливу на систему для реалізації ефекту ІнтМО повинні виконуватись необхідні умови для його протікання.

Характер протікання ефекту ІнтМО у даному дослідженні однаковий для всіх окремих об'ємів внутрішнього об'єму термостата, причому особливі точки для них синхронні. Отримане доводить, що під час ефекту ІнтМО має місце «спрямованість» характеру протікання процесу тепломасообміну. Під «спрямованістю» розуміється те, що особливості перетікання процесу будь-якого виділеного об'єму внутрішнього середовища термостата відбивається на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Така поведінка характерна тільки для суцільного середовища. Необхідно відмітити, наявність «спрямованості» процесу тепломасообміну, ще одна ознака «штучності» та керованості ефекту ІнтМО. Дана властивість розширює потенціальні можливості використання даного способу на практиці. Використати дану особливість ефекту ІнтМО можливо для виконання технологічних операцій з обробки різної сировини в одному апараті без її змішування.

З використанням отриманих експериментальних результатів та теоретичних висновків до них розроблено технічне рішення апарата із застосуванням ефекту ІнтМО для сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини. Загальний вид робочої структурної одиниці апарата представлено на рис. 8. Під структурною одиницею мається на увазі автономна частина апарата, в якій проводиться сушіння або гідротермічна обробка вологої сировини. Продуктивність апарата змінюється шляхом зміни кількості таких структурних одиниць, які мають визначений габаритний розмір, визначену продуктивність та енерговитрати на обробку.

Принцип роботи апарата наступний. Волога сировина 2 протягується горизонтальним конвеєром 3 крізь шахту прямокутного перерізу. У верхній частині шахти виконані обтюратори 1 вздовж яких продувається з визначеною швидкістю повітря. Підведення теплоти до сировини здійснюється через нижню частину шахти від нагрівальної поверхні 4. Швидкість руху конвеєрної стрічки визначається видом та вологовмістом сировини, що підлягає сушінню або гідротермічній обробці, температурними режимами та вимогами до якості отриманої кінцевої продукції. Продуктивність наведеної робочої структурної одиниці за гідротермічною обробкою круп складає 18 кг/год, а енерговитрати –  $8,1 \cdot 10^6$  Дж на кг сушеної продукції. Кінцевою продукцією при цьому є швидковідновлювані каші, які не потребують варіння.

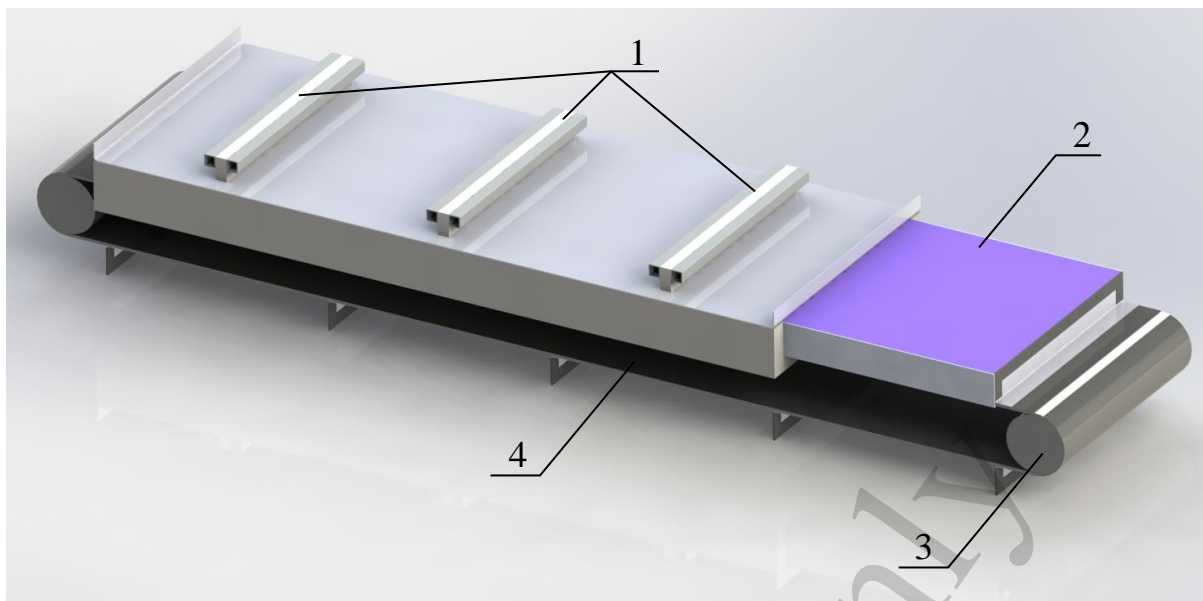


Рис. 8. Загальний вигляд робочої структурної одиниці апарата із застосуванням ефекту ІнтМО для сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини: 1 – обтюратори; 2 – волога сировина; 3 – горизонтальний конвеєр; 4 – нагрівальна поверхня

Необхідно відмітити універсальність розробленого апарата із використанням ефекту ІнтМО. Його універсальність полягає в можливості використання одного апарата для виконання і операції сушіння, і гідротермічної обробки вологої сировини. Економічна привабливість застосування розробленого апарату з ефектом ІнтМО для сушіння та гідротермічної обробки полягає у можливості зменшення енерговитрат на дані технологічні операції на 30 %.

Обмеженням проведеного дослідження є відсутність експериментальних даних про характер ефекту ІнтМО за наявності твердої, рідкої та газової фаз всередині термостата з розривами між фазами. Перспективами подальших наукових досліджень у даному науковому напрямку є моделювання ефекту ІнтМО за умови наявності розривів між фазами, об'єм яких сумірний з внутрішнім об'ємом термостата. Перспективами подальших прикладних досліджень є адаптація розробленого апарату під різні види сировини, яка підлягає гідротермічній обробці або сушінню у виробництві.

## 7. Висновки

1. Доведено моделюванням процесів сушіння та гідротермічної обробки з ІнтМО вологої сировини з газонепроникними включеннями за її горизонтальної орієнтації, що границя розділу «навколишнє середовище – внутрішнє середовище термостата» знаходиться в об'ємі обтюратора. Доведено, що газове середовище всередині термостата під час ефекту ІнтМО є суцільним. Встановлено, що характер даного ефекту за умови наявності газонепроникних включень в твердій фазі всередині термостата не відрізняється від характеру ефекту ІнтМО за умов відсутності таких включень.

2. Моделюванням процесів сушіння та гідротермічної обробки з ІнтМО вологої сировини з газонепроникними включеннями за її вертикальної орієнтації встановлено наявність розщеплення фазового портрету ефекту ІнтМО в даній динамічній системі за даних умов його організації. Доведено, що під час ефекту ІнтМО особливості перетікання процесу будь-якого виділеного об'єму внутрішнього середовища термостата відбивається на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Відзначено, дана ознака «штучності» та керованості ефекту ІнтМО робить можливим виконання визначених технологічних операцій з обробки різної сировини в одному апараті без її змішування.

3. Розроблено технічне рішення апарату із застосуванням ефекту ІнтМО для сушіння та гідротермічної обробки вологої сировини з використанням отриманих експериментальних результатів та встановлених теоретичних висновків. Встановлено розрахунками та експериментальними дослідженнями, що продуктивність розробки за гідротермічною обробкою круп складає 18 кг/год, а енерговитрати –  $8,1 \cdot 10^6$  Дж на кг сушеної продукції. Кінцевою продукцією при цьому є швидковідновлювані каші, які не потребують варіння. Економічна привабливість застосування розробленого апарату з ефектом ІнтМО для сушіння та гідротермічної обробки полягає у можливості зменшення енерговитрат на дані технологічні операції на 30 %.

### Література

1. Bilgen, S. (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 890–902. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.004>
2. Cabezas, H. (2017). Editorial overview: Energy and environmental engineering. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 17, 98–99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.08.006>
3. Keil, F. J. (2018). Process intensification. *Reviews in Chemical Engineering*, 34 (2), 135–200. doi: <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0085>
4. Pavlushin, A., Sutyagin, S., Dolgov, V. (2019). Energy-saving dryer. *E3S Web of Conferences*, 126, 00044. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600044>
5. Gondrexon, N., Cheze, L., Jin, Y., Legay, M., Tissot, Q., Hengl, N. et. al. (2015). Intensification of heat and mass transfer by ultrasound: Application to heat exchangers and membrane separation processes. *Ultrasonics Sonochemistry*, 25, 40–50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.010>
6. Tireuov, K., Mizanbekova, S., Kalykova, B., Nurmanbekova, G. (2018). Towards food security and sustainable development through enhancing efficiency of grain industry. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 6 (1), 446–455. doi: [https://doi.org/10.9770/jesi.2018.6.1\(27\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2018.6.1(27))
7. Lovegrove, A., Edwards, C. H., De Noni, I., Patel, H., El, S. N., Grassby, T. et. al. (2015). Role of polysaccharides in food, digestion, and health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57 (2), 237–253. doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.939263>

8. Shahidi, F. (2009). Nutraceuticals and functional foods: Whole versus processed foods. *Trends in Food Science & Technology*, 20 (9), 376–387. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.08.004>
9. Lamsal, B. P., Faubion, J. M. (2009). The Beneficial Use of Cereal and Cereal Components in Probiotic Foods. *Food Reviews International*, 25 (2), 103–114. doi: <https://doi.org/10.1080/87559120802682573>
10. Shewry, P. R. (2010). Principles of Cereal Science and Technology. *Journal of Cereal Science*, 51 (3), 415. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.001>
11. Hu, X.-Z., Zheng, J.-M., Li, X., Xu, C., Zhao, Q. (2014). Chemical composition and sensory characteristics of oat flakes: A comparative study of naked oat flakes from China and hulled oat flakes from western countries. *Journal of Cereal Science*, 60 (2), 297–301. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.05.015>
12. Gates, F. K., Sontag-Strohm, T., Stoddard, F. L., Dobraszczyk, B. J., Salovaara, H. (2008). Interaction of heat–moisture conditions and physical properties in oat processing: II. Flake quality. *Journal of Cereal Science*, 48 (2), 288–293. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.09.009>
13. Chaunier, L., Della Valle, G., Lourdin, D. (2007). Relationships between texture, mechanical properties and structure of cornflakes. *Food Research International*, 40 (4), 493–503. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2006.07.014>
14. Погожих, М. І., Пак, А. О., Пак, А. В., Жеребкін, М. В. (2017). Технічна реалізація апаратів з використанням процесу індукованого тепломасообміну. *ScienceRise*, 6 (35), 29–33. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.103600>
15. Pogozhikh, M., Pak, A. (2017). The development of an artificial energotechnological process with the induced heat and mass transfer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (8 (85)), 50–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91748>
16. Погожих, М. І., Пак, А. О., Пак, А. В., Жеребкін, М. В. (2017). Аналіз процесу індукованого тепломасообміну методом фазового простору. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 1, 132–143.