

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ ПОВІТРЯ ВІДНОСНО ОБТЮРАТОРА ТЕРМОСТАТА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ

Погожих М. І., Пак А. О., Пак А. В., Чеканов М. А.

1. Вступ

Екологічні проблеми, збільшення вартості енергетичних ресурсів зумовлюють суттєву зацікавленість харчових підприємств до використання енергоефективних технологій та обладнання для переробки харчової сировини та виробництва продукції з неї [1]. На сьогодні актуальним є проблема переробки сільськогосподарської сировини і продуктів з метою зменшення їх втрат [2], збільшення термінів зберігання [3], підвищення якості харчових продуктів [4] та їх конкурентоспроможності [5].

Перспективним напрямом вирішення цих завдань є використання у виробництві індукованих процесів [6]. Для таких процесів перенесення теплоти, маси, імпульсу, тощо не відбувається самовільно, а лише за умови подолання деякого енергетичного активаційного бар'єра [7]. Апарати, створені на використанні таких процесів, як правило, характеризуються високою енергоефективністю та екологічністю [8].

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Одним із таких індукованих процесів є процес, в основі якого лежить ефект індукованого тепломасообміну (ІнТМО) [9]. Цей ефект є *об'єктом дослідження*. До сьогодні даний ефект отримав теоретичний розвиток лише в межах реалізації процесу сушіння харчової сировини (сушіння змішаним теплопідводом) [10].

Ефект ІнТМО спостерігається в термостаті. Температура термостата $T_{\text{термостат}}$ підтримується постійною, а його теплоємність вважається нескінченною. У виділеному об'ємі всередині термостата $V_{\text{термостат}}$ знаходяться рідина об'ємом V_{liquid} і газ об'ємом V_{gas} , який є сумішшю повітря і пари рідини. Також у $V_{\text{термостат}}$ може міститися нерозчинна або частково розчинна в рідині суха речовина об'ємом V_{solid} , яка має або ні певну структуру. Тиск у термостаті $p_{\text{термостат}}$ постійний і дорівнює атмосферному p_{∞} .

Із навколишнім середовищем термостат сполучається через обтюратор, що являє собою отвір у термостаті, із розміщеним у ньому капілярно-пористим тілом (КПТ), об'єм якого значно менший внутрішнього об'єму термостата $V_{\text{обт}} \ll V_{\text{термостат}}$. Площа поверхні обтюлятора значно менша за площу поверхні термостата $S_{\text{обт}} \ll S_{\text{термостат}}$. Обтюратор обмежує вільний доступ газу навколишнього середовища до внутрішнього об'єму термостата.

Термостат з двома або трьома фазами та обтюратором утворюють систему, яка має два рівноважних стани:

– нестійка рівновага – температура всіх частин динамічної системи асимптотично прагне до температури термостата, при цьому практично відсутній масообмін з навколишнім середовищем;

– стійка рівновага температура всіх частин динамічної системи дорівнює температурі термостата, при цьому рідка фаза всередині термостата відсутня.

Сам ефект ІнтМО полягає у переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої, який супроводжується розсіюванням теплоти за рахунок переходу рідкої фази в термостаті у газовий стан.

На сьогодні, незважаючи на велику кількість експериментальних даних, отриманих для ефекту ІнтМО, залишається недостатньо повно описаним фізичний механізм низки особливостей його протікання, пояснити які, виходячи з теоретичних основ, наведених у роботах з його дослідження, неможливо [10]. Розвинення теоретичних основ ефекту ІнтМО обумовлюють перспективність дослідження, яка полягає у виявленні потенціалу його використання в різних технологіях і техніці та в ефективному керуванні витратами енергії з отриманням продукції із заданими властивостями.

Для виявлення особливостей ІнтМО проводився технологічний аудит, який мав за мету встановлення впливу швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, на характер цього ефекту. При цьому досліджувались експериментально отримані кінетики температури модельного колоїдного капілярно-пористого тіла (ККПТ) у виділеному внутрішньому об'ємі термостата під час ІнтМО. А також розраховувався тепловий баланс даного ефекту за різних значень швидкості повітря, що рухається відносно обтюратора термостата.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – встановлення меж регулювання енергоефективності ефекту ІнтМО шляхом виявлення впливу на його характер такого керуючого параметру, як швидкість потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Визначити положення характерних локальних мінімумів та максимумів на кінетиках температури ККПТ під час ІнтМО за різних значень досліджуваного керуючого параметра.

2. Розрахувати енергетичний баланс ефекту ІнтМО за різної швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, для виявлення особливостей даного ефекту.

3. Проаналізувати відмінності між кінетиками теплового потоку, який витрачається у внутрішньому середовищі термостата, за різної швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Система «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата», за умови протікання ефекту ІнтМО, є проточною по відношенню до маси та теплової енергії динамічною системою [11]. В таких системах можливі процеси самоорганізації, які обумовлюють ефективне розсіювання (дисипацію) теплової енергії за рахунок фазових переходів I-го роду [12]. Для такої системи

виділяють дві групи параметрів: параметри порядку – внутрішні властивості системи, які визначають масштаб ІнтМО та його кінетику; керуючі параметри – чинники, які дозволяють регулювати потужність ефекту зовнішніми діями.

В роботі розглядається можливість керування інтенсивністю ефекту ІнтМО його керуючими параметрами. При цьому існуючі рішення даного проблеми можуть бути знайдені, виходячи із необхідних і достатніх умов організації ефекту ІнтМО. Серед них необхідно виділити умову, яку повинні виконувати складові динамічної системи для реалізації ІнтМО: наявність флуктуації на границі розділу між внутрішнім та зовнішнім середовищем. Технічна реалізація даної умови забезпечується способом створення потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, та його параметрами. Флуктуації концентрації молекул води внутрішнього газового середовища створюються механічними збуреннями, які можна реалізувати зовнішнім [13] або внутрішнім [14] газовим середовищем термостата.

Перший із способів створення флуктуації може бути організований шляхом обдування зовнішньої по відношенню до внутрішньої частини термостата поверхні обтюратора. Обдування зовнішньої поверхні обтюратора потоком повітря проводиться зі швидкістю, за якої режим плинку повітря відповідає турбулентному режиму плинку. В результаті утворення турбулентних збурень біля поверхні, що омивається потоком повітря, в потоці виникають пульсації швидкості повітря [15], перпендикулярні до його напрямку. Такі пульсації, які мають стохастичний характер [16], і створюють флуктуації параметрів газового середовища термостата в об'ємі обтюратора під час ІнтМО.

Іншим способом створення флуктуацій концентрації молекул води внутрішнього газового середовища в об'ємі обтюратора є збудження механічних коливань в даному середовищі. Збудження коливань можливе шляхом генерації звукових коливань [17] відповідної частоти у суцільному газовому середовищі всередині термостата відповідними пристроями (інфразвуковими [18], ультразвуковими [19], звуковими [20] генераторами тощо).

Однак необхідно відмітити, що наявність потоку повітря відносно зовнішньої поверхні обтюратора необхідна як за першого способу організації флуктуації концентрації, так і за другого. Потік повітря, по-перше може створювати за необхідності флуктуацію в обтюраторі. По-друге, він зменшує дифузійний шар, який утворюється молекулами рідини у газовому стані через масообмін між навколишнім середовищем та внутрішнім середовищем термостата та який зменшує градієнт концентрації молекул води в об'ємі обтюратора. Зменшенню градієнту концентрації молекул води в обтюраторі сприяє зменшення величини індукованого потоку маси. Таким чином, з точки зору ефективності ІнтМО, організація руху повітря відносно зовнішньої поверхні обтюратора є необхідною як за першого способу створення флуктуації, так і за другого. Виходячи з означеного в роботі проводились дослідження з виявлення впливу на характер ефекту ІнтМО однієї із характеристик потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата – його швидкості.

5. Методи досліджень

У дослідженні використовувався термостат, внутрішній виділений об'єм якого мав форму паралелепіпеду (рис. 1) з розмірами $95 \times 15 \times 22$ мм (тепломасообмінний модуль (ТМО-модуль), який обмежує виділений внутрішній об'єм термостата). Обтюратори виконані на площині 95×15 мм ТМО-модуля. Ширина площини обтюратора, яка граничить з навколишнім середовищем, – 1 мм, довжина – 95 мм.

Вздовж зазорів з обтюраторами закріплені трубки, в яких виконані поздовжні прорізи за розмірами не менше зазору з обтюратором. Вони щільно закріплюються на зовнішній поверхні ТМО-модуля таким чином, щоб прорізи співпадали з зазорами. По трубкам рухається повітря, яке нагнітається компресором. Термостатування здійснюється кондуктивним способом від двох нагрівальних елементів через площини 22×95 мм. Необхідно відмітити, що напруга на нагрівальних елементах та сила струму через них підтримуються постійними, таким чином можна вважати, що тепловий потік від нагрівальних поверхонь підтримується постійним. Це одна із принципів відмінностей забезпечення ІнТМО в даній роботі від попередніх досліджень [21].

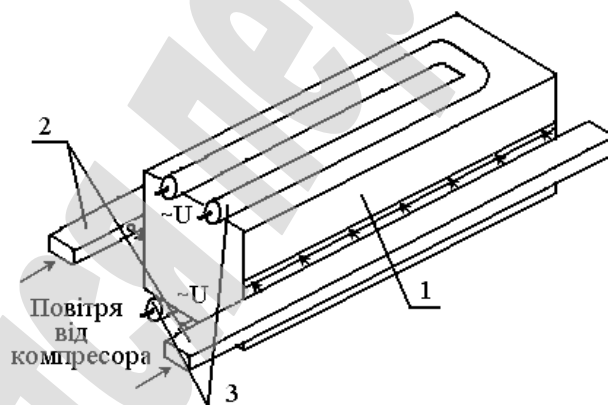


Рис. 1. Схема експериментальної установки для виявлення впливу швидкості повітря, що рухається відносно обтюратора, на характер ефекту індукованого теплообміну: 1 – модуль, який обмежує внутрішній об'єм термостата; 2 – канали для потоку повітря; 3 – нагрівальні елементи

Термостат щільно заповнюється модельним ККПТ. В даному дослідженні вирізалися шматки у формі паралелепіпедів розміром $95 \times 5 \times 22$ мм, які розташовувались уздовж зазорів у внутрішніх стінках термостата, паралельно нагрівальним поверхням. Функції обтюратора виконує частина ККПТ, що щільно прилягає до зазору.

У шарах сировини розміщувалися термопари, як показано на рис. 2.

Гідродинамічний тиск визначали за допомогою трубки Піто, розміщеної в одному із каналів, по якому рухається повітря. Гідродинамічний тиск змінювався дискретно налаштуванням компресора та мав значення, Па: 100; 50; 10. Швидкість руху повітря визначали за формулою:

$$v = \sqrt{\frac{2p_{\text{дин}}}{\rho}}, \quad (1)$$

де $p_{\text{дин}}$ – гідродинамічний тиск повітря, Па; ρ – густина повітря, кг/м³.

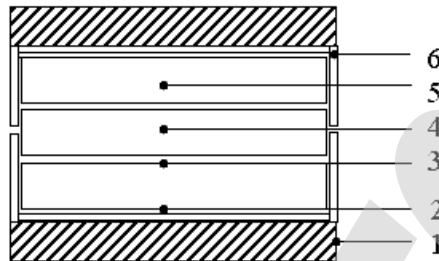


Рис. 2. Схема розміщення термопар у внутрішній частині термостата з рис. 1: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – термопари

При цьому швидкість руху повітря (гідродинамічний тиск) відповідно дорівнювала, м/с (Па): 13 (100); 9 (50); 4 (10). Аналіз характеру протікання ефекту ІнтМО та його ефективності проводиться, виходячи з характеру кінетики температури ККПТ та за положенням локальних мінімумів та максимумів на цих кінетиках.

6. Результати досліджень

Кінетика температури ККПТ під час ефекту ІнтМО, отримана для швидкості руху (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, 13 м/с (100 Па), наведена на рис. 3.

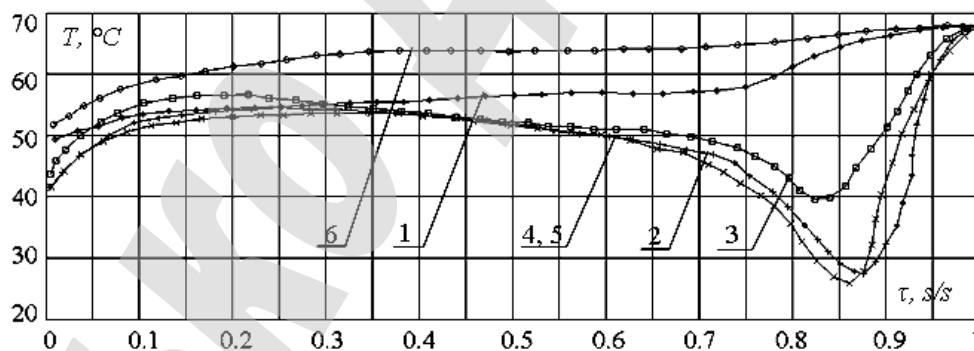


Рис. 3. Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла за швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата 13 м/с (100 Па): 1, 2, 3, 4, 5, 6 – термопари з рис. 2

Характер кінетик температури модельних ККПТ, отриманих від термопар, розташованих в різних точках всередині термостата, – однаковий. Цифрами на рис. 3 позначені номери термопар з рис. 2. Температура ККПТ зростає, досягає певного значення (від 0,1 тривалості до 0,15 для різних координат), починаючи з якого спостерігається зменшення температури. Починаючи з 0,38...0,4 тривалості процесу має місце зміна нахилу кінетики температури – зменшення

температури стає більш значним. Починаючи з 0,7 тривалості процесу, спостерігається різке зменшення температури, яке закінчується мінімумом (0,83 (3), 0,85 (4, 5), 0,87 (2)). Далі температура збільшується і досягає значення температури термостата.

Виходячи з вигляду кінетик температури ККПТ під час ІнТМО, їх можна розділити на 5 характерних ділянок (рис. 4).

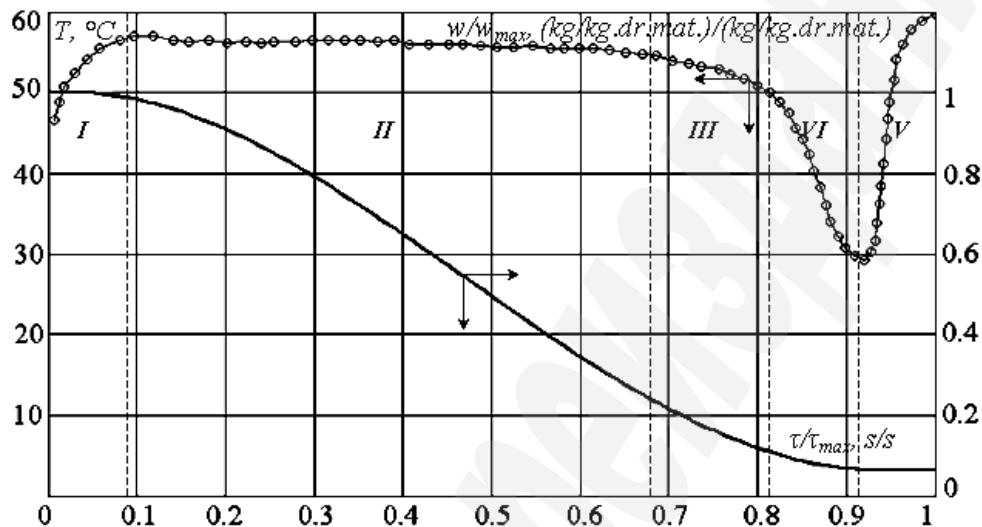


Рис. 4. Періодизація кінетики температури та вологовмісту модельного колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого тепломасообміну у термостаті

На першій ділянці має місце збільшення температури ККПТ до досягнення нею локального максимуму. Дана ділянка відповідає нагріванню матеріалу до визначеної температури та досягненню системою точки біфуркації.

На другій та третій ділянках температура монотонно зменшується. Відрізняються дані ділянки кутом нахилу до осі, на якій відкладена тривалість процесу. На другій та третій ділянках збільшується інтенсивність розсіювання теплового потоку, який надходить від стінок термостата, на фазовий перехід води I роду.

На четвертій ділянці температура сировини різко зменшується та досягає локального мінімуму. Мінімум температури відповідає завершенню ефекту ІнТМО через закінчення в термостаті системної води, яка бере участь у даному ефекті. ККПТ опиняється в області гіроскопічного вологовмісту, що доводить його кінетика вологовмісту (рис. 4).

Збільшення кута нахилу під час переходу з другої ділянки на третю, з третьої на четверту пояснюється розвитком потужності розсіювання теплоти дисипативними структурами під час ІнТМО. Ефект завершується за максимальної потужності розсіювання теплоти дисипативними структурами через закінчення частини води, яка може випаруватися.

На п'ятій ділянці температура збільшується та досягає значення температури термостата. Дана ділянка відповідає нагріванню внутрішнього середовища термостата, а саме твердої, рідкої та газової фаз, до температури термостата.

Кінетики температури ККПТ за двох інших значень швидкості руху (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів,

тобто – 9 м/с (50 Па) та 4 м/с (10 Па), мають такий же характер. Відмінності полягають у тривалості другої, третьої та четвертої ділянок, які відповідають «запуску», «протіканню» та «закінченню» ефекту ІнтМО. За збільшення швидкості обдування довжина ділянок змінюється наступним чином (табл. 1).

Таблиця 1

Відносна довжина ділянок кінетики температури під час індукованого тепломасообміну

Швидкість (гідродинамічний тиск), м/с (Па):	Довжина ділянки $\Delta\tau/\tau_{max}$, с/с		
	II	III	IV
4 (10)	0,58	0,12	0,08...0,125
9 (50)	0,5...0,55	0,2	0,12
13 (100)	0,23...0,3	0,3	0,17

Відносна довжина другої ділянки зменшується за збільшення швидкості обдування: при збільшенні швидкості в 2,25 разу – на 5...14 %, при збільшенні в 3,35 разу – на 48...60 %.

Відносна тривалість третьої ділянки збільшується за зміни швидкості обдування: при збільшенні швидкості в 2,25 разу – на 67 %, при збільшенні в 3,35 разу – на 150 %.

Відносна довжина четвертої ділянки за збільшення швидкості обдування в 2,25 разу змінюється не суттєво, у межах похибки, а за збільшення в 3,35 разу – на 62 %.

Очевидно зміни у відносній довжині другої, третьої та четвертої ділянок пов'язані зі зміною інтенсивності розсіювання теплового потоку, який надходить до внутрішнього середовища термостата. Даний потік витрачається на випаровування системної води ККПТ та залежить від швидкості руху (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів.

Для виявлення причин такого впливу запишемо енергетичний баланс ефекту ІнтМО у термостаті за даних умов. Одними із вихідних даних для розрахунку балансу є кінетики температури стінки термостата (термопара 1 з рис. 2), які фіксувались впродовж експерименту. Кінетика температури стінки термостата пропорційна тепловому потоку до внутрішнього середовища термостата з визначеним коефіцієнтом.

Кінетика теплового потоку системи «оточуюче середовище – термостат – внутрішнє середовище термостата» буде мати вигляд:

$$q_{\text{термостат}} = q_{\text{loss}} + q_{\text{in}}, \quad (2)$$

де $q_{\text{термостат}}$ – тепловий потік, що забезпечується нагрівальними поверхнями термостата, Дж/с; q_{loss} – постійний тепловий потік у оточуюче середовище, обумовлений тепловою конвекцією з зовнішньої поверхні стінок термостата, які контактують з навколишнім середовищем, Дж/с; q_{in} – тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата, Дж/с.

Для врахування втрат теплоти від зовнішньої поверхні стінок термостата у оточуюче середовище q_{loss} був проведений експеримент, у якому здійснювалось нагрівання термостата, заповненого матеріалом з відомою постійною теплоємністю, до рівноважної температури. При цьому умови проведення експерименту створювались такими ж, як і під час ІнТМО в термостаті з вологим ККПТ всередині.

За результатами експерименту отримано кінетику температури стінок в процесі нагрівання, а також кінетику теплового потоку, який надходить до внутрішнього середовища термостата, заповненого матеріалом з відомою постійною теплоємністю. Кінетика теплового потоку до внутрішнього середовища термостата розраховувалась, виходячи із кінетики температури матеріалу з відомою теплоємністю, який його заповнював. Дослідження проводились за температури оточуючого середовища 20...23 °С.

Отримані залежності відрізняються постійним масштабним коефіцієнтом $coef_{scale}$. Даний коефіцієнт є ефективним коефіцієнтом теплообміну між внутрішньою поверхнею стінок термостата та його внутрішнім виділенням об'ємом. Він залежить від площі зовнішньої поверхні стінок термостата, які контактують із оточуючим середовищем, та від температури стінок і температури оточуючого середовища. У розглянутому випадку для рівноважної температури термостата 68...71 °С та температури оточуючого середовища 20...23 °С масштабний коефіцієнт дорівнює – 116 Вт/°С. Таким чином, помноживши кінетику температури стінок термостата на даний масштабний коефіцієнт, можна визначити тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата від поверхні його стінок:

$$q_{in} = coef_{scale} T_{termostat\ side}(\tau) \Big|_{t_{\infty}=const}, \quad (3)$$

де $T_{termostat\ side}(\tau)$ – функція, яка описує кінетику температури нагрівальної поверхні.

Тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата, витрачається на фазовий перехід води (q_{evapor}) та нагрівання ККПТ (q_{solid}) і води (q_{water}) до температури термостата:

$$q_{in} = q_{evapor} + q_{solid} + q_{water}, \quad (4)$$

при цьому частина теплового потоку, що витрачається на фазовий перехід системної води (потік, що розсіюється) розраховується за формулою:

$$q_{evapor} = - \frac{dm_{water}(\tau)}{d\tau} \cdot r, \quad (5)$$

частина теплового потоку, що витрачається на нагрівання ККПТ до поточної температури:

$$q_{solid} = C_{solid} m_{solid} \frac{dT(\tau)}{d\tau}, \quad (6)$$

частина теплового потоку, що витрачається на нагрівання поточної маси води ($m_{water}(\tau)$) всередині термостата до поточної температури:

$$q_{water} = C_{water} m_{water}(\tau) \frac{dT(\tau)}{d\tau}, \quad (7)$$

де C_{solid} , C_{water} – теплоємність сухих речовин та води, Дж/(кг·К); m_{solid} – маса сухих речовин, кг; $m_{water}(\tau)$ – поточна маса води в термостаті, кг; r – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Побудуємо кінетику теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища та кінетику теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі, як суму його складових, тобто як суму (5), (6) та (7). Вихідними даними при цьому будуть кінетика температури ККПТ, кінетика температури стінок термостата, кінетика вологовмісту ККПТ, теплоємність та маса сухих речовин, теплоємність води. Поточна маса води визначається за кінетикою вологовмісту ККПТ, яке заповнює весь виділений внутрішній об'єм термостата. Кінетика теплового потоку від стінок термостата визначається за формулою (3) як добуток функції, що описує кінетику температури його стінок, на масштабний коефіцієнт.

На рис. 5 використані наступні позначення. Цифрою 1 позначена кінетика теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища, розрахована за формулою (3). Цифрами 2, 3 та 4 позначені кінетики теплового потоку, який витрачається на нагрівання сухих речовин та води до поточної температури, розраховані за ділянками відповідно до проведеної періодизації кінетики температури модельного ККПТ (рис. 4) за формулами (6) та (7). Цифрою 5 позначена кінетика теплового потоку, який витрачається на випаровування води у внутрішньому середовищі термостата. Розрахунок даної кінетики проводився у відповідності до кінетики вологовмісту ККПТ за формулою (5). Кінетика теплового потоку, що витрачається у внутрішньому об'ємі термостата, розрахована за формулою (4), позначена цифрою 6.

Наведені кінетики теплового потоку для наочності пронормовані на загальну кількість теплоти, що надійшла до внутрішнього середовища термостата. Необхідно відзначити, що площа під кінетикою теплового потоку від стінок термостата пропорційна кількості теплоти, яка надходить до його внутрішнього середовища.

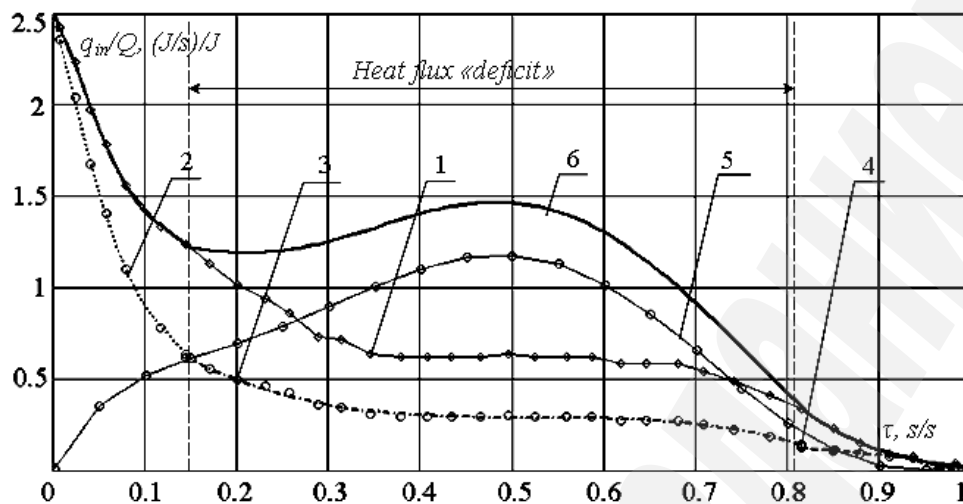


Рис. 5. Кінетика теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища (1) та кінетика теплового потоку, що витрачається внутрішнім середовищем термостата (6), отримана розрахунками за складовими (2)–(5), пронормовані на загальну кількість витраченої теплоти Q

З отриманих результатів (рис. 5) видно, що теплота, яка надходить від стінок термостата до його внутрішнього середовища, має менше значення, ніж теплота, яка витрачається в ньому. Під час ІнТМО у внутрішньому середовищі термостата теплота витрачається на нагрівання складових до рівноважної температури стінок та на фазовий перехід рідини всередині термостата до газоподібного стану. Розрахунки свідчать про те, що під час ІнТМО наявний дефіцит теплоти, який складає 25...30 % від необхідної кількості.

За першим початком термодинаміки, температура будь-якої системи за умови постійного теплового потоку ззовні може змінитися або шляхом передавання теплоти до тіла з меншою температурою, або шляхом виконання роботи:

$$dU = \delta Q \pm \delta A, \quad (8)$$

де dU – внутрішня енергія, Дж; δQ – кількість теплоти, переданої системі, Дж; δA – робота, яка виконується системою («-») або над системою («+»), Дж.

Встановлено, що теплового потоку від стінок термостата недостатньо для відтворення отриманої кінетики теплового потоку, який витрачається у внутрішньому середовищі термостата. Тому слід вважати, що факт, який спостерігається, свідчить про виконання роботи над системою, яка індукується потоком повітря, яке рухається відносно обтюратора термостата. При цьому зовнішня робота потоку повітря, який рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора термостата, забезпечує по величині енергію активації E_A ефекту ІнТМО. Роботами з дослідження ефекту ІнТМО, зокрема ЗТП-сушіння [9], показано, що за відсутності потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, або за швидкості потоку повітря (гідродинамічного тиску) менше визначеного мінімального значення, «запуск», «протікання» та «завершення» ефекту ІнТМО неможливі.

Таким чином, енергія активації E_A для організації ІнтМО забезпечується відповідною швидкістю (гідродинамічним тиском) потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата.

З кінетики теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі термостата, за різної швидкості (гідродинамічного тиску) повітря (рис. 6), пронормованої на загальну кількість витраченої теплоти Q , видно, що характер залежностей однаковий. При цьому площа під кривими, пропорційна кількості енергії, яка витрачається в термостаті на тепломасообмін. Площа під кривими розраховувалась без урахування нагрівання внутрішнього середовища термостата від початкової температури.

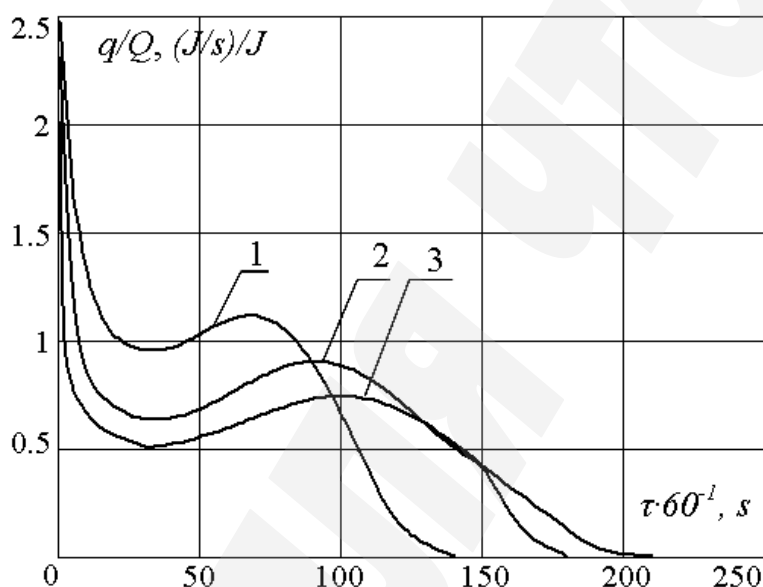


Рис. 6. Кінетика теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі термостата, за різної швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів м/с (Па): 1 – 13 (100); 2 – 9 (50); 3 – 4 (10)

Відмінності наведених залежностей полягають в значеннях їх амплітуди та ширини локальних максимумів. Оскільки в кожному з трьох експериментів використовувався один і той же термостат, з тим же ККПТ, за однакової вихідної кількості системної води в термостаті, то площа під кривими повинна бути однаковою. Теплота, яка надходить від стінок термостата – однакова, тому інтенсивність процесу буде визначатись енергією потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів. При цьому інтенсивність ІнтМО за різної швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, із діапазону від 4 до 13 м/с відрізняється в межах 15...20%. Встановлене свідчить про можливість регулювання інтенсивності ІнтМО швидкістю потоку повітря, яке рухається відносно обтюраторів.

Таким чином, розрахунком теплового потоку, який надходить до внутрішнього середовища термостата, та теплового потоку, який розсіюється в ньому, доведено, що ефект ІнтМО не можливий без зовнішньої роботи активації, яка виконується потоком повітря, що рухається відносно обтюраторів. При цьому робота потоку повітря, що рухається відносно

обтюраторів, є тим керуючим параметром, за допомогою якого організовується «запуск» ІнтМО. Дана зовнішня робота забезпечує по величині енергію активації ефекту ІнтМО. За значень даного керуючого параметру менших E_A «запуск» ефекту ІнтМО відсутній.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження слід відмітити встановлення факту, що енергія активації E_A ефекту ІнтМО досягається кінетичною енергією потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів термостата. При цьому робота потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, є тим керуючим параметром, за допомогою якого організовується «запуск» ІнтМО. Встановлене надає можливість, по-перше, керувати «запуском» ефекту ІнтМО у відповідності до поставленої мети технологічної обробки сировини з використанням даного ефекту. А по-друге, обґрунтовано змінювати інтенсивність протікання ІнтМО та його ефективність варіюванням швидкістю потоку повітря відносно обтюраторів.

Weaknesses. Слабкою стороною дослідження є те, що встановлення значення енергії активації E_A ефекту ІнтМО у даному випадку можливе лише непрямим способом, тобто за розрахованим енергетичним балансом даного ефекту. Відзначене має місце через складність теоретичного розрахунку величин пульсацій швидкості повітря, що виникають біля поверхні обтюратора через утворення турбулентних збурень в потоці повітря та створюють флуктуації в об'ємі обтюратора. Під час визначення енергії активації ефекту ІнтМО непрямим способом є імовірність виникнення похибок, що тягнуть за собою похибки інженерних розрахунків апаратів з використанням ІнтМО, і, як наслідок, збільшення енерговитрат на процес тепломасообміну.

Opportunities. Додатковою можливістю для досягнення мети, поставленої в роботі, є комп'ютерне моделювання турбулентних збурень в потоці повітря біля поверхні обтюратора з наступним розрахунком середньої амплітуди пульсацій швидкості повітря та визначенням величини енергії активації ІнтМО. Така інформація надасть можливість точно враховувати під час вибору способу створення флуктуації в обтюраторі термостата енергетичні витрати на ефект ІнтМО та особливості його технічної реалізації, що сприятиме підвищенню енергоефективності апаратів з ІнтМО та зменшенню вартості їх виробництва.

Threats. Складності у впровадженні отриманих результатів полягають у тому, що під час розробки апаратів з ІнтМО та вибору раціональних значень такого його керуючого параметру як швидкість потоку повітря відносно обтюраторів, слід враховувати не тільки енергоефективність ІнтМО, а ще й витрати пов'язані із забезпеченням відповідної швидкості потоку повітря. Мається на увазі, що збільшення інтенсивності ефекту ІнтМО на 15...20% тягне за собою додаткові капітальні витрати через технічне ускладнення або збільшення потужності пристроїв для забезпечення відповідної швидкості потоку повітря. Однак доцільність такої операції може бути виправдана технічним потенціалом підприємства, на якому впроваджується дане дослідження.

8. Висновки

1. Дослідженнями кінетики температури ККПТ всередині термостата під час ефекту ІнТМО встановлено, що на них можна виділити 5 характерних ділянок, що відповідають різним етапам протікання даного ефекту. Встановлено, що тривалість ділянок, які відповідають «запуску», «протіканню» та «закінченню» ефекту ІнТМО залежить від швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, та може змінюватись при збільшенні швидкості від 4 до 9 м/с на 5...60 %, а при збільшенні від 4 до 13 м/с – на 48...150 %.

2. Розрахунками теплового балансу під час ІнТМО встановлено, що за даного ефекту наявний дефіцит теплоти в термостаті, який складає 25...30% від необхідної кількості. Відзначено, що даний факт свідчить про виконання роботи над системою, яка індукується потоком повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, при цьому зовнішня робота потоку повітря, який рухається відносно обтюратора, забезпечує по величині енергію активації E_A ефекту ІнТМО. Доведено, робота потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, є тим керуючим параметром, за допомогою якого організовується «запуск» ІнТМО.

3. Дослідженнями кінетики потоку теплоти, що витрачається всередині термостата, за швидкості потоку повітря від 4 до 13 м/с, який рухається відносно обтюраторів, встановлено, що інтенсивність ІнТМО може регулюватися даним керуючим параметром у межах 15...20 %.

Література

1. Natsionalnyi plan dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2020 roku [Electronic resource] / State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. – Available at: http://sae.gov.ua/sites/default/files/documents/Presentation_NAPRES_Norw_OCT_3_ukr.pdf. – 10.01.2017.

2. Shuvaev, A. V. The transformational model of agriculture and the problems of social, ecological and economic [Text] / A. V. Shuvaev // Economy and entrepreneurship. – 2013. – No. 9. – P. 405–409.

3. Naumov, O. B. Institutional regulation's strategic priorities of the food industry innovative development [Text] / O. B. Naumov, S. S. Stoianova-Koval // The Scientific Papers of the Legislation Institute of the Verkhovna Rada of Ukraine. – 2017. – No. 1. – P. 131–137.

4. Krisanov, D. F. The system guarantees safety and quality of food products in Ukraine: retrospective reform and the level of formation of the European dimension [Text] / D. F. Krisanov // Economic & food security of Ukraine. – 2013. – No. 1. – P. 64–72.

5. Chernelevskyy, L. Features and prospects of international quality standards in the processing industry [Text] / L. Chernelevskyy, N. Kudrenko // Scientific works of National university of food technologies. – 2014. – Vol. 20, No. 4. – P. 30–37.

6. Ng, K. C. Improving Overall Equipment Effectiveness (OEE) through the six sigma methodology in a semiconductor firm: A case study [Text] / K. C. Ng, K. E. Chong, G. G. G. Goh // 2014 IEEE International Conference on Industrial

Engineering and Engineering Management. – IEEE, 2014. – P. 833–837. doi:[10.1109/ieem.2014.7058755](https://doi.org/10.1109/ieem.2014.7058755)

7. Behdin, S. Effectiveness of Laser Application for Periodontal Surgical Therapy: Systematic Review and Meta-Analysis [Text] / S. Behdin, A. Monje, G.-H. Lin, B. Edwards, A. Othman, H.-L. Wang // Journal of Periodontology. – 2015. – Vol. 86, No. 12. – P. 1352–1363. doi:[10.1902/jop.2015.150212](https://doi.org/10.1902/jop.2015.150212)

8. Danilevicius, P. Laser 3D micro/nanofabrication of polymers for tissue engineering applications [Text] / P. Danilevicius, S. Rekstyte, E. Balciunas, A. Kraniauskas, R. Sirmenis, D. Baltriukiene, V. Bukelskiene, R. Gadonas, V. Sirvydis, A. Piskarskas, M. Malinauskas // Optics & Laser Technology. – 2013. – Vol. 45. – P. 518–524. doi:[10.1016/j.optlastec.2012.05.038](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.05.038)

9. Pogozhikh, M. The development of an artificial energotechnological process with the induced heat and mass transfer [Text] / M. Pogozhikh, A. Pak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, No. 8 (85). – P. 50–57. doi:[10.15587/1729-4061.2017.91748](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91748)

10. Pogozhikh, M. I. Hidrotermichna obrobka krup iz vykorystanniam pryntsyviv sushinnia zmishanym teplopidvodom [Text]: Monograph / M. I. Pogozhikh, A. O. Pak, M. V. Zhrebkin, A. V. Pak. – Kharkiv: KhDUKht, 2014. – 170 p.

11. Strogatz, S. Non-linear Dynamics and Chaos: With applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering [Text] / S. Strogatz. – Westview Press, 2001. – 515 p.

12. Ouannas, A. Generalized synchronization of different dimensional chaotic dynamical systems in discrete time [Text] / A. Ouannas, Z. Odibat // Nonlinear Dynamics. – 2015. – Vol. 81, No. 1-2. – P. 765–771. doi:[10.1007/s11071-015-2026-0](https://doi.org/10.1007/s11071-015-2026-0)

13. Chen, Y. Analysis of the influences of gas temperature fluctuation on the soot formation and oxidation [Text] / Y. Chen, J. Zhang // Fuel. – 2013. – Vol. 111. – P. 492–495. doi:[10.1016/j.fuel.2013.03.077](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.03.077)

14. Gu, X. Experimental study of pressure fluctuation in a gas-solid cyclone separator [Text] / X. Gu, J. Song, Y. Wei // Powder Technology. – 2016. – Vol. 299. – P. 217–225. doi:[10.1016/j.powtec.2016.05.028](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.028)

15. Noskov, A. S. Visualization of air flow in vortex tube using different turbulence models [Text] / A. S. Noskov, V. N. Alekhin, A. V. Khait, N. M. Anoshin // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2015. – No. 1. – P. 43–48.

16. Safaei, M. Numerical modeling of turbulence mixed convection heat transfer in air filled enclosures by finite volume method [Text] / M. Safaei, M. Goodarzi, M. Mohammadi // The International Journal of Multiphysics. – 2011. – Vol. 5, No. 4. – P. 307–324. doi:[10.1260/1750-9548.5.4.307](https://doi.org/10.1260/1750-9548.5.4.307)

17. Kentish, S. Applications of Power Ultrasound in Food Processing [Text] / S. Kentish, H. Feng // Annual Review of Food Science and Technology. – 2014. – Vol. 5, No. 1. – P. 263–284. doi:[10.1146/annurev-food-030212-182537](https://doi.org/10.1146/annurev-food-030212-182537)

18. Sani, A. M. Ultrasound applications for the preservation, extraction, processing and quality control of food [Text] / A. M. Sani, M. Sardarodiyani // BioTechnology: An Indian Journal. – 2016. – Vol. 12, No. 4. – P. 162–174.

19. Mohammadi, V. Ultrasonic techniques for the milk production industry [Text] / V. Mohammadi, M. Ghasemi-Varnamkhasti, R. Ebrahimi, M. Abbasvali // Measurement. – 2014. – Vol. 58. – P. 93–102. doi:[10.1016/j.measurement.2014.08.022](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.022)

20. Nikonova, A. S. Investigation of the method of reception of liquid for smoking on the basis acoustically generated aerosol [Text] / A. S. Nikonova, A. A. Ivaney // Scientific journal NRU ITMO. Series «Processes and Food Production Equipment». – 2014. – No. 4. – P. 161–168.

21. Pogozhikh, M. Technical implementation of the equipment using the process of induced heat and mass transfer [Text] / M. Pogozhikh, A. Pak, A. Pak, M. Zhrebkin // ScienceRise. – 2017. – Vol. 6. – P. 29–33. – doi:[10.15587/2313-8416.2017.1036](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.1036)