

А.О. Пак
А.В. Пак
М.І. Погожих
В.М. Онищенко
Н.В. Сметанкіна

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО
ТЕПЛОМАСООБМІНУ**

Монографія

Харків
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

А.О. Пак
А.В. Пак
М.І. Погожих
В.М. Онищенко
Н.В. Сметанкіна

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО
ТЕПЛОМАСООБМІНУ**

Монографія

Харків
ДБТУ
2023

УДК 621.365.5:664

ББК 3

Н-34

Рецензенти:

професор кафедри технології зерна і комбікормів Одеського національного технологічного університету д-р техн. наук, проф. Станкевич Г.М.;

завідувач лабораторії процесів тепломасообміну в теплотехнологіях відділу тепломасопереносу в теплотехнологіях Інституту технічної теплофізики НАН України, д-р техн. наук, гол. наук. співр. Петрова Ж.О.

Рекомендовано до друку вченою радою Державного біотехнологічного університету (протокол № 6 від 14 лютого 2023 р.).

Н-34 **Наукові** основи ефекту індукованого тепломасообміну: монографія / А.О. Пак, А.В. Пак, М.І. Погожих, В.М. Онищенко, Н.В. Сметанкіна. – Харків : ДБТУ, 2023. – 144 с.

У монографії розглянуто феноменологічну гіпотезу ефекту індукованого тепломасообміну. Сформульовані необхідні та достатні умови для спостереження і регулювання ефекту індукованого тепломасообміну. На основі феноменологічних балансних рівнянь отримано рівняння ефекту індукованого тепломасообміну. Експериментальними дослідженнями доведено основні положення гіпотези ефекту індукованого тепломасообміну та виявлено можливості його використання для виконання низки теплових операцій переробної промисловості. Теоретичними дослідженнями виявлено особливості механізму та рушійні сили тепломасообміну під час індукованого тепломасообміну, які дозволяють керувати цим ефектом.

Матеріали монографії будуть цікавими науковим співробітникам і практичним працівникам харчових та переробних галузей промисловості.

УДК 621.365.5:664

ББК 3

© А.О. Пак, А.В. Пак, М.І. Погожих,
В.М. Онищенко, Н.В. Сметанкіна, 2023

© Державний біотехнологічний
університет, 2023

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ІНДУКОВАНІ ТЕПЛО- ТА МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ	
1.1. Обґрунтування поняття індукованих процесів.....	8
1.2. Особливості протікання процесу сушіння змішаним теплопідводом.....	11
РОЗДІЛ 2. ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА ГІПОТЕЗА ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ	
2.1. Суть феномена ефекту індукованого тепломасообміну, необхідні та достатні умови для його спостереження.....	13
2.2. Балансні рівняння ефекту індукованого тепломасообміну для випадку флуктуації концентрації частинок рідини в обтюраторі.....	17
2.3. Методика організації та спостереження ефекту індукованого тепломасообміну.....	23
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ	
3.1. Аналіз процесу тепломасообміну в термостаті методом фазового простору.....	28
3.2. Системна вода сировини в термостаті, як параметр порядку ефекту індукованого тепломасообміну.....	37
3.3. Експериментальні дослідження ефекту індукованого тепломасообміну за різної його організації.....	42
3.3.1. Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини.....	43
3.3.2. Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну за наявності твердої, рідкої та газової фаз всередині термостата з розривами між фазами.....	49
3.3.3. Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну для сировини з газонепроникними включеннями.....	55
3.3.4. Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого тепломасообміну як функція температури термостата.....	61
3.3.5. Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла у термостаті під час індукованого тепломасообміну як функція координат.....	63
3.3.6. Кінетика вологовмісту колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого тепломасообміну як функція температури термостата та відстані від його внутрішньої стілки.....	67

3.3.7. Фазові траєкторії системи під час ефекту індукованого тепломасообміну за різних температур термостата та координати.....	71
3.3.8. Вплив швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, на характер індукованого тепломасообміну.....	75
3.3.9. Вплив на характер ефекту індукованого тепломасообміну кута обдування обтюраторів потоком повітря.....	88
3.3.10. Вплив на характер ефекту індукованого тепломасообміну розмірів внутрішнього виділеного об'єму термостата.....	93
РОЗДІЛ 4. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ	
4.1. Наближене розв'язання задач теорії тепломасообміну з використанням методу R-функцій.....	96
4.1.1. Розв'язок задачі про розподіл температури і вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми, що містить три фази.....	97
4.1.2. Розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата паралелепіпедної форми, що містить три фази.....	105
4.2. Математична модель розвитку потужності дисипативних структур під час індукованого тепломасообміну.....	114
4.2.1. Постановка задачі зі знаходження функції розподілення потужності дисипативних структур з використанням рівняння теплопровідності.....	114
4.2.2. Теплопровідність, теплоємність та густина колоїдного капілярно-пористого тіла всередині термостата як функції температури термостата та координати.....	116
4.2.3. Функція розвитку потужності дисипативних структур в колоїдному капілярно-пористому тілі всередині термостата під час індукованого тепломасообміну.....	119
ВИСНОВКИ.....	124
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	126
ДОДАТКИ.....	137

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕПР – електронний парамагнітний резонанс;
ІнТМО – індукований тепломасообмін;
ЗТП – змішаний теплопідвод;
ККПТ – колоїдне капілярно-пористе тіло;
КПТ – капілярно-пористе тіло;
КТ – колоїдне тіло;
НВЧ – надвисока частота;
ТМО – тепломасообмін;
ФЄ – функціональна ємність.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку галузей промисловості країн світу існує необхідність пошуку наукового обґрунтування рішень проблем ефективного використання енергетичних ресурсів за умови забезпечення вимог до екологічності виробництва. Особливий інтерес із цієї точки зору становлять процеси тепло- та масообміну (ТМО), які широко застосовуються в харчовій і переробній промисловості. Завдяки значному внеску в розвиток теорії ТМО таких класичних вчених, як О.В. Ликов, А.С. Гінзбург, М.О. Гришин, Г.К. Філоненко та сучасних вітчизняних і зарубіжних науковців, таких як А.А. Долинський, Ю.Ф. Снежкін, А.А. Халатов, Б.І. Басок, К.Д. Малецька, Ж.О. Петрова, Г.М. Станкевич, М.І. Погожих, В.О. Потапов, О.Г. Бурдо, А.М. Поперечний, В.М. Атаманюк, О.О. Завалій, В.В. Шутюк, С.П. Рудобашта, В.Ф. Сорочинський, О.І. Расев та ін., існує можливість знаходити нові шляхи в напрямі інтенсифікації цих процесів, зменшення питомих енерговитрат, удосконалення обладнання та підвищення якості кінцевої продукції. При цьому перспективним є пошук таких комбінацій потенціалів перенесення, за яких процеси перенесення не протікають самовільно, а лише за умови їх індукування. Для таких індукованих процесів один або декілька параметрів системи не мають «спорідненості» з навколишнім середовищем і прийняти рівноважне значення можуть тільки за умови подолання деякого енергетичного активаційного бар'єра. Апарати, створені на використанні таких процесів, як правило, характеризуються високою енергоефективністю та екологічністю. Таким чином, пошук і розробка теоретичних основ нових індукованих процесів та практична реалізація апаратів із їх використанням є досить пріоритетними напрямками всесвітньої політики та політики України у сфері енергоефективності.

Одним із таких індукованих процесів є процес, в основі якого лежить ефект індукованого тепломасообміну (ІнТМО). До сьогодні ефект ІнТМО отримав теоретичний розвиток лише в межах реалізації процесу сушіння харчової сировини (сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння)). Однак залишається недостатньо повно описаним фізичний механізм низки особливостей протікання ефекту ІнТМО, пояснити які, виходячи з теоретичних основ, наведених у роботах з його дослідження, неможливо. Розвинення теоретичних основ ефекту ІнТМО обумовлюють актуальність 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.

Дослідження представлені в монографії виконувались відповідно до тематичних планів наукових досліджень кафедри фізико-математичних та інженерно-технічних дисциплін ХДУХТ у межах держбюджетної теми № 2-11 ФБ «Дослідження стану та структури вологи в харчових продуктах методами ЯМР та ЕПР-спектроскопії» (0108U001333), бюджетних тем № 06-11-13 Б «Наукові обґрунтування енергоефективних процесів харчової промисловості» (0110U006618) та № 13-14-16 Б «Удосконалення фізичних

методів аналізу технологій та процесів харчових виробництв» (0113U008396), госпдоговірних тем № 31-14-15 Д «Аналіз енергоефективності механічних та теплових процесів під час переробки сільськогосподарської сировини» (0114U005577) та № 10-16-17 Д «Розробка раціональних режимів гідротермічної обробки рослинної сировини способом з використанням індукованого тепломасообміну» (0116U008874).

Основні положення наведені в монографії доповідалися, обговорювалися та були схвалені на: Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2008 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 70-річчю з Дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ Беляєва М.І. «Стратегічні напрями розвитку підприємств харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі» (м. Харків, 2008 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Техніка та технології харчових виробництв» (м. Могилів, 2009 р.); Міжнародному науково-технічному семінарі «Актуальні проблеми сушіння та термовологісної обробки матеріалів» (м. Вороніж, 2010 р.); VI Міжнародній конференції «Strategy of Quality in Industry and Education» (м. Варна, 2010 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергозберігаючі технології (СЕТТ-2011)» (м. Москва, 2011 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг» (м. Харків, 2011–2013 рр.); Міжнародній науковій конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації» (м. Київ, 2012 р.); Міжнародному науковому форумі «Харчові інновації та біотехнології» (м. Кемерово, 2013 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Вода в харчових продуктах і для харчових продуктів» (м. Харків, 2013 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (м. Харків, 2014–2016 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу ХДУХТ «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність» (м. Харків, 2017 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції, присвяченій 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини» (м. Харків, 2017 р.).

РОЗДІЛ 1. ІНДУКОВАНІ ТЕПЛО- ТА МАСООБМІННІ ПРОЦЕСИ

1.1. Обґрунтування поняття індукованих процесів

Інтенсивний розвиток галузей промисловості, індустріалізація країн світу призвели до необхідності пошуку наукового обґрунтування рішень проблем ефективного використання енергетичних ресурсів при дотриманні зростаючих вимог до екологічності виробництв. Усередині проблеми варто виділити технологічні процеси [1, 2], тобто такі штучні дії людини, які, через певні послідовності законів природи, приводять до кінцевого продукту за рахунок використання й (або) перетворення одних видів енергії в інші (I початок термодинаміки) [3]:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1.1)$$

де Q – теплота, Дж;

U – внутрішня енергія, Дж;

A – робота, Дж.

Але використання підходу тільки з точки зору закону збереження й перетворення енергії (1.1) недостатньо, оскільки він не «визначає» напрямку перерозподілу енергії, маси, зарядів, а лише встановлює баланс. За спрямованість же процесів, для встановлення цього балансу, відповідає II початок термодинаміки – закон зростання ентропії [4]:

$$dS > 0, \quad (1.2)$$

де S – ентропія, Дж/К.

Тоді, якщо розглядати енергетичний баланс усередині ізольованої системи, то цей баланс може бути стійким, якщо виконується (1.2): виробництво ентропії прагне до нуля, а потенціальна (вільна) енергія E_n прагне до мінімального значення [5]:

$$\frac{dS}{d\tau} \rightarrow 0; E_n \rightarrow \min. \quad (1.3)$$

Можна вважати, що умови (1.1-1.3), а також закони збереження маси, заряду – є обмежувальною областю застосування знань людини для рішення поставленої проблеми [6].

Необхідно відзначити, що будь-які перетворення теплоти, є необоротними, тобто призводять до зростання ентропії (безладу). Саме цей факт в основному й визначає ефективність технологічних процесів, де протікають фазові переходи речовини I роду [7].

При цьому перспективним є пошук таких комбінацій потенціалів перенесення, за яких процеси перенесення не протікають самовільно, а тільки

за умови їх індукування. Для таких індукованих технологічних процесів початок процесу в природних умовах не відповідає виразу (1.3), наприклад, технології вирощування кристалів [8], напівпровідники [9, 10], лазери, каталітичні реакції й т.ін. Для цих випадків загальним є те, що хоча б один або декілька параметрів або властивостей системи не мають «спорідненості» з навколишнім середовищем і прийняти рівноважне значення можуть тільки, при подоланні деякого енергетичного активаційного бар'єра – E_A . Такі процеси, як правило, характеризуються високою енергоефективністю і екологічністю [11]. Таким чином, пошук і розробка теоретичних основ індукованих технологічних процесів є актуальним завданням в рамках всесвітньої політики та політики України в сфері енергоефективності [12].

Особливий інтерес, у цьому плані, представляють процеси тепло- та масообміну, які широко застосовуються у харчовій та переробній промисловості [13, 14]: сушіння, випарювання та концентрування, перегонка та ректифікація.

При цьому слід відмітити, що більшість способів організації ТМО для виконання означених технологічних операцій, які використовуються під час обробки сировини у харчовій та переробній промисловості – це інтенсифікація природних процесів за рахунок створення певних умов.

Доказом тому, може служити аналіз (1.2):

$$dS = \frac{\delta Q}{T} = \frac{r \cdot \delta m}{T} + \frac{\delta E_B}{T}, \quad (1.8)$$

де r – питома теплота фазового переходу, Дж/кг;

δm – маса води, що перейшла з одного агрегатного (фазового) стану в інший, кг;

δE_B – баластна енергія для створення умов і забезпечення фазового переходу, Дж;

T – абсолютна температура, К.

Перший доданок $\frac{r \delta m}{T}$ у формулі (1.8) визначається витратами енергії безпосередньо на перехід вологи у газовий стан, причому він визначається двома чинниками. Перший природний чинник визначається законами збереження маси та енергії, законами термодинаміки. При цьому, наприклад, для процесу сушіння, кількість вологи, що випаровується, обмежена рівноважним вологовмістом сировини $w_p(\varphi)$, який в свою чергу обмежений вологістю оточуючого середовища (наприклад, під час конвективного сушіння – вологістю сушильного агента) φ . Другий чинник визначається температурою T та вологістю оточуючого середовища φ , які можна штучно змінювати для, наприклад, скорочення тривалості процесу масообміну, або зменшення рівноважного вологовмісту.

Необхідно відмітити, що під час будь-якого процесу швидкість зміни ентропії по мірі досягнення рівноваги зменшується, тобто [15-18]:

$$\frac{dS}{d\tau} < 0. \quad (1.9)$$

Таким чином, більшість способів організації процесу ТМО направлені лише на збільшення швидкості зміни ентропії шляхом збільшення або зменшення штучних складових у формулі (1.8). Для даних способів існує можливість не скільки керувати процесом, скільки прискорювати його, тому їх слід вважати інтенсифікацією природного ТМО [13].

Тоді, в ідеальному випадку, для фазових переходів під час ТМО варто вираз (1.8) трансформувати в:

$$dS = \frac{r\delta m}{T} + \frac{\delta E_A}{T}. \quad (1.10)$$

При цьому, пошук наукових рішень області енергетичної ефективності діяльності людини слід шукати з умови:

$$E_A < E_B. \quad (1.11)$$

Але оскільки зміст E_A – це деяка енергія активізації, яка є бар'єром, то до індукованих способів організації ТМО слід відносити такі тепломасообмінні процеси, за яких можливим є керування:

1. початком (запуском) процесу;
2. підтримкою процесу;
3. закінченням процесу.

Одним із таких індукованих способів організації ТМО є сушіння змішаним теплопідводом (ЗТП-сушіння) [19]. ЗТП-сушіння засноване на створенні умов для активної гідродинамічної і теплової взаємодії агента сушіння з об'єктом сушіння. «Індукованість» ЗТП-сушіння полягає в тому, що при дотриманні необхідних для реалізації ЗТП-процесу умов між спеціальним тепломасообмінним модулем (ТМО-модулем) з вологою сировиною і сушильним агентом відбувається інтенсивний масообмін [20, 21].

Під час ЗТП-сушіння використовуються такі поняття як «запуск» і «зрив» процесу. При цьому керувати «запуском» і «зривом», а також характером процесу зневоднення можна умовно виділеними зовнішніми і внутрішніми чинниками [20]. Особливо важливим є те, що варіювання зовнішніми і внутрішніми чинниками дає можливість керувати питомими енерговитратами на процес зневоднення, інтенсивністю ТМО й якістю отримуваної продукції [22-29].

В даний час процес ЗТП-сушіння досліджений в 2 докторських дисертаціях [20, 21] і 7 кандидатських [22-29]. Завдяки роботам Погожих М.І., Потапова В.О., Цуркана М.М., Сомова О.С., Жеребкіна М.В.,

Якушенка Є.М. отримано достатньо велику кількість експериментальних результатів для різної сировини та для різних апаратних реалізацій даного способу зневоднення, розвинуто теорію процесу ТМО під час ЗТП-сушіння.

Роботами з дослідження ЗТП-сушіння встановлено, що даний спосіб зневоднення має принципові відмінності, як у зовнішніх умовах протікання процесу, так і поводженням ККПТ, що знаходиться всередині спеціального ТМО-модуля – функціональної ємності (ФЄ).

1.2. Особливості протікання процесу сушіння змішаним теплопідводом

Необхідно відмітити, незважаючи на велику кількість експериментальних даних для різної сировини і для різних апаратних реалізацій даного способу сушіння, залишається недостатньо повно описаним фізичний механізм низки особливостей протікання ЗТП-процесу. Основні відомі на теперішній час особливості ЗТП-процесу та факти, що спостерігаються під час зневоднення даним способом, які потребують уточнення та пояснення, наступні:

1. наявність «запуску», «блокування», «зриву» ЗТП-процесу;
2. слабка залежність тривалості сушіння від виду сировини;
3. істотна різниця в тривалості сушіння під час використання різних ФЄ: тривалість сушіння в експериментальних циліндричних ФЄ (скляні трубочки) менша у порівнянні із сушінням в типових промислових ФЄ (паралелепіпедна);
4. запуск ЗТП-сушіння будь-якої сировини у будь-якій ФЄ відбувається лише за умови обдування зазору на поверхні ФЄ. При цьому існує залежність характеру ЗТП-процесу від кута обдування, швидкості сушильного агента, наявності турбулізаторів;
5. існують певні вимоги до дисперсності сировини та способу її укладання, а відповідно і до величини порового простору;
6. рециркуляція сушильного агента всередині сушарки (тобто вологість сушильного агента) фактично не впливає на тривалість сушіння;
7. криві швидкості сушіння не мають ділянки постійної швидкості сушіння;
8. кінетика температури сировини має характерні локальні максимуми і мінімуми, що принципово відрізняє даний спосіб від інших відомих способів зневоднення сировини;
9. під час ЗТП-сушіння має місце градієнт температури величиною від 20 до 50% від температури сушіння на товщині сировини 5...10 мм;
10. не знайдений спосіб теплопідведення, який надав би можливості позбутися мінімуму кінетики температури під час зневоднення;
11. зневоднення за умови «запуску» та підтримання ЗТП-процесу відбувається і в разі масообмінних зазорів з одного боку ФЄ;
12. мінімум температури спостерігається і під час сушіння з температурою сушильного агента, яка дорівнює температурі газового середовища лабораторного або виробничого приміщення;
13. ЗТП-процес характеризується певною інертністю;

14. під час сушіння ККПТ з різними рідинами (різні теплофізичні властивості: різні величини питомої теплоти пароутворення, питомої теплоємності та температури кипіння) відбувається зміщення екстремумів кінетики температури;

15. сушена продукція характеризується визначеною якістю: визначена пористість, низький кінцевий вологовміст за один прохід, причому саме «конкретний» вологовміст, а не будь-який проміжний. За умови передчасної зупинки процесу сировина у ФЄ представляє собою локальні об'єми, які мають вологовміст починаючи від початкового та закінчуючи кінцевим;

16. зменшення співвідношення ширини масообмінних зазорів до ширини теплообмінних поверхонь вироджує ЗТП-сушіння в конвективне.

17. під час ЗТП-сушіння ККПТ з різною теплопровідністю відбувається зміщення локальних максимуму і мінімуму кінетики температури відносно тривалості сушіння;

18. для запуску ЗТП-процесу необхідний певний вологовміст сировини;

19. сировина повинна мати певну пористість, вона повинна створювати певний опір повітрю;

20. коливання температури сушильного агента різко відбиваються на кінетиці температури сировини, особливо в період збільшення швидкості сушіння.

Пояснити наведені особливості процесу ЗТП-сушіння, виходячи із теоретичних основ даного процесу, наведених в роботах [20-29], не представляється можливим.

Однак дослідження ЗТП-сушіння, які проведені останнім часом та наведені в даній роботі, а також узагальнення експериментальних та теоретичних даних із вище означених робіт, дають можливість стверджувати що ЗТП-процес є окремим випадком більш загального ефекту. Даний ефект має назву – індукований тепломасообмін (далі ІнТМО) [30].

Отримання нових експериментальних даних під час дослідження ефекту ІнТМО та аналіз отриманої бази даних щодо процесу ТМО під час його окремого випадку – ЗТП-сушіння, надали можливість доповнити та узагальнити інформацію про фізичний механізм ефекту ІнТМО. Узагальнення інформації та розробка феноменологічних фізичних і фізико-математичних моделей, що описують кінетичні та динамічні закономірності, механізм та рушійні сили процесу ТМО, надали можливість розвинути теоретичні основи ефекту ІнТМО та пояснити його особливості описані вище. Результатами розвитку теоретичних основ ефекту ІнТМО та його моделювання є, по-перше, виявлення можливостей його використання у різних технологіях та техніці, по-друге, ефективне керування процесом ТМО у відповідності до обраної мети його застосування з отриманням заданих результатів або продукції із заданими властивостями.

РОЗДІЛ 2. ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА ГІПОТЕЗА ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ

Узагальнення даних, наведених в роботах [20-29], та аналіз результатів, які будуть представлені в монографії, дозволяють стверджувати, що процес ЗТП-сушіння є окремим випадком більш загального ефекту – ефекту індукованого тепломасообміну [30].

Скористаємось деякими результатами, отриманими в згаданих роботах, та основними положеннями нерівноважної термодинаміки та синергетики для розкриття суті ефекту ІНТМО та формулювання наукової гіпотези роботи.

Введемо поняття динамічної системи [31-35]. Під динамічною системою розуміють будь-який об'єкт або процес, для якого однозначно визначене поняття стану, як сукупності деяких величин у даний момент часу, та заданий закон, що описує зміну початкового стану з часом.

2.1. Суть феномена ефекту індукованого тепломасообміну, необхідні та достатні умови для його спостереження

Під динамічною системою під час ефекту ІНТМО розуміється система, що складається у загальному випадку із термостата, виділений внутрішній об'єм якого утримує рідину та газ, може утримувати сухі речовини. Теплоносієм та масоносієм є зовнішні тіла. Під термостатом [36] розуміється система, температура якої підтримується постійною за рахунок створення необхідних та достатніх умов для протікання процесів, результатом яких є підтримка постійної температури внутрішнього виділеного об'єму термостата.

Таким чином, є термостат, його виділений внутрішній об'єм V_m відокремлюється стінкою, що має площу S_m . Температура термостата T_m підтримується постійною. У внутрішньому об'ємі термостата знаходиться рідина об'ємом V_p і газ об'ємом V_g , який є сумішшю повітря і пари рідини. Також, як відмічено вище, термостат може містити суху речовину об'ємом $V_{c.p.}$ нерозчинну або частково розчинну у рідині, що проявляє або ні ліофільну активність, має або ні певну структуру (будову).

Тиск в термостаті постійний і дорівнює атмосферному p . З атмосферою (навколишнім середовищем будь-якої температури) термостат сполучається через обтюратор. Під обтюратором розуміється пристрій, який служить для обмеження доступу газу навколишнього середовища до внутрішнього об'єму термостата. Під час ІНТМО обтюратор являє отвір в термостаті, з розміщеним в ньому КПТ, об'єм якого значно менший внутрішнього об'єму термостата $V_{обт} \ll V_m$. Площа поверхні обтюратора значно менша за площу поверхні термостата $S_{обт} \ll S_m$.

Таким чином, 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 (рис. 2.1).

Пароповітряне середовище (газова суміш) всередині термостата під час ІнтМО вважається суцільним за парціальним тиском пари рідини. Під суцільним середовищем [37-39] розуміється неперервна субстанція, для якої будь-яка мала її частина (надмолекулярного рівня) має властивості цілого. Використання поняття суцільного середовища виключає з розгляду молекулярний рух (тобто враховуються тільки середні показники молекулярного руху, наприклад, тиск, густина і температура) і вивчається тільки рух, викликаний зовнішніми силами. Найменший об'єм суцільного середовища всередині термостата значно більший у порівнянні з міжмолекулярними відстанями, але значно менший об'єму термостата. Всі характеристики такого суцільного середовища є неперервними функціями просторових координат і часу, крім границь розділу з твердою або рідкою фазою. При цьому справедливими для суцільного середовища будуть: рівняння руху або рівноваги середовища, одержувані як висновки основних законів механіки; рівняння нерозривності; закон збереження енергії [37].



Рис. 2.1. Рух системи від нестійкої рівноваги до стійкої під час ІнтМО

Інтегрально всередині термостата може перебувати три фази – тверда, рідка і газоподібна, які спочатку знаходяться між собою в рівновазі. Суцільне газове середовище за парціальним тиском пари рідини (далі – суцільне газове середовище) утворюється через те, що стінки термостата виконані з паронепроникного матеріалу, а масообмін з навколишнім середовищем

можливий тільки через обтюратор, площа якого, принаймні, на порядок менша площі поверхні термостата (від якої до внутрішнього середовища термостата може надходити теплота), що свідчить про «затиснуті» умови. Відхилення будь-якого параметру від рівноважного значення примушує суцільне середовище протидіяти його зміні. Тобто, якщо з будь-яких причин відбудеться зміна рівноважного вмісту пари рідини в пароповітряній суміші всередині термостата, це викличе зміну кількості, складу і розподілу рідини за рахунок її переходу з рідкого стану в газовий. Перехід рідини в газовий стан відбувається шляхом дифузії пари в суцільне газове середовище. Таким чином, оскільки суцільне газове середовище знаходиться всередині термостата, то парціальний тиск пари рідини даного середовища дорівнює тиску насиченої пари рідини за даної температури.

Ефект ІнтМО спостерігається, якщо створити флуктуації, наприклад, концентрації частинок пари рідини в суцільному газовому середовищі всередині термостата, шляхом винесення частини суцільного газового середовища через обтюратор. На таку флуктуацію система «відреагує» відновленням парціального тиску пари рідини до рівня насиченої пари за рахунок переходу рідкої фази в газу. Результатом описуваного процесу є видалення рідкої фази з термостата, а саме – ефект ІнтМО [30].

При цьому обтюратор термостата не містить або частково містить рідину і, в загальному випадку, характеризується коефіцієнтом фільтрації потоку газу k_ϕ , що задовольняє умові:

$$-k_\phi \nabla p \cong j_{\text{диф}}, \quad (2.1)$$

де $j_{\text{диф}}$ - дифузійний потік газу через обтюратор, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

∇p – градієнт тиску в обтюраторі, Па/м .

При цьому для Δp в обтюраторі виконується умова:

$$\Delta p \ll p_\infty. \quad (2.2)$$

Для активації ефекту ІнтМО використовується механічна енергія потоку повітря, який рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора (енергія активації E_A):

$$dE_A = d(p_n V) + \xi \cdot dE_k, \quad (2.3)$$

де ξ – безрозмірний коефіцієнт, що показує частину кінетичної енергії, яка розсіюється в об'ємі обтюратора: $\xi < 1$;

p_n – повний тиск потоку повітря, Па .

Очевидним є те, що при цьому $E_A < E_B$, оскільки мова йде про механічну енергію потоку, а не про суму механічної енергії і тепловмісту, як під час інтенсифікації природних процесів.

Перераховані умови є необхідними для спостереження ефекту ІнтМО, який виникає на шляху досягнення системою стійкої рівноваги. При цьому стійка рівновага досягається тільки за умови, коли маса рідини в термостаті буде дорівнювати нулю: $m_p=0$.

Додатковими (достатніми для спостереження і регулювання ефекту) є умови:

1. Наявність флуктуацій параметрів газу в об'ємі обтюлятора.
2. Теплоємність термостата повинна бути настільки великою, щоб виконувалася умова:

$$m_m c_m \Delta T_m \gg \Delta Q \text{ при } \Delta T_m \rightarrow 0, \quad (2.4)$$

де ΔQ – кількість теплоти, «винесеної» із термостата з газом, що утримує пару рідини, яка випарувалася за тривалість спостереження $\Delta \tau$.

3. Ефект спостерігається за кінцевий (лабораторний) проміжок часу $\Delta \tau$:

$$\Delta \tau \ll \Delta \tau_{\text{диф}}, \quad (2.5)$$

де $\Delta \tau_{\text{диф}}$ – тривалість спостереження, впродовж якої термостат втратив масу рідини Δm_p без флуктуацій параметрів газу в об'ємі обтюлятора, тобто за рахунок дифузійного потоку маси.

4. Флуктуації в об'ємі обтюлятора $V_{\text{обт}}$ можуть бути просторові і (або) за часом. Однак якщо вважати, що газ в цьому об'ємі за властивостями близький до ідеального, то стан його описується замкненими лініями по координатам p, V, T, v з центром k , тобто:

$$\delta \left(\frac{p}{nT} \right) \rightarrow k, \quad (2.6)$$

де k – стала Больцмана.

При цьому флуктуації δ , в даному випадку, створюються зовнішнім по відношенню до термостата середовищем, а релаксація відбувається за рахунок внутрішньої системи термостата і його тепловмісту. Виходячи з умови нескінченно великої ентальпії термостата, релаксація флуктуацій в обтюляторі буде залежати від теплофізичних властивостей газової і рідкої фаз термостата. При цьому релаксація флуктуацій, в будь-якому випадку, буде супроводжуватися явищами фазового переходу, перенесення теплоти і маси, а, отже, виникненням відповідних рушійних сил: градієнтів температури і парціального тиску повітря і пари рідини в об'ємі термостата V_m .

5. За флуктуації температури на границі розділу «обтюратор – навколишнє середовище», обтюратор повинен мати здатність «виносу» рідини за рахунок, наприклад, капілярних сил в навколишнє середовище.

6. Температура термостата може бути більшою за температуру кипіння рідини, при цьому температура рідини за ефекту ІНТМО знаходиться всередині граничного циклу:

$$T_{крисст} < T_p < T_{кип}, \quad (2.7)$$

де $T_{крисст}$ і $T_{кип}$ – температури кристалізації та кипіння рідини за даного тиску p (термостата і навколишнього середовища).

В цьому і полягає, як описано вище, спостережуваний ефект ІНТМО – рух системи від нестійкої до стійкої рівноваги, що супроводжується видаленням рідкої фази з об'єму термостата.

2.2. Балансні рівняння ефекту індукованого тепломасообміну для випадку флуктуації концентрації частинок рідини в обтюраторі

Феноменологічно для процесу масообміну між термостатом та масоносієм, яким є для випадку, що розглядається, повітря оточуючого термостат середовища (повітря навколишнього середовища), можна записати [30, 40]:

$$I_m^\infty = I_m^{ind} = I_m^{sun} \quad (2.8)$$

де I_m^∞ – потік маси пари рідини, що уноситься потоком повітря, який рухається відносно обтюратора, $кг/с$;

I_m^{ind} – індукований потік маси пари рідини, що проходить через обтюратор, $кг/с$;

I_m^{sun} – умовний потік маси пари рідини до суцільного газового середовища у внутрішньому об'ємі термостата за рахунок випаровування (конденсації) рідкої фази, $кг/с$.

Розрахуємо потік маси пари рідини I_m^{ind} , що проходить через обтюратор. Цей потік дорівнює масі молекул пари рідини dm_{ind} , що проходять через нього за одиницю часу:

$$I_m^{ind} = \frac{dm_{ind}}{d\tau} = \frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{dN_{ind}}{d\tau}, \quad (2.9)$$

де μ – молярна маса рідини, $кг/моль$;

N_A – число Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$, $1/моль$;

dN_{ind} – кількість молекул пари рідини, що проходять через обтюратор, *шт. молекул*.

Будемо вважати, що причиною потоку маси є флуктуації зовнішнього середовища біля зовнішньої поверхні обтюратора. Тобто у потоці повітря, що

рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, виникають флуктуації поперечної складової швидкості потоку. В результаті таких флуктуацій відбувається винесення деякого об'єму із обтюратора в оточуюче середовище. Даний об'єм (рис. 2.2), позначений символом $V_{інд}$, розраховується за формулою:

$$V_{інд} = x_{інд} \cdot y_{інд} \cdot z_{інд}, \quad (2.10)$$

де $y_{інд}$ дорівнює ширині поверхні обтюратора $h_{обт}$, яка граничить з оточуючим середовищем, м;

$z_{інд}$ дорівнює довжині поверхні обтюратора $l_{обт}$, яка граничить з оточуючим середовищем, м.

Таким чином, добуток $y_{інд}$ та $z_{інд}$ дорівнює площі поверхні обтюратора $S_{обт}$, яка є його границею з оточуючим середовищем:

$$y_{інд} \cdot z_{інд} = h_{обт} \cdot l_{обт} = S_{обт}. \quad (2.11)$$

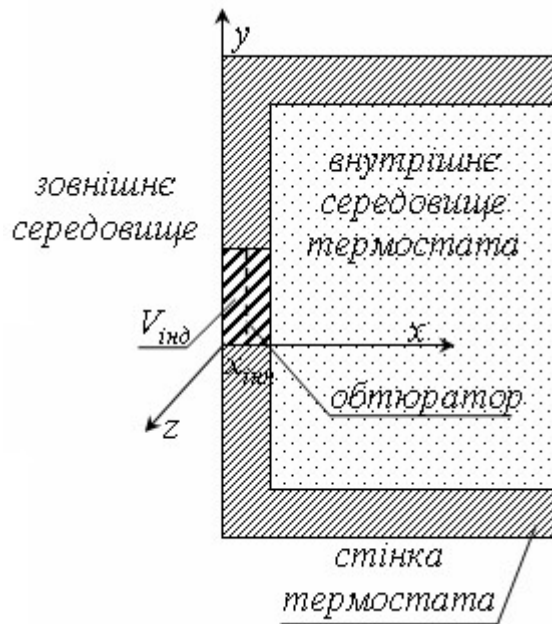


Рис. 2.2. Поперечний переріз термостата

Слід вважати, що $S_{обт}$ визначається конструкційними особливостями термостата, тому її величина не змінюється з часом та не залежить від будь-яких параметрів зовнішнього та внутрішнього середовища. А величина $x_{інд}$ залежить від величини флуктуації поперечної складової швидкості потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, та від властивостей матеріалу, із якого він виконаний. Під властивостями обтюратора, у першому наближенні, розуміється його опір потоку пароповітряної суміші, спрямованому всередину термостата або із нього. Те

ж відноситься і до визначеної частини загального потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, величина якої обумовлена флуктуацією його поперечної складової. Опір обтюратора визначається фільтраційними властивостями його сухого скелету й кількістю рідини та пароповітряної суміші, яку він утримує, а також умовою $p = const$.

Під час ІНТМО кількість сухих речовин обтюратора можна вважати постійною, а кількість рідини та пароповітряної суміші, які він утримує, може змінюватись через рух системи до динамічної рівноваги або через зміну параметрів суцільного газового середовища всередині термостата. Таким чином, опір обтюратора визначається поточним вмістом рідини у ньому та теплофізичними властивостями його сухого скелету.

Оскільки поточний вміст рідини обтюратора, а також амплітуда флуктуації поперечної складової швидкості потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора, змінюються з часом, то можна вважати, що і $x_{інд}$ змінюється з часом. Тоді враховуючи (2.11), запишемо:

$$V_{інд} = x_{інд}(\tau) \cdot S_{обт}. \quad (2.12)$$

При цьому кількість частинок пари рідини, які виносяться з об'ємом $V_{інд}$ дорівнює:

$$N_{інд} = V_{інд} \cdot \langle n_{інд} \rangle, \quad (2.13)$$

де $\langle n_{інд} \rangle$ – середня концентрація молекул пари рідини, які виносяться з, *шт. молекул/м³*.

Концентрація молекул рідини має визначене розподілення в об'ємі $V_{інд}$. При цьому будемо вважати, що вздовж осей Oy та Oz концентрація постійна, а вздовж осі Ox є визначений градієнт концентрації, що описується функцією $f_n(x)$ (рис. 2.3). Тоді середня концентрація частинок в $V_{інд}$ розраховується наступним чином:

$$\langle n_{інд} \rangle = \frac{1}{(n^*(x_{інд}(\tau)) - n_\infty)} \cdot \int_0^{x_{інд}(\tau)} f_n(x) dx, \quad (2.14)$$

де n_∞ – концентрація молекул пари рідини на зовнішній границі $V_{інд}$, тобто на границі даного об'єму з оточуючим середовищем, *шт. молекул/м³*;

$n^*(x_{інд}(\tau))$ – концентрація молекул пари рідини на внутрішній границі $V_{інд}$, тобто на границі даного об'єму із суцільним середовищем всередині термостата, *шт. молекул/м³*.

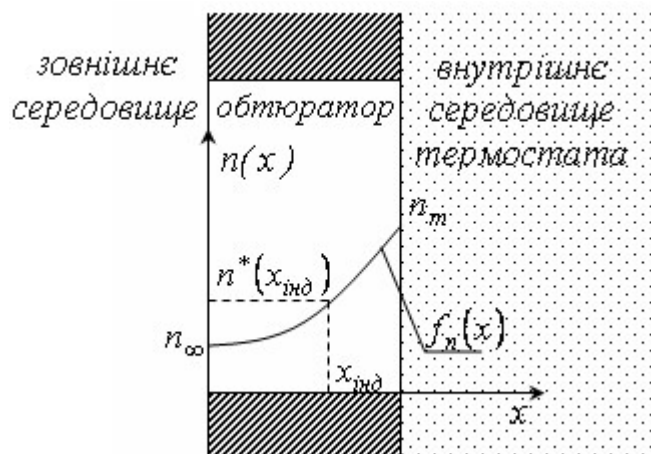


Рис. 2.3. Розподілення концентрації частинок пари рідини суцільного газового середовища в обтюраторі

Виходячи з (2.14), $\langle n_{інд} \rangle$ є функцією $x_{інд}$.

Запишемо повний диференціал для кількості молекул пари рідини, які виносяться з об'ємом $V_{інд}$ (формула (2.13)):

$$dN_{інд} = \frac{\partial(V_{інд} \cdot \langle n_{інд} \rangle)}{\partial \tau} d\tau, \quad (2.15)$$

перенесемо $d\tau$ в ліву частину рівності:

$$\frac{dN_{інд}}{d\tau} = \frac{\partial(V_{інд} \cdot \langle n_{інд} \rangle)}{\partial \tau} = \frac{\partial V_{інд}}{\partial \tau} \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial \tau} V_{інд}. \quad (2.16)$$

Враховуючи (2.12), будемо мати:

$$\frac{dN_{інд}}{d\tau} = S_{обт} \left(\frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial \tau} x_{інд} \right). \quad (2.17)$$

Підставимо (2.17) в (2.9):

$$I_m^{інд} = \frac{dm_{інд}}{d\tau} = \frac{\mu}{N_A} \cdot S_{обт} \left(\frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial \tau} x_{інд} \right). \quad (2.18)$$

Перетворимо вираз (2.18) наступним чином:

$$\begin{aligned}
I_m^{ind} &= \frac{\mu}{N_A} \cdot S_{обт} \left(\frac{\partial x_{ind}}{\partial \tau} \langle n_{ind} \rangle + \frac{\partial \langle n_{ind} \rangle}{\partial x_{ind}} \frac{\partial x_{ind}}{\partial \tau} x_{ind} \right) = \\
&= \frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{\partial x_{ind}}{\partial \tau} \left(\langle n_{ind} \rangle + \frac{\partial \langle n_{ind} \rangle}{\partial x_{ind}} x_{ind} \right) S_{обт}.
\end{aligned} \tag{2.19}$$

З отриманого виразу видно, що густина потоку маси пари рідини через обтюратор дорівнює:

$$j_m^{ind} = \frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{\partial x_{ind}}{\partial \tau} \left(\langle n_{ind} \rangle + \frac{\partial \langle n_{ind} \rangle}{\partial x_{ind}} x_{ind} \right). \tag{2.20}$$

При цьому, якщо розглядати внутрішню задачу, для того, щоб газове середовище всередині термостата залишалось суцільним за парціальним тиском пари рідини, та ж кількість частинок повинна випаруватись.

Маса рідин, що випаровується в одиницю часу, тобто потік маси суцільного газового середовища всередині термостата, який утворюється за рахунок випаровування через прагнення системи до динамічної рівноваги і який протікає зі швидкістю дифузії, розраховується за формулою:

$$\frac{dm^{vun}}{d\tau} = f_{vun}(p, T) \frac{\mu}{N_A} \cdot S_{vun}, \tag{2.21}$$

де $f_{vun}(p, T)$ – функція, яка визначається тиском і температурою всередині термостата та залежить від фізичних властивостей рідини в ньому, *шт.молекул/с*;

S_{vun} – площа випаровування, яка обумовлюється властивостями ККПТ (розмір частинок, наявність газонепроникних включень, спосіб розміщення у внутрішньому об'ємі термостата, тощо), m^2 .

Звідси, очевидно, густина потоку маси в суцільне газове середовище всередині термостата, що утворюється за рахунок переходу рідини в газоподібний стан, буде дорівнювати:

$$j_m^{vun} = f_{vun}(p, T) \frac{\mu}{N_A}. \tag{2.22}$$

Будемо вважати, що через прагнення системи до динамічної рівноваги, маса пари рідини, яка виноситься зовнішнім середовищем, компенсується переходом рідкої фази всередині термостата в газовий стан, чим підтримується суцільність газового середовища за парціальним тиском пари рідини. Тоді прирівняємо (2.19) і (2.21):

$$\frac{dm_{інд}}{d\tau} = \frac{dm_{вун}}{d\tau}, \quad (2.23)$$

а в явному вигляді:

$$\frac{\mu}{N_A} \cdot \frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \left(\langle n_{інд} \rangle + \frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial x_{інд}} x_{інд} \right) S_{обт} = f_{вун}(p, T) \frac{\mu}{N_A} S_{вун}. \quad (2.24)$$

Якщо врахувати (2.20) і (2.22):

$$S_{обт} \cdot j_m^{інд} = S_{вун} \cdot j_m^{вун}, \quad (2.25)$$

або

$$j_m^{інд} = \frac{S_{вун}}{S_{обт}} \cdot j_m^{вун}. \quad (2.26)$$

Якщо густину потоку маси (2.22) в суцільне газове середовище всередині термостата, що утворюється за рахунок переходу рідини в газоподібний стан, помножити на питому теплоту пароутворення, то отримаємо густину теплового потоку, який витрачається на випаровування рідини всередині термостата:

$$j_q^{вун} = r \cdot j_m^{вун} = f_{вун}(p, T) \frac{\mu}{N_A} \cdot r. \quad (2.27)$$

Помножимо та розділимо праву частину (2.26) на питому теплоту пароутворення:

$$j_m^{інд} = \frac{S_{вун}}{S_{обт}} \cdot j_m^{вун} \cdot \frac{r}{r}, \quad (2.28)$$

враховуючи (2.26), отримаємо для ІНТМО:

$$j_m^{інд} = \frac{1}{r} \cdot \frac{S_{вун}}{S_{обт}} \cdot j_q^{вун}. \quad (2.29)$$

Виходячи з отриманих виразів (2.24) і (2.29), можна зробити наступні висновки. З (2.24) видно, що флуктуації часова $\left(\frac{\partial x_{інд}}{\partial \tau} \right)$ і просторова $\left(\frac{\partial \langle n_{інд} \rangle}{\partial x_{інд}} \right)$ в об'ємі обтюратора «індукують» потік маси, який визначається залежністю парціального тиску насичених парів від температури. Отже, тепловий потік, що розсіюється за рахунок виносу потоку маси в навколишнє

середовище визначається фізичними властивостями рідини ($f_{\text{вун}}(p, T)$), способом заповнення об'єму термостата ($S_{\text{вун}}$) і конструкцією обтюратора ($S_{\text{обт}}$). Виходячи з вихідних умов, даний тепловий потік повинен бути нехтовно малим у порівнянні з тепловмістом стінок термостата. При повному видаленні рідкої фази з об'єму термостата, система приходить у стійку рівновагу.

Таким чином, встановлено, що тепловий потік, який розсіюється всередині термостата, пропорційний потоку маси рідини, яка вноситься із термостата в газовому стані, тобто потік маси із термостата індукує потік теплоти до його внутрішнього середовища. При цьому коефіцієнт пропорційності між потоками обумовлюється фізичними властивостями рідини, способом заповнення внутрішнього об'єму термостата і конструкцією обтюратора. Вираз (2.29) є рівнянням ефекту ІнтМО.

Виходячи з вищевикладеного, наукова концепція роботи полягає у наступному: теорія – індукування тепломасообміну в термостаті з обтюратором флуктуаціями параметрів газу в обтюраторі сприятиме ефективному випаровуванню рідини в термостаті; техніка – термостат з обтюратором, що містить рідину та (або) вологе колоїдне капілярно-пористе тіло, являє собою керований тепломасообмінний апарат для харчової промисловості.

2.3. Методика організації та спостереження ефекту індукованого тепломасообміну

З метою перевірки запропонованої феноменологічної гіпотези як предмет дослідження обрані кінетичні та динамічні характеристики ефекту ІнтМО, який реалізовується в термостаті.

Для спостереження ефекту ІнтМО використовується пристрій, схема якого наведена на рис. 2.4. Цифрами на рисунку позначені: 1 – термостат; 2 – трубки, через які продувається потік повітря; 3 – тіло (ККПТ), що складається з трьох фаз: газової, рідкої і твердої; 4 – термопар; 5 – обтюратори.

Судити про «запуск» ефекту ІнтМО, можна виходячи з характеру кінетики температури в різних точках всередині термостата, яку отримують реєстрацією сигналу від термопар.

Організація ефекту ІнтМО полягає в наступному. Всередину термостата розміщують тіло, що складається з твердої, рідкої і газової фаз (вологе ККПТ). Через певний час температура тіла всередині термостата буде асимптотично прагнути до температури термостата. Далі через трубки, зображені на рис. 2.4, організовується рух повітря з визначеною швидкістю, такою, що в результаті турбулентного режиму плин створюється флуктуація поперечної складової швидкості потоку повітря. Ефект ІнтМО «запускається». Термограми, що отримують у разі «запуску», «протікання» та «закінчення» ефекту ІнтМО, представлені на рис. 2.5.

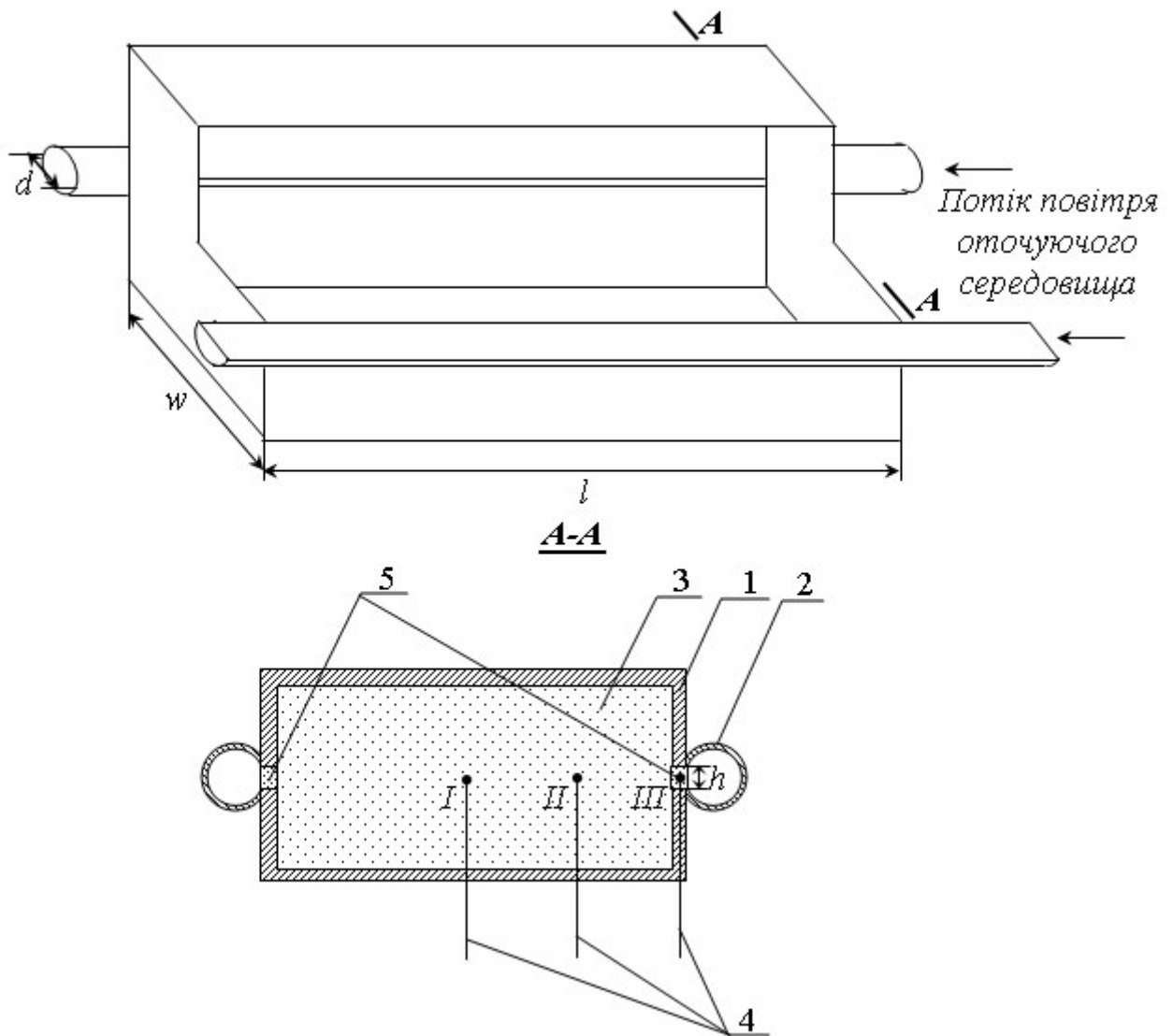


Рис. 2.4. Схема пристрою для спостереження ефекту ІнТМО:
1 – термостат; 2 – трубки, через які продувається потік повітря;
3 – тіло (ККПТ), що складається з трьох фаз: газової, рідкої і
твердої; 4 – термопар; 5 – обтюратори (характерні розміри, мм:
 $l=100$; $w=20$; $d=10$; $h=1$)

«Запуску» ефекту ІнТМО на термограмі відповідає падіння температури тіла, відокремлене першою пунктирною лінією на рис. 2.5. Після видалення рідкої фази всередині термостата (мінімум кінетики температури – друга пунктирна лінія), температура тіла починає знову наближатися до температури термостата. Ефект ІнТМО закінчується за умови, коли маса рідини в термостаті буде дорівнювати нулю: $m_p=0$ – система досягла рівноваги.

Матеріалом для досліджень ефекту ІнТМО була харчова сировина тваринного та рослинного походження, для якої ТМО є частиною технологічної обробки. Попередніми дослідженнями ІнТМО [20-29] та дослідженнями проведеними в даній роботі доведено, що характер ефекту ІнТМО визначається не стільки властивостями сировини, яка знаходиться у

внутрішньому виділеному об'ємі термостата, а тим наскільки повно реалізуються необхідні та достатні умови для організації даного ефекту. При цьому властивості сировини визначають внутрішній ТМО термостата, який визначається, у тому числі, властивостями рідини переходити у газовий стан. Виходячи з цього, дослідження проводились також на модельних КПТ та ККПТ, в якості яких використовувались губка з кукурудзяного та картопляного крохмалю (ККПТ), деревна тирса (ККПТ), синтетична та вовняна повсть (КПТ). Як рідина у внутрішньому об'ємі термостата використовувались рідини з різною температурою кипіння, теплоємністю, леткістю, а саме: етиловий спирт, вода, суміш спирту та води, органічні розчинники.

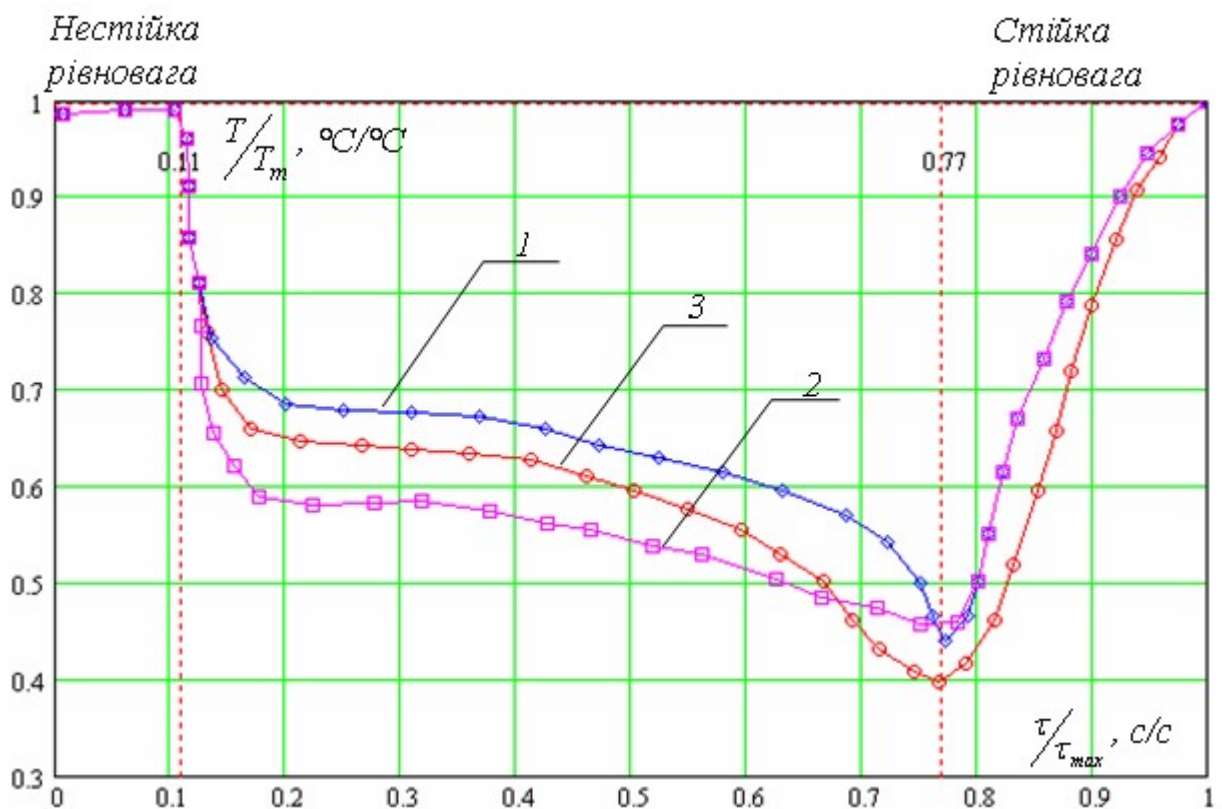


Рис. 2.5. Кінетика температури тіла в процесі ІнтМО, отримана від термопар: 1 – I; 2 – II; 3 – III

Матеріалом, із якого виконували КПТ для обтюратора, були: синтетична та вовняна повсть, фільтрувальна латунна сітка (діаметр отвору від 0,5 до 0,03 мм), фільтрувальна сітка із нержавіючої сталі (діаметр отвору від 0,5 до 0,05 мм). Окремим випадком утворення КПТ обтюратора є його самовільне утворення із сировини, що підлягає обробці. Вибір матеріалу КПТ обтюратора обумовлений операцією, яка виконується, та необхідністю й простотою його санітарної обробки.

Для дослідження ІнтМО використовувалась установка, наведена на рис. 2.6.

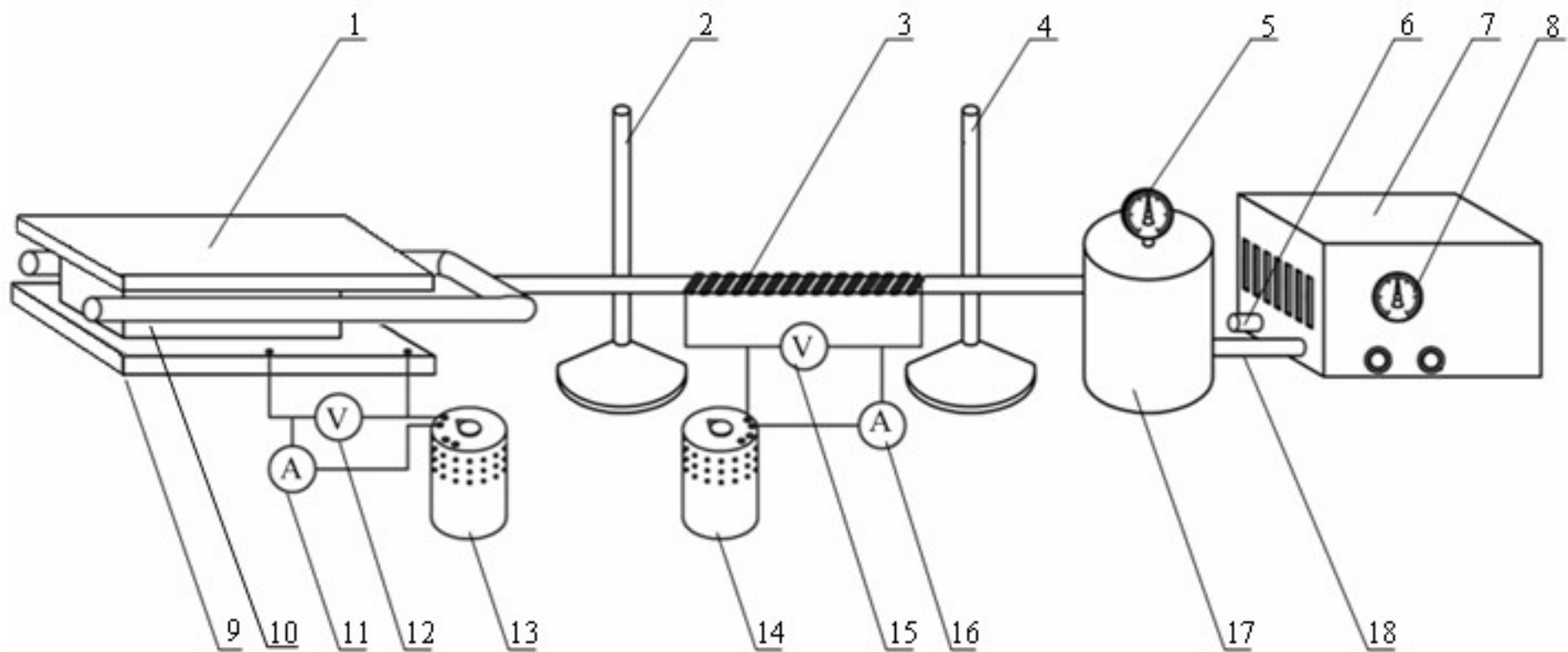


Рис. 2.7. Схема експериментального стенду для дослідження ефекту ІнТМО: 1, 9 – нагрівальні поверхні; 2, 4 – штативи; 3 – електрокалорифер для нагрівання повітря; 5, 8 – манометри; 6, 18 – вхідний та вихідний патрубок компресора, відповідно; 7 – компресор; 10 – ємність з вологим ККПТ; 11, 16 – амперметри; 12, 15 – вольтметри; 13, 14 – автотрансформатори; 17 – ресивер

Принцип її роботи полягає в наступному. Повітря, що нагнітається компресором, надходить до ресивера, після якого проходить через електрокалорифер. За необхідності електрокалорифер підключають для підігрівання повітря до визначеної температури. Далі повітря через трубки обдуває обтюратори ТМО-модуля з вологим ККПТ.

Термостатування модуля здійснюється нагрівальними поверхнями, потужність яких регулюється автотрансформатором, а її величина контролюється амперметром і вольтметром. Для даної установки існує можливість використовувати модулі різних конструкцій. Загальний вигляд використовуваного модуля наведений на рис. 2.4. Вид ТМО-модулів, які відрізняються за конструкцією від модуля з рис. 2.4, будуть наведені безпосередньо перед представленням результатів відповідних експериментів.

Температура всередині термостата визначалась за допомогою термопар. Сигнал від термопар реєструвався у вигляді текстового файлу за допомогою ПК. Після цього отриманий файл зчитували у пакеті програм MathCad та будували відповідні залежності [41-43]. Термопари розміщували в обтюратор, тверду, рідку та газову фази всередині термостата. Безпосередньо перед представленням результатів досліджень наведені рисунки зі схемами розміщення термопар в термостаті.

Як було відмічено вище, на кінетиці температури ІнТМО можуть бути виділені характерні ділянки, які свідчать про «запуск» або «зрив» ефекту, його закінчення та характер його «протікання». Оскільки ефект ІнТМО закінчується, якщо в термостаті відсутня рідка фаза, то стежити за характером його перебігу можна за кінетикою маси рідкої фази всередині термостата.

Кінетику вмісту рідини, тобто його зміну з часом, вивчали наступним чином. Періодично зважуючи термостат із вологим ККПТ під час ІнТМО, розраховували (за масою сухих речовин ККПТ) поточний вологовміст за формулою:

$$w = \frac{m_p}{m_{c.p.}} \cdot 100\% = \left(\frac{m_{nom}}{m_c} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2.30)$$

де m_{nom} , $m_{c.p.}$, m_p – поточне значення маси зразка, маса сухих речовин, маса рідкої фази в зразку, відповідно, *кг/кг сух. реч.*

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ІДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ

3.1. Аналіз процесу тепломасообміну в термостаті методом фазового простору

Одним із способів якісного аналізу стану системи (механічної, хімічної, термодинамічної і т. ін.) є метод фазового простору [44-47]. Полягає він у наступному. На координатних осях відкладають поточні значення змінних стану аналізованої динамічної системи. Їх зміни з часом відповідають певні криві – фазові траєкторії в просторі змінних параметрів стану. Сукупність фазових траєкторій динамічної системи складає її фазовий портрет. Фазовий портрет представляє вичерпний опис всіх її можливих режимів. Однак, в загальному випадку отримання такого повного опису станів динамічної системи представляє складне завдання, оскільки фазові траєкторії є кривими в багатовимірному просторі [47].

Скористаємося методом фазового простору для аналізу стану динамічної системи, в якій реалізується ІнТМО [48, 49]. Під динамічною системою розуміється термостат, у внутрішньому виділеному об'ємі якого знаходиться три фази (вологе ККПТ): тверда, рідка та газова. Газове середовище у внутрішньому виділеному об'ємі термостата сполучається з оточуючим термостат середовищем через обтюратор.

Однією із необхідних умов для запуску ефекту ІнТМО, як відмічено у другому розділі, є те, що величина енергії активації E_A повинна бути менша за баластну енергію E_B , необхідну для забезпечення фазового переходу. Тобто, якщо $E_A < E_B$, то можна вважати, що «запуск» ІнТМО відбувся. Енергією активації, у випадку що розглядається, є робота потоку повітря, що рухається відносно обтюратора, яка визначається кінетичною та потенціальною енергією потоку. Таким чином, критерієм «запуску» ефекту ІнТМО є значення величини енергії активації E_A по відношенню до значення величини баластної енергії E_B .

Ефект ІнТМО, як відмічено у розділі 2, полягає у переході системи від нестійкої рівноваги до стійкої, який супроводжується видаленням рідкої фази з об'єму термостата. Прагнення до рівноваги у випадку, що розглядається, по суті є явищем нагрівання системи зі змінною масою за рахунок випаровування. Тобто «стік» теплоти організовується переходом рідини у газовий стан, а «притік» теплоти забезпечується стінками термостата. Дані умови, як відмічено раніше, є одними із необхідних для організації ефекту ІнТМО умов. Хоча теплота і не являється параметром стану, однак її потік обумовлений різницею температур. Таким чином, можна вважати правомірним використання температури T , як параметру та однієї із узагальнених координат.

На рис. 3.1 наведено зміну температури ККПТ зі зміною вологовмісту, отримані під час можливих варіантів протікання ТМО в термостаті. Зміна

температури ККПТ всередині термостата зі зміною вологовмісту даного ККПТ побудована у безрозмірних координатах. Під безрозмірними координатами розуміється температура, пронормована на температуру термостата, та вологовміст ККПТ всередині термостата, пронормований на початкове значення.

Необхідно відмітити, що за характером зміни температури ККПТ зі зміною його вологовмісту є можливість ідентифікувати «запуск» або «зрив» ефекту ІнтМО, а також аналізувати характер його протікання. Зміна знаку прирощення температури на негативний, свідчить про «запуск» ефекту ІнтМО. Повторна зміна знаку прирощення температури, свідчить або про «зрив» ІнтМО, або про його закінчення.

Так на рис. 3.1 лінії 1 та 2 є характерними для процесу ТМО за відсутності «запуску» ІнтМО, лінія 3 отримана саме для ефекту ІнтМО, а лінії 4 та 5 отримані під час «зриву» ІнтМО.

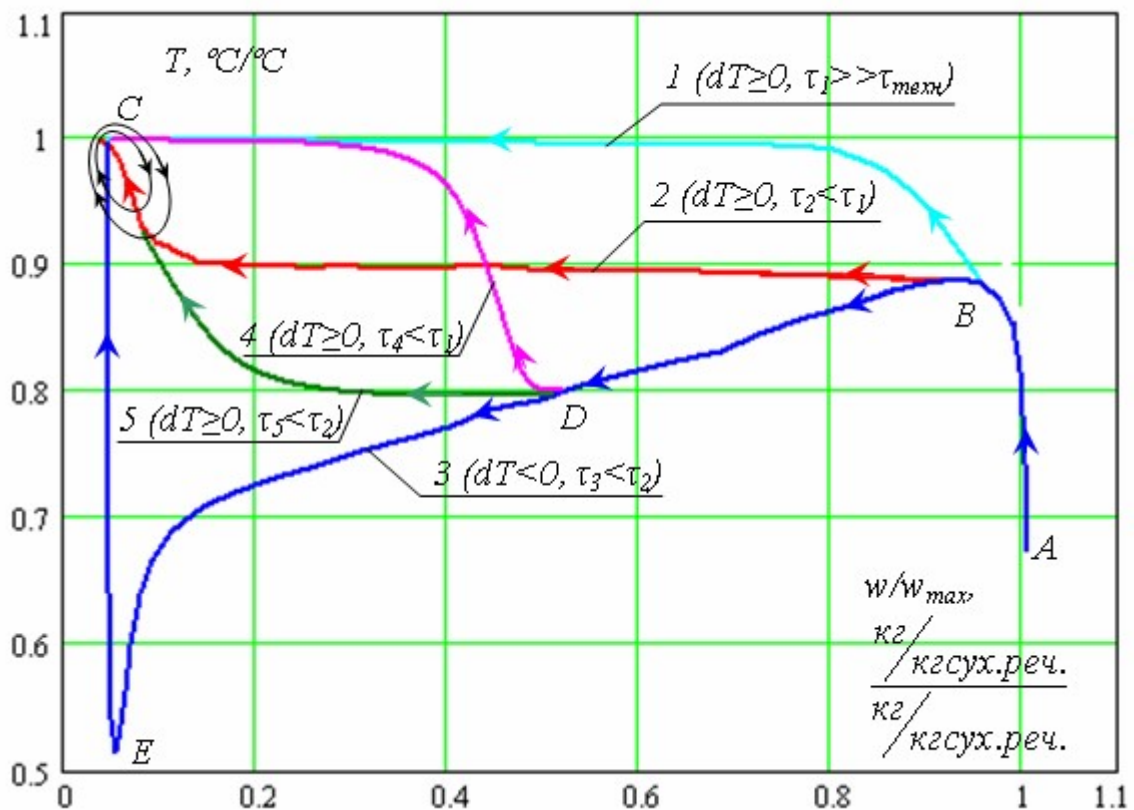


Рис. 3.1. Температура ККПТ від вологовмісту за різної організації тепломасообміну в термостаті: 1, 2 – ТМО з $E_A \geq E_B$; 3 – ІнтМО ($E_A < E_B$); 4, 5 – зрив ІнтМО з трансформацією у ТМО з $E_A \geq E_B$

Другою узагальненою координатою є парціальний тиск пари рідини у внутрішньому газовому середовищі термостата. При цьому слід вважати у відповідності до феноменологічної гіпотези ефекту ІнтМО (розд. 2.1), оскільки суцільне газове середовище знаходиться всередині термостата в

«затиснутих» умовах, то парціальний тиск пари рідини в ньому асимптотично прагне до тиску насиченої пари рідини за даної температури.

Третя узагальнена координата обрана виходячи із наступних міркувань. Запишемо систему із двох нелінійних кінетичних рівнянь з двома змінними:

$$C_{\text{сист}} \frac{dT}{d\tau} = F_T(T, w_{\text{вун}}), \quad (3.1)$$

$$r \frac{dw_{\text{вун}}}{d\tau} = F_w(T, w_{\text{вун}}), \quad (3.2)$$

де $C_{\text{сист}}$ – питома теплоємність системи (на 1 кг сухих речовин тіла), $\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{кг сух. реч.}}$;

r – питома теплота пароутворення, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$;

$w_{\text{вун}} = \frac{m_p}{m_{\text{с.р.}}}$ – питома кількість рідини, що перейшла у газовий стан (на 1 кг сухих речовин тіла), $\frac{\text{кг}}{\text{кг сух. реч.}}$.

Величина $C_{\text{сист}} \frac{dT}{d\tau}$ у (3.1) пропорційна кількості теплової енергії, що надходить до середовища всередині термостата від його стінок за одиницю часу, а функція $F_T(T, w_{\text{вун}})$ визнає математичну залежність даної кількості енергії від поточних температури та вологовмісту. Величина $r \frac{dw_{\text{вун}}}{d\tau}$ у (3.2) пропорційна кількості енергії, яка розсіюється за рахунок фазового переходу I-го роду за одиницю часу, а функція $F_w(T, w_{\text{вун}})$ визнає математичну залежність даної кількості енергії від поточних температури та вологовмісту.

Розділимо перше рівняння системи на друге, отримаємо:

$$\frac{C_{\text{сист}} \cdot dT}{r \cdot dw_{\text{вун}}} = \frac{F_T(T, w_{\text{вун}})}{F_w(T, w_{\text{вун}})} = k_{\Psi} \cdot \Psi(T, w_{\text{вун}}), \quad (3.3)$$

де k_{Ψ} – масштабний коефіцієнт, мм/мм .

Відношення (3.3) має сенс як відношення енергії, поглинутої внутрішнім середовищем термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем.

Відмінність рівняння (3.3) від критерію Ребіндера полягає у його фізичному сенсі. У критерії Ребіндера, за умови не «індукованого», а природного ТМО, чисельник прагне до рівноважної температури по закону теплопровідності, а знаменник – по закону Дальтона. У випадку ІнТМО закони руху до рівноваги зберігають той же вигляд, але вони «вмикаються»

за рахунок E_A – енергії потоку повітря, що рухається відносно обтюратора. Оскільки ефект ІнТМО має «запуск», «протікання», «блокування», «зрив», то фазовий портрет буде обмежуватися деякою універсальною функцією не стільки обумовленою властивостями сировини утримувати рідину, що характерно для критерію Ребіндера, скільки комплексом внутрішніх та зовнішніх чинників процесу (параметрів порядку, керуючих параметрів). Оскільки ІнТМО є керованим процесом, то (3.3) по суті відображає функцію керованості термостата, як системи.

Рішення рівняння (3.3) дозволяє визначити сімейство фазових траєкторій $\Psi(T, w_{\text{вун}})$, або так званих інтегральних кривих на фазовій площині.

Обмежимося розглядом фазового простору для ефекту ІнТМО з трьома ступенями вільності. Фазовий простір складають три узагальнені координати – температура T волого ККПТ у внутрішньому середовищі термостата, парціальний тиск p пари рідини внутрішнього газового середовища термостата і функція $\Psi(T, w_{\text{вун}})$, яка дорівнює відношенню енергії, поглинутої внутрішнім середовищем термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем на випаровування. Координата $\Psi(T, w_{\text{вун}})$ обрана безрозмірною з метою отримання зручного масштабу для виявлення характеру поведінки системи та особливих точок фазового портрету, як під час ТМО без енергії активації, так і під час ІнТМО (процесу ТМО з енергією активації).

Фазовий портрет процесу ТМО в термостаті за двома шляхами еволюції системи наведений на рис. 3.2: тепломасообмін без енергії активації – ТМО (шлях 2 з рис. 3.1) та тепломасообмін з енергією активації – ІнТМО (шлях 3 з рис. 3.1) [48, 49].

На фазовій площині виділені п'ять точок. Точка А є точкою, положення якої обумовлюється початковими умовами для внутрішнього середовища термостата.

Точки В та С є рівноважними точками. При цьому точка В є точкою динамічної рівноваги, а точка С – стійкої. Точка С є особливою точкою типу центр. Навколо такої точки система описує еліпсоїдальні траєкторії. Положення еліпсоїдальної траєкторії, на якій знаходиться система, обумовлюється значеннями параметрів порядку та керуючих параметрів. Під час знаходження системи на еліпсоїдальній траєкторії можуть відбуватися коливання вологовмісту та температури сировини всередині термостата при асимптотичному наближенні до рівноважних величин. Такі траєкторії нейтрально стійкі: зміни параметрів можуть переводити систему з однієї траєкторії на іншу з новими амплітудою та частотою коливань температури, вологовмісту та швидкості досягнення рівноваги [47].

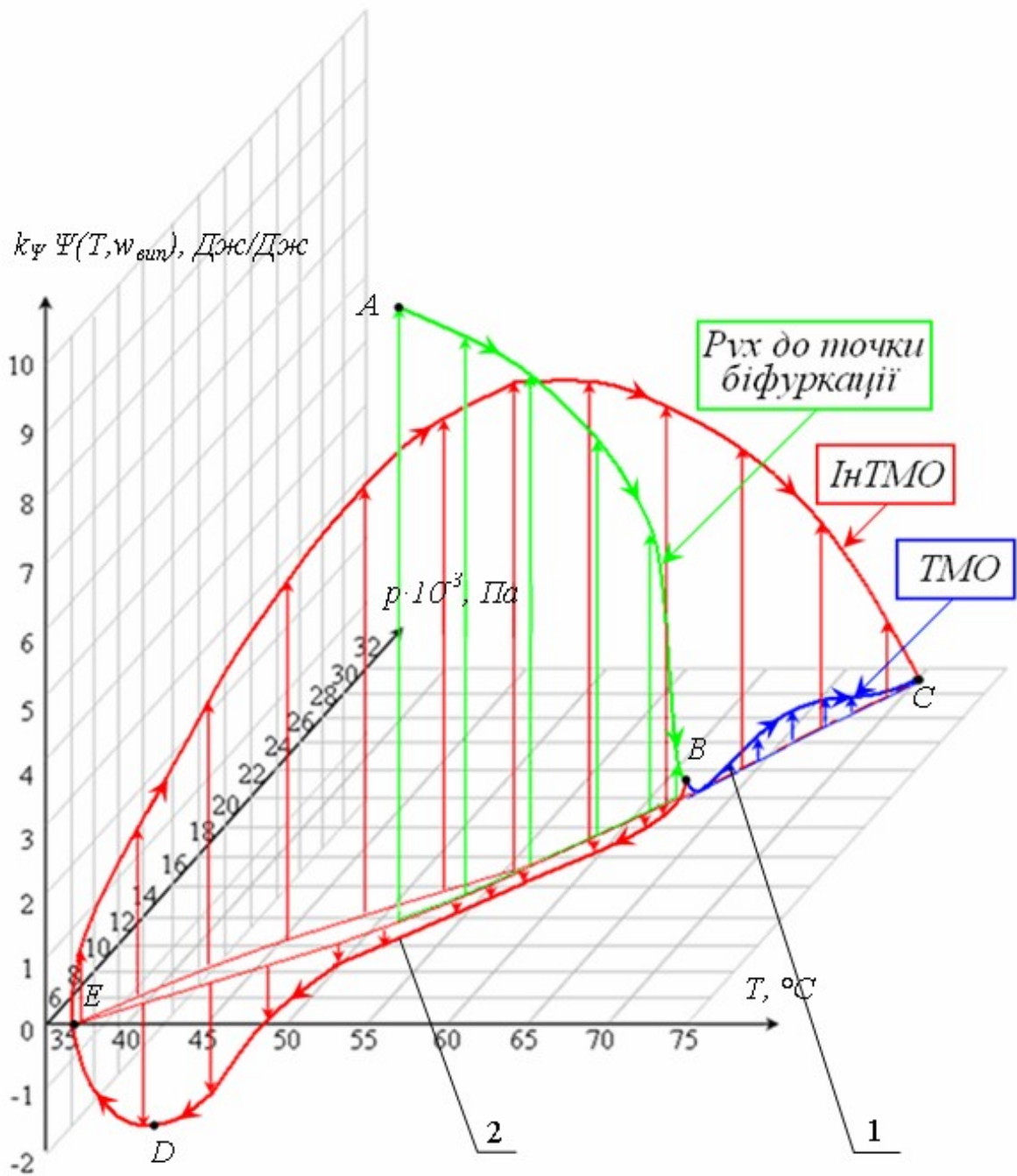


Рис. 3.2. Фазовий портрет процесу тепломасообміну в термостаті: TMO (1) – тепломасообмін без енергії активації; InTMO (2) – тепломасообмін з енергією активації

Як було відмічено раніше, під час InTMO мають місце рівноважні стани, при чому їх не менше двох. Перший стан характеризується наявністю в термостаті рідини (для випадку, що розглядається – рідка вода), температура середовища всередині термостата асимптотично прагне до температури стінок термостата. Другий рівноважний стан встановлюється за відсутності рідини всередині термостата та рівновазі даного внутрішнього середовища за температурою зі стінками термостата.

Як поблизу першого стану рівноваги, так і поблизу другого можливе випаровування рідини із сировини та її конденсація за рахунок флуктуацій

парціальних тисків пари рідини та градієнту температури, при чому обидва процеси відбуваються всередині термостата, оскільки масообмін з зовнішнім середовищем обмежений фільтраційними властивостями обтюратора. Тобто відбуваються коливання парціального тиску пари рідини (відповідно і вмісту рідини ККПТ всередині термостата за умови її наявності) та температури відносно рівноважних значень за сталого тиску. За цих умов молярний перенос маси не відбувається, оскільки тиск всередині термостата є сталим та дорівнює тиску зовнішнього середовища. Такі коливання температури та парціального тиску пари рідини по всьому об'єму всередині термостата характерні лише для ІнТМО, оскільки, наприклад, для масообміну між вологим ККПТ та навколишнім середовищем за умови відсутності енергії активації (відсутній обтюратор) випаровування рідини відбувається лише на границі розділу між даними об'єктами.

Як відмічено вище точка В є точкою, в якій система знаходиться в стані динамічної або нестійкої рівноваги. Будь-яка флуктуація, випадкова чи керована, може вивести систему із такого стану і вона почне рухатися або, іншими словами, еволюціонувати до стійкої рівноваги одним із можливих шляхів. Такі особливі точки, після проходження яких система набуває нових властивостей руху, називають точками біфуркації (за термінологією синергетики) [45]. Така особлива точка, точка біфуркації, виникає, якщо система рухається до максимуму (локального) вільної енергії. При цьому положення такої точки в динамічних координатах може співпадати і з природним процесом, за яким система рухається в сторону з мінімумом вільної енергії. В точці біфуркації природження одного із динамічних параметрів змінює знак, тобто за одним із параметрів (для ефекту ІнТМО – це температура) система починає віддалятися від локальної рівноваги. Наявність точки біфуркації, ще раз доводить те, що система «отоочуюче середовище – внутрішнє середовище термостата», за умови протікання ефекту ІнТМО, є проточною по відношенню до маси та теплової енергії динамічною системою, де можливі процеси самоорганізації, які обумовлюють ефективне розсіювання (дисипацію) теплової енергії за рахунок фазових переходів I-го роду. 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.

Оскільки наведення на фазовій площині $OT \times Op \times O\Psi(T, w_{sun})$ всіх характерних шляхів еволюції системи під час ТМО в термостаті ускладнить його аналіз, перейдемо до проєкцій фазового простору на площину $OT \times O\Psi(T, w_{sun})$ (рис. 3.3).

На фазовому портреті (рис. 3.3) наведено п'ять характерних шляхів еволюції системи після точки біфуркації, отримані шляхом узагальнення експериментальних досліджень.

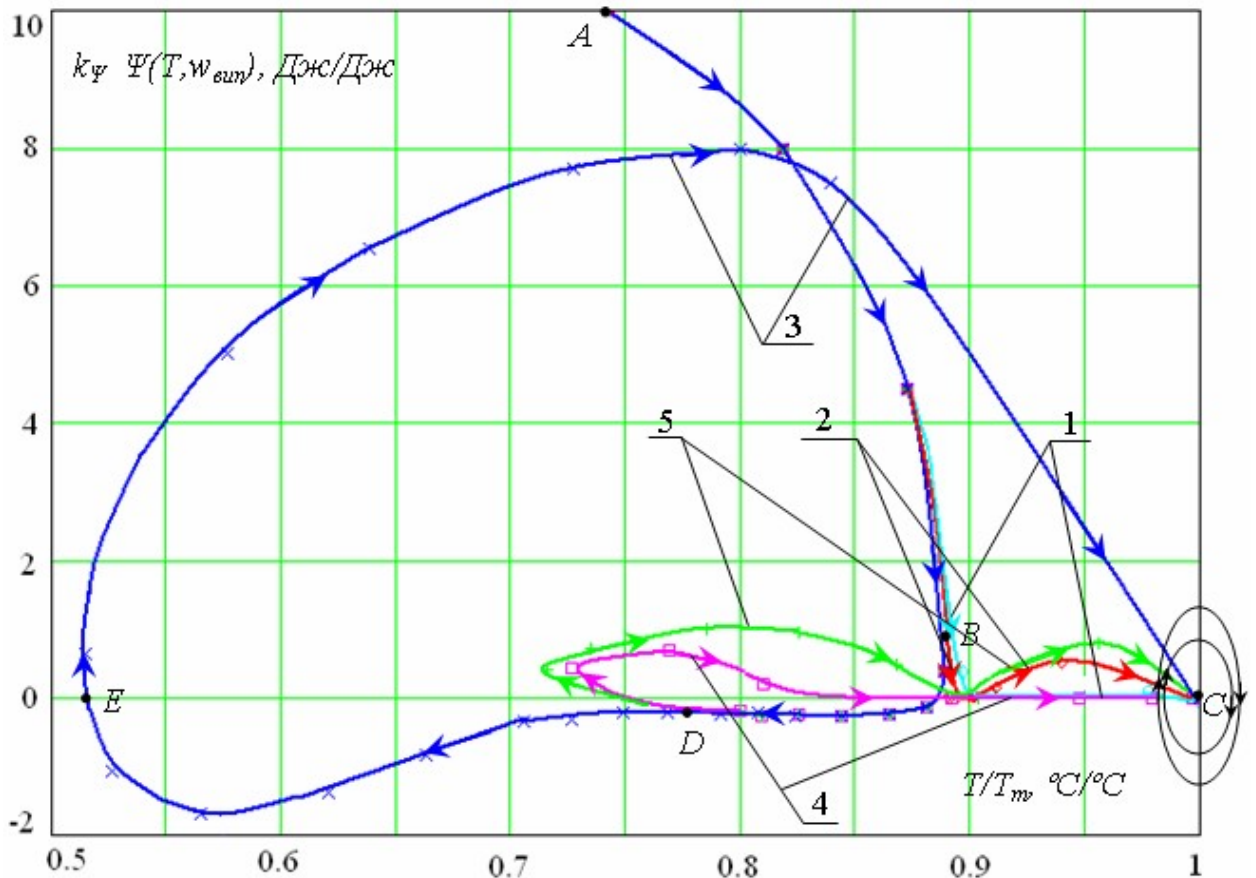


Рис. 3.3. Фазовий портрет ТМО в термостаті за характерними шляхами еволюції від стану нестійкої (В) до стану стійкої (С) рівноваги: 1, 2 – ТМО з $E_A \geq E_B$; 3 – ІнТМО ($E_A < E_B$); 4 – зрив ІнТМО з подальшим нагріванням; 5 – зрив ІнТМО з трансформацією у ТМО з $E_A \geq E_B$

Дані еволюційні шляхи між точками рівноваги також можна ідентифікувати та відстежити за кінетиками температури середовища всередині термостата, наведеними на рис. 3.1. Всі інші шляхи еволюції займають проміжне положення. Еволюція системи за характерними шляхами буде наступною. Якщо керуючі параметри і параметри порядку будуть такими, що система піде за шляхом 1, то кількість рідини всередині термостата змінюватися практично не буде. В термостаті встановиться рівновага за температурою. Система повернеться за вологовмістом в окіл точки В. Перехід в окіл точки типу центр С для даного шляху еволюції системи відбудеться впродовж часу значно більшого за час спостереження (середню тривалість технологічної обробки). За шляхом 2 – відбувається випаровування рідини на границі розділу «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата». Такою границею розділу може бути або зовнішня по відношенню до оточуючого середовища поверхня обтюратора або, за умов проникнення газу навколишнього середовища всередину термостата, – відкрита поверхня рідини чи волого ККПТ. Температура за таких умов наближається до температури термостата. Система рухається в окіл точки типу центр С на одну з її еліпсоїдальних траєкторій. За такого характеру

протікання процесу завжди виконується умова $dT \geq 0$ – «запуск» ефекту ІнтМО відсутній. Перехід між точками В та С для даного шляху еволюції системи відбудеться впродовж часу більшого за час спостереження.

За шляхом 3 система рухається до того ж рівноважного стану, що і за шляхом 2, але напрямком руху до точки типу центр С інший. Для такого шляху еволюції умова $dT \geq 0$ виконується до точки біфуркації (до точки В) та після досягнення сировиною гігроскопічного вологовмісту (після точки Е). Протягом еволюції системи між точками динамічної та стійкої рівноваги виконується умова $dT < 0$ – має місце, так званий, дефіцит теплоти всередині термостата [20], обумовлений тим, що розсіювання енергії на фазовий перехід рідини І-роду відбувається з більшою швидкістю ніж підведення теплоти від стінок термостата. Відбувається самоорганізація дисипативних структур в ККПТ всередині термостата. Якщо будуть підтримуватися необхідні умови для протікання ІнтМО, то, як було відмічено вище, прирощення температури знову змінить свій знак лише у випадку недостатньої для подальшої самоорганізації дисипативних структур кількості рідкої фази, а саме через її закінчення. При цьому має місце локальний мінімум температури на шляху до встановлення в системі температури термостата (рис. 3.1).

Ще два еволюційні шляхи 4 та 5 ілюструють, так званий, «зрив» ефекту ІнтМО. За таких шляхів еволюції після точки біфуркації (точка В) виконується умова $dT < 0$, яка свідчить про процес самоорганізації дисипативних структур, але після досягнення точки D, через те, що порушуються умови, необхідні для протікання ефекту ІнтМО, спостерігається зміна знаку прирощення температури, тобто – $dT \geq 0$. Відбувається «зрив» ефекту ІнтМО – його проявленням є зміна знаку прирощення температури. Подальше протікання процесу можливе двома характерними шляхами: відбудеться або виродження ефекту ІнтМО в процес ТМО з відкритої по відношенню до оточуючого середовища поверхні (шлях 5), або нагрівання середовища всередині термостата до температури його стінки (шлях 4) з подальшим еволюціонуванням до стійкої рівноваги впродовж часу більшого за час спостереження. Необхідно відмітити, що положення точки D може змінюватись вздовж ділянки кривої ВЕ і залежить від причин «зриву» ефекту ІнтМО.

Таким чином, фазова траєкторія ІнтМО відрізняється від ТМО без енергії активації наявністю ділянки у негативній області фазового простору.

Фізичний зміст такої поведінки системи наступний. Функція $\Psi(T, w_{\text{вун}})$ дорівнює відношенню енергії, яку утримує внутрішнє середовище термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем на випаровування (формула (3.3)). Оскільки кінетика вологовмісту під час ІнтМО за наявності рідкої фази у термостаті є незростальною функцією, що підтверджено численними дослідженнями ефекту ІнтМО, то прирощення вологовмісту ККПТ не може бути позитивним. Відповідно, прирощення кількості рідини, що перейшла у газовий стан є невід'ємним $dw_{\text{вун}} \geq 0$, таким чином,

знаменник у формулі (3.3) є невід'ємним. Тоді для того, щоб функція $\Psi(T, w_{sun})$ набула негативних значень, необхідно, щоб від'ємним був чисельник формули (3.3). Чисельник у (3.3) пропорційний енергії, яку утримує внутрішнє середовище термостата, тобто тепловмісту, який складається із тепловмісту трьох фаз внутрішнього середовища термостата: сухих речовин, рідкої та газової фаз. Від'ємний знак чисельника свідчить про те, що фазовий перехід рідини у газовий стан у внутрішньому середовищі термостата відбувається не тільки за рахунок теплоти, що надходить від стінок термостата, та роботи, що виконується зовнішнім середовищем, але і за рахунок зменшення тепловмісту внутрішнього середовища термостата.

Необхідно відмітити, негативний знак функції $\Psi(T, w_{sun})$ є ознакою наявності ІнтМО під час процесу ТМО в термостаті. Важливим є те, що функція $\Psi(T, w_{sun})$ може бути негативною лише за наявності рідкої фази в термостаті, тобто за умови прагнення до рівноваги між двома фазами даної динамічної системи – рідиною та газовим суцільним середовищем. Після того, як об'ємна рідина в системі закінчується, система переходить до гігроскопічної області. Функція $\Psi(T, w_{sun})$ при цьому змінює знак на позитивний. В даній області характер досягнення рівноваги внутрішнім середовищем термостата визначається властивостями рідини, яку він утримує, а саме, формами зв'язку та структурою.

Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії на фазовій площині з координатами $\Psi(T, w_{sun})$ та T , пропорційна частині тепловмісту внутрішнього середовища термостата витраченому на фазовий перехід рідини даного середовища у газовий стан, є критерієм енергоефективності ефекту ІнтМО. При цьому слід відмітити, що її величина становить від 10 до 30% загальної площі під фазовою траєкторією процесу ТМО.

Розглянемо характерні шляхи еволюції з точки зору їх використання на практиці з керуванням ТМО в термостаті з обтюратором.

За еволюційним шляхом 1 (рис. 3.3) сировина знаходиться за температури термостата за практично відсутнього масообміну з зовнішнім середовищем впродовж часу значно більшого за час спостереження. Вивести систему із такого стану на будь-який інший еволюційний шлях можна відповідною зміною керуючих параметрів та параметрів порядку. Використати даний факт можна, наприклад, для таких процесів, як проварювання, бланшування, пастеризація, термостатування сировини і т. ін. Так в роботі [50] даний еволюційний шлях використовується для гідротермічної обробки крупи перед сушінням для виробництва швидковідновлюваних каш.

За 2 та 3 еволюційними шляхами сировина переводиться із стану з більшим вологовмістом до стану з меншим, тобто відбувається її зневоднення, що може бути використано для сушіння, випарювання, згущення, тощо. При цьому шлях еволюції системи визначає ефективність з точки зору енергетичних витрат та якості отримуваної продукції. Як слідує із вигляду кривих, що описують зміну температури сировини зі зміною її

вологовмісту, шлях 2 відповідає традиційному ТМО (не «індукованому»), а шлях 3 – керованому ІнТМО. Рух системи по шляху еволюції 3 дає можливість керувати «запуском», «зривом», «протіканням» процесу ТМО, а також його інтенсивністю, а, відповідно, і продуктивністю апаратної реалізації, що забезпечує даний процес. Попередніми дослідженнями доведено [20-29], що реалізація ефекту ІнТМО для зневоднення вологої сировини, характеризується високою енергоефективністю та якістю отримуваної продукції у порівнянні з більшістю способів зневоднення. Виходячи з цього, при виборі шляху еволюції системи під час зневоднення сировини з ІнТМО з точки зору енергетичних витрат та якості отримуваної сушеної продукції прагнуть до еволюційного шляху 3 [20-29].

Таким чином, аналізом ефекту ТМО в термостаті з обтюратором та трьома фазами у його виділеному внутрішньому об'ємі методом фазового простору, як одним із способів якісного аналізу стану системи, доведено принципові відмінності ефекту ІнТМО (ТМО з енергією активації) від ТМО без енергії активації. Доведено, що ІнТМО є керованим ефектом з широкими можливостями його практичної реалізації.

3.2. Системна вода сировини в термостаті, як параметр порядку ефекту ІнТМО

Одним із основних параметрів порядку ефекту ІнТМО є властивість рідини всередині термостата переходити до газового стану, обумовлена взаємодією її з оточенням – сухими речовинами, з точки зору практичного застосування ІнТМО – властивість сировини утримувати рідину. У феноменологічних рівняннях ефекту ІнТМО цей чинник визначається функцією $f_{\text{вун}}(p, T)$, яка обумовлює величину потоку маси (2.21) до суцільного газового середовища всередині термостата, що утворюється на етапі досягнення динамічної рівноваги. Функція $f_{\text{вун}}(p, T)$ визначає швидкість випаровування рідини з одиниці площі поверхні, визначається тиском і температурою всередині термостата та залежить від форми зв'язку рідини з твердим тілом всередині термостата та її структури. Виходячи з цього, інформація про форми та структуру рідини всередині термостата є вихідною для керування ІнТМО. При цьому слід відмітити, існує зворотній зв'язок між динамічними характеристиками протікання ефекту ІнТМО та динамічною поведінкою системної рідини всередині термостата [29, 30], що надає можливість керувати як характером ІнТМО, так і властивостями отримуваної продукції та енерговитратами на її отримання.

Виходячи із класичних поглядів [51] будемо вважати, що будь-яку вологоутримуючу систему можна представити як таку, що складається із води у рідкому, газоподібному або твердому стані та сухих речовин в розчиненому та твердому стані. Вода, що утримується системою, має різні форми зв'язку та структуру. При цьому, в твердому (кристалічному) стані вода знаходиться за температури $t < 0^{\circ}\text{C}$, в рідкому – як за позитивних ($0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 100^{\circ}\text{C}$), так і негативних ($t < 0^{\circ}\text{C}$) температур, якщо в ній розчинені електроліти, або молекули утворюють фізико-хімічні зв'язки з

сухими речовинами. Рідка вода може видалятися із системи механічно або через фазовий перехід I роду. Газоподібна вода знаходиться в системі за будь-яких температур, а її кількість визначається рівновагою за даних температури T та тиску p між рідкою та твердою водою й оточуючим середовищем. Таким чином, у випадку процесу ТМО слід враховувати рівновагу між фазами і, таким чином, форми зв'язку води системи з сухими речовинами та її структуру, що складають деяке середовище в гетерогенній трьохфазній системі, яке визначає основу поведінки тіла в цілому, як об'єкта масообміну.

Визначимо, що вода за формою зв'язку з сухою речовиною – це частина від загальної кількості рідкої води, яка ідентифікується за феноменологічними ознаками її внутрішньо- та міжмолекулярних зв'язків; вода за структурою – частина загальної кількості води, що ідентифікується відносним просторовим розташуванням певної кількості молей води відносно молей сухих речовин. Кількість води за формою зв'язку та структурою можуть не співпадати, особливо за межами рівноваги з оточенням. Частину води системи, яка проявляє властивості, відмінні від властивостей об'ємної рідкої води або так званої «вільної води», називають «зв'язаною водою».

Виходячи із ЯМР-досліджень, на відміну від класичних поглядів Ребіндера, де в якості єдиного критерію для класифікації форм зв'язку вологи з матеріалом прийнята величина вільної енергії ізотермічного зневоднення [52-56], ступінь «зв'язаності» вологи визначають за рухливістю молекул води [57]. В той же час, в теорії та практиці ЕПР відомий метод спінових міток, для якого розділення води на «зв'язану» та «вільну» проводиться виходячи з її властивостей розчиняти сіль, яка утримує спінову мітку [58]. Воду також класифікують, виходячи із температури її кристалізації або із величини її діелектричної проникності [59].

Ще одна точка зору на дані поняття витікає із класичного визначення «зв'язаного стану»: «зв'язаний стан – це стан системи частинок, за якого їх відносний рух відбувається в обмеженій частині простору впродовж тривалого часу у порівнянні з характерним для даної системи періодами». У загальному випадку, виходячи із класичного фізичного визначення, вся рідина, яку утримує продукт, є зв'язаною [60] тим або іншим механізмом.

Тобто, існує достатньо велика кількість методів дослідження рідин харчової сировини та продуктів, але під час їх застосування виникають певні труднощі, такі як: тривалість вимірювань, труднощі у визначенні кількості різних форм зв'язку рідини, незадовільна кореляція молекулярно-кінетичних характеристик з термодинамічними характеристиками, вимоги до вмісту рідини досліджуваного зразка, що значно збільшує похибки вимірів в області гігроскопічного стану [61].

З погляду на означене та з метою удосконалення підходів до методів кількісного та якісного аналізу властивостей рідини в харчовій сировині та продуктах, для рідини всередині термостата введено поняття «системна рідина» або «системна вода» [61] – це рідка частина, що знаходиться в об'ємі харчової системи всередині термостата впродовж часу не меншого за

характерний час технологічної операції та яка визначає перебіг ТМО і функціонально-технологічні властивості цієї харчової системи. Далі в роботі використовується саме ця термінологія, тобто рідина будь-якої харчової системи у внутрішньому виділеному об'ємі термостата вважається системною рідиною [62, 63].

Очевидно, процес видалення системної води із тіла супроводжується порушенням її зв'язку з сухими речовинами, на що витрачається визначена енергія [64]. Виходячи з цього, форма та структура системної води вологої сировини є одним із параметрів порядку для динамічної системи «оточуюче середовище – термостат з вологим ККПТ», який має визначальний вплив на характер ІнТМО і, при цьому, в свою чергу визначається характером протікання ефекту ІнТМО [30].

Поділимо сухі речовини будь якої харчової сировини або продуктів на розчинні, які утворюють гелі (число молів позначимо як $v_{c.p.}^{розч}$), та нерозчинні, що приймають участь в утворенні границь поділу в системі (число молів позначимо як $v_{c.p.}^{нерозч}$). Тоді мольне відношення сухих речовин ($v_{c.p.}$) до кількості системної води ($v_{c.в.}$) матиме вигляд:

$$C_{мол} = \frac{v_{c.p.}}{v_{c.в.}} = \frac{v_{c.p.}^{розч} + v_{c.p.}^{нерозч}}{v_{c.в.}}. \quad (3.4)$$

Вся системна вода умовно розділяється на n форм зв'язку:

$$v_{c.в.} = a_1 v_{c.в.} + a_2 v_{c.в.} + \dots + a_n v_{c.в.} = v_{c.в.} \sum_{i=1}^n a_i, \quad (3.5)$$

де a_i – частка від загальної кількості системної води (в молях) з i -ою формою зв'язку з матеріалом.

Тоді

$$C_{мол} = \frac{v_{c.p.}^{розч} + v_{c.p.}^{нерозч}}{v_{c.в.} \sum_{i=1}^n a_i}. \quad (3.6)$$

Якщо в системі вміщується k «сухих» компонентів:

$$v_{c.p.} = \sum_{j=1}^k v_{c.p.}^j. \quad (3.7)$$

Тоді отримаємо:

$$C_{\text{мол}} = \frac{\sum_{j=1}^k v_{\text{с.р.}}^j}{v_{\text{с.в.}} \sum_{i=1}^n a_i}. \quad (3.8)$$

Якщо припустити, що за технологічної обробки хімічних реакцій не відбувалось, а системна вода не видалялась та не зазнавала фазових перетворень I-го роду, тоді в процесі технологічної обробки мольна концентрація системної води в багатокомпонентній харчовій системі залишається сталою:

$$C_{\text{мол}} = \frac{v_{\text{с.р.}}}{v_{\text{с.в.}}} = \text{const}. \quad (3.9)$$

Виходячи з рівнянь (3.8) та (3.9), отримаємо:

$$C_{\text{мол}} = \frac{v_{\text{с.р.}}}{v_{\text{с.в.}}} = \frac{\sum_{j=1}^k v_{\text{с.р.}}^j}{v_{\text{с.в.}} \sum_{i=1}^n a_i} = \frac{\sum_{j=1}^k \frac{v_{\text{с.р.}}^j}{v_{\text{с.в.}}}}{\sum_{i=1}^n a_i} = \frac{\sum_{j=1}^k g_j}{\sum_{i=1}^n a_i} \geq 0, v_{\text{с.в.}} > 0, \quad (3.10)$$

де $g_j = \frac{\sum_{j=1}^k v_{\text{с.р.}}^j}{v_{\text{с.в.}}}$ – відносна мольна частка j -ої компоненти сухої речовини у системній воді.

Із рівняння (3.10) для частки від загальної кількості системної води (в молях) з f -ою формою зв'язку з матеріалом маємо:

$$a_f = \frac{\sum_{j=1}^k g_j}{C_{\text{мол}}} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq f}}^n a_i. \quad (3.11)$$

Виходячи з такого погляду на системну воду і на складові харчової сировини та продуктів, актуальним є створення модельних систем, які характеризуються, по можливості, меншою кількістю компонентів та простотою інтерпретації форм зв'язку води з ними. Отримання таких модельних систем можливо забезпечити шляхом визначеної пробопідготовки, яка полягає в отриманні зразка з максимально можливим однорідним складом та мінімально можливою кількістю складових. Так, наприклад, якщо це зернова культура, то зразки з неї повинні утримувати по можливості лише крохмаль, або лише клейковину і т. ін.

Кожному зразку такої бази даних модельних харчових систем буде відповідати k відносних мольних часток k компонентів сухої речовини у системній воді (g_j) та n мольних часток від загальної кількості системної води з n формами зв'язку з матеріалом (a_i). Значення відносних мольних часток компонентів сухої речовини у системній воді g_j визначаються виходячи із хімічного складу зразка, а мольні частки від загальної кількості системної води з i -тою формою зв'язку з матеріалом a_i – виходячи із експериментальних даних. Під експериментальними даними маються на увазі дані, отримані різними методами дослідження води: низькотемпературним калориметричним, тензометричним, реологічним, ЕПР, ЯМР, диференціально скануючої калориметрії, молекулярної динаміки і таке інше.

Під час використання будь-якого із методів дослідження води є можливість знайти значення мольних часток води A_i , які представляють собою суму деякої кількості a_i , тобто загальна кількість води буде мати вигляд:

$$v_{c.в.} = v_{c.в.} \left(\sum_{i=1}^l a_i + \sum_{i=l}^s a_i + \dots + \sum_{i=r}^n a_i \right) = v_{c.в.} (A_0 + A_1 + \dots + A_m) = v_{c.в.} \sum_{i=0}^m A_i \quad (3.12)$$

Кількість A_i визначається методом та методикою дослідження. Наприклад, для такого термодинамічного метода як калориметричний, який базується на визначенні температури кристалізації та кількості теплоти, що виділяється під час даного процесу за температури охолодження до -5 °С, мольних часток A_i – всього дві, але для того ж метода за зниження температури, наприклад, до -70 °С кількість A_i збільшується.

Іншим прикладом визначення A_i є такий молекулярно-кінетичний метод як метод ЕПР-спінових міток [62] (патент на методику, розроблену авторами монографії наведена в додатку). В даному експерименті мітка дає сигнал в залежності від того чи знаходиться вона в розчині, чи випала в осад через перенасиченість розчину. Для такого способу мольних часток A_i – дві. За допомогою ЕПР методу також досліджують воду за величиною її діелектричної проникності, при цьому кількість A_i зростає і визначається чутливістю реєструючого приладу.

Методів дослідження води достатньо велика кількість, але набір мольних часток a_i , які входять до мольних часток A_i – різний. При цьому кількість A_i залежить не тільки від умов експерименту, а і від інтерпретації отриманих результатів.

Використовуючи отриману таким чином базу даних, воду будь-якої харчової сировини або продукту, за умови наявного відомого хімічного складу, можна проаналізувати на предмет кількісної та якісної оцінки форм та видів зв'язку води з сухими речовинами обраного зразку. Порівняння

величин g_j та a_i для харчового продукту з тими ж величинами із бази даних дає можливість прогнозувати та науково обґрунтовувати функціонально-технологічну роль того чи іншого компонента.

Особливо слід відзначити ґрунтовність такого аналізу для харчових продуктів та сировини, що підлягають технологічній обробці з процесами тепло- та масообміну. У цьому випадку прагнення до рівноваги між агрегатними станами води є основним кінетичним та енергетичним чинником ефективності реалізації обраної технології. Тобто системна вода є тим уявленням, використання та аналіз якого дозволить науково обґрунтовувати певні енерготехнологічні процеси.

Як відмічено вище, у феноменологічних рівняннях ефекту ІнтМО (2.21) властивість рідини переходити до газового стану враховується функцією $f_{\text{вун}}(p, T)$, яка обумовлює величину потоку маси до суцільного газового середовища всередині термостата: функція $f_{\text{вун}}(p, T)$ визначається тиском і температурою всередині термостата та залежить від форми зв'язку рідини з сухими речовинами всередині термостата та її структури. Умовно її можна представити як суму:

$$f_{\text{вун}}(p, T) = A_0 \cdot f_{\text{вун}}^0(p, T) + A_1 \cdot f_{\text{вун}}^1(p, T) + \dots + A_m \cdot f_{\text{вун}}^m(p, T), \quad (3.13)$$

де $f_{\text{вун}}^i(p, T)$ – визначається лише тиском та температурою для рідини з відповідною формою зв'язку з сухими речовинами;

A_0 – відносна частка системної рідини, яка має властивості об'ємної (вільної) рідини.

Якщо в термостаті знаходиться тільки рідина $A_0=1$. Частина системної рідини A_0 є тією частиною, яка бере участь у масообміні під час ІнтМО, тому аналіз функції $f_{\text{вун}}(p, T)$ може бути обмежений першим доданком.

Необхідно відмітити, що частина системної води, яка не приймає участь у масообміні під час ІнтМО – не випаровується за температури менше 100 °С, не замерзає за температури 0 °С, не витікає тощо, та визначає вимоги до умов зберігання харчової сировини та продуктів.

Вищевикладене обґрунтовує доцільність розрахунку мольних, а не масових концентрацій для складових будь-якої системи, що знаходиться в термостаті під час організації ІнтМО.

3.3. Експериментальні дослідження ефекту індукованого тепломасообміну за різної його організації

З метою доведення феноменологічної гіпотези ефекту ІнтМО, проведено експериментальні та теоретичні дослідження, результатом яких стало розвинення поглядів на фізико-математичний механізм даного ефекту.

Як відмічено у попередніх підрозділах, 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 [30]. При цьому термостат технічно реалізується як деякий ТМО-модуль, визначена теплоємність стінок якого (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 параметрами порядку, які обумовлюють вихідні вимоги для конструювання апаратів з використанням ефекту ІнТМО, є розміри, конструкція внутрішнього виділеного об'єму термостата, способи та ступень заповнення його сировиною.

Для дослідження впливу на характер ефекту ІнТМО даних параметрів порядку проведено серію експериментів. При цьому дослідження особливостей ТМО за різних умов реалізації ефекту ІнТМО проводили непрямым способом. Під час досліджень ІнТМО реєстрували кінетику вологовмісту ККПТ або КПТ та кінетику температури від термопар, розміщених у внутрішньому об'ємі термостата. За положенням особливих точок кінетики вологовмісту, кінетики температури та фазового портрету ефекту ІнТМО судили про характер та механізм ТМО термостата з навколишнім середовищем.

Дослідження проводились на експериментальних установках, принципові схеми яких наведені на рис. 2.6 та 2.7. Матеріалом для виготовлення стінок термостата, які обмежують його внутрішній об'єм, було скло та листовий алюміній товщиною від 1 до 5 мм, тобто стінки виконані із паронепроникного матеріалу. Місця з'єднання стінок термостата між собою були загерметизовані з використанням силіконового жароміцного герметика. Таким чином, єдиним шляхом для масообміну між оточуючим середовищем та внутрішнім середовищем термостата є обтюратори.

3.3.1. Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини

Найпростішим варіантом організації ефекту ІнТМО є термостат з обтюратором, що утримує рідину ($A_0=1$) та газ (рис. 3.9). Даним дослідженням проводиться моделювання процесів випарювання, концентрування та згущення з використанням ефекту ІнТМО.

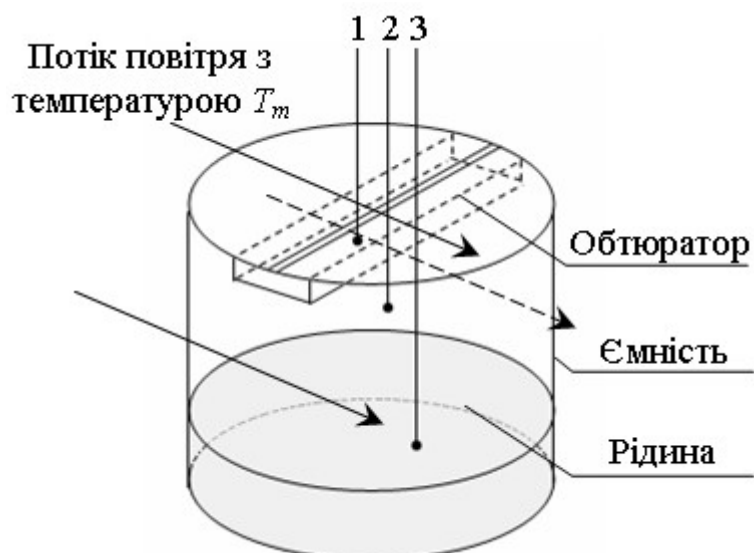


Рис. 3.4. Схема експериментальної установки для моделювання випарювання, концентрування та згущення з використанням ІнтМО за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини у його внутрішньому об'ємі: 1, 2, 3 – термопарні

Дослідження характеру ІнтМО проводилось за атмосферного тиску та температури термостата більшої за температуру кипіння рідини, яка знаходиться у його внутрішньому виділеному об'ємі [65]. Так за атмосферного тиску $99 \dots 102 \text{ кПа}$ для води цією температурою є температура більша за $99 \dots 100 \text{ }^\circ\text{C}$, а для етилового спирту – більша за $77 \dots 78 \text{ }^\circ\text{C}$.

Внутрішня частина термостата, яка використовувалась під час досліджень, являла собою скляну прозору циліндричну ємність. У верхній частині ємності виконаний обтюратор. Функція створення флуктуації газового середовища в об'ємі обтюратора та функція термостатування забезпечувались потоком повітря з визначеною температурою, що омиває зовнішню поверхню циліндричної ємності, яка обмежує внутрішнє середовище термостата (рис. 3.4).

Виділений внутрішній об'єм термостата частково або повністю заповнювався рідиною, у якості якої використовувались вода або/та етиловий спирт. Дослідження проводились як за умови використання вологого обтюратора, так і сухого. Зволоження обтюратора проводилось рідиною, яка використовувалась у дослідженні, тобто рідиною, яка знаходилась у виділеному внутрішньому об'ємі термостата. Спостереження за протіканням ефекту ІнтМО проводили візуально та за сигналами від термопар, які знаходились у внутрішньому об'ємі термостата. При цьому термопара 1 реєструє температуру обтюратора, термопарні 2 і 3 – відповідно температуру газу та температуру рідкої фази у внутрішньому об'ємі термостата.

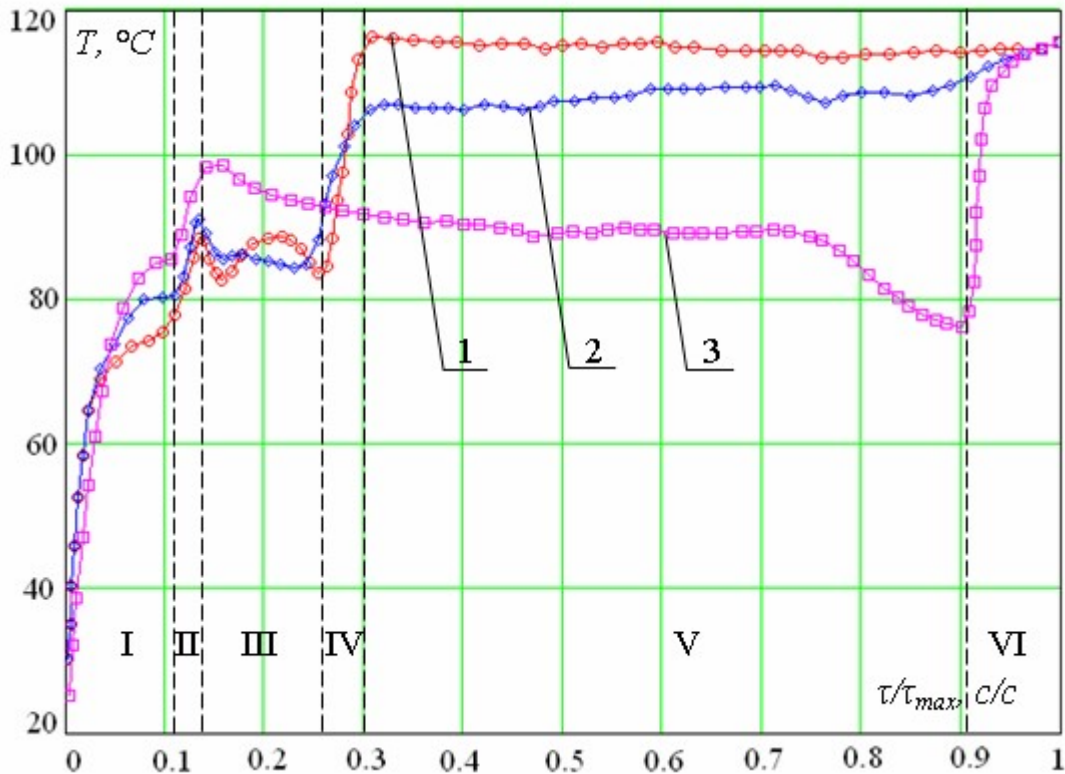


Рис. 3.5. Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата (1, 2, 3 – термопари з рис. 3.9) під час ефекту ІнтМО за температур термостата, °С: I – 95...96; II-VI – 115...116

Кінетика температури ефекту ІнтМО в термостаті зі зволуженим обтюратором наведена на рис. 3.5. Температура термостата в даному дослідженні змінювалась ступінчасто та дорівнювала на першому етапі 95...96 °С, а на другому 115...116 °С. Зміна температури проводилась у два етапи ступінчасто з метою «запуску» ефекту ІнтМО: динамічна система «оточуюче середовище – термостат» має певну інерційність – для «запуску» ефекту ІнтМО необхідне забезпечення відповідних необхідних умов.

Однією з таких необхідних умов є забезпечення суцільності внутрішнього газового середовища всередині термостата. Дана умова виконується по мірі досягнення парціальним тиском пари води у внутрішньому газовому середовищі значення тиску насиченої пари за даного атмосферного тиску та температури.

Іншою необхідною умовою, яка має певну інерційність, є наявність флуктуації газового середовища в об'ємі обтюратора. Оскільки обтюратор являє собою отвір в термостаті з КПТ, а в даному дослідженні обтюратор зволожувався, то для забезпечення наявності середовища для флуктуацій газу, частина вологи повинна випаруватися. Очевидно для забезпечення як першої відміченої умови, так і другої, необхідний визначений час.

На кінетиці температури складових внутрішнього середовища термостата можна виділити декілька ділянок відділенні одна від одної пунктирними лініями (рис. 3.5). Перша ділянка (I) відповідає досягненню динамічною системою точки біфуркації та «запуску» ефекту ІнтМО, при

цьому температура термостата дорівнює 95...96 °С. Після «запуску» ефекту ІнтМО, якому відповідає вихід кінетик температури складових внутрішнього середовища термостата на горизонтальну ділянку, температуру термостата збільшили до 115...116 °С. Збільшенню температури термостата відповідає стрибкоподібна зміна температури на ділянці II. Впродовж третьої ділянки (III) відбувається видалення води із обтюатора з одночасним переходом об'ємної води у внутрішньому середовищі термостата у газовий стан. Про закінчення рідкої води в обтюаторі свідчить стрибкоподібне його нагрівання до температури близької до температури термостата (IV). П'ята ділянка відповідає переходу об'ємної води у газовий стан при «сухому» обтюаторі (відсутність рідкої води у обтюаторі). Закінченню об'ємної води у внутрішньому виділеному об'ємі термостата та завершенню ефекту ІнтМО відповідає стрибкоподібне збільшення температури газового середовища внутрішньої частини термостата до значення температури термостата (VI).

На ділянках II-V динамічна система «рідина – газ – обтюатор» знаходиться в метастабільному стані за $p, V = const$. При цьому на початку третьої ділянки (III) ентальпія внутрішнього середовища термостата дорівнює:

$$I_1 = c_1 m_1 T_1 + r \cdot m_p, \quad (3.14)$$

а в кінці п'ятої ділянки:

$$I_2 = c_2 m_2 T_2, \quad (3.15)$$

де c_1, m_1, T_1 – теплоємність, маса та температура внутрішнього середовища термостата, яке складається з рідини, газу та КПТ обтюатора на початку ІнтМО;

c_2, m_2, T_1, T_2 – теплоємність, маса та температура внутрішнього середовища термостата, яке складається з газу та обтюатора на закінченні ефекту ІнтМО;

m_p – маса рідини у виділеному внутрішньому об'ємі термостата;

r – питома теплота пароутворення рідини.

Зміна ентальпії під час ефекту ІнтМО дорівнює:

$$\Delta I = I_2 - I_1. \quad (3.16)$$

При цьому слід вважати, що зміна ентальпії відбувається за рахунок зміни тепловмісту термостата, який значно більший зміни ентальпії, та кінетичної енергії потоку повітря, що рухається відносно обтюатора.

Впродовж проведеного експерименту за температури термостата 115...116 °С, тобто за температури більшої за температуру кипіння об'ємної води, кипіння води у внутрішньому середовищі термостата не відбувалось,

що доводить, по-перше, візуальне спостереження, а по-друге, кінетика температури від термопар 3, яка фіксує температуру об'ємної води (температура не перевищувала 97 °С).

Кипіння рідини спостерігається у термостаті за умови відсутності «запуску» ефекту ІнтМО через невиконання будь-яких необхідних умов. Так, якщо температуру термостата з вологим обтюратором підтримувати 115...116 °С, то через відсутність флуктуацій газового середовища в обтюраторі, як описано вище, ефект ІнтМО «блокується» і температура внутрішнього середовища починає прагнути до температури термостата – об'ємна вода закипає. Однак по мірі досягнення необхідних умов для «запуску» ефекту ІнтМО і, відповідно, його «запуску» – кипіння припиняється. Далі ІнтМО протікає відповідно до ділянок III-IV на кінетиці температур з рис. 3.5.

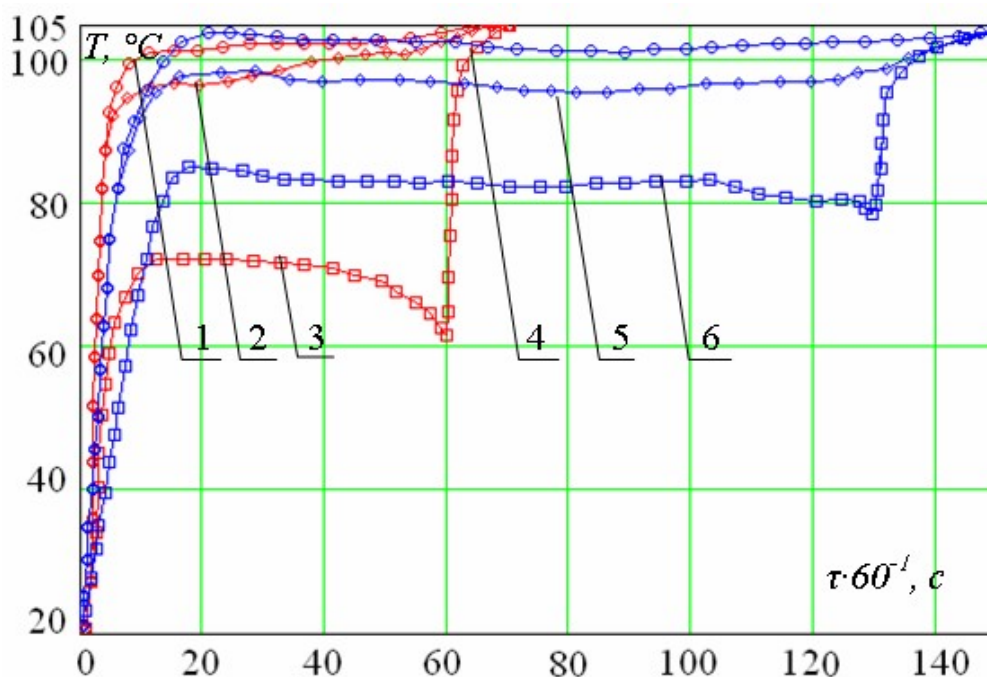


Рис. 3.6. Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ІнтМО за умови використання в якості рідкої фази: 1, 2, 3 – етилового спирту (відповідно сигнал від термопар 1, 2, 3 з рис. 3.9); 4, 5, 6 – води (відповідно сигнал від термопар 1, 2, 3 з рис. 3.9)

Отриманим результатом встановлена неможливість досягнення об'ємною водою у внутрішньому виділеному об'ємі термостата температури кипіння за умови протікання ефекту ІнтМО.

Такий же результат отриманий і для етилового спирту, і для суміші спирту та води. На рис. 3.6 наведено кінетики температури складових внутрішнього виділеного об'єму термостата (рис. 3.4) під час ІнтМО, де в якості рідкої фази по черзі використовувались етиловий спирт та вода.

Під час експерименту, результати якого наведені на рис. 3.6, обтюратор не зволожували, температуру термостата підтримували рівною 105...106 °С. Як і в попередньому дослідженні ні для спирту, ні для води кипіння не відбувалось.

Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнтМО, де в якості рідкої фази використовувалась суміш етилового спирту та води у об'ємному співвідношенні 1:1, має такий же характер (рис. 3.7).

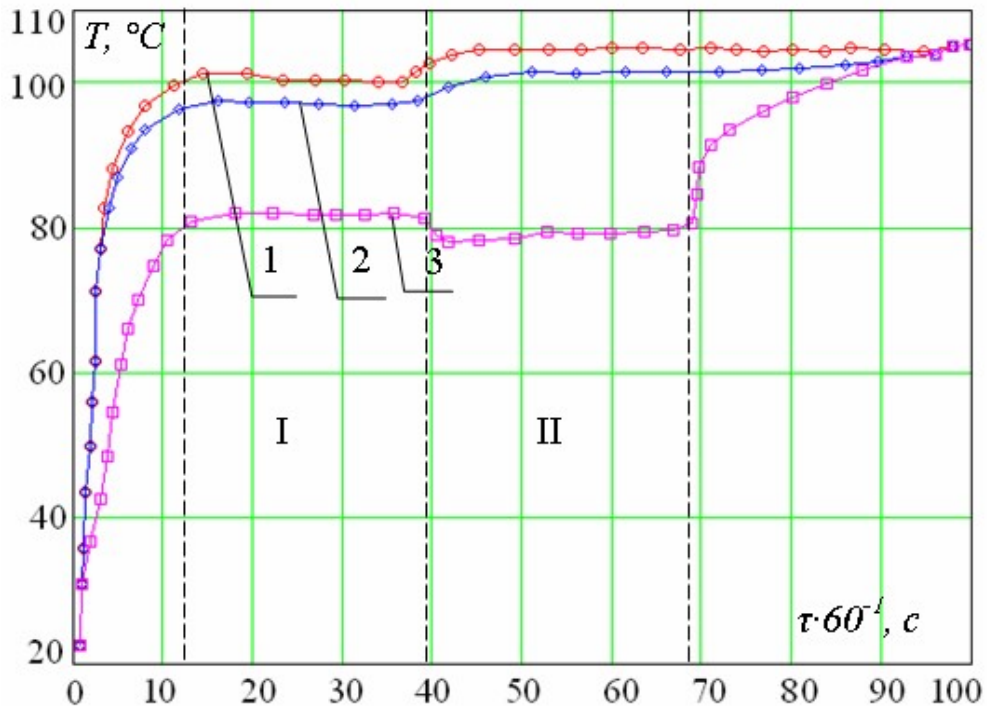


Рис. 3.7. Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнтМО за умови використання в якості рідкої фази суміші етилового спирту та води у об'ємному співвідношенні 1:1 (1, 2, 3 – сигнали від термопар з рис. 3.4)

Однак ділянка кінетики температури рідини у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, яка відповідає переходу рідкої фази у газовий стан, має дві частини I та II. Дані частини відрізняються одна від одної значенням температури, при чому перехід між ними відбувається стрибкоподібно. Даний стрибкоподібний перехід відповідає закінченню випаровування етилового спирту у внутрішньому середовищі термостата та початку переходу рідкої води у газовий стан.

Слід відмітити, що для даної суміші під час ІнтМО за температури термостата (105 °С) більшої за температуру кипіння даної рідини (83 °С), кипіння її не відбувалось.

Важливим результатом даного дослідження є встановлення факту, що етиловий спирт та вода переходять до газового стану під час ефекту ІнтМО

окремо, при цьому фіксувати видалення рідкої фази компонентів суміші можливо за кінетикою температури рідини.

Відзначено, з точки зору практичного застосування ефекту ІНТМО у харчовій промисловості дана особливість може бути використана для таких технологічних операцій як ректифікація, перегонка або дистиляція без фази кипіння. Відмічено, перетин кінетик температури складових внутрішнього середовища термостата є відбиттям їх теплофізичних властивостей, що може бути використано для експериментального дослідження цих властивостей, а термостат з ефектом ІНТМО – як лабораторне (науково-дослідне) обладнання.

3.3.2. Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну за наявності твердої, рідкої та газової фаз всередині термостата з розривами між фазами

Моделюванням ІНТМО за наявності твердої, рідкої та газової фаз всередині термостата з розривами між фазами встановлений основний параметр порядку ефекту ІНТМО – наявність суцільності газового середовища за парціальним тиском пари рідини всередині термостата. За умови забезпечення даного параметра порядку ефект ІНТМО можливий навіть при просторовому відділенні сухих речовин і рідини. Моделювання проводились у термостаті, внутрішній об'єм якого складається з двох камер. Схема розміщення термопар та загальний вигляд термостата наведений на рис. 3.8.

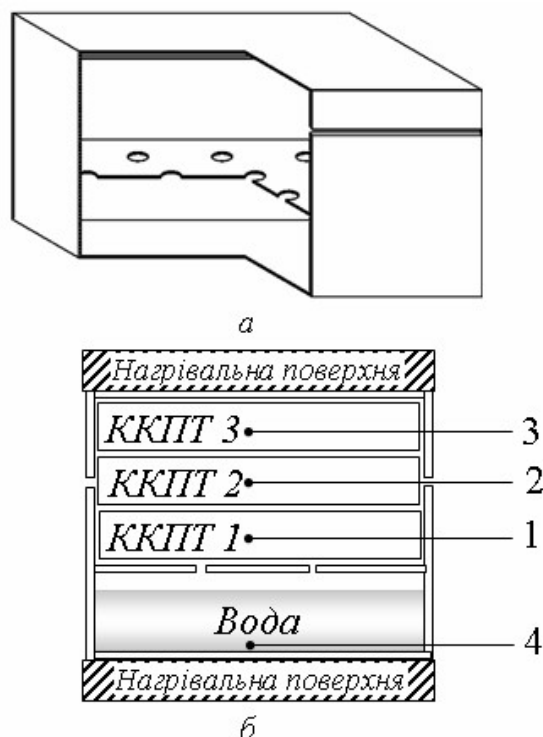


Рис. 3.8. Загальний вигляд (а) модуля, що обмежує внутрішню частину термостата з двома камерами та схема розміщення термопар в ньому (б)

Камери одна від одної відділялись алюмінієвою перегородкою (товщина перегородки 4 мм), в якій були виконані отвори. Загальна площа отворів ($6,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$) складала не більше 3% від площі перегородки ($2,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$). Верхня камера щільно заповнювалась модельним ККПТ, а нижня частково або повністю заповнювалась водою.

Обтюратори наявні лише в верхній камері внутрішньої частини термостата. Всі стики між стінками були загерметизовані. Єдиним шляхом для масообміну між навколишнім середовищем та внутрішнім середовищем термостата є обтюратори. Вихід води із нижньої камери можливий лише в газовому стані через отвори в перегородці, а до оточуючого середовища лише через ККПТ та обтюратори. Конструкцією нижньої камери передбачений оглядовий отвір та можливість додавати рідину через капіляр безпосередньо під час ТМО.

Виходячи із спостереження за кількістю води в нижній камері через оглядовий отвір та кінетик температури від різних термопар, наведених на рис. 3.9, кінетика процесу наступна. На початку процесу відбувається нагрівання внутрішнього середовища термостата, яке супроводжується фазовим переходом I-го роду для води, що утримується ККПТ, та води у нижній камері, при цьому кінетика температури ККПТ має прирощення температури не менше нуля, тобто $dT \geq 0$.

Очевидно, у нижній камері знаходиться вільна (об'ємна) вода, випаровування якої потребує меншої енергії у порівнянні з водою, що зв'язана тим або іншим механізмом із оточенням. Тому першою починає випаровуватися до внутрішнього середовища вода із нижньої камери та частина системної води ККПТ, яка має ті ж властивості. Кінетика температури при цьому має горизонтальну ділянку, для якої прирощення температури близьке до нуля – $dT \approx 0$. Горизонтальна ділянка обумовлена тим, що кількість води, що переходить в газовий стан за одиницю часу, тобто швидкість випаровування – постійна. Збільшення швидкості випаровування обмежене сталістю площі випаровування та значенням парціального тиску пари води у внутрішньому газовому середовищі термостата, яке асимптотично прагне до тиску насиченої пари за даної температури.

Про повне видалення в термостаті системної води, яка має властивості об'ємної, свідчить локальний мінімум кінетики температури, отриманої від термопари, яка знаходиться у нижній камері (термопара 4 на рис. 3.8 та 3.9). Наявність локального мінімуму (пунктирна лінія на рис. 3.9) пояснюється тим, що по мірі зменшення у нижній камері кількості води, її поверхневий шар, з якого випаровується вода, переміщується та досягає спаю термопари. Очевидно, температура даного шару через випаровування молекул води – найменша, у порівнянні з шарами води, які знаходяться нижче. Оскільки термопара 4 знаходиться на дні нижньої камери, то локальний мінімум кінетики температури, отриманої від неї, свідчить про закінчення води у даній частині термостата. При цьому закінчується системна вода ККПТ, яка має ті ж властивості, що і об'ємна вода у нижній камері термостата.

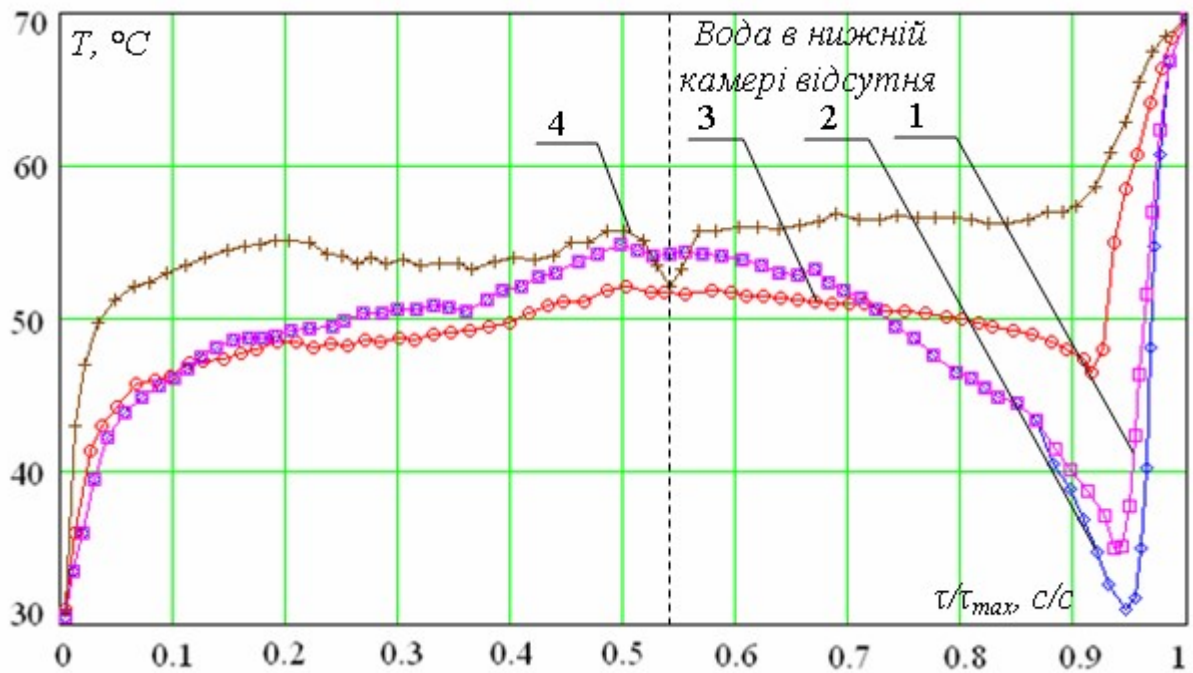


Рис. 3.9. Кінетики температури (пронормовані на загальну тривалість процесу τ_{max}), отримані від різних термопар під час ІнТМО в термостаті, внутрішня частина якого складається з двох камер (рис. 3.8), де 1, 2, 3, 4 – номери термопар

Після цього продовжується випаровування частини системної води, яка зв'язана тим, або іншим механізмом з сухими речовинами ККПТ. Випаровування системної води, властивості якої відмінні від властивостей об'ємної води, супроводжується під час ІнТМО утворенням та розвитком дисипативних структур в об'ємі ККПТ всередині термостата в різних місцях, де наявна границя розділу «рідина – газ». Збільшується інтенсивність випаровування системної води з ККПТ, в результаті приріст температури для ККПТ змінює свій знак на від'ємний – $dT < 0$. Ефект ІнТМО продовжується до повного випаровування частини системної води, для якої можливий фазовий перехід I роду за даної температури та атмосферного тиску. Система надходить до гігроскопічного стану, якому відповідає локальний мінімум на кінетиках температури ККПТ.

Після досягнення ККПТ гігроскопічного стану, відбувається нагрівання внутрішнього середовища термостата до температури термостата.

Отриманий результат свідчить про те, що наявність розривів в рідкій та твердій фазах всередині термостата сумірних за розмірами з габаритними розмірами внутрішньої частини термостата не вносить видимих змін у характер протікання ефекту ІнТМО.

Тобто «запуск», «протікання» та «завершення» ефекту ІнТМО можливі навіть за наявності просторового відокремлення рідкої та твердої фаз у внутрішньому виділеному об'ємі термостата за виконання необхідних умов для реалізації даного ефекту. При цьому узагальнюючою необхідною умовою

реалізації ефекту ІнтМО (основний параметр порядку ефекту ІнтМО) є збереження суцільності газового середовища всередині термостата.

Необхідно відзначити, дана особливість ефекту ІнтМО має практичну цінність для здійснення операцій з просторовим відділенням сухих речовин і рідини, таких як ароматизація або одночасна гідротермічна обробка з сушінням, причому за організації ІнтМО в одному універсальному апараті.

Для організації безперервно діючих процесів досліджувався ефект ІнтМО в тому ж термостаті з періодичним додаванням води з постійним об'ємом V_0 у нижню камеру по мірі її випаровування. На рис. 3.10 наведено кінетики температури, отримані при цьому від різних термопар у тому ж термостаті (рис. 3.8). Воду додавали по мірі її закінчення в нижній камері. За рівнем води спостерігали через оглядовий отвір.

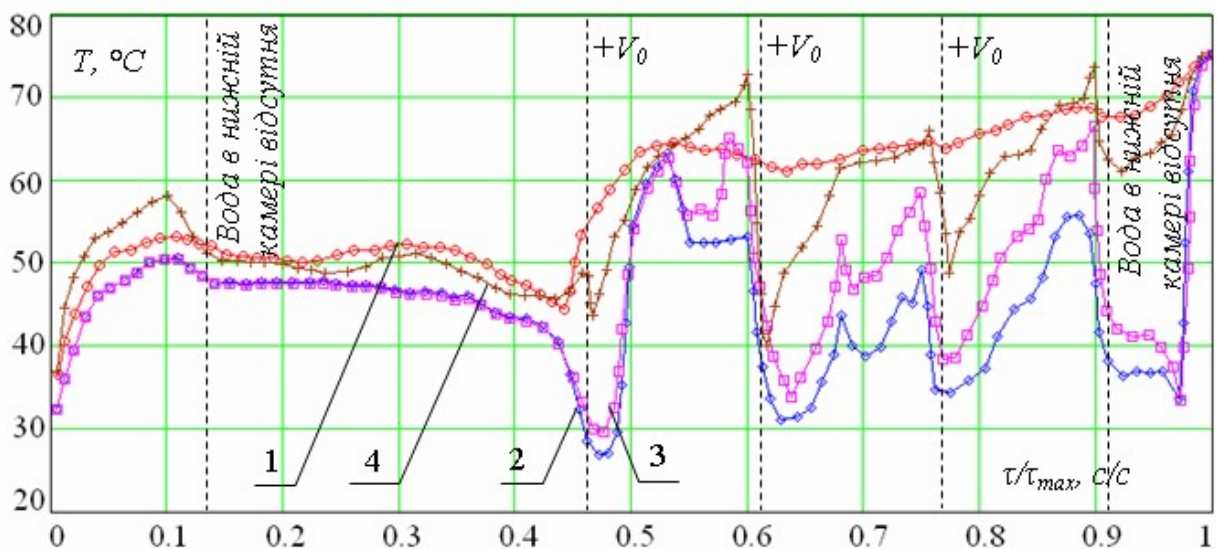


Рис. 3.10. Кінетики температури, отримані від різних термопар (1, 2, 3, 4 – термопары з рис. 3.8) під час ІнтМО в термостаті з періодичним додаванням води об'ємом V_0

Про закінчення води у нижній камері свідчать характерні стрибкоподібні зміни кінетики температури, отриманої від термопары 4, спай якої знаходиться в рідкій воді.

Перше додавання води у нижню камеру внутрішньої частини термостата було проведено, коли температура ККПТ досягла локального мінімуму, тобто ККПТ знаходилось в гігроскопічному стані.

Після введення у нижню камеру термостата об'ємної води, її температура починає рости. Об'ємна вода нагрівається і одночасно випаровується, при цьому газове середовище всередині термостата насичується паром води. В той же час, по мірі насичення газового середовища водою, вологовміст ККПТ збільшується, через те, що ККПТ поглинає воду із газового середовища всередині термостата. Температура ККПТ при цьому збільшується.

Після переходу всієї об'ємної системної води в газовий стан та виходу її частини в газовому стані через обтюратори в оточуюче середовище, парціальний тиск пари води у суцільному газовому середовищі всередині термостата зменшується й інтенсивність випаровування системної води ККПТ збільшується за рахунок розвитку дисипативних структур. Температура ККПТ починає зменшуватися до досягнення ним гігроскопічного стану через закінчення частини системної води, для якої можливий фазовий перехід I роду за даних умов.

Необхідно відмітити, що як видно з рис. 3.10, тривалість випаровування доданої в нижню камеру води відрізняється у межах похибки (відстані між пунктирними лініями на рис. 3.10). Отримане свідчить про те, що продуктивність термостата по випаруваній воді постійна і обумовлена продуктивністю обтюратора за даних керуючих параметрів. При цьому продуктивність обтюратора визначається його фізичними властивостями, що є одним із чинників, за допомогою яких можливе керування ефектом ІнТМО під час застосування його на практиці.

Продуктивність обтюратора розраховується за формулою:

$$Pr_{обт} = \frac{\Delta m_p}{S_{обт} \cdot \Delta \tau}, \quad (3.17)$$

де Δm_p – маса рідини, що випарувалась за час $\Delta \tau$ (с), кг;

$S_{обт}$ – площа зовнішньої поверхні обтюратора (по відношенню до внутрішнього об'єму термостата), m^2 .

Розрахована таким чином продуктивність обтюратора для температури термостата $75^\circ C$ за умови $\Delta m_p = 12 \cdot 10^{-3}$ кг; $\Delta \tau = 3600$ с;

$$S_{обт} = 190 \cdot 10^{-6} m^2 \text{ дорівнює } Pr_{обт} \approx 17 \cdot 10^{-3} \frac{кг}{m^2 \cdot c}.$$

Для порівняння, випаровування води з відкритої поверхні за тієї ж температури без обдування складає $Pr_{v=0 м/с} = 3 \cdot 10^{-3} \Big|_{T_m=75^\circ C} \left(\frac{кг}{m^2 \cdot c} \right)$, а за швидкості $v = 10$ м/с повітря, що рухається відносно відкритої поверхні рідини – $Pr_{v=10 м/с} = 10 \cdot 10^{-3} \Big|_{T_{нов}=75^\circ C} \left(\frac{кг}{m^2 \cdot c} \right)$.

Таким чином, проведеними розрахунками встановлено, питома продуктивність робочої поверхні термостата з ІнТМО в 1,7 рази більша у порівнянні з продуктивністю випаровування з відкритої поверхні води за тих же температури ($75^\circ C$) та швидкості руху ($v=10$ м/с) над поверхнею, що вигідно вирізняє ІнТМО.

Моделювання сушіння та гідротермічної обробки з ІнТМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки [66] проводилось шляхом

створення між шарами ККПТ розривів сумірних з внутрішнім об'ємом термостата (рис. 3.11).

При цьому використовувався термостат наведений на рис. 2.4. Його внутрішній об'єм заповнювали шарами вологого ККПТ з габаритними розмірами $95 \times 5 \times 22$ мм, як показано на рис. 3.11.

Як видно з рис. 3.11, у внутрішньому об'ємі термостата мають місце розриви об'єму ККПТ. При цьому величина об'єму заповненого тільки газовим суцільним середовищем сумірна з об'ємом шару ККПТ.

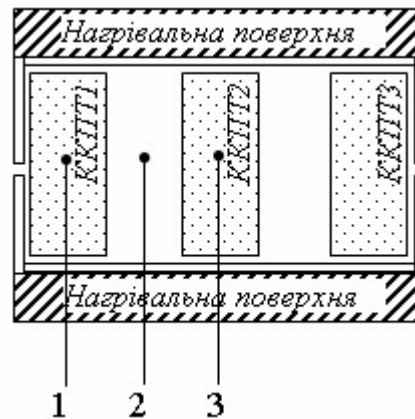


Рис. 3.11. Схема заповнення внутрішньої частини термостата шарами ККПТ під час моделювання ІнТМО в сировині з високою поруватістю або високим ступенем усадки: 1, 2, 3 – термодари

За «запуском» та характером «протікання» ефекту ІнТМО стежили за кінетиками температури, які отримували від термодар розміщених у внутрішньому середовищі термостата (рис. 3.11). Експеримент організовувався таким чином, що обдування обтюраторів потоком повітря проводили після досягнення температурою внутрішнього середовища температури термостата, тобто після досягнення системою точки нестійкої рівноваги, яка є точкою біфуркації.

Створення зовнішньої флуктуації приводить до того, що система виходить із стану нестійкої рівноваги та починає рухатись до стану стійкої рівноваги. Кінетики температури суцільного газового середовища (термопара 2) та шарів ККПТ (термодари 1 та 3), отримані при цьому, наведена на рис. 3.12.

Про «запуск» ефекту ІнТМО, відповідно, свідчить негативне прирощення температури $dT < 0$, а про його закінчення – зміна знаку прирощення температури на позитивний $dT > 0$. Таким чином, виходячи з виду отриманих кінетик температури (рис. 3.12) характер ефекту ІнТМО за умов наявності розривів в твердій фазі всередині термостата сумірних за розмірами з габаритними розмірами внутрішньої частини термостата не відрізняється від характеру ефекту ІнТМО за умов відсутності таких розривів.

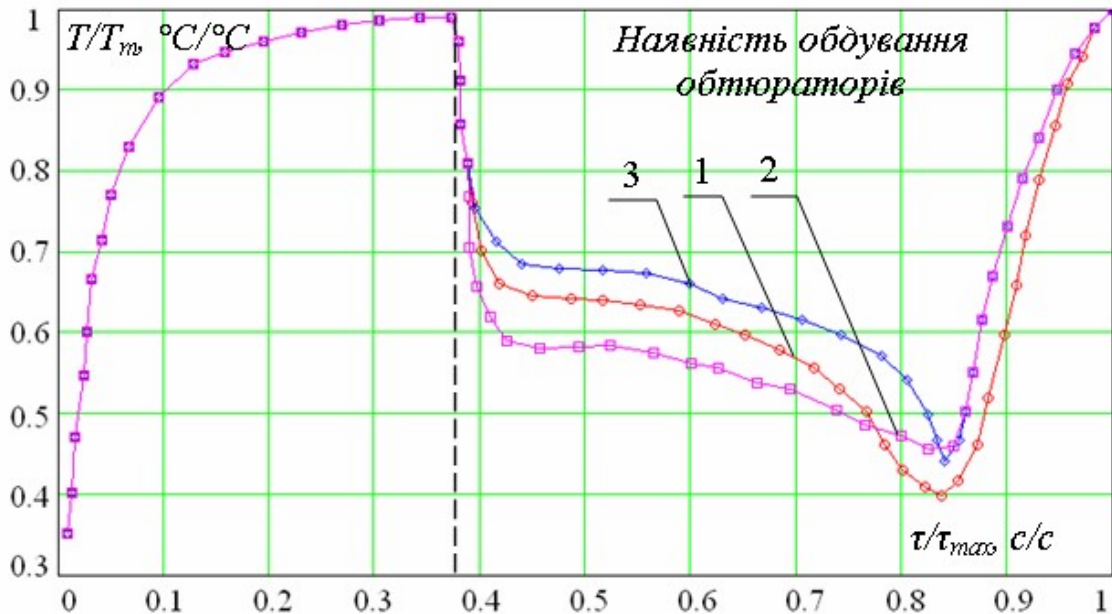


Рис. 3.12. Кінетика температури (пронормована на загальну тривалість процесу τ_{max} та температуру термостата T_m) суцільного газового середовища (2) та шарів ККПТ (1, 3) всередині термостата під час ІнТМО, за умови наявності розривів в твердій фазі всередині термостата сумірних за розмірами з габаритними розмірами його внутрішнього виділеного об'єму

Такий же результат отриманий і під час моделювання обробки з ІнТМО сировини з частинками, що мають газонепроникні включення.

3.3.3. Дослідження характеру ефекту індукованого тепломасообміну для сировини з газонепроникними включеннями

Моделювання ефекту ІнТМО для сировини з газонепроникними включеннями [67] проводилось у термостаті, який наведено на рис. 2.4. Площа стінок термостата, що обмежують його внутрішній виділений об'єм, складала – $7,5 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$, а площа зовнішньої поверхні обтюраторів – $1,9 \cdot 10^2 \text{ мм}^2$, тобто співвідношення між площами дорівнює 40:1. Три прямокутні шари ККПТ розміром $95 \times 5 \times 22 \text{ мм}$ розміщувались паралельно нагрівальним поверхням як показано на рис. 3.13.

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

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 ККПТ (ККПТ 2) контактує з оточуючим середовищем через зазори в стінках термостата. Функції обтюратора виконує частина даного шару ККПТ, яка безпосередньо прилягає до зазору.



Рис. 3.13. Схема розміщення термопар та листів алюмінієвої фольги між шарами ККПТ під час моделювання ІнТМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями (1, 2, 3 – термопари у відповідних шарах ККПТ)

На рис. 3.14 наведено кінетику температури шарів ККПТ під час ефекту ІнТМО за даної організації експерименту.

Кінетики температури для різних шарів ККПТ мають типовий для ефекту ІнТМО характер: нагрівання ККПТ та досягнення локального максимуму температури, який відповідає точці біфуркації; зменшення температури з часом та досягнення локального мінімуму температури; нагрівання до температури термостата. Локальний мінімум температури відповідає досягненню модельним ККПТ гігроскопічного стану, що відповідає кінцевому періоду процесу ТМО в термостаті.

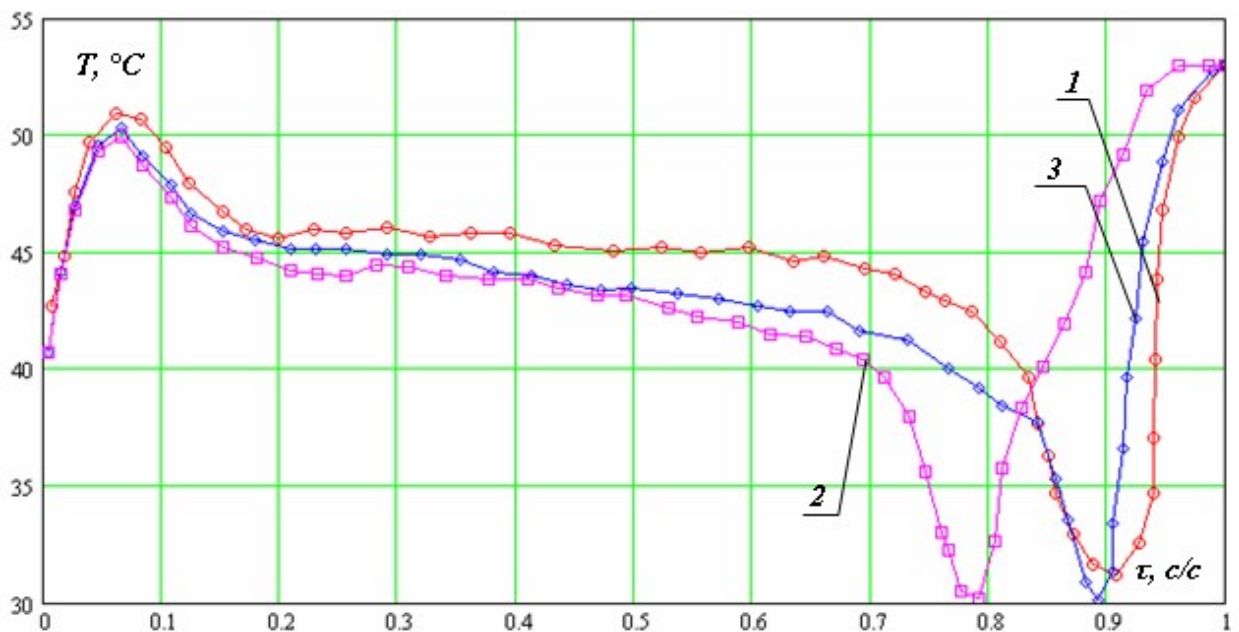


Рис. 3.14. Кінетика температури (пронормована на загальну тривалість процесу τ_{max}) шарів ККПТ під час моделювання ефекту ІнТМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1 – ККПТ 1; 2 – ККПТ 2; 3 – ККПТ 3

Як видно з рис. 3.14, першим локального мінімуму температури, який відповідає гігроскопічному стану ККПТ, досягає шар ККПТ 2. Одночасно з цим, для кінетик температури шарів ККПТ 1 та ККПТ 3 має місце різка зміна кута їх нахилу до осі, на якій відкладено тривалість ІнТМО. Через 0,1 частку від загальної тривалості процесу локальних мінімумів досягають також кінетики температури шарів ККПТ 1 та ККПТ 2, 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 ТМО, 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.

Моделювання ефекту ІнТМО за горизонтальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями проводилось шляхом вертикального розміщення бар'єрів між шарами ККПТ. Всього було розміщено п'ять шарів ККПТ, між якими розміщували листки фольги прямокутної форми, як наведено на рис. 3.15.

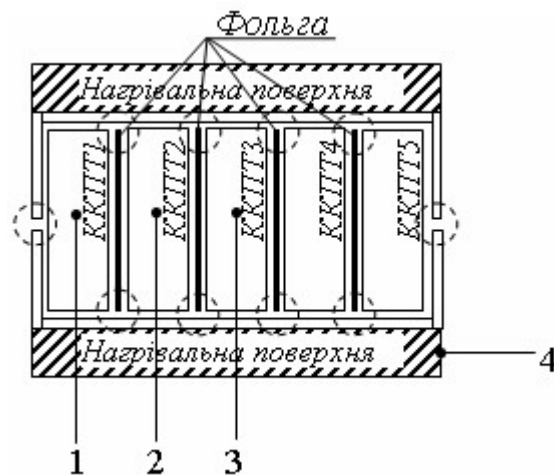


Рис. 3.15. Схема розміщення термопар та листів алюмінієвої фольги між шарами ККПТ під час моделювання ефекту ІнТМО за вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1, 2, 3, 4 – термопар

Фазові портрети ефекту ІнТМО для трьох шарів, отримані при цьому, наведені на рис. 3.16. Фазові портрети отримувались лише для трьох шарів, оскільки, як доведено роботами [26, 27] з дослідження даного ефекту, має місце площинна симетрія ІнТМО у тепломасообмінному модулі в формі паралелепіпеду, який обмежує внутрішній об'єм термостата, за однакових зовнішніх умов на стінках з обтюраторами. Тобто, очевидно, фазові портрети

ефекту ІнтМО для шарів ККПТ 1 та ККПТ 5 співпадають, те ж стосується і шарів ККПТ 2 та ККПТ 4.

За такої організації структури внутрішнього середовища термостата, тобто за такого розміщення ККПТ та елементів газонепроникного матеріалу фазові портрети ефекту ІнтМО мають певні особливості (рис. 3.16).

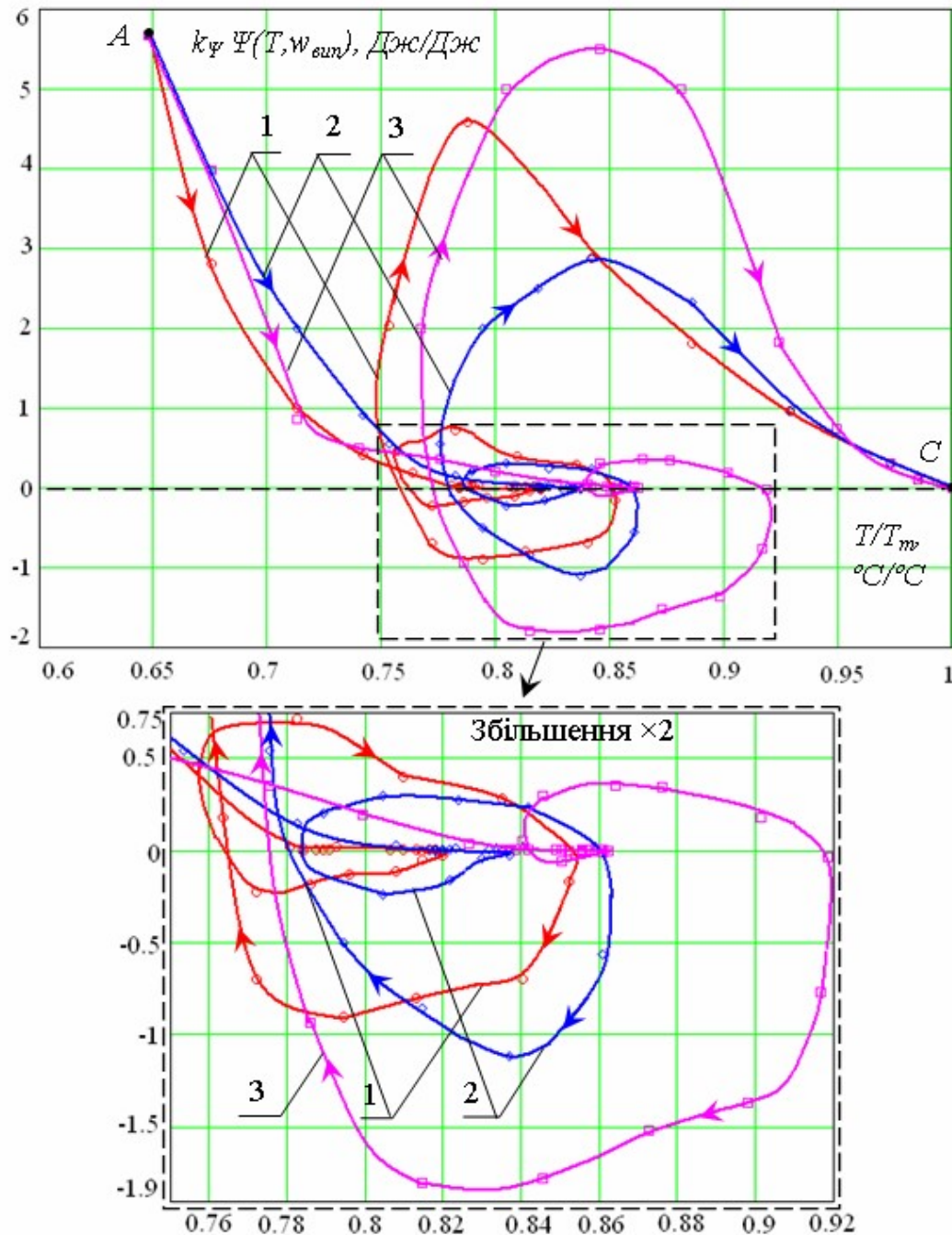


Рис. 3.16. Фазові портрети ефекту ІнтМО за вертикальної орієнтації сировини з газонепроникними включеннями: 1 – ККПТ 1, ККПТ 5; 2 – ККПТ 2, ККПТ 4; 3 – ККПТ 3 (з рис. 3.15)

Основною відмінністю наведених фазових портретів, від фазових портретів, наведених вище для інших реалізацій ефекту ІнтМО, є наявність

двох петель з частиною фазової траєкторії у негативній області площини з координатами $k_{\psi} \cdot \Psi(T, w_{sun})$ та T/T_m .

Для такої організації структури внутрішнього середовища термостата має місце розділення системи на підсистеми. Роль обтюраторів у даному дослідженні виконують частини ККПТ, які прилягають до зазору між паронепроникними частинами термостата (позначені обведенням на рис. 3.15). 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, а функції зазорів виконують щілини між листками фольги та стінками термостата.

Таким чином, термостат з розміщеними всередині нього шарами ККПТ та листками алюмінієвої фольги, як наведено на рис. 3.15, можна, з точки зору масообміну, розглядати, як послідовно та паралельно поєднані між собою умовні термостати. Умовна еквівалентна схема такого з'єднання термостатів наведена на рис. 3.17.

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, а, відповідно, і в обтюраторах на границі розділу між умовними термостатами. Виходячи з цього, «запуск», «зрив», «протікання» або «закінчення» ефекту ІнТМО в будь-якому із умовних термостатів буде відбиватися на характері протікання ТМО у всій системі. Дане ствердження наочно підтверджують фазові портрети наведені на рис. 3.16.

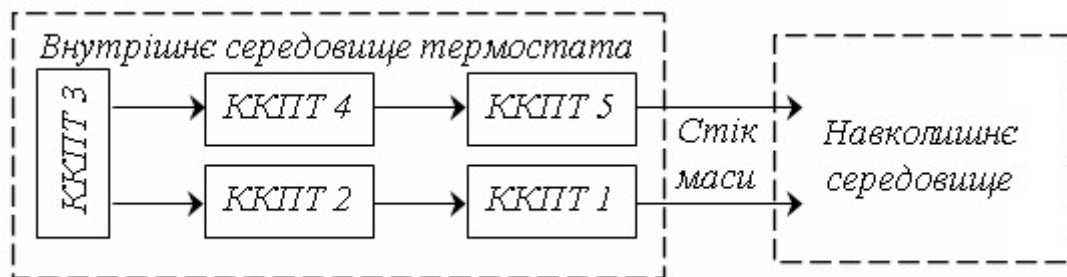


Рис. 3.17. Еквівалентна схема внутрішньої частини термостата з рис. 3.15

На наведених фазових портретах ефекту ІнТМО, як відмічено вище, мають місце для кожного шару ККПТ (умовного термостата) дві петлі з частиною фазової траєкторії у другій чверті фазової площини, яка має негативний знак за координатою $k_{\psi} \cdot \Psi(T, w_{sun})$. 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, обтюратори яких знаходяться на границі розділу «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата», тобто у шарах ККПТ 1 та ККПТ 5. Друга петля має місце через перебіг ефекту ІнтМО у внутрішніх умовних термостатах, тобто у шарах – ККПТ 2, ККПТ 3, ККПТ 4.

За даних умов організації експерименту, а саме, за даної організації структури внутрішнього середовища термостата (послідовне з'єднання умовних термостатів), за даних властивостей матеріалу, який використовується як обтюратор і ККПТ та за даної енергії потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, має місце розщеплення фазового портрету ефекту ІнтМО в даній динамічній системі.

Наявність дворівневого розщеплення (відсутність трирівневого розщеплення) за умови трьох послідовно з'єднаних умовних термостатів пояснюється наступним чином. У відповідності до запропонованої феноменологічної гіпотези (розд. 2), 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 (з виразів (2.24) і (2.29)), 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 обтюатора, як часової, так 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 обтюаторі «запуск» ІнтМО можливий лише за виконання необхідних умов для його реалізації.

За одним із шляхів еволюції системи за постійного зовнішнього впливу на неї, 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 просторової флуктуацій 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. 3.16.

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 обтюатора. Однак збільшення енергії потоку може порушити необхідні умови, що висувуються до властивостей обтюатора (2.1)-(2.2), 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'єма термостата, причому особливі точки для них синхронні. Отримане доводить, що під час ефекту ІнтМО має місце «спрямованість» характеру протікання процесу ТМО. 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 ТМО, ще одна ознака «штучності» та керованості ефекту ІнтМО, яка 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 його змішування.

3.3.4. Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого тепломасообміну як функція температури термостата

В попередніх розділах відмічено, що кінетика температури під час ІнтМО має визначений характер: наявні відповідні локальні екстремуми. При цьому важливим є те, що вони мають місце за наявності всередині термостата сухих речовин (у загальному випадку ККПТ), рідкої та газової фаз. Таким чином, під час дослідження кінетики температури під час ІнтМО, об'єм термостата заповнювали вологим ККПТ. Рідка вода та пароповітряна суміш утримувались в порожнинах між частинами ККПТ, а також в його порах та капілярах.

Для отримання кінетики температури сировини під час ІнтМО в залежності від рівноважної температури термостата в його геометричному центрі розміщувалась термопара [68]. Температура термостата змінювалась дискретно від 40 до 100 °С з інтервалом 5 °С. Використовувалась паралелепіпедна форма внутрішнього об'єму термостата з розмірами 20×100×100 мм. Кінетика температури ККПТ під час ІнтМО за різної температури термостата наведена на рис. 3.18.

Апроксимаційні функції для отриманих залежностей мають вид:

$$f_{T_m}(\tau) = \left(a0_{T_m} \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - a1_{T_m})^2}{a2_{T_m}}\right) - a5_{T_m} \left(\exp(-\tau^2 \cdot a3_{T_m}) + 1 \right) \right) \cdot a4_{T_m}, \quad (3.18)$$

де $a0_{T_m}$ (°С/°С), $a1_{T_m}$ (с), $a2_{T_m}$ (с²), $a3_{T_m}$ (с⁻²), $a4_{T_m}$ (°С), $a5_{T_m}$ (°С/°С) – апроксимаційні коефіцієнти.

Апроксимаційні функції для кінетики температури за різної температури термостата мають однаковий вид, але різні значення апроксимаційних коефіцієнтів.

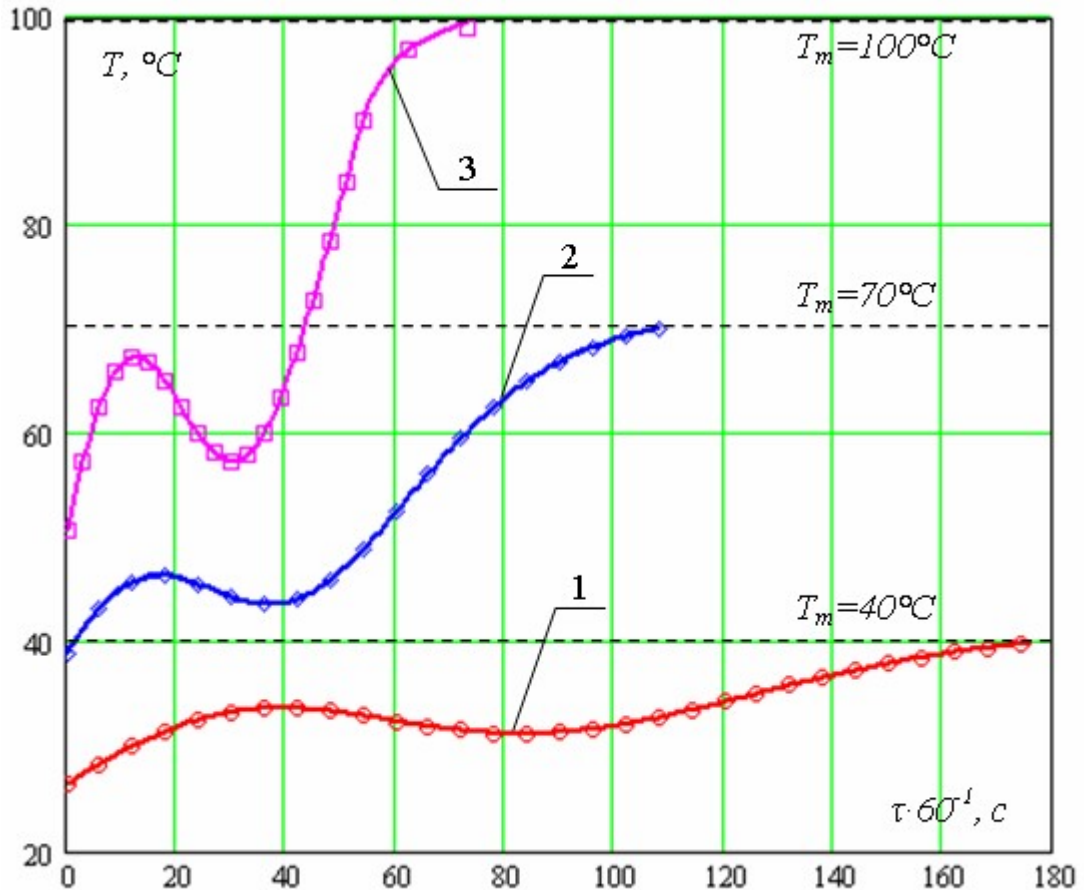


Рис. 3.18. Кінетика температури ККПТ під час ІнТМО за різної температури термостата, °C: 1 – 40; 2 – 70; 3 – 100

Для розрахованих за різної рівноважної температури термостата T_m апроксимаційних коефіцієнтів також були отримані апроксимаційні функції, які представляють собою лінійні та експоненціальні залежності:

$$\begin{aligned}
 a0_T(T_m) &= a00_T + a01_T \cdot T_m, \\
 a1_T(T_m) &= a10_T \cdot \exp(a11_T \cdot T_m), \\
 a2_T(T_m) &= a20_T \cdot \exp(a21_T \cdot T_m), \\
 a3_T(T_m) &= a30_T + a31_T \cdot T_m, \\
 a4_T(T_m) &= a40_T \cdot \exp(a41_T \cdot T_m),
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

де $a00_T = 0.952$ (°C/°C), $a01_T = -5.267 \cdot 10^{-3}$ (1/°C);

$a10_T = 26.855$ (c), $a11_T = -0.011$ (1/°C);

$a20_T = 1.074 \cdot 10^4$ (c²), $a21_T = -0.033$ (1/°C);

$a30_T = 7.044 \cdot 10^{-5}$ (c⁻²), $a31_T = 7.044 \cdot 10^{-5}$ (c⁻²/°C);

$a40_T = 16.21$ (°C), $a41_T = 0.022$ (1/°C).

Таким чином, якщо врахувати (3.19) – апроксимаційна функція (3.18) є функцією двох аргументів: температури термостата та часу.

3.3.5. Кінетика температури колоїдного капілярно-пористого тіла у термостаті під час індукованого тепломасообміну як функція координат

Під час досліджень зі знаходження аналітичного виду кінетики температури як функції координат використовували ТМО-модуль, що має форму паралелепіпеду з характерними розмірами l_1 , l_2 , l_3 та який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата (рис. 3.19) [69, 70].

Характерні розміри l_1 та l_2 були принаймні на порядок більші ніж l_3 . Обтюратори розміщені на гранях $l_1 \times l_2$, а грань $l_3 \times l_2$ перпендикулярна до потоку повітря, що рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора. Характерний розмір l_3 дорівнював 20 мм. Термостатування забезпечувалось потоком повітря, що рухається відносно обтюратора та омиває ТМО-модуль. Температура повітря дорівнювала температурі термостата.

Направимо осі координат вздовж ребер ТМО-модуля, який обмежує внутрішній об'єм термостата, як показано на рис. 3.19. Для отримання кінетики температури ККПТ під час ІнтМО вздовж кожної осі всередині ТМО-модуля розміщали термопари на відстані 5 мм одна від одної.

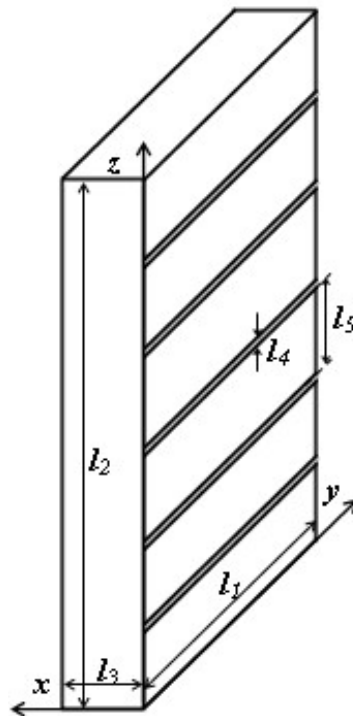


Рис. 3.19. ТМО-модуль у формі паралелепіпеду з розмірами l_1 , l_2 , l_3 , який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата

В ході експериментальних досліджень встановлено, що перепад температур вздовж осі Oy за постійних значень координат z та x не суттєвий. Найбільша різниця температур вздовж вище означеної осі спостерігається на початковому етапі під час прогрівання ККПТ, при цьому вона не перебільшує 10% від загальної тривалості процесу.

Той же самий результат отриманий і під час дослідження різниці температур вздовж осі Oz . Пояснюється отримане тим, що, оскільки, теплообмін на площинах $l_2 \times l_3$ та $l_1 \times l_3$ не ускладнений масообміном, через відсутність на поверхні термостата обтюраторів, то перепади температур вздовж осей Oy та Oz обумовлені теплопровідністю ККПТ і виникають лише під час його підігріву.

Таким чином, далі було зроблено припущення, що вздовж осей Oy та Oz перепад температур не суттєвий і залежність кінетики температури ККПТ від координат досліджувалась лише вздовж осі Ox .

На рис. 3.20 наведено кінетику температури ККПТ під час ІнтМО на різній відстані від внутрішньої стінки термостата. Нуль відліку координатної осі Ox знаходиться під поверхнею внутрішньої стінки термостата. Крива кінетики температури (1) показує температуру під поверхнею стінки, тобто на відстані 0 мм, друга (2) – на відстані 5 мм, а третя – 10 мм від поверхні. По іншу сторону від середини товщини модуля, тобто на відстані 15 та 20 мм від початку осі Ox , кінетики температур мають той же характер та ті ж значення, що й на відстані, відповідно, 5 та 0 мм.

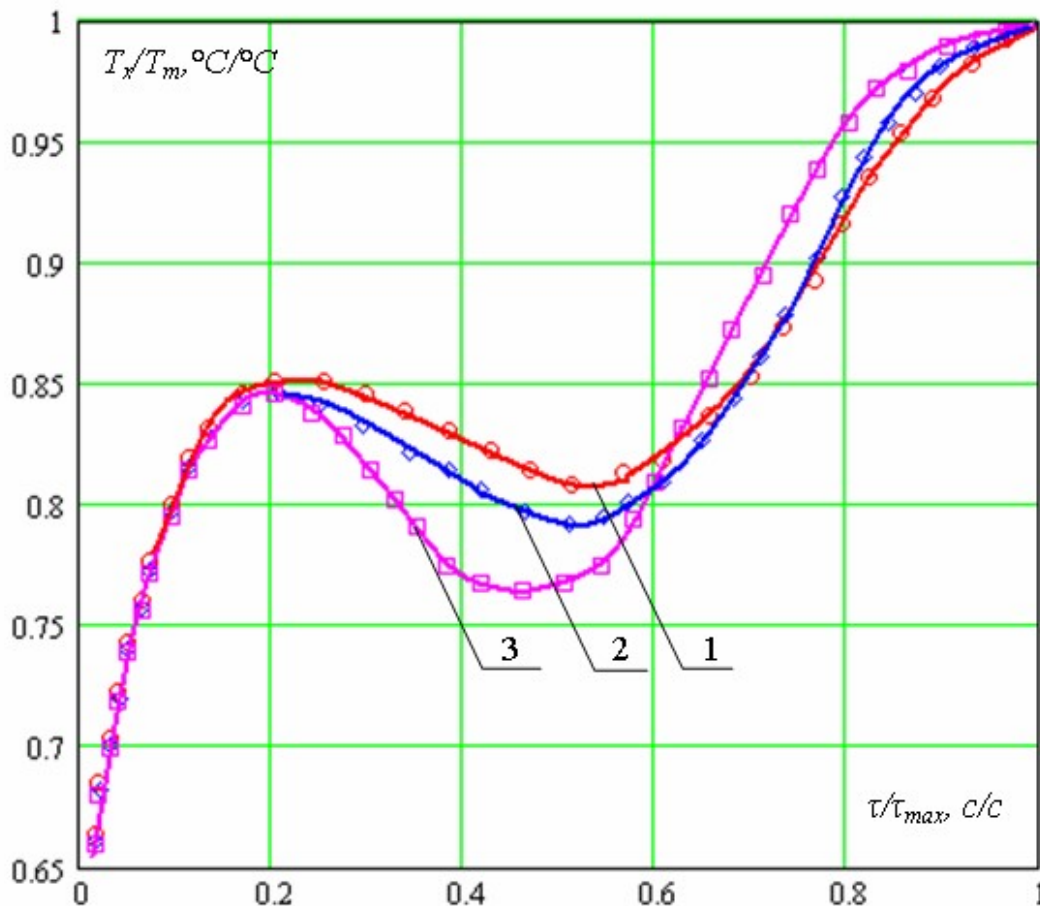


Рис. 3.20. Кінетика температури ККПТ (пронормована на загальну тривалість процесу τ_{max} та температуру термостата T_m) під час ІнтМО на різній відстані від внутрішньої стінки термостата вздовж осі Ox , мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10

Температура на рис. 3.20 пронормована на значення температури термостата, оскільки попередніми дослідженнями встановлено, що кінетика температури всередині ККПТ за різної відстані від внутрішньої поверхні термостата для різних температур його стінок має однаковий характер. Для знаходження абсолютних значень температури сировини під час ІнтМО необхідно помножити наведені значення на температуру термостата.

З наведених результатів видно, що за наближення до центру ТМО-модуля, який обмежує внутрішній об'єм термостата, мінімум температури зміщується відносно осі, на якій відкладено час, в сторону менших його значень, при цьому значення температури, яке відповідає мінімуму кінетики – зменшується, тобто збільшується різниця температур ККПТ – внутрішня стінка термостата.

Апроксимація експериментальних даних проводилась функцією виду:

$$f_x(\tau) = \left(a0_x \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - a1_x)^2}{a2_x}\right) - a5_x \left(\exp(-\tau^2 \cdot a3_x) + 1 \right) \right) \cdot a4_x, \quad (3.20)$$

де $a0_x$ ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$), $a1_x$ (м), $a2_x$ (м^2), $a3_x$ (м^{-2}), $a4_x$ ($^{\circ}\text{C}$) та $a5_x$ ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$) – апроксимаційні коефіцієнти.

Апроксимаційні функції для кінетики температури ККПТ на різній відстані від внутрішньої стінки термостата мають однаковий вид, але різні значення апроксимаційних коефіцієнтів.

Для розрахованих за різної відстані від внутрішньої стінки термостата апроксимаційних коефіцієнтів також були отримані апроксимаційні функції, які мають вид:

$$ai_x(x) = ci_0 \cdot \exp\left(-\frac{(x - ci_1)^2}{ci_2}\right) + ci_3, \quad (3.21)$$

де x – відстань від внутрішньої стінки термостата вздовж осі Ox ;

$i=0, 1, 2, 3, 4$ – номер апроксимаційного коефіцієнта ai із формули (3.21);

ci_0, ci_1, ci_2 та ci_3 – апроксимаційні коефіцієнти, значення яких наведено в табл. 3.1.

Функції (3.18) та (3.20) мають однаковий вид, але відрізняються вони набором аргументів: аргументами функції (3.18) є час та температура термостата, а функції (3.20), враховуючи те, що апроксимаційні коефіцієнти (3.21) залежать від відстані від внутрішньої стінки термостата, – відстань від стінки та час.

Таблиця 3.1

Значення апроксимаційних коефіцієнтів для формули (3.21)

	ci_0	ci_1	ci_2	ci_3
$a0_x$	0,02 (°C/°C)	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$30 \cdot 10^{-6}$ (м ²)	0,73 (°C/°C)
$a1_x$	$-0,007 \cdot 10^{-3}$ (м)	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$32 \cdot 10^{-6}$ (м ²)	$0,117 \cdot 10^{-3}$ (м)
$a2_x$	$-0,043 \cdot 10^{-6}$ (м ²)	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$30 \cdot 10^{-6}$ (м ²)	$0,133 \cdot 10^{-6}$ (м ²)
$a3_x$	$0,8 \cdot 10^{-6}$ (м ²)	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$25 \cdot 10^{-6}$ (м ²)	$3 \cdot 10^{-6}$ (м ²)
$a4_x$	-0,027 (°C)	$10 \cdot 10^{-3}$ (м)	$30 \cdot 10^{-6}$ (м ²)	1,05 (°C)

Якщо навести відповідну кореляцію між коефіцієнтами (3.19) та (3.21), то для коефіцієнтів (3.21) можна отримати наступні залежності від координати та температури термостата:

$$\begin{aligned}
 a0(x, T_m) &= \frac{0.73}{0.75} \cdot a0_T(T_m) + \\
 &+ \left(-3.669 \cdot 10^{-4} + 0.028 \cdot a0_T(T_m) \right) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{30} \right), \\
 a1(x, T_m) &= \frac{0.117}{0.11} \cdot a1_T(T_m) + \\
 &+ \left(0.03 - 0.068 \cdot a1_T(T_m) \right) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{32} \right), \\
 a2(x, T_m) &= \frac{0.133}{0.09} \cdot a2_T(T_m) + \\
 &+ \left(0.449 - 0.482 \cdot a2_T(T_m) \right) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{30} \right), \\
 a3(x, T_m) &= \frac{3}{3.8} \cdot a3_T(T_m) + \\
 &+ \left(8.823 \cdot 10^{-7} + 0.205 \cdot a3_T(T_m) \right) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{25} \right), \\
 a4(x, T_m) &= \frac{1.05}{1.023} \cdot a4_T(T_m) + \\
 &+ \left(0.019 - 0.027 \cdot a4_T(T_m) \right) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{30} \right). \tag{3.22}
 \end{aligned}$$

Далі підставимо отримані коефіцієнти в функцію (3.18) та отримаємо апроксимаційну функцію для кінетики температури ККПТ аргументами якої є час, температура стінки термостата та координата:

$$T(\tau, x, T_m) = [a_0(x, T_m) \cdot \exp\left(-\frac{(\tau - a_1(x, T_m))^2}{a_2(x, T_m)}\right) - \exp(-\tau^2 \cdot a_3(x, T_m)) + 1] \times a_4(x, T_m). \quad (3.23)$$

Отримана функція використовується для знаходження фазових траєкторій системи і пошуку раціональних режимів ефекту ІнТМО та конструкторських рішень щодо геометрії внутрішньої частини термостата.

3.3.6 Кінетика вологовмісту колоїдного капілярно-пористого тіла під час індукованого тепломасообміну як функція температури термостата та відстані від його внутрішньої стінки

Під час знаходження аналітичного виду функції, що описує кінетику вологовмісту ККПТ в залежності від температури термостата та відстані від його внутрішньої стінки [71, 72], дотримувались тієї ж схеми як і під час знаходження функції для кінетики температури. Тобто спочатку необхідно знайти аналітичну функцію для кінетики вологовмісту ККПТ за різної температури термостата, далі – за різної відстані від його внутрішньої стінки, а після цього встановити зв'язок між даними функціями.

Необхідно відмітити, що для кінетики вологовмісту ККПТ додається ще один аргумент – початковий вологовміст.

Кінетики вологовмісту виділених малих (у порівнянні із внутрішнім об'ємом термостата) об'ємів ККПТ за різної температури термостата апроксимувались функцією виду:

$$w_T(\tau) = w_0 \cdot \exp(-b_T \cdot \tau^2), \quad (3.24)$$

де w_0 – початковий вологовміст, кг/кг;

b_T – апроксимаційний коефіцієнт, c^{-2} .

Оскільки під час досліджень використовувалась одна і та ж сировина, то початковий вологовміст для всіх зразків однаковий, і функції кінетики вологовмісту (3.24) за різної температури термостата відрізняються лише значеннями апроксимаційного коефіцієнту b_T . Для даних апроксимаційних коефіцієнтів було отримано апроксимаційну функцію, яка наведена на рис. 3.21 та має вид:

$$b_T(T_m) = b_{0_T} \cdot \exp(b_{1_T} \cdot T_m), \quad (3.25)$$

де $b_{0_T} = 2,447 \cdot 10^{-5}$ (c^{-2}), $b_{1_T} = 0,032$ ($^{\circ}C$) – апроксимаційні коефіцієнти.

Залежність коефіцієнтів b_T від температури термостата в діапазоні температур від 40 до 100 $^{\circ}C$ – експоненціальна, що свідчить про нелінійну залежність тривалості ІнТМО від температури термостата.

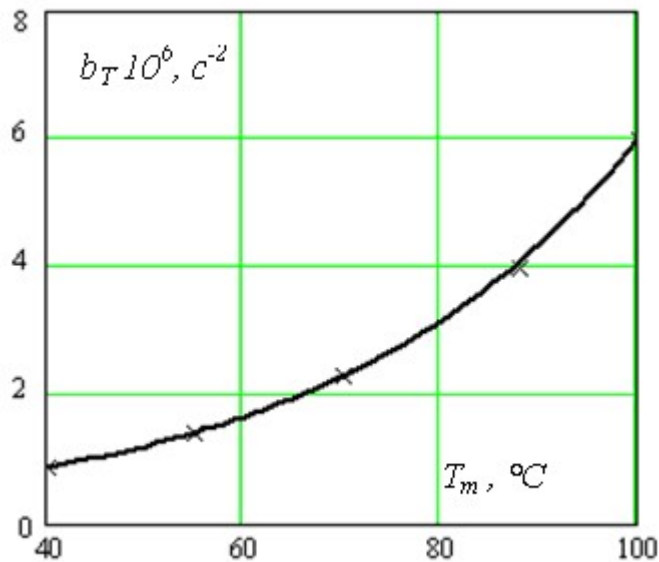


Рис. 3.21. Коефіцієнти b_T від температури термостата

Оскільки коефіцієнти (3.25) є функціями температури термостата, то функція (3.24) є функцією часу та температури термостата.

Під час визначення аналітичного виду функції, що описує кінетику вологовмісту в залежності від відстані від стінки термостата, виникають труднощі з визначенням вологовмісту у визначених об'ємах всередині термостата. Тому для даних досліджень була використана наступна методика. Як було вказано вище, роботами з дослідження ІнТМО показано [20-29], що температура матеріалу в цьому ефекті має кілька характерних ділянок, що істотно відрізняє даний спосіб ТМО від інших теплових способів. Типовість таких термограм дає можливість проведення якісного аналізу, тобто може бути використана для реєстрації та опису характеру ІнТМО.

Для визначення аналітичного виду функції, яка описує кінетику вологовмісту виділених малих об'ємів ККПТ в залежності від відстані до внутрішньої стінки термостата, вважається правомірним наступне припущення. Тривалість досягнення відповідним об'ємом ККПТ кінцевого вологовмісту визначається за кінетикою температури відповідного об'єму. Як було відмічено раніше, тривалість, за якої температура сировини досягає значення локального мінімуму, відповідає закінченню рідкої води в об'ємі, де знаходиться термопара. Таким чином, тривалість процесу, за якої у даному об'ємі досягається локальний мінімум температури, вважається тривалістю зневоднення даного об'єму ККПТ.

Під час розрахунків зроблено наступне припущення. Необхідно відмітити, що оскільки обтюратори, через які організовується масообмін між внутрішнім середовищем термостата та навколишнім середовищем, знаходяться лише на гранях з характерними розмірами $l_1 \times l_2$, тобто в площині $Oy \times Oz$, то зміну вологовмісту ККПТ за координатами розраховували лише вздовж осі Ox . Таким чином, далі досліджується вологовміст шарів сировини

всередині термостата елементарна товщина яких змінюється вздовж даної осі Ox (рис. 3.19).

За кінетиками температури (рис. 3.20) шарів ККПТ всередині термостата встановлено, що тривалість досягнення кінцевого вологовмісту шару, який знаходиться безпосередньо біля внутрішньої стінки термостата, тобто на відстані 0 мм від неї, складає $0,9 \text{ відн.од.}$ від загальної тривалості процесу; на відстані 5 мм – $0,96 \text{ відн.од.}$; посередині характерного розміру l_3 ($l_3=20 \text{ мм}$), тобто на відстані 10 мм від внутрішньої стінки термостата – дорівнює тривалості процесу.

Далі, виходячи із тривалості зневоднення відповідного шару, за функцією

$$w_x(\tau) = w_0 \cdot \exp(-b_x \cdot \tau^2) \quad (3.26)$$

будується кінетика вологовмісту в залежності від відстані від стінки термостата, представлена на рис. 3.22, де b_x – апроксимаційний коефіцієнт (c^{-2}). Кінетика вологовмісту пронормована на максимальний вологовміст.

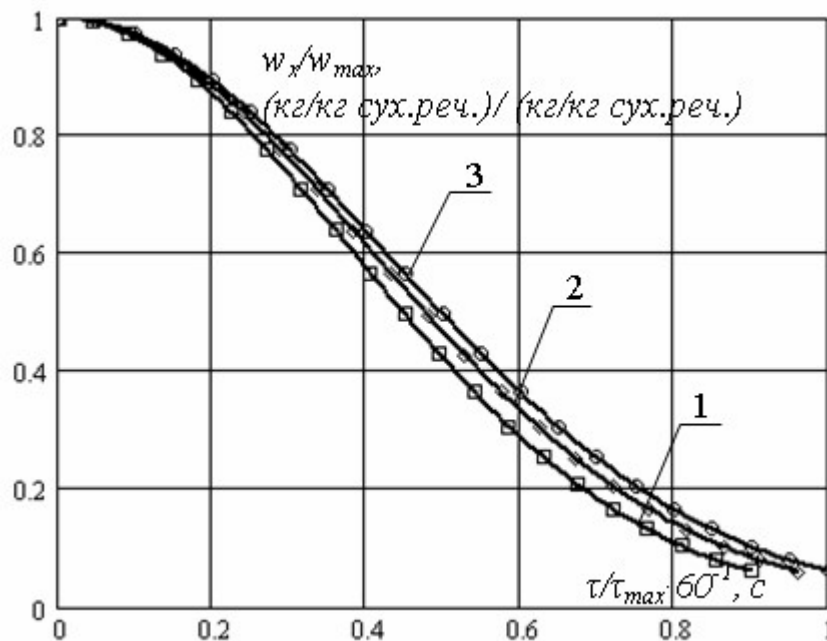


Рис. 3.22. Кінетика вологовмісту (пронормована на максимальну тривалість процесу τ_{max} та на максимальний вологовміст w_{max}) шарів ККПТ за різної відстані від внутрішньої стінки термостата, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10

Функції кінетики вологовмісту (3.26) за різної відстані від внутрішньої стінки термостата відрізняються лише значеннями апроксимаційного коефіцієнту b_x . Для обчислювання коефіцієнтів було отримано апроксимаційну функцію, яка представлена на рис. 3.23 та має вид:

$$b_x(x) = b0_x + b1_x \cdot \exp\left(-\frac{(x + b2_x)^2}{b3_x}\right). \quad (3.27)$$

де $b0_x = -2,8$ (c^{-2}); $b1_x = -0,67$ (c^{-2}); $b2_x = -10 \cdot 10^{-3}$ (м); $b3_x = 30 \cdot 10^{-6}$ (m^2).

Залежність коефіцієнтів b_x від відстані від стінки термостата має нелінійний характер з наявним екстремумом. Отримане свідчить про наявність критичних значень товщини внутрішньої частини термостата (за умови використання термостата у формі паралелепіпеда) для реалізації ефекту ІнтМО, тобто про існування необхідних та достатніх вимог до розмірів термостата.

Таким чином, враховуючи залежність коефіцієнта (3.27) від координати x , тобто від відстані від внутрішньої стінки термостата вздовж осі Ox , функцію (3.26) слід вважати функцією координат та часу.

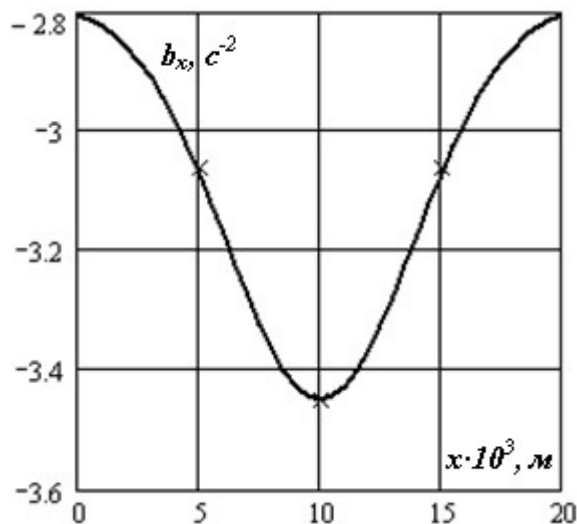


Рис. 3.23. Коефіцієнти b_x за різної відстані від внутрішньої стінки термостата

Функції (3.24) та (3.26) мають однаковий вид, але відрізняються вони набором аргументів: аргументами функції (3.24) є час та температура термостата, а функції (3.26) – час та відстань від стінки. Якщо навести відповідну кореляцію між коефіцієнтами (3.25) та (3.27), то для коефіцієнту (3.27) можна отримати наступну залежність від координати та температури термостата:

$$b(x, T_m) = \frac{2.8}{3.45} \cdot b_T(T_m) + \left(-4.762 \cdot 10^{-7} + 0.19 \cdot b_T(T_m) \cdot \exp\left(-\frac{(x-10)^2}{30}\right) \right) \quad (3.28)$$

Далі підставимо отримані коефіцієнти в функцію (3.24) та отримаємо апроксимаційну функцію для кінетики вологовмісту ККПТ, аргументами якої є час, температура термостата та координата:

$$w(\tau, x, T_m) = w_0 \cdot \exp(-b(x, T_m) \cdot \tau^2). \quad (3.29)$$

Отримана функція використана для побудови фазових траєкторій стану системи під час ефекту ІнТМО та для знаходження аналітичного вигляду таких величин, як коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина сировини, оскільки вони визначаються вологовмістом ККПТ і, як наслідок, є функціями часу, координат та рівноважної температури термостата.

3.3.7. Фазові траєкторії системи під час ефекту індукованого теплообміну за різних температур термостата та координати

Під час використання ІнТМО для зневоднення ККПТ важливим з точки зору удосконалення процесу ТМО та подальшого його використання на практиці є шлях 3 (рис. 3.3) еволюції системи між станами динамічної рівноваги та стійкої, а саме шлях, за яким відбувається «запуск», «протікання» та «закінчення» ефекту ІнТМО.

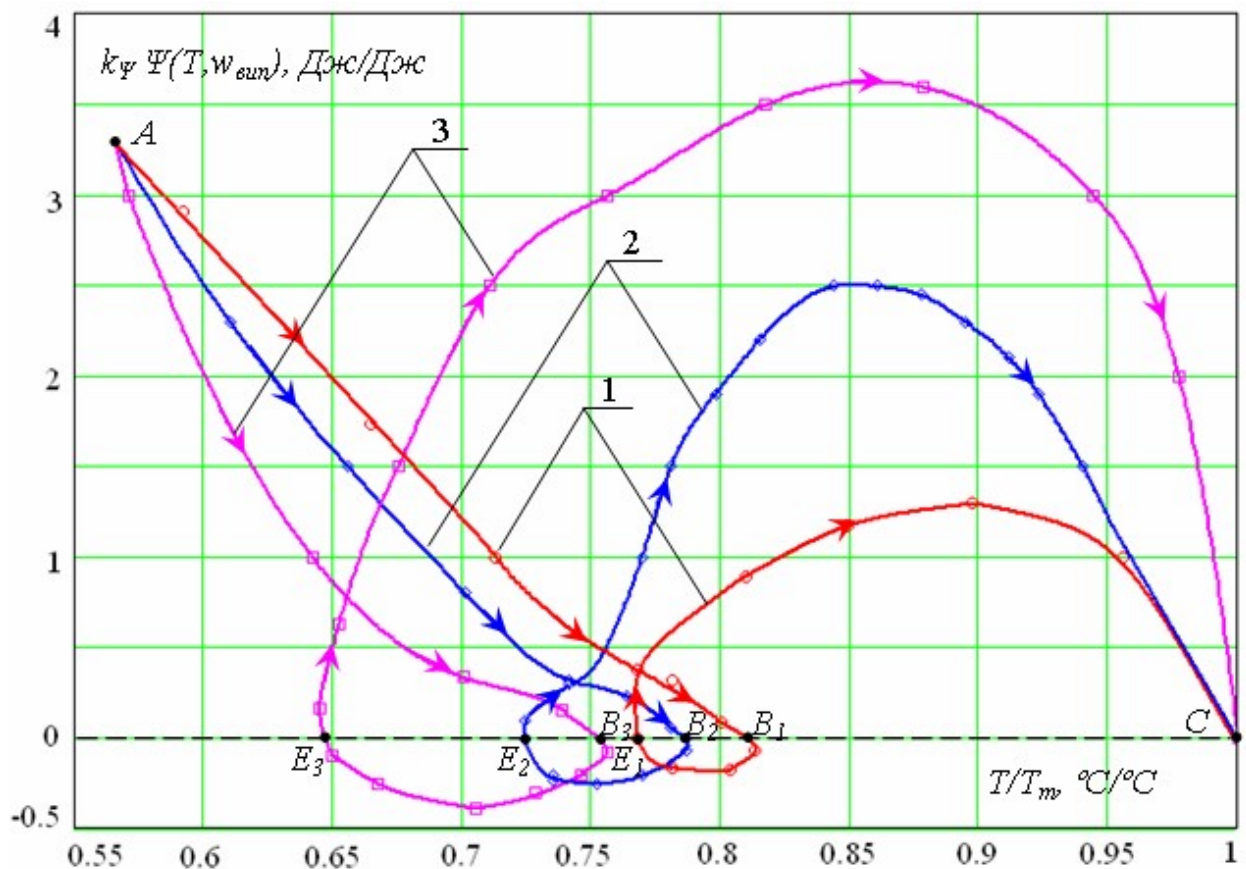


Рис. 3.24. Фазові траєкторії еволюції системи під час ефекту ІнТМО за різної температури термостата, °С: 1 – 40; 2 – 70; 3 – 90

Для побудови фазових траєкторій (рис. 3.24) використовувались функції (3.23) та (3.29), при цьому значення температури були пронормовані на температуру термостата. Нормування проводилось з метою зручності аналізу та наочності виявленого характеру фазових траєкторій за різних значень такого керуючого параметру, як температура термостата.

Як було відмічено під час аналізу загального вигляду фазових траєкторій для ТМО у термостаті (рис. 3.3), про «запуск» ефекту ІнТМО свідчить наявність ділянки, для якої $dT < 0$. Для таких значень прирощення температури фазова траєкторія знаходиться в області негативних значень функції $\Psi(T, w_{\text{sun}})$ (на рис. 3.24 нижче пунктирної лінії).

Фазові траєкторії ефекту ІнТМО за різної температури термостата мають типовий характер: наявні ділянки фазової траєкторії з негативним знаком, відокремлені горизонтальною пунктирною лінією на рис. 3.24. З рисунку видно, що по мірі збільшення температури термостата, площа під негативною ділянкою збільшується.

Площі під ділянками фазових траєкторій (ділянки між точками B_i та E_i) можна розрахувати, як визначений інтеграл від функції $\Psi(T, w_{\text{sun}})$ у відповідних границях:

$$S_i = \int_{B_i}^{E_i} \Psi(T, w_{\text{sun}}) dT. \quad (3.30)$$

Залежність площі під негативною ділянкою фазової траєкторії ефекту ІнТМО від температури термостата (рис. 3.25) має нелінійний характер. Прирощення температури термостата на $20\text{ }^\circ\text{C}$ від значення $40\text{ }^\circ\text{C}$ до значення $60\text{ }^\circ\text{C}$ дає прирощення площі під негативною ділянкою фазової траєкторії – 20% , а те ж прирощення температури від значення $80\text{ }^\circ\text{C}$ до значення $90\text{ }^\circ\text{C}$ – 71% . Тобто збільшення температури термостата під час ефекту ІнТМО є ефективним.

Однак під час організації ефекту ІнТМО, особливо за температур термостата більших за температуру кипіння вільної рідини за даного тиску оточуючого середовища, умови підведення теплоти повинні бути узгоджені з умовами її розсіювання через фазовий перехід рідини I роду. Мається на увазі узгодженість між тривалістю досягнення рідиною температури кипіння (тривалість обумовлена теплопровідністю внутрішніх стінок термостата, теплопровідністю та теплоємністю рідини, тощо) та часом, необхідним для «запуску» ефекту ІнТМО (інерційність обумовлена тривалістю утворення суцільного газового середовища за парціальним тиском пари рідини у внутрішньому виділеному об'ємі термостата).

Обмеженням для температури термостата є вимоги до якості отримуваної продукції. Після закінчення ефекту ІнТМО через закінчення об'ємної води всередині термостата, його внутрішнє середовище опиняється в гігроскопічній області. Гігроскопічній області відповідає ділянка фазової

траєкторії між точкою E та точкою стійкої рівноваги C . На даній ділянці фазової траєкторії має місце інтенсивне нагрівання внутрішнього середовища до температури термостата. Інтенсивне нагрівання може викликати необоротні зміни у механічних властивостях ККПТ, формах та структурі системної води, яку воно утримує. Таким чином, очевидне обмеження температури у відповідності до властивостей отримуваної продукції.

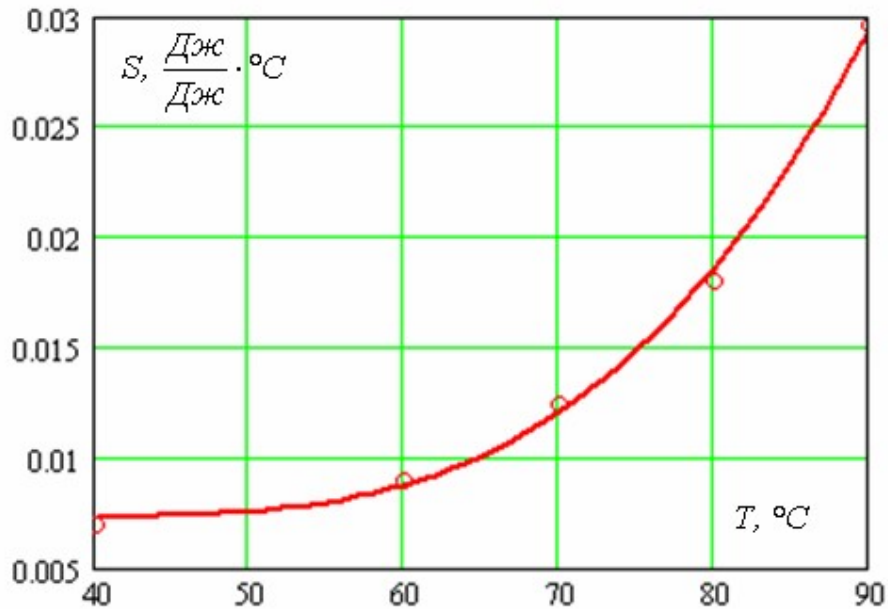


Рис. 3.25. Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії ефекту ІнТМО від температури термостата

Використання максимально можливої для організації ефекту ІнТМО температури термостата є енергоефективним, але може чинити негативний вплив на якість продукції (за умови обробки термолабільної сировини).

Однак завдяки особливостям організації ефекту ІнТМО [73], існує можливість в залежності від етапу, на якому знаходиться динамічна система на шляху еволюції між станом нестійкої та станом стійкої рівноваги, обирати різну температуру термостата, а, відповідно, і різну температуру обробки сировини.

З використанням тих же функцій (3.23) та (3.29) побудовані фазові траєкторії еволюції системи за різної координати всередині термостата.

Фазові траєкторії представлені на рис. 3.26 побудовані для паралелепіпедного ТМО-модуля наведеного на рис. 3.18, який обмежує внутрішнє середовище термостата. При цьому як і під час отримання функції для описання кінетики температури в залежності від координат, було зроблено припущення, що вздовж осей Oy та Oz перепад температур не суттєвий і фазові траєкторії для різних координат будувались лише вздовж осі Ox .

Попередніми дослідженнями ефекту ІнТМО та його окремого випадку процесу ЗТП-сушіння встановлено, що градієнт температури ККПТ по товщині ТМО-модуля (на рис. 3.18 вздовж осі Ox) паралелепіпедної форми

має однакове значення. Тому фазовий портрет для різних шарів ККПТ будувався, виходячи з того, що координатою були долі від товщини внутрішньої частини термостата. Тобто координата шару біля взаємно протилежних внутрішніх стінок термостата дорівнювала 0 та d_{max} , координата середини товщини внутрішньої частини термостата – $0,5 \cdot d_{max}$ і т.д. Отримання такого розподілення правомірне у діапазоні значень товщини внутрішньої частини термостата у формі паралелепіпеда від 10 до 40 мм. За більших значень товщини такі дослідження не проводились через відсутність необхідності використання ТМО-модуля паралелепіпедної форми, який обмежує внутрішній об'єм термостата, з більшими розмірами.

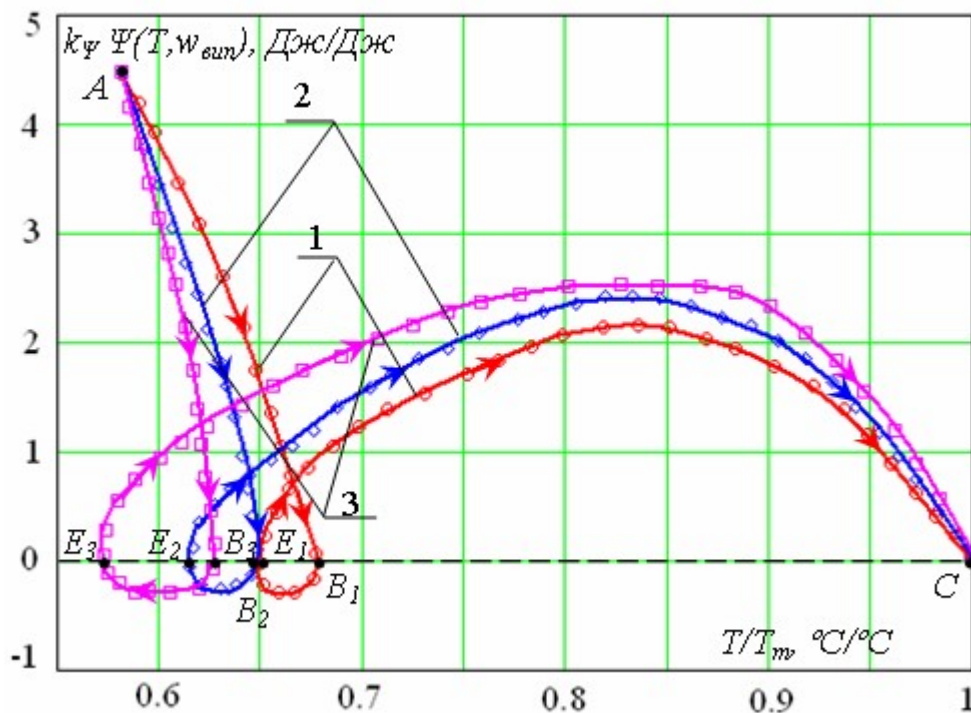


Рис. 3.26. Фазові траєкторії еволюції системи під час ефекту ІнТМО за різної координати всередині термостата у формі паралелепіпеда: 1 – 0; 2 – $0,25 \cdot d_{max}$; 3 – $0,5 \cdot d_{max}$

Необхідно відмітити, що фазові портрети для шарів ККПТ, які знаходяться на однаковій відстані від середини внутрішнього об'єму термостата у формі паралелепіпеда, але по різні сторони від неї, – однакові. Така симетрія спостерігається через те, що умови для ТМО взаємно протилежних стінок такого ТМО-модуля однакові.

З виду фазових траєкторій за різної координати всередині внутрішньої частини термостата (рис. 3.26) слідує, що площа під негативною частиною фазової траєкторії по мірі наближення до середини її товщини збільшується, що свідчить про більшу енергоефективність ІнТМО в середньому шарі ККПТ. При цьому мінімум фазової траєкторії ефекту ІнТМО зміщується вліво вздовж осі, на якій відкладено температуру. Тобто ІнТМО відбувається за меншої температури (у порівнянні з шарами біля внутрішньої стінки

термостата різниця складає 10...15%), що є позитивним чинником для обробки термолабільної сировини.

Зміна площі під негативною ділянкою фазової траєкторії ефекту ІнтМО за різної координати у внутрішній частині термостата (рис. 3.27) має нелінійний характер, причому дана залежність має екстремум.

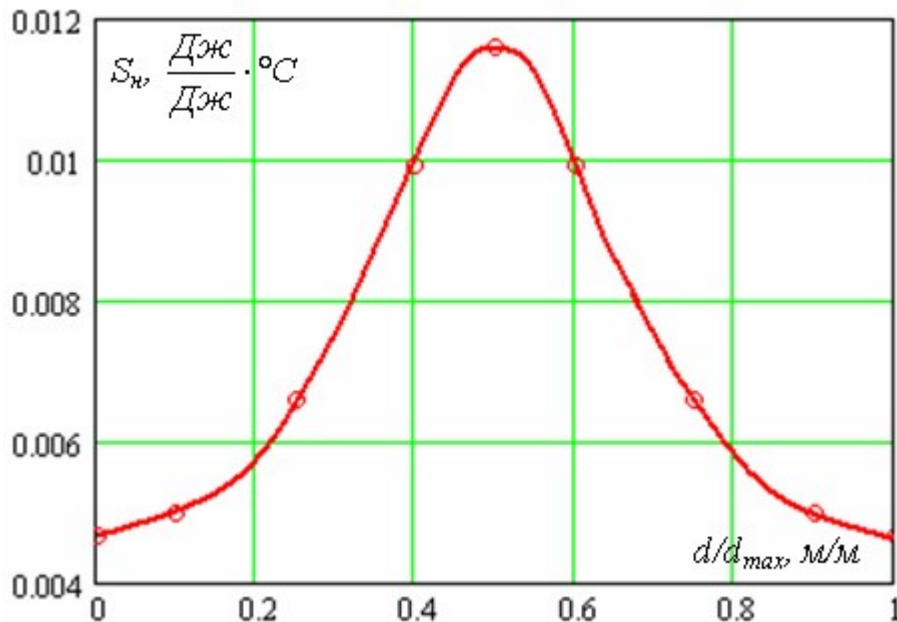


Рис. 3.27. Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії (S_n) ефекту ІнтМО за різної координати у внутрішній частині термостата

З точки зору величини площі під негативною ділянкою, як критерію енергоефективності ІнтМО, енергоефективність максимальна для центрального шару ККПТ у внутрішній частині термостата.

Таким чином, енергоефективним є вибір найбільшої товщини ТМО-модуля у формі паралелепіпеду, що обмежує внутрішній виділений об'єм термостата із вище означеного діапазону, тобто – 40 мм. Однак обмеженням даного вибору є теплофізичні властивості середовища всередині термостата та продуктивність обтюратора.

3.3.8. Вплив швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата, на характер індукованого тепломасообміну

Для виявлення характеру ефекту ІнтМО за різної швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, використовувався термостат, внутрішні стінки якого мали форму паралелепіпеду (рис. 3.28) з розмірами $95 \times 15 \times 22$ мм (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

жорстко 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 (спіралях) та сила струму через них підтримувались постійними, таким чином можна вважати, що тепловий потік від нагрівальних поверхонь підтримується постійним. Це одна із принципових відмінностей забезпечення ІнТМО в даній роботі від попередніх досліджень. Під час дослідження окремого випадку ефекту ІнТМО – ЗТП-сушіння, термостатування забезпечувалось постійною температурою теплоносія [20-29] (межові умови III роду).

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

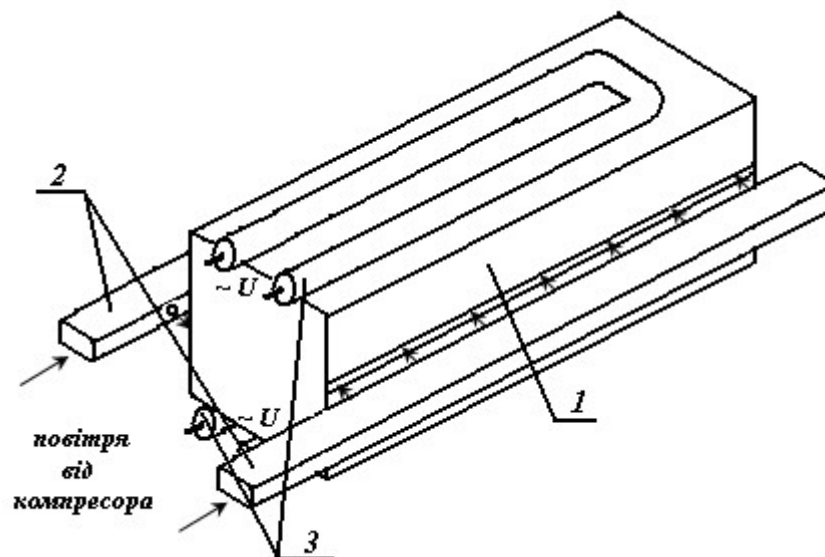


Рис. 3.28. Схема експериментальної установки для виявлення впливу швидкості повітря, що рухається відносно обтюратора, на характер ефекту ІнТМО: 1 – модуль, який обмежує внутрішній об’єм термостата; 2 – канали для потоку повітря; 3 – нагрівальні елементи

У шарах сировини розміщувалися термопари, як показано на рис. 3.29.

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:

$$v = \sqrt{\frac{2p_{дин}}{\rho}}, \quad (3.31)$$

де $p_{дин}$ – гідродинамічний тиск повітря, $Па$;
 ρ – густина повітря, $кг/м^3$.

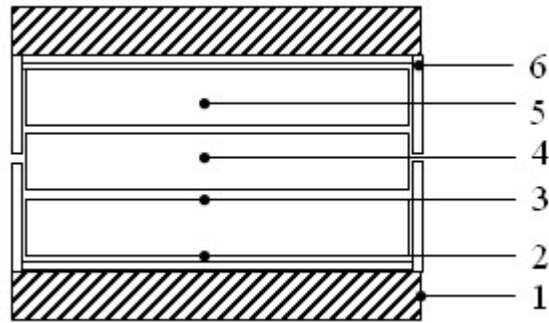


Рис. 3.29. Схема розміщення термопар у внутрішній частині термостата для виявлення впливу величини швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів на характер ефекту ІнтМО: 1, 2, 3, 4, 5, 6 – термопари

При цьому швидкість руху повітря відповідно дорівнювала, $м/с$ ($Па$): 13 (100); 9 (50); 4 (10). 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. 3.30.

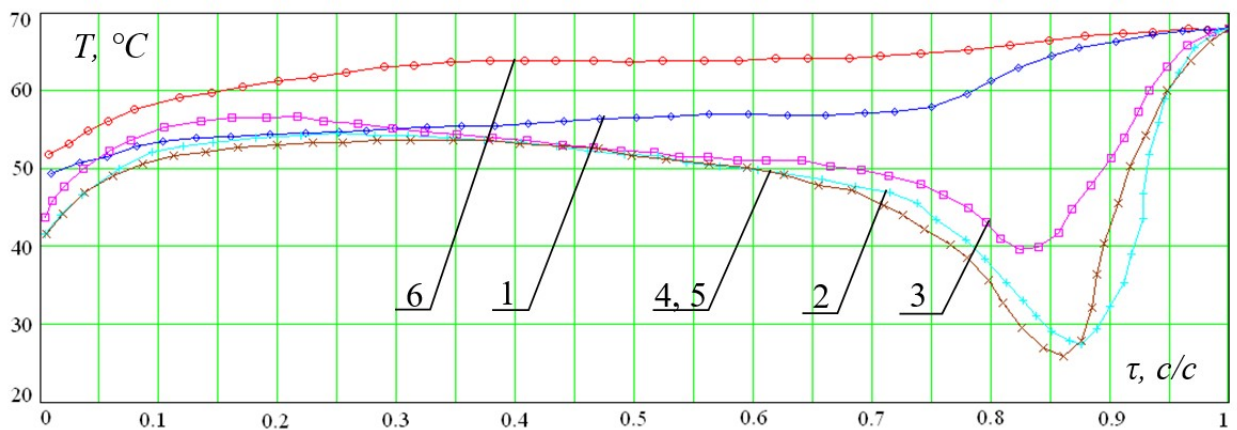


Рис. 3.30. Кінетика температури ККПТ за швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюратора термостата $13 м/с$ ($100 Па$): 1, 2, 3, 4, 5, 6 – термопари з рис. 3.28

Характер кінетик температури модельних ККПТ, отриманих від термопар, розташованих в різних точках всередині термостата – однаковий. Цифрами на рисунку позначені номери термопар з рис. 3.28. 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. 3.31).

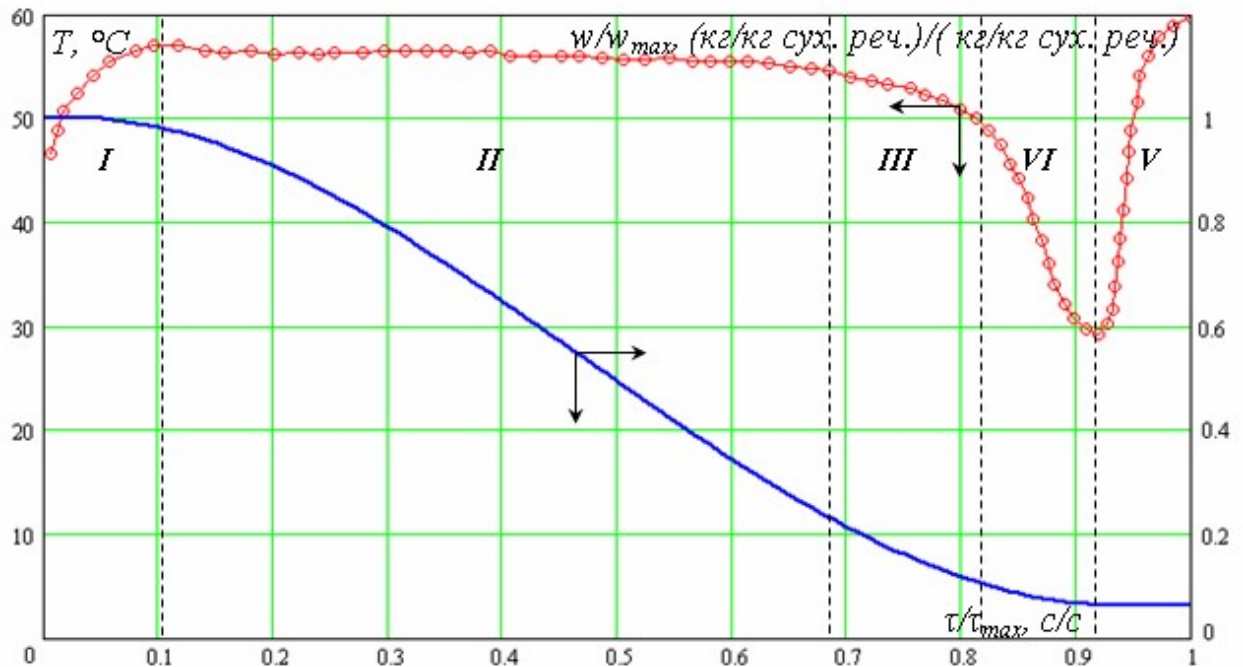


Рис. 3.31. Періодизація кінетики температури та вологовмісту модельного ККПТ під час ІнТМО у термостаті

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. 3.31).

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. 3.2).

Таблиця 3.2

Відносна довжина ділянок кінетики температури під час ІнтМО

Швидкість, м/с:	Довжина ділянки $\Delta\tau / \tau_{max}$, с/с		
	II	III	IV
4	0,58	0,12	0,08...0,125
9	0,5...0,55	0,2	0,12
13	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, на випаровування системної води ККПТ зі зміною 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. 3.29), 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:

$$q_m = q_{втр} + q_{вх}, \quad (3.32)$$

де q_m – тепловий потік, що забезпечується нагрівальними поверхнями термостата, Дж/с;

$q_{втр}$ – постійний тепловий потік у оточуюче середовище (втрати теплового потоку), обумовлений тепловою конвекцією з зовнішньої поверхні стінок термостата, які контактують з навколишнім середовищем, Дж/с;

$q_{вх}$ – тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата, Дж/с.

Для врахування втрат теплоти від зовнішньої поверхні стінок термостата у оточуюче середовище $q_{втр}$ 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 $coef_m$. Даний коефіцієнт є ефективним коефіцієнтом теплообміну між внутрішньою поверхнею стінок термостата та його внутрішнім виділеним 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 температури термостата 68...71 °С та температури оточуючого середовища 20...23 °С масштабний коефіцієнт дорівнює – $116 \frac{Вт}{°С}$. 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:

$$q_{вх} = coef_m T_{н.н.}(\tau) \Big|_{t_{\infty}=const} \quad (3.33)$$

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

Тепловий потік, який надходить до внутрішнього середовища термостата, витрачається на фазовий перехід води ($q_{вун}$) та нагрівання ККПТ ($q_{с.р.}$) і системної води ($q_{с.в.}$) до температури термостата:

$$q_{вх} = q_{вун} + q_{с.р.} + q_{с.в.} \quad (3.34)$$

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

$$q_{\text{вин}} = -\frac{dm_g}{d\tau} \cdot r; \quad (3.35)$$

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

$$q_{c.p.} = C_{c.p.} \cdot m_{c.p.} \cdot \frac{dT}{d\tau}; \quad (3.36)$$

частина теплового потоку, що витрачається на нагрівання поточної маси системної води ($m_{c.в.}$) всередині термостата до поточної температури:

$$q_{c.в.} = C_{c.в.} \cdot m_{c.в.} \cdot \frac{dT}{d\tau}; \quad (3.37)$$

де $C_{c.p.}$, $C_{c.в.}$ – теплоємність сухих речовин та системної води, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

$m_{c.p.}$ – маса сухих речовин, кг;

$m_{c.в.}$ – поточна маса системної води в термостаті, кг;

r – питома теплота пароутворення, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

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 (3.35), (3.36) та (3.37). 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 об'єм термостата. Кінетика теплового потоку від стінок термостата визначається за формулою (3.33) як добуток функції, що описує кінетику температури його стінок, на масштабний коефіцієнт.

На рис. 3.32 використані наступні позначення. Цифрою 1 позначена кінетика теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища, розрахована за формулою (3.33). 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. 3.30) за формулами (3.36) та (3.37). 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 (3.35). Кінетика теплового потоку, що витрачається у внутрішньому об'ємі термостата, розрахована за формулою (3.34), 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.

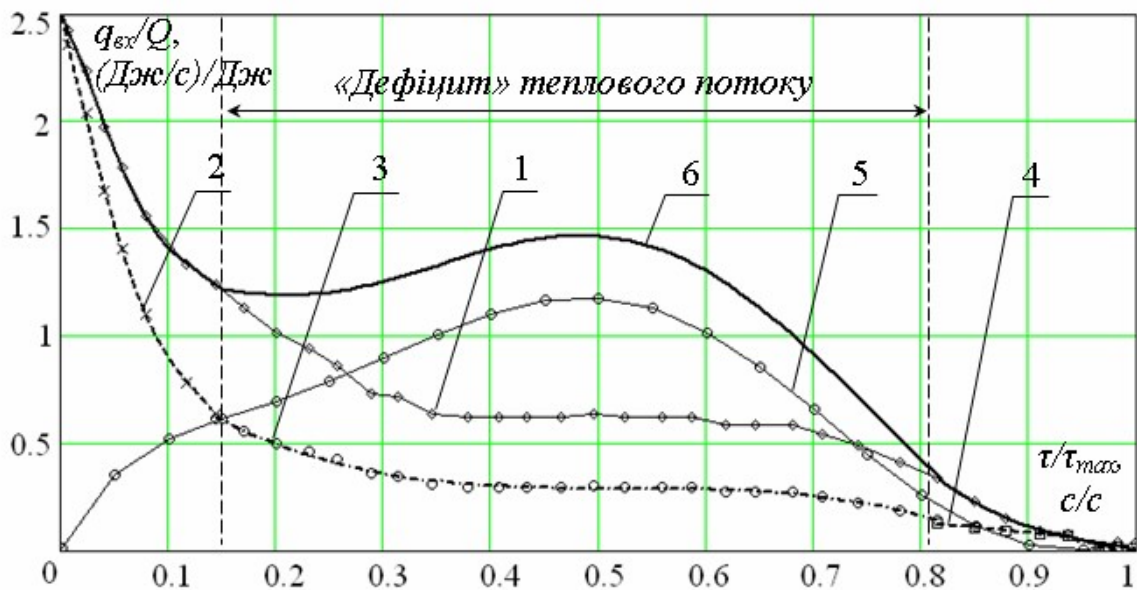


Рис. 3.32. Кінетика теплового потоку від стінок термостата до його внутрішнього середовища (1) та кінетика теплового потоку, що витрачається внутрішнім середовищем термостата (6), отримана розрахунками за складовими (2-5), пронормовані на загальну кількість витраченої теплоти Q

З отриманих результатів (рис. 3.32) видно, що теплота, яка надходить від стінок термостата до його внутрішнього середовища, має менше значення, ніж теплота, необхідна для нагрівання даного внутрішнього середовища термостата до рівноважної температури його стінок та для фазового переходу 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:

$$dU = \delta Q \pm \delta A, \quad (3.38)$$

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, якщо повернутися до формули (1.10), то зовнішня робота потоку повітря, яке рухається відносно зовнішньої поверхні обтюратора термостата, забезпечує по величині енергію активації E_A ефекту ІнтМО. Роботами з дослідження ефекту ІнтМО, зокрема ЗТП-сушіння [20-29], 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.

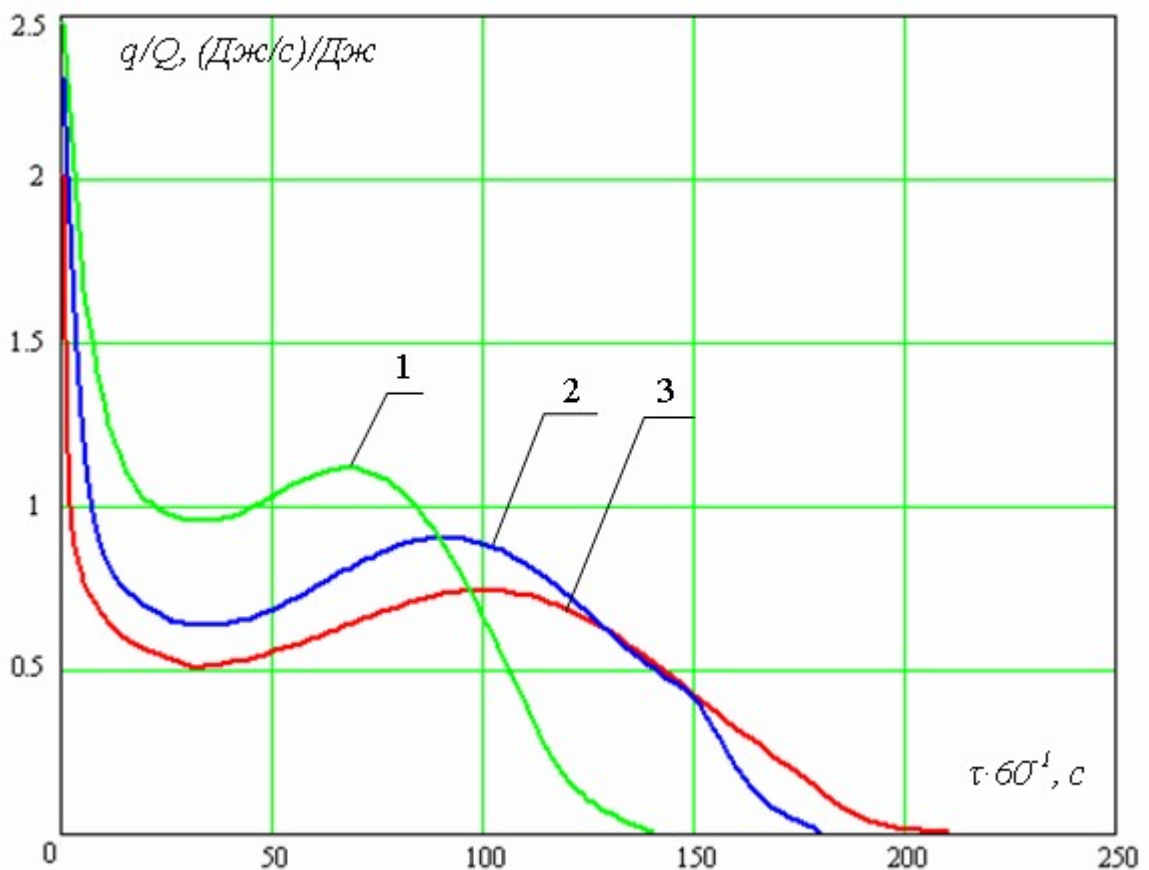


Рис. 3.33. Кінетика теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі термостата, за різної швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів м/с (Па): 1 – 13 (100); 2 – 9 (50); 3 – 4 (10)

З кінетики теплового потоку, що витрачається у внутрішньому середовищі термостата, за різної швидкості (гідродинамічного тиску) повітря (рис. 3.33), 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 ТМО. Площа під кривими розраховувалась без урахування нагрівання внутрішнього середовища термостата від початкової температури.

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 від його стінок, та теплового потоку, який розсіюється у даному внутрішньому середовищі, 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 E_A ефекту ІнТМО. За значень даного керуючого параметру менших E_A «запуск» ефекту ІнТМО відсутній.

На одному з етапів дослідження кінетики ефекту ІнТМО за різної швидкості потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, було проведено серію експериментів з визначення співвідношення гідростатичного тиску в потоці повітря та гідростатичного тиску всередині термостата.

Для проведення такого дослідження було виготовлено диференціальний манометр, один кінець якого розміщали в різні точки внутрішнього середовища термостата, а інший всередину каналу (трубки), по якому рухається повітря, перпендикулярно до напрямку його руху (рис. 3.34). Спочатку були проведені дослідження різниці гідростатичного тиску з сухим ККПТ у термостаті за відсутності рідкої фази у ньому. Далі організовували ефект ІнТМО у термостаті з вологим модельним ККПТ всередині, при цьому фіксували відхилення рідини в манометрі від положення рівноваги. Експеримент повторювали за різної швидкості потоку (гідродинамічного тиску) повітря, що рухається відносно обтюратора.

Експеримент проводився з точністю – ± 4 Па.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що відхилення рідини в манометрі від положення рівноваги з сухим ККПТ та протягом ефекту ІнтМО з вологим ККПТ у термостаті у різних його точках, за різної швидкості (гідродинамічного тиску) потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, знаходиться у межах похибки.

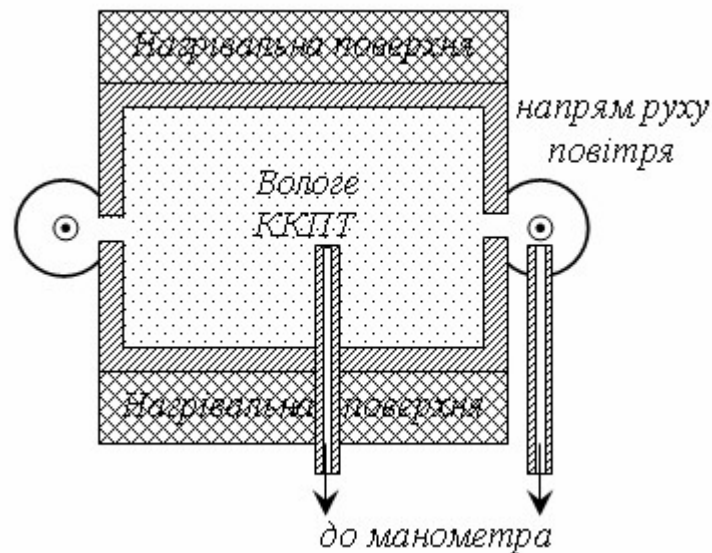


Рис. 3.34. Схема розміщення диференціального манометра в експериментальній установці

Даний результат доводить відсутність процесу фільтрації вологи між обтюраторами через ККПТ або його несуттєвий вплив, оскільки рушійною силою процесу фільтрації є наявність постійного градієнту тиску, чого у ефекті ІнтМО експериментально не спостерігається.

Необхідно відмітити те, що енергія активації E_A ефекту ІнтМО за умови його «запуску», «протікання» та «завершення» забезпечується не стільки кінетичною енергією молекул ($\frac{mv^2}{2}$) повітря, яке рухається відносно обтюраторів, скільки кінетичною енергією його потоку (його гідродинамічним тиском $\frac{\rho v^2}{2}$), який не залежить від температури та масової секундної витрати повітря. Доводять дані ствердження наступні експерименти.

Організовували ефект ІнтМО в термостаті з вологим ККПТ. Експеримент проводився за умови руху відносно обтюраторів спочатку потоку повітря з температурою лабораторного приміщення (15...20 °С). Після цього дослідження повторювали за умови руху відносно обтюраторів потоку повітря з температурою, яка дорівнювала температурі термостата (60 °С). Термостатування виділеного внутрішнього об'єму термостата забезпечувалось нагрівальними поверхнями. При цьому реєстрували сигнали

від термопар розміщених у термостаті. Отримані кінетики температур для термопар в центрі термостата всередині ККПТ наведені на рис. 3.35.

Представлений результат очевидно свідчить про те, що вплив підігріву потоку повітря на характер ефекту ІнтМО за даних умов організації експерименту не спостерігається. При цьому зміна тривалості процесу та величин локальних мінімумів та максимумів, характерних для ІнтМО, знаходяться в межах похибки. Отримане свідчить про відсутність значимого впливу підігріву повітря, а відповідно і зміни його ентальпії за рахунок підвищення температури, на ефект ІнтМО, та доводить, що основна функція повітря – створювати флуктуації концентрації частинок в об'ємі обтюлятора. Тобто саме кінетична енергія потоку, що розсіюється, є такою, що індукує ефект ІнтМО.

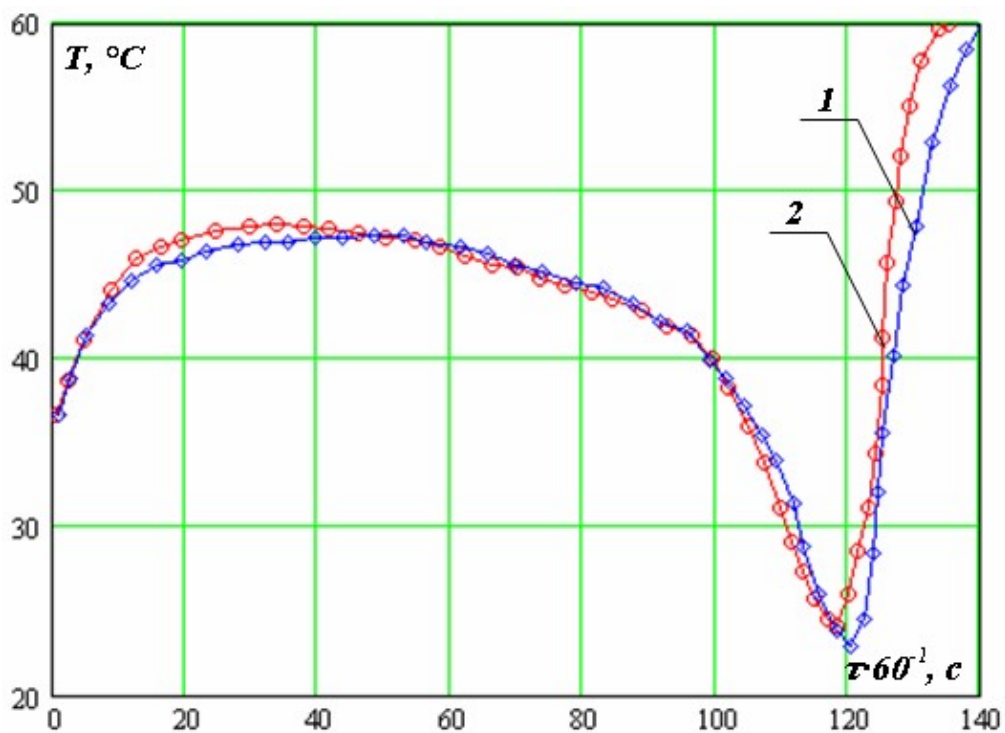


Рис. 3.35. Кінетики температури, отримані під час ефекту ІнтМО з обдуванням обтюраторів повітрям з температурою лабораторного приміщення (15...20 °С) (1) та повітрям, підігрітим до температури термостата (60 °С) (2)

Під час дослідження впливу витрат повітря на ефект ІнтМО, обтюратори спочатку обдували потоком повітря від компресора через трубки з прорізами, які щільно прилягають до зазорів на поверхні термостата, в яких розміщені обтюратори. При цьому за швидкості повітря $4 \frac{M}{c}$ витрати повітря

складали $- 8 \cdot 10^{-4} \frac{M^3}{c}$. Термостатування в даному експерименті забезпечувалось кондуктивним способом нагрівальними поверхнями.

Після цього експеримент проводили за умови розміщення ТМО-модуля, який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, з вологим ККПТ всередині до сушильної камери шафової сушарки (трубки для обдування зовнішньої поверхні обтюраторів повітрям від компресорів попередньо від'єднували). Термостатування у даному експерименті забезпечувалось конвективно повітрям тепломасообмінної камери (сушильної камери шафової сушарки). При цьому напрям обдування зазорів з обтюраторами на поверхні термостата був таким же, його швидкість була тією ж $-4 \frac{м}{с}$, а витрати дорівнювали $-8 \cdot 10^{-2} \frac{м^3}{с}$.

І в першому, і в другому експерименті температура повітря, яким проводили обдування зазорів з обтюраторами, дорівнювала $73...75 \text{ } ^\circ\text{C}$. Напруга та сила струму джерела живлення нагрівальних поверхонь підтримувались такими, щоб їх температура була однаковою в обох експериментах. За отриманими експериментальними даними побудовані фазові портрети ефекту ІнТМО наведені на рис. 3.36.

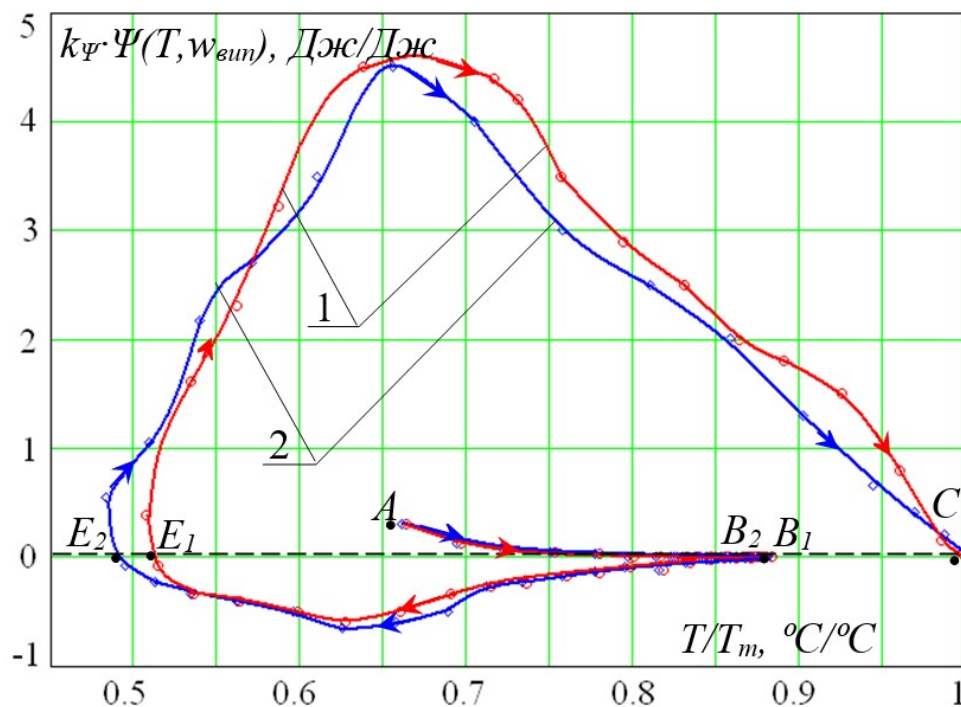


Рис. 3.36. Фазові портрети ефекту ІнТМО, отримані за обдування зовнішньої поверхні обтюраторів повітрям зі швидкістю 4 м/с з різними його витратами, $\text{м}^3/\text{с}$: 1 – $8 \cdot 10^{-4}$; 2 – $8 \cdot 10^{-2}$

Наведені фазові портрети за різних витрат повітря відрізняються один від одного у межах похибки, при тому, що витрати повітря відрізняються на два порядки. Величина витрат повітря не чинить видимого впливу на характер ефекту ІнТМО. Слід вважати, як було відмічено раніше, потік повітря повинен не скільки поглинути вологу біля границі розділу, яка для

ІнТМО знаходиться в об'ємі обтюраторів, скільки створити флуктуації параметрів газового середовища в них.

Таким чином, доведено, 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, а температура і витрати повітря не чинять істотного впливу на характер ІнТМО і не є баластом енергії.

Встановлено, інтенсивність ІнТМО може регулюватися в межах 15...20% швидкістю потоку повітря (від 4 до 13 м/с), що рухається відносно обтюраторів. Встановлене доводить, що керування інтенсивністю ІнТМО, а, відповідно, і продуктивністю його апаратної реалізації, можливе не тільки температурою термостатування та тепловим потоком від стінок термостата до його внутрішнього середовища, але і гідродинамічними характеристиками потоку повітря, яке рухається відносно обтюраторів термостата, що свідчить про ефективність ІнТМО.

3.3.9. Вплив на характер ефекту індукованого тепломасообміну кута обдування обтюраторів потоком повітря

В попередньому підрозділі доведено, що основною функцією потоку повітря, що рухається відносно обтюраторів, є створення флуктуації параметрів газового середовища в об'ємі обтюратора. Доведено при цьому, що енергія активації E_A ефекту ІнТМО забезпечується кінетичною енергією потоку повітря, яка є визначальним чинником для запуску даного ефекту. При цьому, слід відмітити, дисипація кінетичної енергії потоку повітря залежить від кута обдування обтюратора. Виходячи з цього, кут обдування обтюратора є одним із керуючих параметрів динамічної системи «навколишнє середовище – обтюратор – внутрішнє середовище термостата». Даний керуючий параметр є однією із вихідних вимог до конструкції апаратів з використанням ефекту ІнТМО.

Під час ІнТМО в типових ЗТП-сушарках, в яких функцію термостатування виконує потік повітря, що обдуває ТМО-модуль (функціональну ємність (ФЄ)), який обмежує внутрішнє середовище термостата, підведення теплоти до внутрішнього об'єму термостата здійснюється змішаним способом. При цьому, як правило, використовуються двосторонні ФЄ у формі паралелепіпеда. В таких ФЄ було виявлено, що в їх центральній площині (в області геометричної симетрії) знаходиться критична область, де відбувається відхилення умов для «запуску» та «протікання» ефекту ІнТМО. Це обумовлено тим, що в центральній частині ФЄ гідродинамічні умови для обтікання зовнішнім повітрям поверхні суттєво відрізняються від аналогічних з боку торців ємності, де динамічний тиск потоку максимальний, а статичний – мінімальний. Щоб вирівняти розподіл між статичним та динамічним тисками вздовж всієї поверхні ФЄ

використовуються вставки-турбулізатори, які розміщуються вздовж площин ФЄ [20-29].

Вважається, що швидкість потоку повітря поблизу газонепроникної стінки ФЄ прагне до нуля. При цьому динамічний тиск потоку мінімальний, а статичний – максимальний [20].

Розрив поверхні ФЄ (зазор, в якому знаходиться обтюратор) вносить істотне локальне збурювання в характер розподілу тисків. Такі збурювання мають стохастичний нестійкий характер [74-76]: утворюються завихрення потоку з нестійким часом життя.

Роботами з дослідження ЗТП-сушіння [20-22] встановлено, що мінімальним значенням швидкості повітря, за якого можлива реалізація «запуску», «протікання» та «завершення» ефекту ІнТМО є швидкість більша за 3 м/с. Якщо розрахувати число Рейнольдса для такої швидкості та мінімальної температури, за якої можливий ефект ІнТМО (30...40 °С), то його значення буде більшим за 2500 ($Re > 2.5 \cdot 10^3$). Оскільки критичним значенням критерію Рейнольдса між ламінарним та турбулентним режимом плинину вважається $Re_{кр} = 2000$, то слід вважати, що реалізація ефекту ІнТМО можлива лише за турбулентного режиму плинину повітря [77-79]. При цьому, з метою підвищення ефективності процесу, важливим є забезпечення по можливості рівномірного розподілення турбулентних збурювань вздовж обтюраторів.

Турбулентність, як відомо із класичного визначення [80] – це трьохмірний нестационарний рух, в якому внаслідок розтягання вихорів створюється неперервний розподіл пульсацій швидкості в інтервалі довжин хвиль від мінімальних, що визначаються в'язкими силами, до максимальних, що визначаються граничними умовами плинину.

Внаслідок існування нелінійної залежності між швидкістю руху речовини та потоком кількості руху, що міститься в системі рівнянь для опису турбулентних збурювань, а також через наявність в даних рівняннях напружень Рейнольдса, не існує можливості теоретичного вирішення повної системи рівнянь Нав'є–Стокса для такого нестационарного плинину. Таким чином, для якісного уявлення про турбулентні збурювання та отримання кількісної інформації, необхідної для технічних розрахунків, використовуються експериментальні дослідження [80-82].

В дослідженні [83-85] використовувалась експериментальна установка загальний вигляд якої представлений на рис. 3.28.

Особливістю установки (рис. 3.37), що застосовувалась у експерименті, є трубки, через які повітрям від компресора обдуваються зазори з обтюраторами. По довжині трубок зроблені отвори малого діаметру (1 мм). Трубки розміщують таким чином, щоб отвори знаходились навпроти обтюраторів. Існує можливість змінювати кут обдування зазорів з обтюраторами потоком повітря, шляхом їх повертання в тримачах. Під кутом обдування мається на увазі кут між нормаллю до поверхні зазору та напрямом руху потоку повітря. Внутрішня частина термостата при цьому

заповнювалась вологим модельним ККПТ. У вологому ККПТ розміщали термомпари.

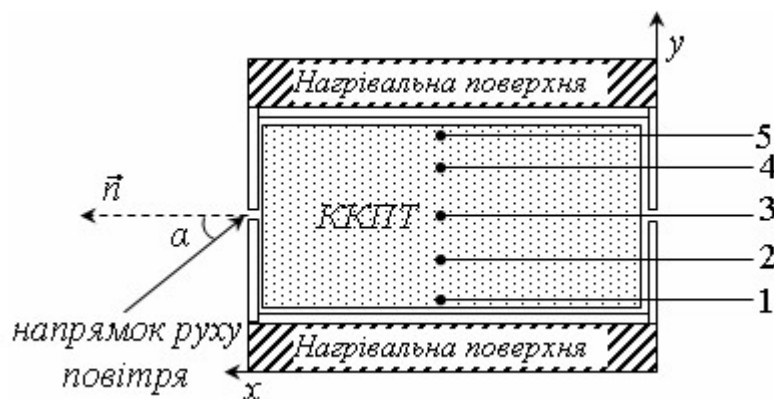


Рис. 3.37. Схема розміщення термомпар у ККПТ всередині термостата під час дослідження впливу на характер ефекту ІнтМО кута обдування повітрям обтюраторів

Дослідження проводились для швидкості руху потоку повітря 10 м/с. Кут обдування зазорів з обтюраторами (α) змінювався від 0° до 90° . Під кутом обдування мається на увазі кут між віссю Ox та напрямком руху потоку повітря, як це показано на рис. 3.37.

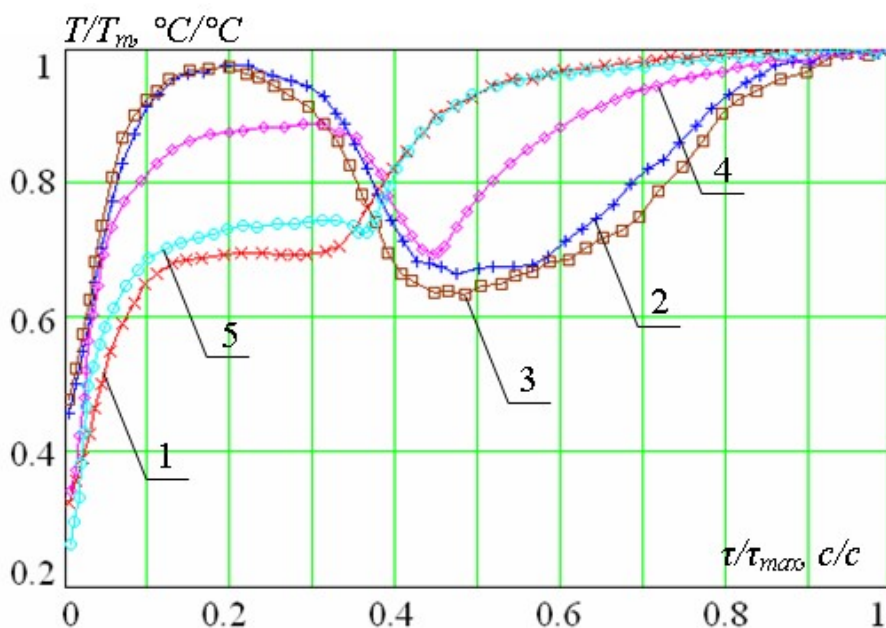


Рис. 3.38. Кінетики температури ККПТ, отримані під час ІнтМО за кута обдування повітрям обтюраторів $\alpha=0^\circ$ (1, 2, 3, 4, 5 – термомпари з рис. 3.37)

Кінетики температур ККПТ за різних кутів обдування повітрям обтюраторів мають типовий для ефекту ІнтМО характер. На рис. 3.38 наведено кінетику температури для кута обдування $\alpha=0^\circ$.

Характер фазових траєкторій також однаковий, але відрізняються вони частинами фазової траєкторії у негативній частині фазового простору. З рис. 3.39 видно, що площа яку обмежує негативна ділянка фазової траєкторії різна за різних кутів обдування обтюраторів.

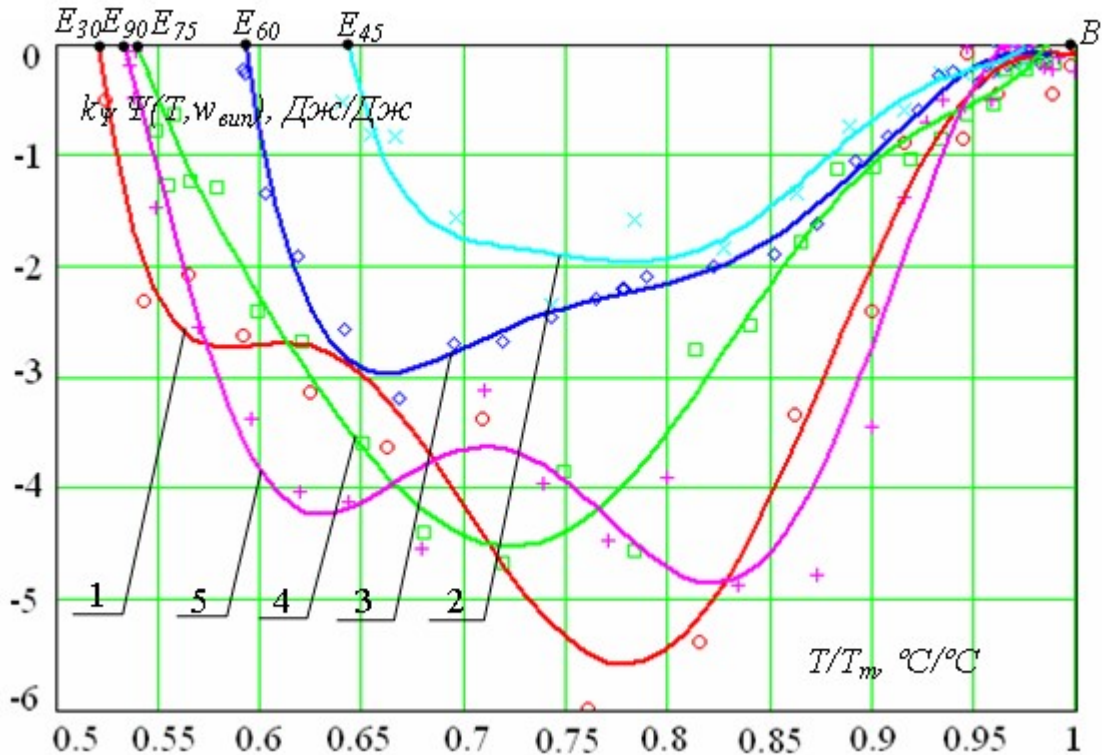


Рис. 3.39. Негативні ділянки фазових траєкторій для еволюції системи під час ІнтМО за різних кутів обдування обтюраторів потоком повітря, град: 1 – 30; 2 – 45; 3 – 60; 4 – 75; 5 – 90

Розрахунок площ під негативними ділянками фазових траєкторій показує, що вони нелінійно залежать від кута обдування обтюраторів потоком повітря (рис. 3.40).

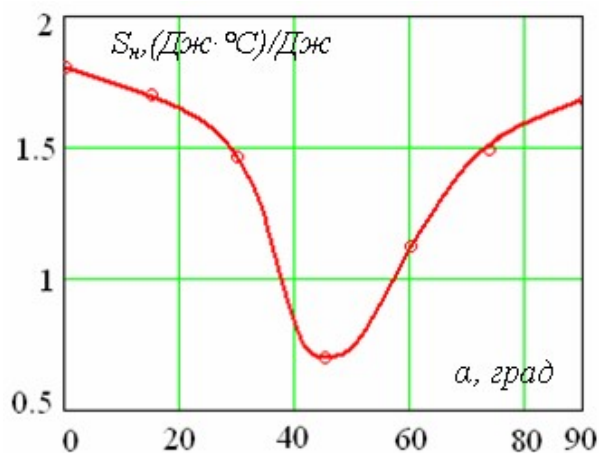


Рис. 3.40. Площа під негативною ділянкою фазової траєкторії ефекту ІнтМО від кута обдування обтюраторів потоком повітря

Як слідує із наведеного рисунка, залежність площі під негативною ділянкою фазової траєкторії від кута обдування обтюраторів має локальний мінімум. Як відмічено вище, розраховані площі є критеріями енергоефективності ІнТМО за даних умов організації ТМО, оскільки вони пропорційні частині тепловмісту внутрішнього середовища термостата, витраченому на фазовий перехід рідини даного середовища у газовий стан. Таким чином, чим більша площа під негативною частиною фазової траєкторії, тим вища енергоефективність ІнТМО.

Отриманий результат свідчать про те, що для кутів обдування обтюраторів із діапазону від 35° до 55° енергетична ефективність ІнТМО найменша у порівнянні з іншими кутами обдування. При цьому тривалість процесу досягнення ККПТ гігроскопічного стану найдовша на 33...45%. При збільшенні та при зменшенні кута обдування відносно даного діапазону відбувається збільшення площі під негативною ділянкою фазової траєкторії та, відповідно, зменшення тривалості процесу ТМО за однакових інших умов організації ІнТМО.

Найменша тривалість досягнення ККПТ гігроскопічного стану під час ІнТМО спостерігається для випадків, коли потік повітря направлений до зазорів з обтюраторами під кутами із діапазонів від 0° до 30° та від 70° до 90° . За тих же діапазонів кутів локальний максимум кінетики температури досягається раніше, тобто для таких кутів обдування раніше «запускається» ефект ІнТМО.

Причиною такої залежності є те, що серед досліджуваних кутів обдування обтюраторів повітрям, кути обдування 0° та 90° є такими, за яких створюються найбільш сприятливі умови для виникнення турбулентних збурень [78, 86, 87].

Умови для утворення турбулентних збурень під час руху потоку повітря під кутом обдування зазорів з обтюраторами 0° аналогічній умовам, створюваним під час руху газу у каналі прямокутного перерізу, коли взаємодіючі поля дотичних напружень спрямовані відносно один одного під кутом 90° [78-80]. Випадок руху потоку повітря під кутом обдування зазору 90° аналогічний випадку обтікання плоскої поверхні з геометричними неоднорідностями, коли нормальні напруження сумірні з дотичними [88, 89]. Відповідно, умови для утворення турбулентного руху потоку повітря під час обдування обтюраторів під іншими досліджуваними кутами займають проміжне положення, в результаті чого розподілення турбулентних збурень має меншу рівномірність.

Таким чином, встановлено, що «запуск», «протікання» та «завершення» ефекту ІнТМО можливе за будь-яких кутів обдування обтюраторів, але необхідно забезпечувати наявність необхідної для реалізації ефекту швидкості потоку біля всіх обтюраторів.

Як відмічено вище, в типових ЗТП-сушарках для уникнення утворення в центральній частині двосторонньої ФЄ критичної області, пов'язаної з відривом потоку від поверхні ФЄ, використовують вставки-турбулізатори [20], які розміщуються між площиною ФЄ та стінкою сушильної камери.

Виходячи із цього та із результатів проведеного дослідження, для успішної реалізації ефекту ІнтМО керувати його «запуском», «протіканням» та «завершенням» можливо шляхом індивідуального обдування обтюраторів.

Раціональними із досліджуваних з точки зору енергоефективності ІнтМО слід вважати кути обдування обтюраторів потоком повітря 0° та 90° . Обмеженням використання для обдування зазору потоком повітря під кутом 0° є наступне. Під час направлення потоку повітря перпендикулярно до поверхні обтюратора, створюється додатковий тиск на його поверхню, яка контактує з оточуючим середовищем. В результаті такої дії, оскільки зазори часто виконуються з протилежних сторін ТМО-модуля, який обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, через неоднорідність потоку можливе виникнення постійного градієнту тиску. Внаслідок цього можливе виникнення потоку повітря через внутрішню частину термостата. Виникнення такого потоку порушує суцільність середовища за парціальним тиском пари рідини, внаслідок чого можливий «зрив» ефекту ІнтМО.

Таким чином, дослідженнями кінетики температури, кінетики вологовмісту ККПТ всередині термостата та аналізу фазового портрету ефекту ІнтМО за різних кутів обдування повітрям обтюраторів із діапазону від 0° до 90° , встановлено, що досліджувані кінетики температури та вологовмісту ККПТ за досліджуваних кутів обдування мають типовий для ефекту ІнтМО характер.

Встановлено, що енергоефективність ІнтМО найменша для кутів обдування із діапазону від 35° до 55° . Встановлено, при збільшенні та при зменшенні кута обдування відносно даного діапазону відбувається зменшення тривалості ІнтМО, а енергоефективність його збільшується.

3.3.10. Вплив на характер ефекту індукованого тепломасообміну розмірів внутрішнього виділеного об'єму термостата

У підрозд. 3.3.7 визначене раціональне значення товщини ТМО-модуля, що обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, в даному підрозділі проведено дослідження характеру ефекту ІнтМО у модулі, один із габаритних розмірів якого збільшений більше, ніж в два рази (рис. 3.41). Даний ТМО-модуль має форму паралелепіпеду з габаритними розмірами – $95 \times 15 \times 50$ мм. Обтюратори виконані на площині 95×15 мм, ширина зовнішньої поверхні обтюратора – 1 мм, довжина – 95 мм. Підведення теплоти до модуля здійснюється кондуктивно від двох нагрівальних поверхонь через площини 50×95 мм. Таким чином, збільшено у 2,3 разу один із габаритних розмірів, відповідно в 2,3 разу збільшився об'єм внутрішнього середовища термостата. Термостат щільно заповнювався шарами волого ККПТ у формі паралелепіпедів. Термопари у внутрішньому середовищі розміщувались як показано на рис. 3.41.

Обдування обтюраторів потоком повітря здійснювалось, як і в попередніх експериментах через канали з прорізами, які жорстко закріплюються до зовнішньої поверхні стінки термостата вздовж обтюраторів. Отримані кінетики температури наведені на рис. 3.42.

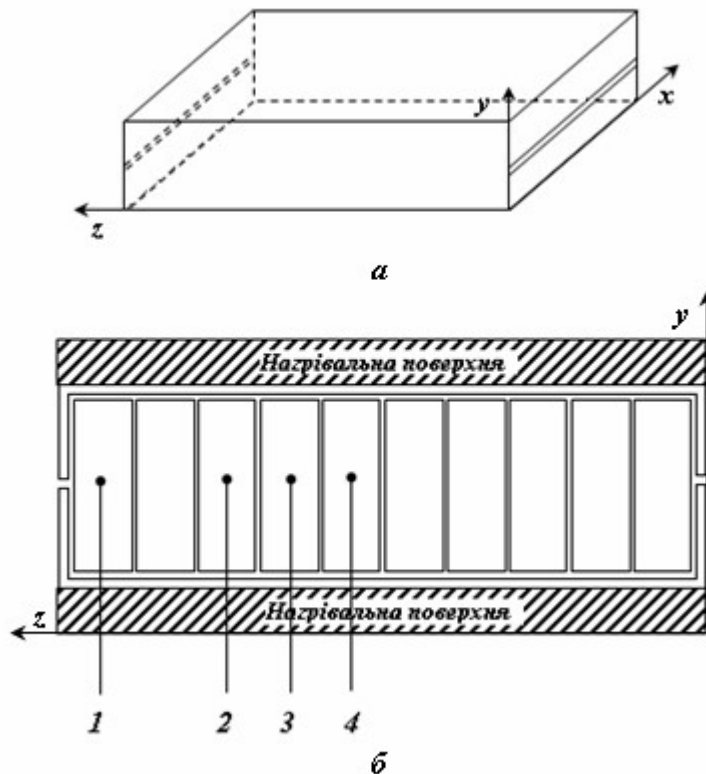


Рис. 3.41. Схема (а) ТМО-модуля, що обмежує внутрішній виділений об'єм термостата, з габаритними розмірами 95×15×50 мм та схема розміщення термопар в ньому (б)

Наведені кінетики доводять, що в даному термостаті ефект ІнтМО реалізовується, тобто за особливими точками видно: наявні «запуск», «протікання» та «завершення» ефекту ІнтМО.

В роботі [23], виявлено вплив розмірів двостороннього ТМО-модулю (ФЄ) для ЗТП-сушарок на кінетику процесу ЗТП-сушіння (реалізації ефекту ІнтМО для зневоднення волого ККПТ). Двосторонні ФЄ являють собою дві паралельні площини, на яких зроблені зазори та перфорація для обтюраторів. Роль обтюраторів виконує частина КППТ яка прилягає до зазору або перфорації. Термостатування ФЄ здійснюється конвективним способом, шляхом обдування її нагрітим до температури термостата повітрям. Професором Погожих М.І. доведена складна залежність кінетики ЗТП-сушіння від розмірів двосторонніх ФЄ, пов'язана з механізмом проникнення сушильного агента всередину ФЄ. Під час зневоднення відбувається утворення пор безпосередньо під теплообмінною поверхнею, при чому, чим більша її площа, тим більший їх об'єм. Якщо в ці пори починає надходити повітря, по ходу свого руху воно насичується паром води і випаровування води з вологої зони матеріалу припиняється. Через це, волога зона перегрівається і відбувається механічне руйнування цілісності сировини та утворення порожнеч. Утворення порожнеч сприяє збільшенню кількості повітря, що надходить всередину ФЄ з оточуючого середовища, що призводить до або трансформації ЗТП-процесу в конвективне, або

блокування процесу зневоднення. Ґрунтуючись на наведеній вище моделі механізму масообміну під час ефекту ІнтМО, такий результат можна пояснити невиконанням обтюраторами своїх функцій та порушенням суцільності середовища всередині ФЄ за парціальним тиском пари рідини.

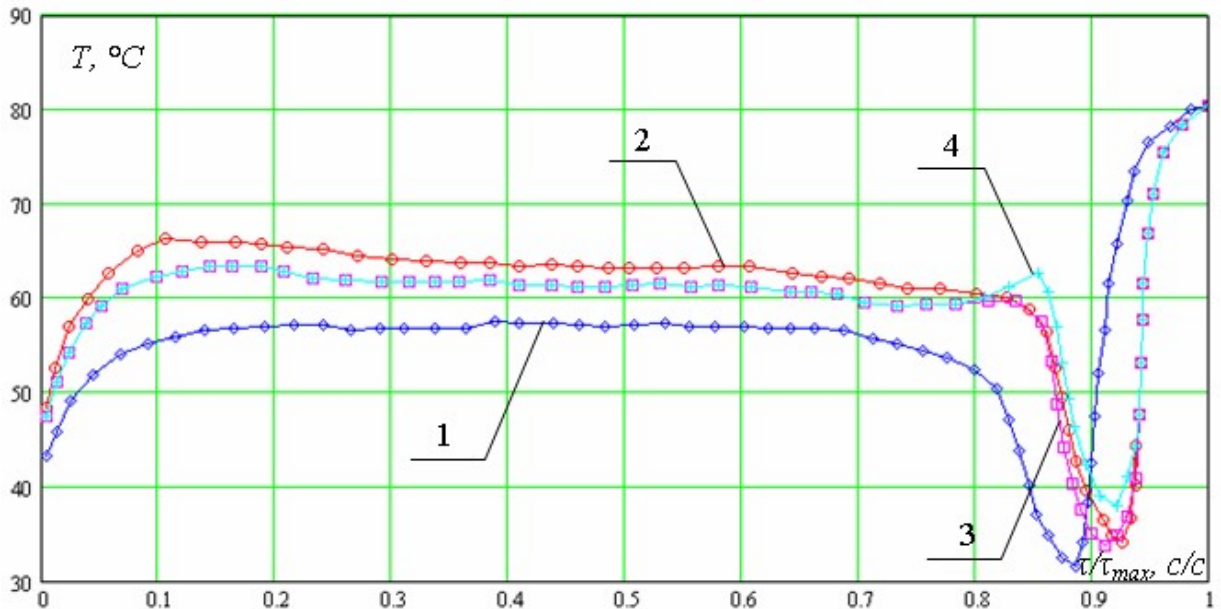


Рис. 3.42. Кінетики температури (пронормовані на максимальну тривалість процесу τ_{max}) ККПТ під час ефекту ІнтМО у термостаті з габаритними розмірами його внутрішньої частини – $95 \times 15 \times 50$ мм (1, 2, 3, 4 – термопари з рис. 3.41)

Таким чином, дослідження, результати якого наведені на рис. 3.42, доводить, що за умови збереження суцільності середовища за парціальним тиском пари рідини, габаритний розмір внутрішнього виділеного об'єму термостата не має обмежень з точки зору реалізації ефекту ІнтМО. В залежності від способу застосування ІнтМО на практиці, обмеження до розміру термостатів досліджуваної конструкції (рис. 3.41) слід ставити, виходячи із продуктивності обтюраторів, тобто з точки зору стоку маси через них.

Таким чином, дослідженнями наведеними в розділі підтверджено гіпотезу ефекту ІнтМО та виявлено можливості його використання для виконання низки теплових операцій харчової та переробної промисловості.

РОЗДІЛ 4. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ

4.1. Наближене розв'язання задач теорії тепломасообміну з використанням методу R-функцій

Ефективність інтенсифікації процесів тепло- та масообміну в термостаті з вологим ККПТ у його внутрішньому виділеному об'ємі лежить на шляху дослідження математичних моделей з урахуванням широкого діапазону змін теплофізичних параметрів та межових умов. При значних градієнтах температури взаємний вплив процесів тепло- та масообміну призводить до появи нових механізмів ТМО, вияви та дослідження яких можна здійснювати на основі аналізу початково-межових задач теорії ТМО. Розв'язки задач теорії ТМО про розподілення температури і вологовмісту в термостаті з трьома фазами, надають можливість виявляти особливості механізму і рушійні сили для процесів тепло- та масообміну та ефективно керувати ними [90-97].

Під час розгляду широкого класу крайових задач різної фізичної природи виникає необхідність у вирішенні диференціальних рівнянь в частинних похідних, в яких досліджувана область має складну конфігурацію. У таких випадках, як правило, використовуються чисельні методи: сіткові [98], варіаційні [99] та проєкційні [100]. Однак, кожен з них має свої переваги і недоліки. Так, сіткові методи володіють великою ефективністю алгоритму, але при цьому не точно враховують геометрію досліджуваного об'єкта. У разі варіаційних методів не завжди можна побудувати базисні функції, які задовольняли б всім необхідним умовам, тому їх використання обмежене [101]. Слід відмітити метод R-функцій [102], що володіє геометричною гнучкістю і універсальністю по відношенню до вибраного способу мінімізації функціоналу [103].

В теорії ТМО всебічно досліджені розв'язки задач лише для таких форм тіл, для яких використовуються інтегральні перетворення (необмежена пластина, циліндр нескінченної висоти, куля) [98-100]. У той же час такі практичні форми, як паралелепіпед, півкуля (або інші частини кулі), циліндр скінченної довжини, похила призма та ін., не стають предметом аналітичних досліджень. Це зумовлено тим, що будь-який метод повинен урахувати як аналітичну, так і геометричну інформацію задачі [100, 101].

Метою даного етапу дослідження є наближений розв'язок задач теорії ТМО з використанням методу R-функцій та застосування їх для описання ефекту ІнТМО [104-106].

4.1.1. Розв'язок задачі про розподіл температури і вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми, що містить три фази

Першим етапом даного дослідження є отримання розв'язку задачі про розподіл температури і вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми, що утримує три фази, при межових умовах третього роду з використанням методу R-функцій сумісно з методом малого параметра. Другим етапом є узагальнення результатів з урахуванням комбінації межових умов третього і першого роду.

Нехай нормальний перетин нескінченного циліндричного ККПТ площиною x_1Ox_2 має форму області Ω з межею $\partial\Omega$. В області Ω маємо безрозмірну систему рівнянь [107]:

$$\begin{aligned} \Delta T(x, Fo) - \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} &= \varepsilon \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo}, \\ Lu\Delta U(x, Fo) &= \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo} + LuPn\Delta T(x, Fo). \end{aligned} \quad (4.1)$$

При наступних межових і початкових умовах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial n} + Bi_q T(x, Fo) &= Bi_q - (1 - \varepsilon_\phi) Ko Lu Ki_m(Fo), \\ \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial n} - Pn \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial n} &= Ki_m(Fo), \quad x \in \partial\Omega, \\ T(x, Fo) = U(x, Fo) &= 0, \quad Fo = 0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Рівності (4.1), (4.2) записані в безрозмірних величинах [107] $x = (x_1, x_2)$, $x_i = \frac{\bar{x}_i}{R}$ ($i = 1, 2$), $Fo = \frac{a\bar{\tau}}{R^2}$, $\bar{\tau} \in [0, \tau_0]$, $U = \frac{U_0 - \bar{U}}{U_0}$, $T = \frac{\bar{t} - t_0}{t_0}$ (рискою відмічені розмірні величини); Δ – оператор Лапласа; ε_ϕ – критерій фазового перетворення; n – зовнішня нормаль до $\partial\Omega$; a – коефіцієнт теплопровідності; R – постійна, яка має розмірність довжини; U_0 , t_0 – початкові вологовміст і температура; Fo – критерій Фур'є, Pn – критерій Поснова; Lu – критерій Ликова; Bi_q – тепловий критерій Біо; $Ki_m(Fo)$ – масообмінний критерій Кірпічова (залежний від критерію Фур'є Fo); Ko – критерій Косовича.

Параметр зв'язності ε ($\varepsilon = \varepsilon_\phi Ko$), який входить в перше рівняння системи (4.1), характеризує взаємодію полів вологовмісту та температури ($\varepsilon < 1$).

Замінімо в (4.1) похідні за критерієм Fo різницевиими аналогами

$$\frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} = \frac{T(x, Fo_k) - T(x, Fo_{k-1})}{h_{Fo}},$$

$$\frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo} = \frac{U(x, Fo_k) - U(x, Fo_{k-1})}{h_{Fo}},$$

де $h_{Fo} = \frac{Fo_0}{N}$ – крок розбиття проміжку зміни критерію Fo

($Fo \in [0, Fo_0]$, $Fo_0 = \frac{a\tau_0}{R^2}$) на N частин, $Fo_k = kh_{Fo}$ ($k = 1, 2, \dots, N$).

Одержуємо послідовність стаціонарних межових задач (значення всіх величин в момент Fo_k будемо позначати верхнім індексом « k »):

$$\Delta T^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} T^{(k)} = -\frac{1}{h_{Fo}} T^{(k-1)} + \frac{\varepsilon}{h_{Fo}} (U^{(k)} - U^{(k-1)}), \quad (4.3)$$

$$Lu\Delta U^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} U^{(k)} = -\frac{1}{h_{Fo}} U^{(k-1)} + LuPn\Delta T^{(k)}, \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial T^k}{\partial n} + Bi_q T^{(k)} = q_1^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega, \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial U^k}{\partial n} + Pn \frac{\partial T^{(k)}}{\partial n} = q_2^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega, \quad (4.6)$$

$$T^{(0)} = 0, \quad U^{(0)} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Тут введені позначення $T^{(k)}(x) = T(x, kh_{Fo})$, $U^{(k)}(x) = U(x, kh_{Fo})$, $q_1^{(k)} = Bi_q - (1 - \varepsilon_\phi) Ko Lu Ki_m(k \cdot h_{Fo})$, $q_2^{(k)} = Ki_m(k \cdot h_{Fo})$.

У відповідності до методу малого параметра розв'язання межової задачі (4.3)-(4.6) на кожному фіксованому шарі Fo_k ($k = 1, 2, \dots, N$) будемо шукати у вигляді степеневих рядів по параметру ε :

$$T^{(k)} = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon^m T_m^{(k)}, \quad U^{(k)} = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon^m U_m^{(k)}. \quad (4.7)$$

Відмітимо, що коефіцієнти розв'язання $T_m^{(k)}$ і $U_m^{(k)}$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) не залежать від ε , а $T_0^{(k)}$, $U_0^{(k)}$ – розв'язки при $\varepsilon = 0$. Шляхом підстановки (4.7) в (4.3)-(4.6) і порівняння коефіцієнтів при однакових степенях ε , одержуємо для визначення нульового наближення $T_0^{(k)}$, $U_0^{(k)}$ задачі:

$$\Delta T_0^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} T_0^{(k)} = -\frac{1}{h_{Fo}} T_0^{(k-1)}, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial T_0^{(k)}}{\partial n} + Bi_q T_0^{(k)} = q_1^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega$$

та

$$Lu\Delta U_0^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} U_0^{(k)} = -\frac{1}{h_{Fo}} U_0^{(k-1)} + LuPn\Delta T_0^{(k)}, \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial U_0^{(k)}}{\partial n} - Pn \frac{\partial T_0^{(k)}}{\partial n} = q_2^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega,$$

$$T^{(0)} = 0, \quad U^{(0)} = 0.$$

Подальші наближення $T_m^{(k)}$, $U_m^{(k)}$ ($m=0, 1, 2, \dots$) знаходяться як розв'язки задач:

$$\Delta T_m^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} T_m^{(k)} = \frac{1}{h_{Fo}} (U_{m-1}^{(k)} - \gamma_m U^{(k-1)}), \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial n} + Bi_q T_m^{(k)} = 0, \quad x \in \partial\Omega$$

та

$$Lu\Delta U_m^{(k)} - \frac{1}{h_{Fo}} U_m^{(k)} = LuPn\Delta T_m^{(k)}, \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial U_m^{(k)}}{\partial n} - Pn \frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial n} = 0, \quad x \in \partial\Omega,$$

$$T^{(0)} = 0, \quad U^{(0)} = 0, \quad \gamma_m = \begin{cases} 1, & m = 1 \\ 0, & m > 1 \end{cases}.$$

Замітимо, що верхнім індексом « k » позначається відповідність розглядуваних величин k -тому шару за критерієм Fo , а нижнім індексом « m » – місце тих же величин в розвиненнях в ряди по степеням ε для вологовмісту та температури.

Для побудови наближеного розв'язку межових задач (4.10), (4.11) використаємо метод R -функцій, а саме, запишемо структурні формули для коефіцієнтів розвинення температури $T_m^{(k)}$ та вологовмісту $U_m^{(k)}$ у такому вигляді, щоб відповідні межові умови задовольнялися точно. Структура розв'язку для задачі (4.10) має вигляд:

$$T_m^{(k)} = \Phi_m^{(k)} - \omega D_1 \Phi_m^{(k)} - \omega (Bi_q \Phi_m^{(k)} - \delta_m q_1^{(k)}), \quad (4.12)$$

а для задачі (4.11) записується так:

$$U_m^{(k)} = \Psi_m^{(k)} - \omega D_1 \Psi_m^{(k)} - \omega (Pn D_1 T_m^{(k)} - \delta_m q_2^{(k)}), \quad (4.13)$$

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 0, & m \geq 1 \end{cases}$$

Тут $\Phi_m^{(k)}$, $\Psi_m^{(k)}$ – довільні компоненти структур (4.12) і (4.13) відповідно, при будь-якому виборі яких, межові умови задовольняються точно. Функція $\omega(x)$ є лівою частиною нормалізованого до першого порядку рівняння межі $\partial\Omega$ та має такі властивості: $\omega > 0$ в Ω , $\omega = 0$, $\frac{\partial\omega}{\partial n} = -1$ на $\partial\Omega$.

Оператор D_1 визначається формулою:

$$D_1 = \frac{\partial\omega}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial\omega}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2} \quad (4.14)$$

і є продовженням оператора $\frac{\partial}{\partial n}$ в Ω , а його змінні коефіцієнти $\frac{\partial\omega}{\partial x_1}$ та $\frac{\partial\omega}{\partial x_2}$ перетворюються на $\partial\Omega$ в напрямні косинуси нормалі, а саме:

$$\cos(n, x_1) = \frac{\partial\omega}{\partial x_1}, \quad \cos(n, x_2) = \frac{\partial\omega}{\partial x_2}. \quad (4.15)$$

Для побудови функції $\omega(x)$ скористаємось R -операціями [102, 103]:

$$\begin{aligned} x \wedge_0 y &= x + y - \sqrt{x^2 + y^2} \quad - \text{R-кон'юнкція,} \\ x \vee_0 y &= x + y + \sqrt{x^2 + y^2} \quad - \text{R-диз'юнкція,} \\ \bar{x} &= -x \quad - \text{R-заперечення.} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Так для області Ω , зображеній на рис. 4.1, функція $\omega(x)$ може бути за допомогою R -операцій записана в такій послідовності [108].

Спочатку, виходячи із загального вигляду області Ω , будемо предикатне рівняння цієї області:

$$\Omega = (\Omega_1 \wedge \bar{\Omega}_2) \wedge (\Omega_3 \vee \bar{\Omega}_4), \quad \Omega = \begin{cases} 1, & x \in \Omega \\ 0, & x \notin \Omega \end{cases}. \quad (4.17)$$

Тут \wedge , \vee , $\bar{}$ – символи операцій алгебри логіки [109]; Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 , Ω_4 – опорні області, які визначаються формулами:

$$\Omega_1 \equiv (R^2 - x_1^2 - x_2^2 \geq 0) \quad (\text{коло радіусу } R \text{ з центром на початку координат});$$

$$\Omega_2 \equiv (r^2 - x_1^2 - x_2^2 \geq 0) \text{ (коло радіусу } r \text{ з центром на початку координат);}$$

$$\Omega_3 \equiv (x_2 - x_1 \geq 0) \text{ (півплощина вище прямої } x_2 = x_1);$$

$$\Omega_4 \equiv (x_1 + x_2 \geq 0) \text{ (півплощина вище прямої } x_2 = -x_1).$$

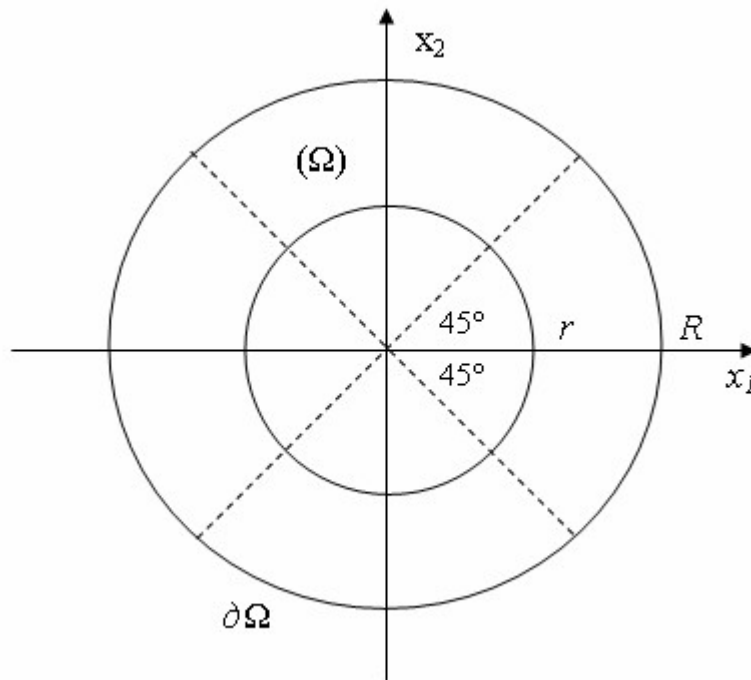


Рис. 4.1. Загальний вигляд області Ω

Далі логічні символи замінимо відповідними символами R -операцій, а позначення опорних областей – їх аналітичним описом [110]. В результаті одержимо аналітичний вираз для функції $\omega(x)$, а саме:

$$\omega(x) = \left[(R^2 - x_1^2 - x_2^2) \wedge_0 (x_1^2 + x_2^2 - r^2) \right] \wedge_0 \left[(x_2 - x_1) \vee_0 (-(x_1 + x_2)) \right]. \quad (4.18)$$

Одержана функція $\omega(x)$ задовольняє умові:

$$\omega > 0 \text{ в } \Omega, \omega = 0 \text{ на } \partial\Omega.$$

Для того, щоб забезпечити нормалізованість для цієї функції ($|\nabla\omega| = 1$ на $\partial\Omega$), необхідно, щоб рівняння відповідних опорних областей були також нормалізованими. Для таких ліній, як коло і пряма, нормалізація забезпечується введенням для рівнянь постійних множників. Для розглядуваних опорних областей маємо:

$$\omega \equiv \left[\frac{1}{2R} (R^2 - x_1^2 - x_2^2) \wedge \frac{1}{2r} (x_1^2 + x_2^2 - r^2) \right] \wedge_0 \wedge_0 \left[\frac{1}{\sqrt{2}} (x_2 - x_1) \vee \left(\left(-\frac{1}{\sqrt{2}} (x_1 + x_2) \right) \right) \right] = 0 \quad (4.19)$$

Невизначені компоненти $\Phi_m^{(k)}$, $\Psi_m^{(k)}$ будемо представляти у вигляді розвинень по елементам деяких повних систем функцій (наприклад [111], степеневих поліномів, поліномів Чебишева, сплайнів):

$$\begin{aligned} \Phi_m^{(k)} &= \sum_{i=1}^{N_1} C_{i,m}^{(k)} \xi_i(x), \\ \Psi_m^{(k)} &= \sum_{i=1}^{N_2} d_{i,m}^{(k)} \eta_i(x). \end{aligned} \quad (4.20)$$

Коефіцієнти $C_{i,m}^{(k)}$, $d_{i,m}^{(k)}$ будемо знаходити шляхом пошуку мінімуму відповідних функціоналів [112] (для задач (4.8), (4.10)):

$$\begin{aligned} J_1(T_m^{(k)}) &= \iint_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{h_{Fo}} (T_m^{(k)})^2 - 2T_m^{(k)} F_m^{(k)} \right] d\Omega + \\ &+ \int_{\partial\Omega} [Bi_q (T_m^{(k)})^2 - 2\delta_m T_m^{(k)} q_1^{(k)}] d(\partial\Omega), \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$F_m^{(k)} = \begin{cases} \frac{1}{h_{Fo}} T_m^{(k-1)}, & m = 0 \\ -\frac{1}{h_{Fo}} (U_{m-1}^{(k)} - \gamma_m U^{(k-1)}), & m > 0 \end{cases},$$

та (для задач (4.9), (4.11)):

$$\begin{aligned} J_2(U_m^{(k)}) &= \iint_{\Omega} \left[Lu \left(\frac{\partial U_m^{(k)}}{\partial x_1} \right)^2 + Lu \left(\frac{\partial U_m^{(k)}}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{h_{Fo}} (U_m^{(k)})^2 - 2U_m^{(k)} G_m^{(k)} \right] d\Omega - \\ &- 2 \int_{\partial\Omega} [\delta_m T_m^{(k)} q_1^{(k)}] d(\partial\Omega), \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$G_m^{(k)} = \begin{cases} \frac{1}{h_{Fo}} U_m^{(k-1)} - LuPn\Delta T_0^k, & m = 0 \\ -LuPn\Delta T_m^k, & m > 0 \end{cases}.$$

В подальшому випишемо алгоритм пошуку коефіцієнтів $C_{i,m}^{(k)}$ та $d_{i,m}^{(k)}$ розвинень (4.20) [113]. Розвинення для $T_m^{(k)}$ та $U_m^{(k)}$ із (4.20) підставимо відповідно в формули (4.12) і (4.13). Одержимо координатні послідовності:

$$\begin{aligned} T_m^{(k)} &= \varphi_{0,m}^{\{k\}} + \sum_{i=1}^{N_1} C_{i,m}^{(k)} \varphi_i, \\ \varphi_{0,m}^{(k)} &= \delta_m \omega q_1^{(k)}, \\ \varphi_i &= \xi_i - \omega D_1 \xi_i - B i_q \omega \xi_i, \end{aligned} \quad (4.23)$$

та

$$\begin{aligned} U_m^{(k)} &= f_{0,m}^{\{k\}} + \sum_{i=1}^{N_1} d_{i,m}^{(k)} f_i, \\ f_{0,m}^{(k)} &= \delta_m \omega q_2^{(k)} + P n \omega D_1 T_m^{(k)}, \\ f_i &= \eta_i - \omega D_1 \eta_i. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Функції $\varphi_{0,m}^{(k)}$, $f_{0,m}^{(k)}$ задовольняють неоднорідним межовим умовам (4.8), (4.10) і (4.9), (4.11) відповідно, а φ_i , f_i – відповідним однорідним.

Реалізація умови мінімуму функціоналу (4.21) на множині функцій (4.23) призводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів розвинень $C_{i,m}^{(k)}$:

$$\sum_{i=1}^{N_1} a_{ji} C_{i,m}^{(k)} = b_{j,m}^{(k)}, \quad j = 1, 2, \dots, N_1, \quad (4.25)$$

де

$$a_{ij} = \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial \varphi_j}{\partial x_1} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_2} + \frac{1}{h_{Fo}} \varphi_j \varphi_i \right) d\Omega + B i_q \int_{\partial\Omega} \varphi_j \varphi_i d(\partial\Omega), \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} b_{j,m}^{(k)} &= -\iint_{\Omega} \left(\frac{\partial \varphi_{0,m}^{(k)}}{\partial x_1} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_1} + \frac{\partial \varphi_{0,m}^{(k)}}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_2} + \frac{1}{h_{Fo}} \varphi_{0,m}^{(k)} \varphi_j - F_m^{(k)} \varphi_j \right) d\Omega - \\ &\quad - B i_q \int_{\partial\Omega} \left(\varphi_{0,m}^{(k)} \varphi_j - \delta_m q_1^{(k)} \varphi_j \right) d(\partial\Omega). \end{aligned} \quad (4.27)$$

Виконуючи аналогічні дії відносно функціоналу (4.22) з урахуванням розвинень (4.24), одержимо нову систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів розвинень $d_{i,m}^{(k)}$:

$$\sum_{i=1}^{N_1} e_{ji} d_{i,m}^{(k)} = p_{j,m}^{(k)}, \quad j = 1, 2, \dots, N_1, \quad (4.28)$$

$$e_{ij} = \iint_{\Omega} \left(Lu \left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1} \frac{\partial f_i}{\partial x_1} + \frac{\partial f_j}{\partial x_2} \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right) + \frac{1}{h_{Fo}} f_j f_i \right) d\Omega, \quad (4.29)$$

$$p_{j,m}^{(k)} = \iint_{\Omega} \left(Lu \left(\frac{\partial f_{0,m}^{(k)}}{\partial x_1} \frac{\partial f_j}{\partial x_1} + \frac{\partial f_{0,m}^{(k)}}{\partial x_2} \frac{\partial f_j}{\partial x_2} \right) + G_m^{(k)} f_j \right) d\Omega + \delta_m \int_{\partial\Omega} q_2^{(k)} f_j d(\partial\Omega). \quad (4.30)$$

Аналізуючи матриці коефіцієнтів і праві частини системи лінійних алгебраїчних рівнянь (4.25) та (4.28), необхідно відмітити наступне:

1. коефіцієнти $a_{i,j}$ і $e_{i,j}$ ($i, j = 1, 2, \dots, N_1$) формуються з елементів координатних послідовностей, які задовольняють лише однорідним межовим умовам і не залежать від індексів « m » і « k », а тому обчислюються один раз на початку обчислювального процесу, тобто при $k = 1$ і $m = 0$;

2. коефіцієнти $b_{j,m}^{(k)}$ і $p_{j,m}^{(k)}$, які складають праві частини систем (4.25) і (4.28) відповідно, обчислюються на кожному шарі Fo_k ($k = 1, 2, \dots, N$) і кожному наближенні m ($m=0, 1, 2, \dots$).

Оптимальну товщину шару h_{Fo} , а також кількість наближень m для одержання температури $T(x)$ і вологовмісту $U(x)$ достатньої точності можна встановити в результаті проведення чисельних експериментів. Всі коефіцієнти систем (4.25) і (4.28) знаходяться при обчисленні інтегралів як по області Ω , так і по контуру $\partial\Omega$. Такі обчислення можна ефективно здійснювати з використанням квадратурних формул Гауса заданого порядку.

Таким чином, запропоновано розвиток методу R -функцій сумісно з методом малого параметра стосовно до розв'язання задач тепло та масообміну.

Узагальнимо запропоновану методику розв'язання задачі про розподіл вологовмісту та температури ускладненням межових умов, коли на бічній поверхні задано комбінацію умов третього та першого роду. Будемо вважати, що вся поверхня $\partial\Omega$ тіла Ω має складові $\partial\Omega_1$ і $\partial\Omega_2$ ($\partial\Omega = \partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2$). На частині поверхні $\partial\Omega_1$ задано умову третього роду, а на другій частині $\partial\Omega_2$ – умову першого роду. Тоді межові умови задач (4.8), (4.9) та (4.10), (4.11) замінюються на такі:

межова умова А

$$\frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial n} + Bi_q T_m^{(k)} = \delta_m q_1^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega_1, \quad (4.31)$$

$$T_m^{(k)} = \delta_m T_n, \quad x \in \partial\Omega_2; \quad (4.32)$$

та межова умова В

$$\frac{\partial U_m^{(k)}}{\partial n} + Pn \frac{\partial T_m^{(k)}}{\partial n} = \delta_m q_2^{(k)}, \quad x \in \partial\Omega_1, \quad (4.33)$$

$$U_m^{(k)} = \delta_m U_n, \quad x \in \partial\Omega_2; \quad (4.34)$$

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 0, & m \geq 1 \end{cases}, \quad \partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2 = \partial\Omega. \quad (4.35)$$

Тут T_n , U_n – відповідно постійні безрозмірні температура та вологовміст, які визначені на $\partial\Omega_2$. У відповідності до умови А структура розв'язку (4.12) замінюється і записується формулою:

$$T_m^{(k)} = \Phi_{1,m}^{(k)} - \frac{\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} D_1^{(1)} \Phi_{1,m}^{(k)} - \frac{\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \left(Bi_q \Phi_{1,m}^{(k)} - \delta_m \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} q_1^{(k)} \right), \quad (4.36)$$

$$\Phi_{1,m}^{(k)} = \delta_m T_n + \omega_1 \Phi_m^{(k)}, \quad D_1^{(1)} = \frac{\partial\omega_1}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial\omega_1}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2}, \quad (4.37)$$

де ω_1 – ліва частина нормалізованого рівняння ділянки $\partial\Omega_2$.

Структура (4.13) також змінюється і у відповідності до межевої умови В та подається формулою:

$$U_m^{(k)} = \Psi_{1,m}^{(k)} - \frac{\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} D_1^{(1)} \Phi_{1,m}^{(k)} - \frac{\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \left(Pn D_1^{(1)} \Phi_{1,m}^{(k)} - \delta_m \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} q_2^{(k)} \right), \quad (4.38)$$

$$\Psi_{1,m}^{(k)} = \delta_m U_n + \omega_1 \Phi_1^{(k)}. \quad (4.39)$$

Як і раніше $\Phi_m^{(k)}$, $\Psi_m^{(k)}$ – невизначені компоненти структур розв'язків. Для їх знаходження має місце запропонована вище схема, в якій лише необхідно одновимірні інтеграли в формулах (4.21), (4.22) обчислювати не по $\partial\Omega$, а по тій її частині, де задані умови третього роду, тобто по $\partial\Omega_1$.

Отримані розв'язки використовуються для побудування розподілення температури під час ІнтМО у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми, що містить три фази: газову, рідку та тверду.

4.1.2. Розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата паралелепіпедної форми, що містить три фази

Для знаходження розподілення температури та вологовмісту під час ІнтМО у внутрішньому виділеному об'ємі термостата паралелепіпедної форми, що містить три фази: газову, рідку та тверду (ККПТ), пропонується математична модель процесу у вигляді системи нестационарних рівнянь у частинних похідних із заданими початковими та межевими умовами. Наявність часової складової та прагнення враховувати реальні просторові

геометричні форми внутрішнього виділеного об'єму термостата ускладнюють математичну модель задачі. Вказані труднощі подолано сумісним використанням R -функцій і проєкційного методу Бубнова–Гальоркіна [114-116]. Запропонована форма розв'язку початково-крайової задачі точно враховує геометричну форму внутрішнього виділеного об'єму термостата та межові умови. Етап одержання числових розв'язків завершується розв'язанням системи звичайних диференціальних рівнянь з початковими умовами, що сформовані проєкційним методом.

Для пошуку невизначених компонент структур пропонується алгоритм, основу якого становить проєкційний метод Бубнова–Гальоркіна [117]. Розглянемо в просторі $Ox_1x_2x_3$ ККПТ Ω з межею $\partial\Omega$. В області Ω маємо безрозмірну систему рівнянь [117]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} &= (1 + Ko^* PnLu)\Delta T - Ko^* Lu\Delta U, \\ \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo} &= Lu\Delta U - LuPn\Delta T.\end{aligned}\quad (4.40)$$

За наступних межових (третього роду) і початкових умов:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T(x, Fo)}{\partial n} + \beta_{11}T(x, Fo) + \beta_{12}U(x, Fo) &= q_1, \quad x \in \partial\Omega, \\ \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial n} + \beta_{21}U(x, Fo) + \beta_{22}T(x, Fo) &= q_2, \quad x \in \partial\Omega, \\ T(x, Fo) = U(x, Fo) = 0, \quad Fo = 0.\end{aligned}\quad (4.41)$$

Відзначимо, що межові умови третього роду (4.41) враховують найбільш типовий вид залежності безрозмірного потоку від вологовмісту:

$$Ki_m = Bi_m(1 - U(x, Fo)).\quad (4.42)$$

Рівності (4.40), (4.41) записані в безрозмірних величинах:
 $x = (x_1, x_2, x_3)$, $x_i = \frac{\bar{x}_i}{R}$ ($i = 1, 2, 3$), $Fo = \frac{a\bar{\tau}}{R^2}$, $\bar{\tau} \in [0, \bar{\tau}_0]$, $U = \frac{U_0 - \bar{U}}{U_0}$,

$T = \frac{\bar{T} - T_0}{T_0}$ (рискою відзначені розмірні величини); Δ – тривимірний оператор

Лапласа; n – зовнішня нормаль до $\partial\Omega$; a – коефіцієнт теплопровідності; R – постійна, яка має розмірність довжини; U_0 , T_0 – початкові вологовміст і температура; Fo – критерій Фур'є, Pn – критерій Поснова; Lu – критерій Ликова; Bi_q – тепловий критерій Біо; Bi_m – масообмінний критерій Біо; $Ki_m(Fo)$ – масообмінний критерій Кірпічова

(залежний від критерію Фур'є Fo); $Ko^* = \varepsilon Ko$, ε – критерій фазового перетворення; Ko – критерій Косовича; $\beta_{11} = Bi_q$, $\beta_{12} = -(1 - \varepsilon)Bi_m Ko Lu$, $\beta_{21} = (1 - (1 - \varepsilon)Ko Lu Pn)Bi_m$, $\beta_{22} = Pn Bi_q$, $q_1 = Bi_q - (1 - \varepsilon)Ko Lu Bi_m$, $q_2 = Pn Bi_m + (1 - (1 - \varepsilon)Ko Lu Pn)Bi_m$.

Будемо вважати Ω – прямокутний паралелепіпед (рис. 4.2), який є перетином трьох площин: $x_1 = \pm a_1$, $x_2 = \pm a_2$, $x_3 = \pm a_3$. Його нормалізоване рівняння можна записати формулою:

$$\omega = \left(\frac{1/4 a_1^2 - x_1^2}{a_1} \wedge_0 \frac{1/4 a_2^2 - x_2^2}{a_2} \right) \wedge_0 \frac{1/4 a_3^2 - x_3^2}{a_3}, \quad (4.43)$$

де $\omega > 0$ в Ω ; $\omega = 0$, $|\nabla \omega| = 1$ на $\partial \Omega$.

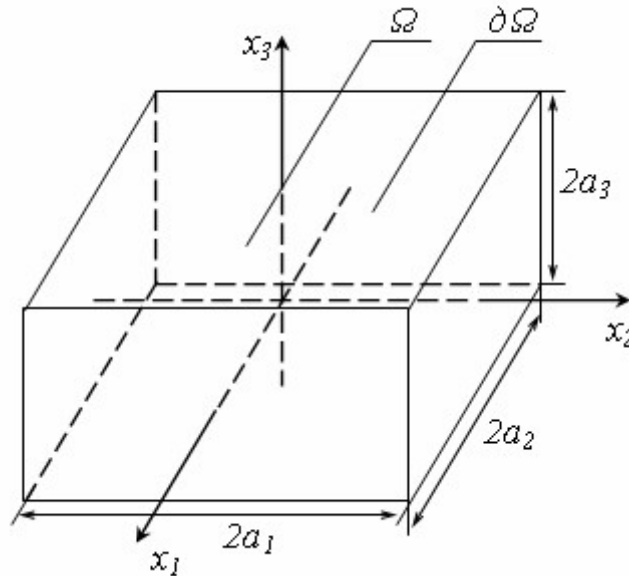


Рис. 4.2. Внутрішній виділений об'єм термостата паралелепіпедної форми

Побудуємо структурні формули для компонент $T(x, Fo)$, $U(x, Fo)$ нестационарної крайової задачі (4.40), (4.41) таким чином, щоб межові умови (4.41) задовольнялися точно. Нехай $\omega(x) = 0$ – нормалізоване до першого порядку ($|\nabla \omega(x)| = 1$) рівняння межі $\partial \Omega$ області Ω , яке будується за допомогою R -функцій. Умова нормалізованості лівої частини рівняння дозволяє записати диференціальний оператор:

$$D_2 = \frac{\partial \omega}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial \omega}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial \omega}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_3}, \quad (4.44)$$

який визначений в області Ω , а на $\partial\Omega$ збігається з похідною за напрямком нормалі $\frac{\partial}{\partial n}$. Коефіцієнти $\frac{\partial\omega}{\partial x_i}$ ($i=1,2,3$) оператора (4.44) збігаються на

$$\partial\Omega \text{ з напрямними косинусами нормалі } \cos(n, x_i) = \frac{\partial\omega}{\partial x_i} \Big|_{\partial\Omega} \quad (i=1,2,3).$$

Для побудови функції $\omega(x)$ скористаємося R -операціями (4.16): R -кон'юнкцією $x \wedge_0 y = x + y - \sqrt{x^2 + y^2}$; R -диз'юнкцією $x \vee_0 y = x + y + \sqrt{x^2 + y^2}$; R -запереченням $\bar{x} = -x$.

Межові умови (4.41), які визначені на $\partial\Omega$, продовжимо в Ω за допомогою оператора D_2 :

$$D_2T + \beta_{11}T + \beta_{12}U = q_1 + \omega\xi_0, \quad D_2U + \beta_{21}U + \beta_{22}T = q_2 + \omega\eta_0. \quad (4.45)$$

Вирази (4.45) визначені в $\Omega \cup \partial\Omega$, а ξ_0, η_0 – довільні функції. Структуру розв'язку будемо представляти функціями:

$$T = \Phi_1 + \omega\Phi_2, \quad U = \Psi_1 + \omega\Psi_2, \quad (4.46)$$

де Φ_i, Ψ_i ($i=1,2$) – довільні функції.

Підставимо (4.46) в (4.45). З урахуванням формули $D_2\omega = 1 + O(\omega^2)$ та об'єднанням довільних функцій, що містять множник ω , одержимо:

$$\begin{aligned} D_2\Phi_1 + \Phi_2 + \beta_{11}\Phi_1 + \beta_{12}\Psi_1 &= q_1 + \omega\xi_1, \\ D_2\Psi_1 + \Psi_2 + \beta_{21}\Psi_1 + \beta_{22}\Phi_1 &= q_2 + \omega\eta_1, \end{aligned} \quad (4.47)$$

де ξ_1, η_1 – нові довільні функції.

Виразимо Φ_2, Ψ_2 із (4.47) та підставимо в (4.46). Одержимо структуру розв'язку:

$$\begin{aligned} T(x, Fo) &= \Phi_1 - \omega D_2\Phi_1 - \beta_{11}\omega\Phi_1 - \beta_{12}\omega\Psi_1 + \omega q_1, \\ U(x, Fo) &= \Psi_1 - \omega D_2\Psi_1 - \beta_{21}\omega\Psi_1 - \beta_{22}\omega\Phi_1 + \omega q_2. \end{aligned} \quad (4.48)$$

У формулах (4.48) $\Phi_1(x, Fo), \Psi_1(x, Fo)$ – невизначені компоненти, незалежно від вибору яких межові умови (4.41) задовольняються точно. Свободою у виборі функцій Φ_1, Ψ_1 скористаємося для наближеного задовільнення системи диференціальних рівнянь (4.40) проєкційним методом.

Невизначені компоненти $\Phi_1(x, Fo), \Psi_1(x, Fo)$ структурних формул (4.48) будемо представляти розвиненням за елементами деяких повних систем функцій (наприклад, степеневих поліномів, сплайнів тощо):

$$\Phi_1(x, Fo) = \sum_{i=1}^{n_1} C_i^{(1)}(Fo) \varphi_i^{(1)}(x); \quad \Psi_1(x, Fo) = \sum_{i=1}^{n_1} C_i^{(2)}(Fo) \varphi_i^{(2)}(x). \quad (4.49)$$

Тут $C_i^{(1)}(Fo)$, $C_i^{(2)}(Fo)$ – коефіцієнти розвинень, які підлягають визначенню; $\varphi_i^{(1)}(x)$, $\varphi_i^{(2)}(x)$ – елементи повних систем функцій. Підставимо (4.49) в (4.48). Одержимо нове представлення структурних формул:

$$\begin{aligned} T(x, Fo) &= T_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo) T_i(x), \\ U(x, Fo) &= U_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo) U_i(x), \end{aligned} \quad (4.50)$$

де $T_0(x, Fo) = \omega q_1$;

$$T_i(x) = \varphi_i^{(1)}(x) - \omega D_2 \varphi_i^{(1)}(x) - \beta_{11} \omega \varphi_i^{(1)}(x) - \beta_{12} \omega \varphi_{i-n_1}^{(2)}(x);$$

$$U_0(x, Fo) = \omega q_2;$$

$$U_i(x) = \varphi_{i-n_1}^{(2)}(x) - \omega D_2 \varphi_{i-n_1}^{(2)}(x) - \beta_{21} \omega \varphi_{i-n_1}^{(2)}(x) - \beta_{22} \omega \varphi_i^{(1)}(x);$$

$$C_i(Fo) = \begin{cases} C_i^{(1)}(Fo), & i \leq n_1 \\ C_{i-n_1}^{(2)}(Fo), & i > n_1 \end{cases}, \quad n = 2n_1, \quad i = \overline{1, n}.$$

Функції $U_0(x, Fo)$, $T_0(x, Fo)$ задовольняють неоднорідним межовим умовам (4.41), а послідовності $U_1(x), U_2(x), \dots, T_1(x), T_2(x), \dots$ – відповідним однорідним. Коефіцієнти $C_i(Fo)$ знаходимо проекційним методом у формі Бубнова–Гальоркіна [114, 115]. Для цього два рівняння системи (4.40) запишемо так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, Fo)}{\partial Fo} - \mu_{11} \Delta T(x, Fo) + \mu_{12} \Delta U(x, Fo) &= 0, \\ \frac{\partial U(x, Fo)}{\partial Fo} - \mu_{21} \Delta U(x, Fo) + \mu_{22} \Delta T(x, Fo) &= 0, \end{aligned} \quad (4.51)$$

де $\mu_{11} = 1 + Ko^* PnLu$, $\mu_{12} = 1 + Ko^* Lu$, $\mu_{21} = Lu$, $\mu_{22} = LuPn$.

Підставимо в (4.51) вирази для функцій $U(x, Fo)$, $T(x, Fo)$ із (4.40). Одержимо:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial T_0(x, Fo)}{\partial Fo} + \sum_{i=1}^n C_i'(Fo)T_i(x) - \mu_{11} \left(\Delta T_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo)\Delta T_i(x) \right) + \\
& + \mu_{12} \left(\Delta U_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo)\Delta U_i(x) \right) = \delta_1(x, C_1(Fo), \dots, C_n(Fo)), \\
& \frac{\partial U_0(x, Fo)}{\partial Fo} + \sum_{i=1}^n C_i'(Fo)U_i(x) - \mu_{21} \left(\Delta U_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo)\Delta U_i(x) \right) + \\
& + \mu_{22} \left(\Delta T_0(x, Fo) + \sum_{i=1}^n C_i(Fo)\Delta T_i(x) \right) = \delta_2(x, C_1(Fo), \dots, C_n(Fo)), \quad (4.52)
\end{aligned}$$

де δ_1, δ_2 – нев'язки.

Будемо вимагати, щоб нев'язка δ_1 була ортогональною до функцій $T_1(x), T_2(x), \dots$, а нев'язка δ_2 була ортогональною до функцій $U_1(x), U_2(x), \dots$.

Ця вимога призводить до такої системи диференціальних рівнянь першого порядку відносно коефіцієнтів $C_j(Fo)$, $j = \overline{1, n}$:

$$\sum_{j=1}^n (a_{ij}C_j'(Fo) + b_{ij}C_j(Fo)) = d_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4.53)$$

з відповідними початковими умовами. Початкові значення $C_1(0), C_2(0), \dots, C_n(0)$ розраховуємо із початкових умов (4.41), як розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}C_j(0) = e_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.54)$$

Коефіцієнти систем (4.53), (4.54) визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}
a_{ij} &= \int_{\Omega} (T_j T_i + U_j U_i) d\Omega, \\
b_{ij} &= \int_{\Omega} \left((-\mu_{11}\Delta T_j + \mu_{12}\Delta U_j) T_i + (-\mu_{21}\Delta U_j + \mu_{22}\Delta T_j) U_i \right) d\Omega, \\
d_i &= \int_{\Omega} \left(\left(-\frac{\partial T_0}{\partial Fo} + \mu_{11}\Delta T_0 - \mu_{12}\Delta U_0 \right) T_i + \left(-\frac{\partial U_0}{\partial Fo} + \mu_{21}\Delta U_0 - \mu_{22}\Delta T_0 \right) U_i \right) d\Omega, \\
e_i &= -\int_{\Omega} (T_0(x, 0)T_i(x) + U_0(x, 0)U_i(x)) d\Omega. \quad (4.55)
\end{aligned}$$

Усі коефіцієнти систем (4.53), (4.54) розраховуються під час обчислення інтегралів по області Ω . Такі обчислення можна здійснювати з використанням квадратурних формул Гауса заданого порядку.

Таким чином, запропоновано розвиток методу R -функцій, який використовується сумісно з проєкційним методом Бубнова–Гальоркіна.

Як і в підрозділі 4.1.1 узагальнимо запропонований розрахунковий алгоритм на випадок комбінації межових умов третього та першого роду на поверхні $\partial\Omega$ тіла Ω . Будемо вважати, $\partial\Omega_1$ і $\partial\Omega_2$ дві частини поверхні $\partial\Omega$ ($\partial\Omega = \partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2$): на $\partial\Omega_1$ задано умову третього роду, а на $\partial\Omega_2$ – першого роду. Нехай також $\omega_1 = 0$ – нормалізоване рівняння ділянки $\partial\Omega_1$, а $\omega_2 = 0$ – рівняння ділянки $\partial\Omega_2$. Тоді межові умови (4.41) запишуться формулами:

$$\frac{\partial T(x, Fo)}{\partial n} + \beta_{11}T(x, Fo) + \beta_{12}U(x, Fo) = q_1, \quad x \in \partial\Omega_1, \quad (4.56)$$

$$T(x, Fo) = T_n, \quad x \in \partial\Omega_2; \quad (4.57)$$

$$\frac{\partial U(x, Fo)}{\partial n} + \beta_{21}U(x, Fo) + \beta_{22}T(x, Fo) = q_2, \quad x \in \partial\Omega_1, \quad (4.58)$$

$$U(x, Fo) = U_n, \quad x \in \partial\Omega_2, \quad (4.59)$$

де T_n , U_n – відповідно постійні безрозмірні значення температури та вологовмісту на ділянці $\partial\Omega_2$.

Для записаних умов структура розв'язку записується формулами:

$$T(x, Fo) = \Phi_2 - \omega D_2^{(1)}\Phi_2 - \beta_{11}\omega\Phi_2 - \beta_{12}\omega\Psi_2 + \omega \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} q_1, \quad (4.60)$$

$$\Phi_2 = T_n + \omega_1\Phi_1, \quad (4.61)$$

$$\Psi_2 = U_2 + \omega_1\Psi_1, \quad (4.62)$$

$$D_2^{(1)} = \frac{\partial\omega_1}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial\omega_1}{\partial x_2} \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial\omega_1}{\partial x_3} \frac{\partial}{\partial x_3}, \quad (4.63)$$

$$\omega = \frac{\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2}, \quad (4.64)$$

$$U(x, Fo) = \Psi_2 - \omega D_2^{(1)}\Psi_2 - \beta_{21}\omega\Psi_2 - \beta_{22}\omega\Phi_2 + \omega \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} q_2, \quad (4.65)$$

У формулах (4.50), які входять в алгоритм пошуку невизначених компонент Φ_1 і Ψ_1 , змінюються вирази для T_0 , T_i та U_0 , U_i на такі:

$$T_0 = \frac{\omega_1\omega_2^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} q_1 + T_n - \omega(\beta_{11}T_n + \beta_{12}U_n), \quad (4.66)$$

$$T_i = \omega_1 \varphi_i^{(1)} - \omega(D_2^{(1)}(\omega_1 \varphi_i^{(1)})) + \beta_{11} \omega_1 \varphi_i^{(1)} + \beta_{12} \omega_1 \varphi_{i-n_1}^{(1)}); \quad (4.67)$$

$$U_0 = \frac{\omega_1 \omega_2^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} q_2 + U_n - \omega(\beta_{21} U_n + \beta_{22} T_n), \quad (4.68)$$

$$U_i = \omega \varphi_{i-n_1}^{(1)} - \omega(D_2^{(1)}(\omega_1 \varphi_{i-n_1}^{(1)})) + \beta_{21} \omega_1 \varphi_{i-n_1}^{(1)} + \beta_{22} \omega_1 \varphi_i^{(1)}. \quad (4.69)$$

Отриманий наближений розв'язок задачі про розподіл температури та вологовмісту у виділеному внутрішньому об'ємі термостата паралелепіпедної форми, що містить три фази, з комбінацією межових умов третього та першого роду використовується для моделювання ІнТМО.

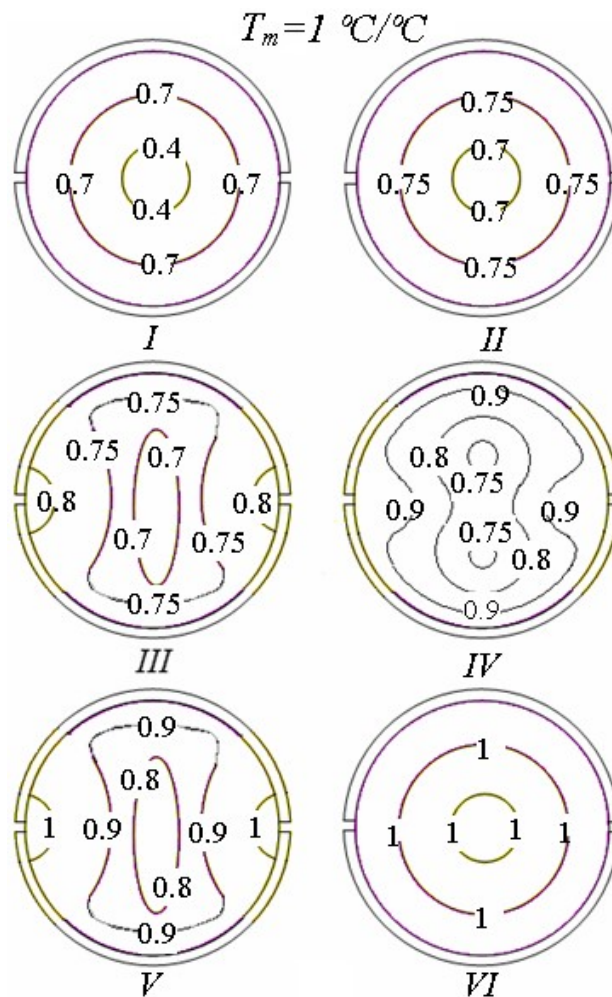


Рис. 4.3. Розподілення полів температур за різних моментів часу у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної форми під час ІнТМО, отримані розв'язком задачі теорії ТМО з використанням методу R -функцій сумісно з методом малого параметра: *I, II* – нагрівання; *III, IV, V* – ТМО; *VI* – рівновага

Оскільки ідентифікувати ефект ІнТМО в термостаті можна за кінетикою температури (наявність ділянки кінетики з негативним прирощенням температури – $dT < 0$), то скористаємось розробленими

алгоритмами для знаходження розподілу температури у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної та паралелепіпедної форми, що містять три фази: газову, рідку, тверду (ККПТ). Обмежимося наведенням в тексті роботи наочних матеріалів.

На рис. 4.3 та 4.4 наведено розподілення полів температур за різних моментів часу під час ІнТМО в термостаті з циліндричною та паралелепіпедною формою внутрішнього виділеного об'єму, отримані з використанням розроблених математичних моделей.

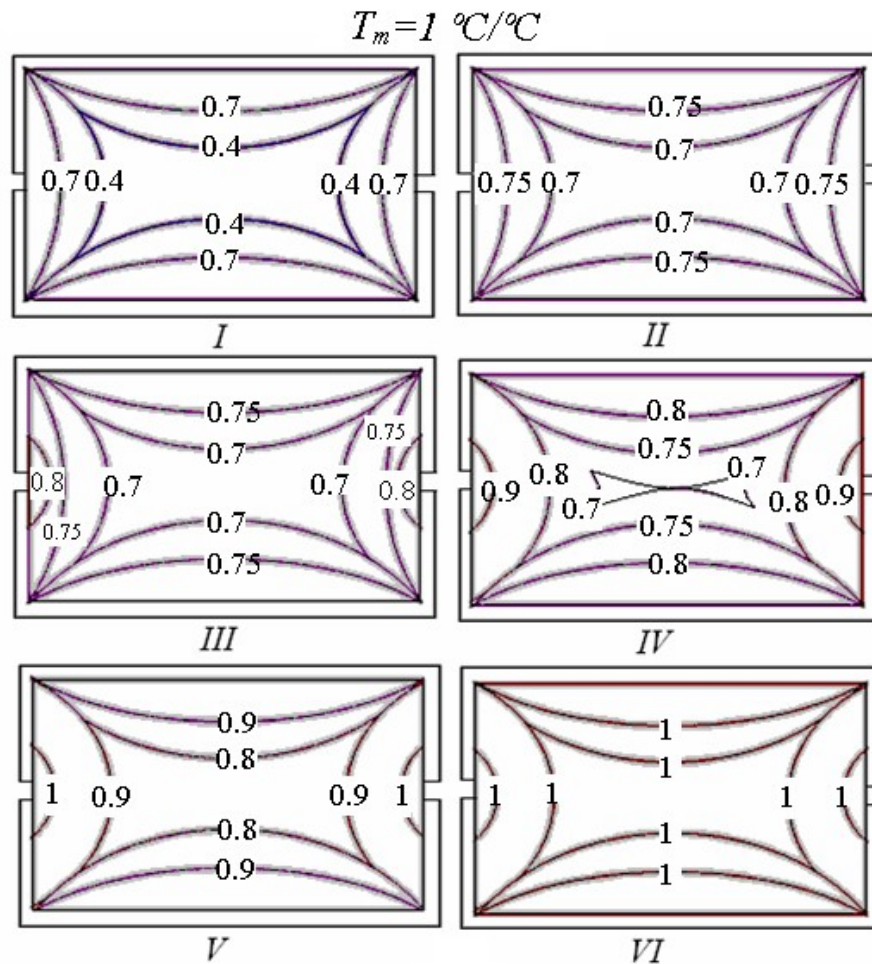


Рис. 4.4. Розподілення полів температур за різних моментів часу у внутрішньому виділеному об'ємі термостата паралелепіпедної форми під час ІнТМО, отримані розв'язком задачі теорії ТМО за сумісного використання методу *R*-функцій і проекційного методу: *I, II* – нагрівання; *III, IV, V* – ТМО; *VI* – рівновага

Розподілення температур наведені для поперечного перерізу виділеного внутрішнього об'єму термостата. Рис. 4.3 *I*, 4.3 *II*, 4.4 *I*, 4.4 *II* відповідають початку процесу, а саме етапу прогрівання внутрішнього середовища термостата з трьома фазами: газовою, рідкою та твердою (ККПТ). Внутрішнє середовище термостата прогривається і починається видалення системної води, причому поширення зони випаровування відбувається від обтюраторів (рис. 4.3 *III*, 4.3 *IV*, 4.4 *III*, 4.4 *IV*). По мірі

випаровування води температура шарів, які досягли свого кінцевого вологовмісту, підвищується (рис. 4.3 *V*, 4.4 *V*). Рис. 4.3 *VI*, 4.4 *VI* відповідає завершенню процесу зневоднення – встановлюється рівновага за температурою та вологовмістом.

З отриманих результатів видно, що температура у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, як циліндричної, так і паралелепіпедної форми, не зменшується, тобто $dT \geq 0$, що свідчить або про «зрив» ефекту ІнТМО, або про відсутність його «запуску». Таким чином, застосування розроблених моделей, які базуються на класичних диференціальних рівняннях ТМО навіть з використанням методу R -функцій, без урахування утворення та розвитку дисипативних структур, тобто без урахування «запуску», «протікання» та «закінчення» ефекту ІнТМО, не відбиває реальних розподілень температури в термостаті та їх кінетику під час ІнТМО.

Прийнятні результати можна отримати, якщо для ефекту ІнТМО вирішувати не тепломасообмінну задачу, а теплову. При цьому врахування масообміну здійснювати через функцію, яка описує розсіяння теплової енергії на фазовий перехід води у газовий стан.

Необхідно відмітити, що розв'язки задачі про розподіл температури та вологовмісту у внутрішньому виділеному об'ємі термостата циліндричної та паралелепіпедної форми, що містять три фази, отримані методом R -функцій сумісно з методом малого параметра та сумісно з методом Бубнова–Гальоркіна, прийнятні для використання при виявленні особливостей механізму і рушійних сил для процесів тепло- та масообміну без енергії активації в тілах циліндричної та паралелепіпедної форми з точним урахуванням їх геометрії. Відзначене має практичну значимість для дослідження процесу зневоднення харчової сировини з частинками циліндричної та паралелепіпедної форми.

4.2. Математична модель розвитку потужності дисипативних структур під час індукованого тепломасообміну

4.2.1. Постановка задачі зі знаходження функції розподілення потужності дисипативних структур з використанням рівняння теплопровідності

Дисипативні структури, що утворюються під час організації ТМО в ефекті ІнТМО, дозволяють максимально розсіяти «високоякісну» енергію, яка надходить до внутрішнього середовища термостата, що в першому наближенні визначається зниженням його температури. Під час ефекту ІнТМО під утворенням дисипативних структур розуміється розвиток поверхні випаровування за рахунок збільшення пористості ККПТ, яке знаходиться всередині термостата [20].

В роботі [20] було знайдено аналітичний вигляд функції розвинення площі випаровування, а в роботі [118] – знайдено розподілення потужності таких дисипативних структур всередині термостата під час ІнТМО та в залежності від температури теплоносія.

Рівняння теплопровідності для ККПТ всередині термостата, за умови щільного заповнення внутрішньої частини термостата ККПТ та з урахуванням утворення дисипативних структур, буде мати вигляд [119-121]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{1}{c\rho} f_i + \frac{1}{c\rho} f_d, \quad (4.70)$$

де T – температура ККПТ, $^{\circ}\text{C}$;

τ – час, c ;

λ , c і ρ – коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина ККПТ,

$\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

f_i – функція розвитку потужності внутрішніх джерел теплоти у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{c}}$;

f_d – функція розвитку потужності дисипативних структур, $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{c}}$.

У даному рівнянні температура, коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина ККПТ, функції розвитку потужності внутрішніх джерел теплоти та дисипативних структур є функціями координат і часу.

Рівняння (4.70) можна перетворити наступним чином:

$$f_d = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} - \lambda \Delta T - f_i. \quad (4.71)$$

Вирішуючи рівняння (4.47) відносно шуканої f_d існує можливість знайти її як функцію координат та часу. Для вирішення даного завдання необхідно знати аналітичний вигляд кінетик температури та вологовмісту ККПТ як функцій координат, часу та температури термостата, а також зміну густини, теплопровідності та теплоємності з часом. Аналітичний вигляд перерахованих функцій отриманий в розділі 3 (формули (3.23) та (3.29)), окрім функцій для густини, теплопровідності та теплоємності.

Функцію розвитку внутрішніх джерел теплоти f_i у внутрішньому виділеному об'ємі термостата під час ІнТМО будемо вважати рівною нулю, оскільки внутрішні джерела теплоти за умови реалізації ІнТМО розглянутими в роботі способами, тобто за умови забезпечення термостатування внутрішньої частини термостата кондуктивним або конвективним способами – відсутні.

4.2.2. Теплопровідність, теплоємність та густина колоїдного капілярно-пористого тіла всередині термостата як функції температури термостата та координати

Коефіцієнт теплопровідності, теплоємність і густина ККПТ, оскільки вони визначаються його вологовмістом, є функціями часу, координат та температури термостата.

Оскільки інтегрально тіло у внутрішній частині термостата знаходиться в трьох агрегатних станах – твердому, рідкому та газовому, які знаходяться між собою у рівновазі, то його маса буде дорівнювати:

$$m = m_{c.p.} + m_g + m_{c.v.}, \quad (4.72)$$

де $m_{c.p.}$ – маса сухих речовин ККПТ, кг;

m_g – маса газу (пароповітряної суміші) в порах та між частинками ККПТ всередині термостата, кг;

$m_{c.v.}$ – маса системної води у внутрішній частині термостата, кг.

Маса системної води у внутрішній частині термостата являє собою суму частини системної води A_0 , яка бере участь у ІнтМО, та частини $(1 - A_0)$, яка не бере участі в цьому ефекті:

$$m_{c.v.} = A_0 \cdot m_{c.v.} + (1 - A_0) \cdot m_{c.v.} \quad (4.73)$$

Таке розділення води у внутрішній частині термостата на складові необхідне, оскільки у ІнтМО бере участь лише перший доданок – $A_0 \cdot m_{c.v.}$, при цьому кожний із доданків має свої середні значення величини теплоємності, густини, теплопровідності. Співвідношення між складовими, їх вміст та фізичні властивості визначаються різними термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами. Отримана при цьому інформація надає можливість практичного керування ефектом ІнтМО, за використання його для технологічної обробки ККПТ. Так, наприклад, для сушіння існує можливість: обирати спосіб видалення води із ККПТ (наприклад, механічний замість сушіння або випарювання) та проводити розрахунки ефективності використання енергії та інших ресурсів для реалізації процесу ТМО у відповідності до обраного способу.

Питома теплоємність ККПТ у внутрішній частині термостата відповідно буде дорівнювати:

$$C = \frac{\delta Q}{m \cdot dT} = \frac{\delta Q_{c.p.} + \delta Q_g + \delta Q_{c.v.}}{(m_{c.p.} + m_g + m_{c.v.})dT}, \quad (4.74)$$

де $\delta Q_{c.p.}$, δQ_g , $\delta Q_{c.v.}$ – кількість теплоти необхідна для підвищення температури, відповідно, сухих речовин ККПТ, газу в його порах, системної води термостата на 1 К.

Густина ККПТ у внутрішній частині термостата розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V_m} = \frac{\rho_{c.p.} V_{c.p.} + \rho_2 V_2 + \rho_{c.v.} V_{c.v.}}{V_m}, \quad (4.75)$$

де $\rho_{c.p.}$, ρ_2 , $\rho_{c.v.}$ – густина сухих речовин ККПТ, газу в його порах, системної води в термостаті, які займають, відповідно, об'єми – $V_{c.p.}$, V_2 , $V_{c.v.}$;

V_m – об'єм внутрішньої частини термостата.

При цьому густину, об'єм та масу сухих речовин ККПТ будемо вважати постійними, а ті ж величини для системної води та газу у внутрішній частині термостата можуть змінюватися впродовж процесу ТМО.

Знайдемо зв'язок між об'ємом і масою газового середовища та рідини у внутрішньому виділеному об'ємі термостата. Маса системної води змінюється наступним чином:

$$m_{c.v.} = m_{c.p.} \cdot w(\tau, x, T_m), \quad (4.76)$$

відповідно, її об'єм:

$$V_{c.v.} = \frac{m_{c.v.}}{\rho_{c.v.}} = \frac{m_{c.p.} \cdot w(\tau, x, T_m)}{\rho_{c.v.}}. \quad (4.77)$$

Очевидно, що об'єм системної води, яка перейшла до газового стану, буде заміщений пароповітряною сумішшю, відповідно об'єм пароповітряної суміші також є функцією вологовмісту і визначається за формулою:

$$V_2 = V_m - V_{c.p.} - \frac{m_{c.p.} \cdot w(\tau, x, T_m)}{\rho_{c.v.}}. \quad (4.78)$$

Помноживши об'єм пароповітряної суміші на її густину, отримаємо масу пароповітряної суміші у внутрішньому виділеному об'ємі термостата (масу суцільного газового середовища всередині термостата):

$$m_2 = \rho_2 \left(V_m - V_{c.p.} - \frac{m_{c.p.} \cdot w(\tau, x, T_m)}{\rho_{c.v.}} \right). \quad (4.79)$$

Як коефіцієнт теплопровідності середовища у внутрішньому виділеному об'ємі термостата [122], за умови щільного його заповнення вологим ККПТ, використовується еквівалентний коефіцієнт

теплопровідності внутрішнього середовища термостата $\lambda_{вн}$, який характеризує властивість вологого ККПТ проводити теплоту, а, саме, визначається теплопровідністю сухого скелету ККПТ; теплопровідністю рідини та пароповітряної суміші, що знаходяться в стаціонарному стані в порах матеріалу; конвекцією повітря всередині ККПТ; переносом теплоти за рахунок переносу маси рідини всередині ККПТ; променевою теплопровідністю. Визначення точного значення даної величини досить складне завдання, для вирішення якого в класичних роботах А.С. Гінзбурга [15] та О.В.Ликова [16] існує достатньо велика кількість моделей з низкою різних припущень. Але, оскільки, знаходження точного значення величини $\lambda_{вн}$ в роботі не ставилось, то виходячи із результатів досліджень, наведених у роботах [15, 16], вважалось, що теплопровідність вологого ККПТ складається із теплопровідностей сухого скелету ($\lambda_{с.р.}$) ККПТ, системної води ($\lambda_{с.в.}$), яку воно утримує, пароповітряної суміші, що оточує частинки ККПТ та знаходиться в його порах (λ_2).

Інтегральне тіло у внутрішній частині термостата являється складним з розташуванням складових в різних напрямках. На рис. 4.5 показаний один із можливих варіантів розміщення складових, використаний в роботі для розрахунку еквівалентного коефіцієнту теплопровідності середовища у внутрішньому об'ємі термостата, за умови щільного заповнення його вологим ККПТ [15].

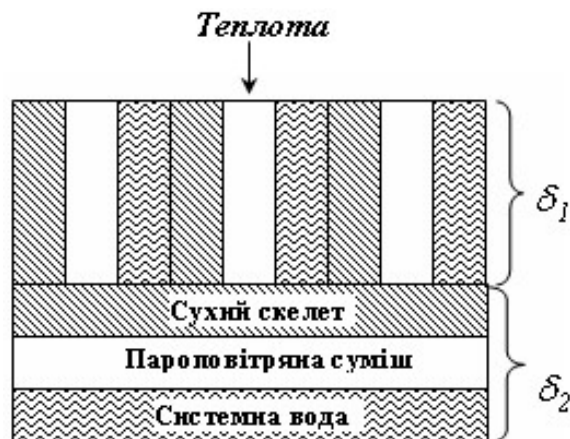


Рис. 4.5. Модель розташування складових інтегрального тіла у внутрішньому виділеному об'ємі термостата

Для даної моделі розташування складових інтегрального тіла у внутрішньому об'ємі термостата, еквівалентний коефіцієнт теплопровідності буде розраховуватися за формулою:

$$\lambda_{вн} = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}, \quad (4.80)$$

де λ_1 та λ_2 – еквівалентні коефіцієнти теплопровідності, відповідно, частини внутрішнього середовища термостата, в якому складові розташовані паралельно, та частини, в якому складові розташовані послідовно, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

δ_1 та δ_2 – значення товщини відповідних частин сировини, м.

Дані коефіцієнти розраховуються за формулами:

$$\lambda_1 = n_{c.p.} \cdot \lambda_{c.p.} + n_{c.в.} \cdot \lambda_{c.в.} + n_2 \cdot \lambda_2, \quad (4.81)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{n_{c.p.}}{\lambda_{c.p.}} + \frac{n_{c.в.}}{\lambda_{c.в.}} + \frac{n_2}{\lambda_2}}, \quad (4.82)$$

де $n_{c.p.}$, $n_{c.в.}$, та n_2 – об'ємні частки сухого скелета ККПТ, системної води та газу у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, відповідно, $\frac{м^3}{м^3}$;

$\lambda_{c.p.}$, $\lambda_{c.в.}$, та λ_2 – коефіцієнти теплопровідності сухого скелета сировини, системної води та газу, $\frac{Вт}{м \cdot К}$.

Значення об'ємної частки складових у внутрішньому виділеному об'ємі термостата залежать від обраної сировини, її попередньої обробки, способу укладання в термостаті та визначаються експериментально.

Теплопровідність ККПТ визначається за формулою (4.80), причому необхідно враховувати, що еквівалентний коефіцієнт теплопровідності внутрішнього середовища термостата змінюється внаслідок ТМО через зменшення кількості рідини та заміщення її газом.

Таким чином, встановлено аналітичний вид всіх функцій, що входять до рівняння (4.71).

4.2.3. Функція розвитку потужності дисипативних структур в колоїдному капілярно-пористому тілі всередині термостата під час індукованого тепломасообміну

Далі після підстановки у рівняння (4.71) виразів (3.23), (3.29), (4.74), (4.75) та (4.80) з урахуванням (4.76, 4.79, 4.81, 4.82) було отримано аналітичний вид функції розвитку потужності дисипативних структур $f_d(\tau, x, T_m)$ в ККПТ, що знаходиться у внутрішньому виділеному об'ємі термостата, під час ІнтМО.

Функція $f_d(\tau, x, T_m)$ занадто громіздка для наведення її в тексті, тому в даному пункті наведено графіки функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнтМО в залежності від температури термостата (рис. 4.6) та відстані від стінки термостата, отримані за розрахованим аналітичним виразом даної функції. Для отримання аналогічних графіків розвитку потужності дисипативних структур для будь-якої сировини,

необхідно в рівнянні (4.71) використовувати відповідні початковий вологовміст, теплоємність, густину та теплопровідність для неї.

На рис. 4.6 представлені кінетика температури ККПТ [123] та розвиток потужності дисипативних структур на відстані 10 мм від внутрішньої стінки термостата за температури термостата 40, 60 та 90 °С [124].

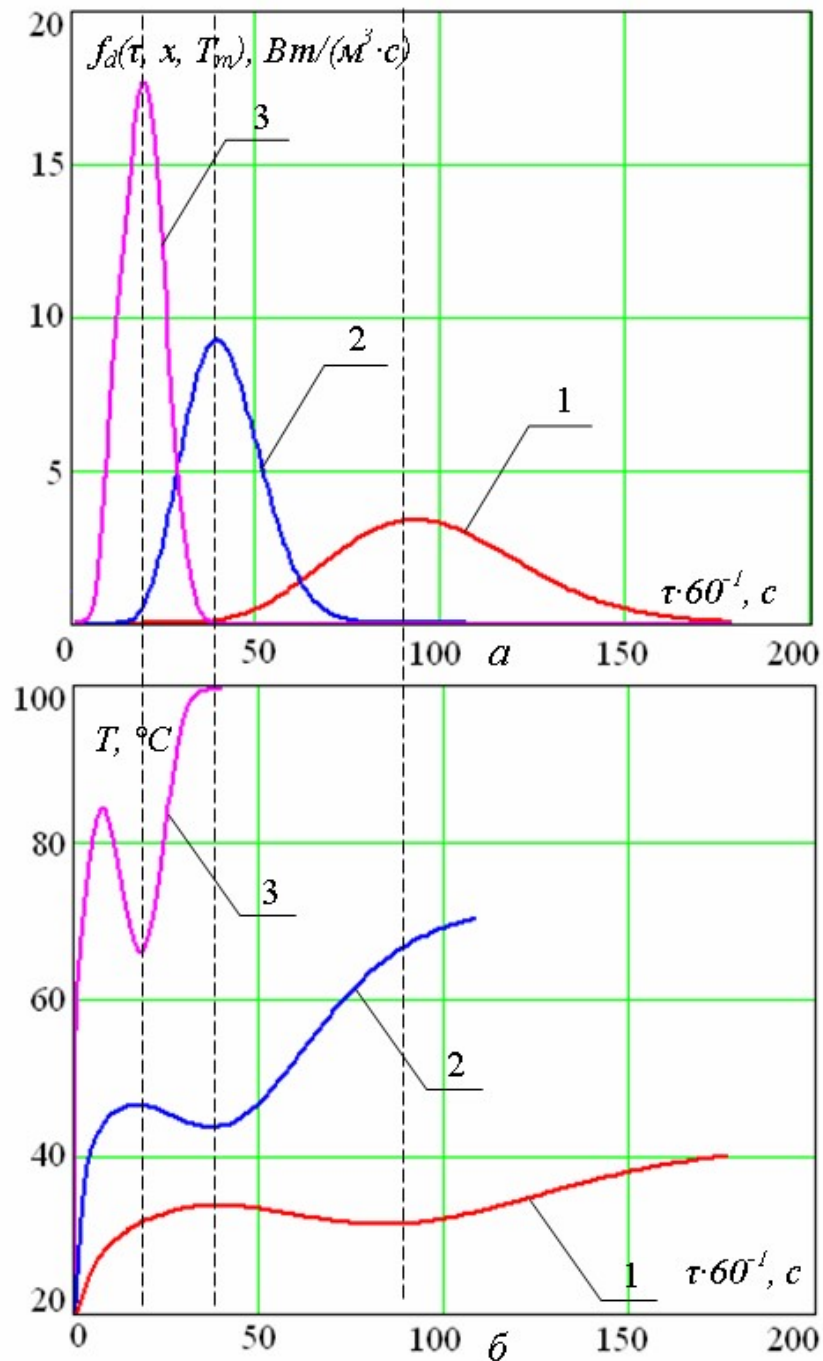


Рис. 4.6. Кінетика температури ККПТ (б) та функція розвитку потужності дисипативних структур (а) в ньому на відстані 10 мм ($x=10$ мм) від внутрішньої стінки термостата за температури термостата, °С: 1 – 40; 2 – 60; 3 – 90

З наведених кривих видно, що максимум функції розвитку потужності дисипативних структур відповідає мінімуму температури ККПТ. Розвиток потужності дисипативних структур відбувається через збільшення площі випаровування, що сприяє збільшенню інтенсивності випаровування води, в результаті чого зменшується температура ККПТ.

Максимум функції розвитку потужності дисипативних структур відповідає закінченню ефекту ІнТМО через закінчення рідини, для якої можливий фазовий перехід I роду за даних умов.

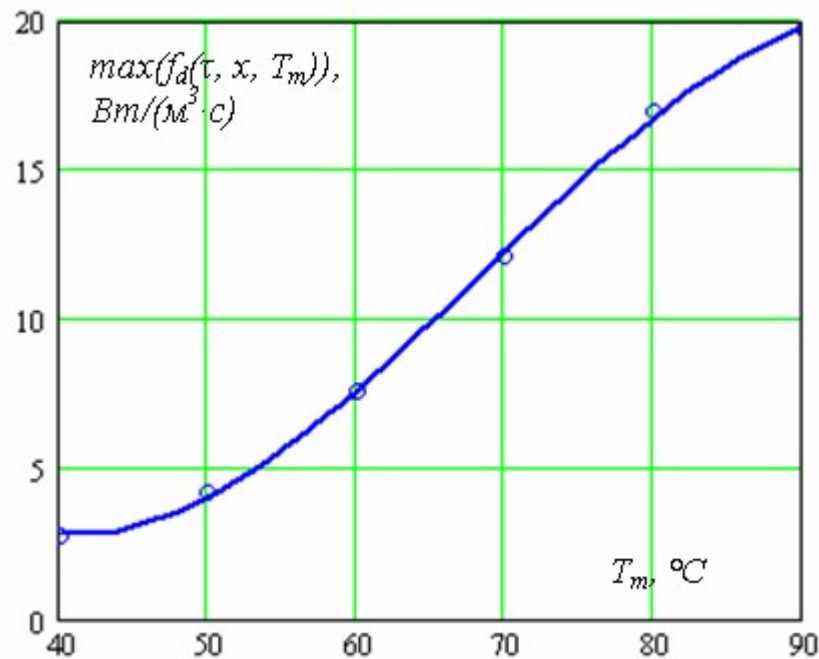


Рис.4.7. Максимум функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнТМО від температури термостата

Необхідно відмітити: за збільшення температури термостата також збільшується максимум функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ, тобто збільшується максимум функції $f_d(\tau, x, T_m)$ (рис. 4.7), що відображається на інтенсивності процесу, а, відповідно, і на тривалості ефекту ІнТМО. Так тривалість ефекту ІнТМО за температури термостата 90 °C менша за його тривалість за температури 40 °C у 3,6 разу.

При цьому залежність максимуму функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнТМО за різної температури термостата має лінійну ділянку в діапазоні температур термостата від 50 до 80 °C. В даному діапазоні однакові прирощення температури термостата призводять до однакових прирощень значення максимуму функції розвитку потужності дисипативних структур. Дана особливість свідчить про те, що зміна температури термостата в даному діапазоні не викликає зміни характеру ефекту ІнТМО.

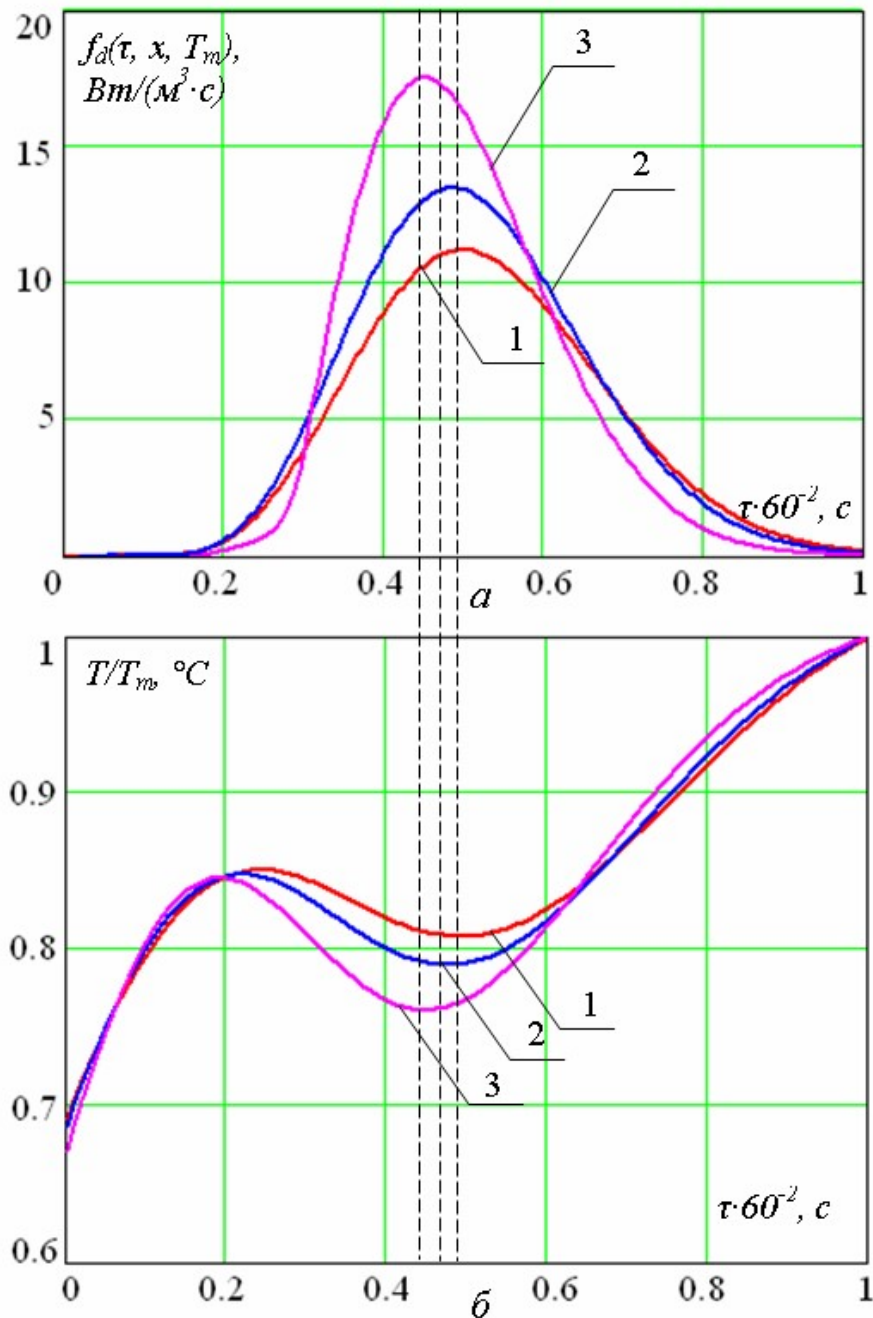


Рис. 4.8. Кінетика температури ККПТ (б) та функція розвитку потужності дисипативних структур в ньому (а) за температури термостата $90^{\circ}C$ на різній відстані від внутрішньої стінки термостата, мм: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10

З рис. 4.8, на якому наведено кінетику температури ККПТ та розвиток потужності дисипативних структур на різній відстані від внутрішньої стінки термостата, видно, що інтенсивність випаровування системної води ККПТ тим більша, чим ближче координата до середини внутрішньої частини термостата, при цьому значення мінімуму температури найменше для координати 10 мм.

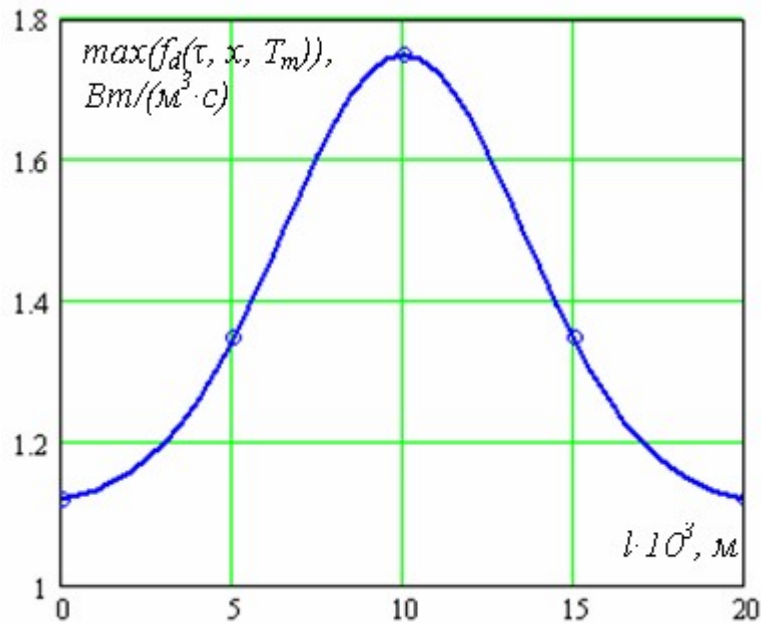


Рис. 4.9. Максимум функції розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ під час ІнТМО за різної координати у внутрішній частині термостата

З характеру функції розвитку потужності дисипативних структур витікає: максимум для координати 10 мм має найбільшу величину, знижуючись за наближення до поверхні (рис. 4.9). При цьому дана залежність має нелінійний характер, що свідчить про те, що розвиток поверхні випаровування в різних шарах ККПТ різна, відповідно і ефективність протікання ефекту ІнТМО в них – різна.

Отримані результати корелюють з результатами експериментальних досліджень ефекту ІнТМО (розд. 3). Таким чином, розроблена математична модель для розвитку потужності дисипативних структур в ККПТ є коректною для описання особливостей ефекту ІнТМО.

Практична значимість розробленої математичної моделі полягає у її використанні під час розробки апаратів для обробки сировини з використанням ефекту ІнТМО, модернізації сушарок з використанням ІнТМО шляхом моделювання процесу зневоднення з варіюванням як параметрами порядку (теплофізичні характеристики сировини), так і керуючими параметрами (товщина внутрішньої частини термостата, температура термостата), а також надає можливість спрогнозувати отримуваний результат базуючись на вихідних даних для сировини та значеннях параметрів, які дозволяють керувати процесом ТМО.

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано гіпотезу ефекту ІнТМО, яка полягає в індукуванні за рахунок флуктуацій переходу системи «рідина – пара» від нестійкої рівноваги до стійкої за умови термостатування. Ефект супроводжується розсіюванням теплоти термостата за рахунок видалення з нього рідини через фазовий перехід. Установлено, що потік маси рідини, яка виноситься із термостата в газовому стані, індукує тепловий потік, який розсіюється всередині термостата. Виявлено необхідні та достатні умови організації та керування ефектом ІнТМО.

2. Доведено, що за ефекту ІнТМО система «оточуюче середовище – внутрішнє середовище термостата» є проточною та динамічною по відношенню до теплової енергії та маси, де спостерігаються процеси самоорганізації, які й зумовлюють ефективне розсіювання теплової енергії. Відзначено, що площа під негативною ділянкою фазової траєкторії на фазовій площині, яка становить від 10 до 30% загальної площі та яка пропорційна частині тепловмісту внутрішнього середовища термостата, витраченому на фазовий перехід рідини цього середовища в газовий стан, є критерієм енергоефективності ІнТМО.

3. Обґрунтовано введення поняття «системна вода» як одного із параметрів порядку ІнТМО та доцільність розрахунку мольних концентрацій для систем «системна вода – складові харчової системи».

4. Дослідженнями тепломасообміну в прототипі апарата для випарювання, концентрування та згущення з ІнТМО, який являє термостат з обтюратором, що утримує рідину та газ, установлено, що кипіння за температури термостата від 100 до 140 °С ні для спирту, ні для води, ні для їх суміші не відбувалося за атмосферного тиску. Установлено, що етиловий спирт та вода переходять до газового стану під час ІнТМО окремо. Закінчення видалення рідкої фази компонентів суміші фіксується за особливостями кінетики температури, що рекомендовано використовувати для процесів ректифікації, перегонки або дистиляції без фази кипіння в термостаті з ІнТМО.

5. Дослідженнями ІнТМО за наявності в термостаті твердої, рідкої та газової фаз із розривами між фазами встановлений основний параметр порядку ефекта ІнТМО – наявність суцільності газового середовища всередині термостата. Доведено, що у разі забезпечення цього параметра порядку ефект ІнТМО спостерігається навіть за умови просторового відділення сухих речовин і рідини, що має практичну цінність для виконання операцій ароматизації або одночасної гідротермічної обробки з сушінням з просторовим відділенням компонент оброблюваної сировини в одному універсальному апараті. Моделюванням обробки з ІнТМО сировини з високою поруватістю або високим ступенем усадки (об'єми пустот до 30...50% внутрішнього об'єму термостата) та сировини з частинками, що мають газонепроникні включення, встановлено, що тривалість ІнТМО для окремих об'ємів ККПТ по всьому внутрішньому об'єму термостата

відрізняється не більше ніж на 10%. Доведено, що особливості перетікання ІнтМО в будь-якому виділеному об'ємі внутрішнього середовища термостата відбивається на характері його перетікання для інших виділених об'ємів. Установлено умови здійснення обробки сировини різної природи в одному апараті без її змішування. Розрахунками встановлено: питома продуктивність робочої поверхні термостата в 1,7 разу більша порівняно з продуктивністю випаровування з відкритої поверхні води за тих же температури (75 °С) та швидкості руху повітря (10 м/с).

6. Установлено, що дефіцит теплоти, що надходить від стінок термостата до його внутрішнього середовища і становить 25...30% від теплоти, що витрачається на нагрівання внутрішнього середовища та фазовий перехід рідини, компенсується зовнішньою роботою потоку повітря, який рухається відносно обтюратора. Експериментальними дослідженнями доведено: температура і витрати повітря, що рухається відносно обтюратора, не чинять істотного впливу на тривалість ІнтМО і не є баластом енергії. Дослідженнями кінетики потоку теплоти, що витрачається всередині термостата, за швидкості потоку повітря від 4 до 13 м/с, який рухається відносно обтюраторів, установлено, що інтенсивність ІнтМО може регулюватися даним керуючим параметром у межах 15...20 %. Визначений діапазон кутів обдування (від 35° до 55°), за яких енергоефективність ІнтМО менша вдвічі порівняно з кутами, за яких досягається найбільша енергоефективність (0° та 90°).

Експериментальними дослідженнями доведена феноменологічна гіпотеза ефекту ІнтМО.

7. Розв'язано класичну задачу про розподіл температури і вологовмісту в термостатах циліндричної та паралелепіпедної форм методом R-функцій сумісно з методом малого параметра та проєкційним методом Бубнова–Гальоркіна. Обґрунтовано проведення фізико-математичного моделювання ефекту ІнтМО постановкою та вирішенням теплової задачі, де масообмін ураховано через функцію розвитку потужності дисипативних структур. Доведено, що ця модель є коректною для описання ІнтМО та застосування для інженерних розрахунків апаратів з ІнтМО.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы / под редакцией д-ра техн. наук Л.В. Лысенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 190 с.
2. Рудобашта С. П. Теплоэнергетические установки и системы сельского хозяйства / Р. А. Амерханов, А. С. Бессараб, Б. Х. Драганов, С. П. Рудобашта, Г. Г. Шишко – М. : Колос-Пресс.2002. – 423 с.
3. Быков Г. А. Системный анализ термодинамики энерготехнологических процессов тепловых машин / Г. А. Быков, О. Г. Быкова, В. Ю. Лупашевская // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – №12 (82). – С. 37–42.
4. Grandy W.T. Jr. Entropy and the Time Evolution of Macroscopic Systems [Текст] / W.T. Jr. Grandy. – Oxford University Press : Oxford, 2008. – P. 55–58.
5. Schmidt-Rohr K. Expansion Work without the External Pressure, and Thermodynamics in Terms of Quasistatic Irreversible Processes / K. Schmidt-Rohr // J. Chem. Educ. – 2014. – P. 402–409. (doi:10.1021/ed3008704)
6. Arnab S. Entropy production theorems and some consequences / Saha Arnab, Sourabh Lahiri, A. M. Jayannavar // Physical Review: The American Physical Society. – 2009. – P. 1–10.
7. Квасников И. А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 1. Теория равновесных систем: Термодинамика. / И. А. Квасников – 2-е изд., сущ. перераб. и доп. – М. : Едиториал УРСС, 2002. – 240 с.
8. Steurer W. Twenty years of structure research on quasicrystals. Part I. Pentagonal, octagonal, decagonal and dodecagonal quasicrystals / W. Steurer // Z. Kristallogr. – 2004. – P. 391–446.
9. Yacobi B.G. Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles / B. G. Yacobi // Springer. – 2003. – P. 1–3.
10. Matthiesen J. Observation of All the Intermediate Steps of a Chemical Reaction on an Oxide Surface by Scanning Tunneling Microscopy / J. Matthiesen, S. Wendt, J. Hansen, G. K. Madsen, E. Lira, P. Galliker, E. K. Vestergaard, R. Schaub, E. Laegsgaard, B. Hammer, F. Besenbacher // ACS Nano. – 2009. – №3 (3). – P. 517–526. (doi:10.1021/nn8008245)
11. Карпов М. О. Связь ресурсосбережения с экологичностью пищевых производств / М. О. Карпов, А. Г. Леу // В сборнике: Научная мысль XXI века: конвергенция знаний Материалы Международной научно-практической конференции НИЦ" Поволжская научная корпорация. – 2016. – С. 157-159.
12. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [Електронний ресурс] / Державне агентство з енергозбереження та енергоефективності України. – Режим доступу : http://saee.gov.ua/sites/default/files/documents/Presentation_NAPRES_Norw_OCT_3_ukr.pdf – 10.01.2017 г. – Загл. с экрана.

13. Погожих М. І. Потенційні можливості штучного керування процесом сушіння вологої сировини / М. І. Погожих, А. В. Пак, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 14 травня 2015 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2015. – Ч. 1. – С. 300-301.
14. Погожих М. І. Розвиток наукових основ ефективного керування технікою та технологією ЗТП-сушіння харчової сировини / М. І. Погожих, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 22 травня 2014 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2014. – Ч. 1. – С.3-4.
15. Гинзбург А. С. Сушка пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М. : Пищепромиздат, 1960. – 684с.
16. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 470с.
17. Лыков А. В. Тепломассообмен : [Справочник] / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1971. – 476с.
18. Филоненко Г. К. Сушка пищевых растительных материалов/ Г. К. Филоненко, М. А. Гришин, Я. М. Гольденберг, В. К. Коссек. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 438 с.
19. Пат. 2096962 Рос. Федерация: МКИ А23 В7/03. Способ сушки пищевых продуктов : / Погожих Н. И., В. А. Потапов, Н. М. Цуркан; заявитель и патентообладатель Харьковский государственная академия технологии и организации питания. – №94033280/13; заявл. 13.09.94; опубл. 22.06.89, Бюл. № 40. – 3 с.
20. Погожих Н. И. Научные основы теории и техники сушки пищевого сырья в массообменных модулях : дис. ...д-ра техн. наук / Н. И. Погожих. – Харьков : ХДАТОХ, 2002. – 331 с.
21. Потапов В. А. Научные основы анализа и управления кинетикой сушки пищевого сырья : дис. ... д-ра. техн. наук / Потапов В. А. – Харьков, 2007. – 348с.
22. Погожих Н. И. Разработка интенсивного способа сушки картофеля со смешанным теплоподводом и анализ процесса методом ЯМР : дис. ... канд. техн. наук / Н. И. Погожих.– Одесса, 1989. – 205 с.
23. Потапов В.А. Рациональные режимы сушки овощей смешанным теплоподводом : дис. ... канд. техн. наук / В. А. Потапов. – Одесса, 1994. – 190 с.
24. Цуркан Н. М. Разработка рациональных режимов производства сушеного быстровосстанавливаемого картофеля : дис. ...канд. техн. наук / Н. М. Цуркан. – Харьков : ХДАТОХ., 2000. – 156 с.
25. Сомов А. С. Разработка и исследование процесса СТП-сушки моркови : дис. ... канд. техн. наук / А. С. Сомов. – Харків: ХДУХТ, 2000. – 180 с.

26. Пак А. О. Розробка процесу сушіння плодово-ягідної сировини змішаним теплопідводом зі штучним пороутворенням : дис. ... канд. техн. наук / А. О. Пак. – Харків: ХДУХТ, 2008. – 153 с.
27. Жеребкін М. В. Розробка процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом : дис. ... канд. техн. наук / М. В. Жеребкін. – Харків: ХДУХТ, 2013. – 151 с.
28. Якушенко Є. М. Підвищення енергоефективності процесу сушіння виноградних вичавок у масообмінному модулі з кондуктивним підведенням теплоти : дис... канд.техн. наук: 05.18.12 / Є. М. Якушенко. – Харків: ХДУХТ, 2014. – 230 с.
29. Погожих М. І. Сушіння плодово-ягідної сировини способом змішаного теплопідводу зі штучним пороутворенням : Монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. М. Цуркан. – Харків : ХДУХТ, 2009. – 102с.
30. Pogozhikh M. The development of an artificial energotechnological process with the induced heat and mass transfer / M. Pogozhikh, A. Pak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №.1/8 (85). – P. 50–58. (doi: 10.15587/1729-4061.2017.91748)
31. Анищенко В. С. Динамические системы / В. С. Анищенко // Соросовский образовательный журнал. – №11, 1997. – С.77-84.
32. Динамическая система. Математическая энциклопедия. – М. : Советская энциклопедия. И. М. Виноградов. 1977-1985. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_mathematics/1493/Динамическая_система
33. Динамическая система // Энциклопедия физики и техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://femto.com.ua/articles/part_1/1018.html
34. Динамическая система // Новая философская энциклопедия: В 4 тт. М.: Мысль. Под редакцией В. С. Стёпина. 2001. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/8265/Динамические_системы
35. Анищенко В. С. Знакомство с нелинейной динамикой : Лекции соросовского профессора / В. С. Анищенко. – Институт компьютерных исследований, 2002. – 144 с.
36. Суцільне середовище: Мала гірнича енциклопедія. т. III. (за редакцією В. С. Білецького). – Донецьк : Східний видавничий дім, 2013. – 644 с.
37. Смыслов В.В. «Гидравлика и аэродинамика», Авиация: Энциклопедия. — М.: Большая Российская Энциклопедия. Главный редактор Г.П. Свищев. 1994.; О.В. Голубева Теоретическая механика. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.physic-explorer.ru/ponyatie_sploshnoy_sredi-427-1.html
38. Кошкин В. К. Нестационарный теплообмен / В. К. Кошкин, Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М. : Машиностроение, 1973. – 328 с.

39. Белов В. В. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач / В. В. Белов, И. В. Образцов, В. К. Иванов, Е. Н. Коноплев. – Тверь : ТвГТУ, 2015. – 108 с.
40. Погожих М. І. Штучний енерготехнологічний процес з індукованим тепломасообміном / М. І. Погожих, А. О. Пак // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф. присв. 50-річчю Харківського державного університету харчування та торгівлі, 1-2 червня 2017 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2017. – С. 47-48.
41. Очков В. Ф. MathCAD 14 для студентов, инженеров и конструкторов / В. Ф. Очков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.
42. Дьяконов В. П. Система MathCAD: Справ очник / В. П. Дьяконов. – М.: Радио и связь, 1993. – 127 с.
43. MathCad 2000: учебный курс / В. Дьяконов. – СПб : Питер, 2000. – 592с.
44. Jordan D. W. Non-Linear Ordinary Differential Equations: Introduction for Scientists and Engineers (4th ed.) / D.W. Jordan; P. Smith // Oxford University Press. – 2007. – 560 p. ISBN 978-0-19-920825-8.
45. Steven Strogatz. Non-linear Dynamics and Chaos: With applications to Physics, Biology / Steven Strogatz // Chemistry and Engineering. – 2001. – 515 p. ISBN 9780738204536.
46. Никитенков Н. Н. Синергетика для инженеров / Н. Н. Никитенков, Н. А. Никитенкова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 168 с.
47. Анищенко В. С. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций : монография / В. С. Анищенко, В. В. Астахов, Т. Е. Вадивасова. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. – 312 с. — ISBN 978-5-91559-066-2
48. Погожих М. І. Аналіз процесу індукованого тепломасообміну методом фазового простору / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. : О. І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2017. – Вип. 2(25) – С. 284-293
49. Погожих М.І., Пак А.О., Жеребкін М.В., Рурак Л.В. Фазовий портрет процесу індукованого тепломасообміну / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін, Л. В. Рурак // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф. присв. 50-річчю Харківського державного університету харчування та торгівлі, 1-2 червня 2017 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2017. – С. 43-44.
50. Погожих М. І. Гідротермічна обробка круп із використанням принципів сушіння змішаним теплопідводом : Монографія / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін. – Х. : ХДУХТ, 2014. – 170 с.

51. Dolinsek J. Novel NMR and EPR Techniques, in Lecture Notes in Physics / J. Dolinsek, M. Vilfan, S. Zumer // Springer Verlag. – 2006. – 441 p. DOI: 10.1007/b11540830
52. Декуша Л. В. Експериментальне визначення питомої теплоти випаровування / Л. В. Декуша, Ю. Ф. Снежкін, Л. І. Воробйов, Н. В. Дмитренко, В. А. Михайлик, Л. А. Боряк, Н. С. Дубовікова // Коммунальная и промышленная теплоэнергетика (Теплообеспечение – 2009): VII междунар. конф., 5-9 окт. 2009 г.: материалы конф. – Киев, 2009 / Опубликовано: Промышленная теплотехника. – 2009. – Т.31, №7. – С. 90-91.
53. Снежкин Ю. Ф. Измерение теплоты испарения воды в процессе сушки растительного сырья / Ю. Ф. Снежкин, В. А. Михайлик, Н. В. Дмитренко, Л. В. Декуша, Л. Й. Воробьев, Н. С. Дубовикова, Л. А. Боряк // Современные энергосберегающие тепловые технологии (СЭТТ-2011): IV междунар. науч.-практ. конф., 20-23 сент. 2011 г.: труды конф. – Москва, 2011. – Т.1. – С. 394-397.
54. Михайлик В. А. Связанная вода в древесине / В. А. Михайлик, Ю. Ф. Снежкин, Н. В. Дмитренко // IV Минский международный форум по тепло- и массообмену, 10-13 сентября 2012 года, г. Минск : Тезисы докладов и сообщений. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова, 2012. . – Том 1, часть 2. – С. 550–553.
55. Погожих М.І., Пак А.О. Метод исследования интенсивности испарения влаги с поверхности материала в процессе сушки / М. І. Погожих, А. О. Пак // Наукові праці ОНАХТ. – Серія: Технічні науки. – Одеса, 2008. – Вип. 32(35). – С. 97-100
56. Пак А. О. Установка для исследования испарения влаги из зерновых / А. О. Пак, І. М. Павлюк, О. С. Мольский // Тези доповідей міжн. наук. форуму «Харчові інновації та біотехнології». Збірка матеріалів конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – Кемерово : КемТИПП, 2013. – С. 772-775.
57. Levy Y. Water and proteins : a love-hate relationship / Y. Levy, J. Onuchic // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2004. – Vol. 101, Issue 10. – P. 3325–3326. DOI: 10.1073/pnas.0400157101
58. Bender C. J. Computational and Instrumental Methods in EPR, in Biological Magnetic Resonance / C. J. Bender, L. J. Berliner. – Springer Verlag, 2006 – 387 p. DOI: 10.1007/978-0-387-38880-9
59. Water Activity [Electronic resource] / Available at : <http://www.wateractivity.org/free-vs-bound-water> – 04.06.2013. – Title from the screen
60. Is there “Bound Water” in Foods? [electronic resource] / Decagon Devices, Inc. – Available at : <http://www.aqualab.com/education/is-there-bound-water-in-foods> – 12.08.2013. – Title from the screen.
61. Погожих М. І. Дослідження системної води харчової сировини термодинамічними та молекулярно-кінетичними методами / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. А. Чеканов, Є. О. Іштван, І. М. Павлюк // ЕЕJET, Східно-

європейський журнал передових технологій. – Харків, 2014. – № 5/11 (71). – С.42-46. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27790

62. Погожих М. І. Дослідження системної вологи крохмалю зернових культур методом ЕПР / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін // Восточно-європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 5/6 (59). – С. 62–66.

63. Вода в пищевых продуктах и для пищевых продуктов : Монография / гл. редактор Н.И. Погожих; Харьк. гос. ун-т пит. и торговли. – Х. : ХГУПТ, 2013. – 177 с.

64. Гришин М. А. Эффект динамического структурирования влаги в процессе сушки / М. А. Гришин, Н. И. Погожих, В. А. Потапов // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23, №. 4-5. – С. 100-105.

65. Погожих М. І. Характер процесу ІНТМО за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини у його внутрішньому середовищі / М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф. присв. 50-річчю Харківського державного університету харчування та торгівлі, 1-2 червня 2017 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2017. – С. 45-46.

66. Погожих М. І. Дослідження характеру процесу ІНТМО за наявності розривів ККПТ всередині термостату / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі, 18 травня 2017 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2017. – Ч. 1. – С. 316-317.

67. Погожих М. І. Дослідження особливостей процесу ІНТМО за умови створення границь розділу у вологому ККПТ / М. І. Погожих, А. В. Пак, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, присвячена 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі, 18 травня 2017 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2017. – Ч. 1. – С. 318-319.

68. Погожих М. І. Математична модель кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. А. Чеканов, М. В. Жеребкін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. праць / НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 43. – С. 7–12.

69. Погожих М. І. Исследование кинетики температуры и кинетики сушки при получении быстровосстанавливаемой каши / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Наукові праці ОНАХТ. – Серія: Технічні науки. – Одеса, 2009. – Вип. 35(35) – С. 101-104.

70. Погожих М. І. Внутрішні чинники процесу гідротермічної обробки круп з використанням принципів ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, Т. В. Міщенко, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/3 (53). – С. 60–63.
71. Погожих М. І. Постановка задачи исследования развития диссипативных структур при сушке смешанным теплоподводом / М. І. Погожих, А. О. Пак // Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ-2011 [Текст] : Труды четвертой Международной научно практической конференции, 20-23 сентября 2011г. – Москва : ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина», 2011. – Т.1. – С. 432-436.
72. Погожих М. І. Дослідження кінетики сушіння сировини при виробництві швидковідновлюваних каш / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини [Текст] : Всеукр. науково-практ. конф., 3-4 листопада 2011р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2011. – С. 62-63.
73. Погожих М. І. Дослідження теплової дії на плодово-ягідну сировину під час ЗТП-сушіння зі штучним пороутворенням / М. І. Погожих, А. О. Пак, Я. В. Толстова // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини», 31 жовтня 2008 р. – Харків : ХДУХТ. – С.11-12.
74. Берже П. Порядок в хаосе. О детерминистическом подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М. : Мир. – 1991. – 368 с.
75. Ландау Л. Д Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 736 с.
76. Монин А. С. Статистическая гидромеханика. В 2-х ч. / А. С. Монин, А. М. Яглом – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. – 695 с.
77. Falkovich Gregory. Lessons from hydrodynamic turbulence / Gregory Falkovich, K. R. Sreenivasan // Physics Today. – 2006. – №59 (4) – P. 43–49.
78. Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение / П. Брэдшоу. – М. : «Мир», 1974. – 278 с.
79. Brykina I. G. Effective Boundary Conditions for Continuum Method of Investigation of Rarefied Gas Flow over Blunt Body / I. G. Brykina, B. V. Rogov, I. L. Semenov, G. A. Tirskiy // Rarefied Gas Dynamics, 27th International Symposium. AIP conference proceedings, V. 1333, ed. by D. Levin, I. Wysong, A. Garcia. Melville. – NY. – 2011. – P. 1289-1294.
80. Spalart P. R. Strategies for turbulence modelling and simulation / P. R. Spalart // Intern. Journal of Heat and Fluid Flow. – 2000. – v. 21. – P. 252-263.
81. Breuer M. Comparison of DES, RANS and LES for the separated flow around a flat plate at high incidence / M. Breuer, N. Jovicic, K. Mazaev // Int. J. Numer. Meth. Fluids. – 2003. – v. 41. – P. 357-388.

82. Airframe, Volume 1: Structures. Third Edition / Aviation Maintenance Technician Series – Newcastle, Washington: Aviation Supplies & Academics, Inc. – 2006. – 490 p.
83. Погожих М. И. Влияние параметров движения сушильного агента на процесс сушки способом смешанного теплоподвода / М. И. Погожих, А. О. Пак // Проблемы ресурсо - и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК : Международная научно-техническая конференция, 23-26 сентября 2014, Иваново : тезисы докладов. – Иваново, 2014. – С. 192-195.
84. Погожих М. И. Вплив параметрів руху сушильного агента на кінетику сушіння змішаним тепло підводом / М. И. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, М. В. Жеребкін // ЕЕJET, Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків, 2014. – № 2/12 (68). – С. 4-8.
85. Погожих М. И. Вплив параметрів руху сушильного агента на кінетику процесу ЗТП-сушіння / М. И. Погожих, Ж. В. Воронцова, А. О. Пак // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 14 травня 2015 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2015. – Ч. 1. – С. 295-297.
86. Rockwell D. Vortex-body interactions / D. Rockwell. – Ann. Rev. Fluid Mech. – 1998 – №30. – P. 199–229.
87. Гиневский А. С. Акустическое управление турбулентными струями / А. С. Гиневский, Е .В. Власов, Р .К. Каравосов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 240 с. – ISBN 5-9221-0116-7
88. Бабенко В. В. Профили скорости в пограничном слое над пластиной с углублением / В В. Бабенко, А. В. Воскобойник, В А. Воскобойник, В. Н. Турик // Акустичний вісник. – 2004. – Т. 7. – №3. – С. 14-27. ISSN 1028 -7507
89. Терехов В. И. Вихревая картина турбулентного обтекания и теплообмен одиночного куба на плоской поверхности при различных углах атаки / В.И. Терехов, А.И. Гныря, С.В. Коробков // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т.17. – №4. – С. 521-533.
90. Дяченко Э. П. Моделирование тепломассообмена при инфракрасной сушке сульфанола во вспененном состоянии / Э. П. Дяченко, В. В. Ермолаев, Т. Г. Васильева, Н. П. Васина // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. №2. С. 95-99
URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-teplomassoobmena-pri-infrakrasnoy-sushke-sulfonola-vo-vspenennom-sostoyanii>
91. Бурдо О. Г. Проблемы моделирования процессов обезвоживания сырья / О. Г. Бурдо, С. Г. Терзиев, Н. В. Ружицкая, И. И. Яровой, А. А. Борщ // Наук. пр. ОНАХТ. – Одеса, 2012. – Вип. 41, Т.1. – С. 4-8.
92. Адамович А. Л. Моделирование тепловлагоденоса при конвективной и микроволновой сушке древесины / А. Л. Адамович, Ю. Г. Грозберг, О. А. Кизина, Н. Н. Гринчик, С. П. Кундас // Вестник Полоцкого

государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. – № 8. – 2010. – С. 79-85. ISSN: 2070-1616

93. Платонов А. Д. Основы моделирования процесса конвективной сушки термохимически обработанной древесины / А. Д. Платонов // Научный журнал КубГАУ. – № 74(10). – 2011. – С. 1-9. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/10/pdf/15.pdf> 1 УДК 65.011.56:630*812.14

94. Курдюмов В. И. Тепловая обработка зерна в установках контактного типа: монография / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, Г. В. Карпенко, С. А. Сутягин. – Ульяновск : УГСХА имени П.А. Столыпина, 2013. – 290 с.

95. Шутьок В.В. Математичне моделювання сушіння харчових продуктів перегрітою парою / В.В. Шутьок, С.М. Василенко, О.С. Бесараб Наукові праці НУХТ. – К. : НУХТ, 2013. – №49. – 84-87.

96. Кіндзера Д. П. Моделювання тепло-масообмінних процесів під час фільтраційного сушіння струганого березового шпону / Д. П. Кіндзера, В. М. Атаманюк, Б. М. Микичак, О. В. Уткіна // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». – 2014. – №787. – С. 319-323.

97. Гайвась Б. Математичне моделювання конвективного сушіння матеріалів з урахуванням механотермодифузійних процесів / Б. Гайвась // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2010. – вип. 12. – С. 9-37. ISSN 1816-1545

98. Kumar A. Implicit boundary method for finite element analysis using non-conforming mesh or grid / A. Kumar, S. Padmanabhan, R. Burla // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2008. – Vol. 74 (9). – P. 1421–1447.

99. Демьянов В. Ф. О прямых методах решения вариационных задач / В. Ф. Демьянов, Г.Ш. Тамасян // Труды института математики и механики УрО РАН. – 2010. – Том 16 № 5– С. 36-47.

100. Trefethen Lloyd N. Numerical Analysis / Lloyd N. Trefethen // Princeton Companion of Mathematics. – Princeton University Press. – 2006. – 20 p.

101. Dey TK. Provable surface reconstruction from noisy samples / TK. Dey, S. Goswami // Proceedings of the twentieth annual symposium on computational geometry. – 2004. – New York (NY, USA): ACM. – P. 330-339.

102. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения / В. Л. Рвачев – Киев: Наук. думка, 1982. – 552 с.

103. Shapiro V. Semi-analytic geometry with R-Functions / V. Shapiro // Acta Numerica, Cambridge University Press. – 2007.– vol. 16. – P. 239-303.

104. Погожих М. І. Використання числових методів для дослідження математичних моделей сушіння / М. І. Погожих, М. С. Синькоп, А. О. Пак // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини :Всеукр. наук.-практ. конф. до 25-річчя факультету обладнання та технічного сервісу ХДУХТ, 29 жовтня 2015 р. : [тези] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.] ; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х. : ХДУХТ, 2015. – С. 13-14.

105. Погожих М. І. Наближений розв'язок задач теорії сушіння капілярно-пористих тіл складної форми / М. І. Погожих, М. С. Синєкоп, Д. О. Торяник, А. О. Пак // *Science Rise* – №3/2 (20). – 2016. – С.6-11
106. Погожих М. І. Структура розв'язання задач теорії сушіння капілярно-пористих тіл складної форми / М. І. Погожих, М. С. Синєкоп, А. О. Пак // *Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 19 травня 2016 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2016. – Ч. 1. – С. 369-370.*
107. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва – Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1963. – 535 с.
108. Максименко-Шейко К. В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов в 3D по информации в 2D / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // *Вісник Запорізького національного університету.* – 2010. – №1. – С. 98-104.
109. Balabanian N. Digital logic design principles / Norman Balabanian, Bradley Carlson // John Wiley. – 2001. – P. 39-40.
110. Максименко-Шейко К. В. R-функции и обратная задача аналитической геометрии в трехмерном пространстве / К. В. Максименко-Шейко, А. М. Мацевитый, А. В. Толок, Т. И. Шейко // *Информационные технологии.* – 2007. – №10. – С. 23-32.
111. Hernandez M. A. Chebyshev's approximation algorithms and applications / M.A. Hernandez // *Comp. Math. Applic.* – 2001. – № 41. – P. 433-445.
112. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике / С.Г. Михлин. – М.: Наука. – 1970. – 512 с.
113. Лобанова Л. С. Нестационарные динамические задачи термоупругости в двухмерных областях / Л. С. Лобанова, Н. С. Синєкоп // *Проблемы машиностроения.* – 2001. – Том 4, №1-2. – С.108.
114. Гуляев В. И. Прикладные задачи теории нелинейных колебаний механических систем / В. И. Гуляев, В. А. Баженов, С. Л. Попов. – М. : Высшая школа, 1989. – 383 с. – ISBN 5-06-000091-5.
115. Yousef Saad. Iterative Methods for Sparse Linear Systems : 2nd edition / Saad. Yousef. – SIAM. – 2003. – 547 p. ISBN 978-0-89871-534-7 (<http://dx.doi.org/10.1137/1.9780898718003>)
116. Броунштейн Б. И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах / Б. И. Броунштейн, В. В. Щеголев. – Л. : Химия, 1988. – 336 с. ISBN 5-7245-0100-7
117. Погожих М. І. Сумісне використання R-функцій і проєкційного методу в задачах теорії сушіння / М. І. Погожих, М. С. Синєкоп, А. О. Пак, М. А. Чеканов / *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / [редкол. : О. І. Черевко (відпов. ред.) та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2016. – Вип. 1(23) – С. 284-293.*

118. Погожих М. І. Функція розподілення потужності дисипативних структур всередині ФЄ під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/12 (56). – С. 59–63.
119. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
120. Тихонов А. Н. Дифференциальные уравнения / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильева, А. Г. Свешников. – М. : «Наука», 1980. – 231с.
121. Кошляков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М. : «Высшая школа», 1970. – 712с.
122. Погожих М. І. Дослідження плинну вологої сировини в функціональній ємності прямокутного перерізу / М. І. Погожих, А. О. Пак, М. В. Жеребкін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 6/5 (42). – С. 56–59.
123. Погожих М. І. Математична модель кінетики температури сировини під час ЗТП-сушіння / М.І. Погожих, А.О. Пак, М.В. Жеребкін // Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність : Міжнародна науково-практична конференція, 14 травня 2015 р. : [тези у 2-х ч.] / редкол. : О. І. Черевко [та ін.]. – Харків : ХДУХТ, 2015. – Ч. 1. – С. 298-299.
124. Погожих М. І. Функція розподілення потужності дисипативних структур в сировині під час ЗТП-сушіння / М. І. Погожих, А. О. Пак // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації». – Київ, 2012. – Ч.1. – Том. Промислові технології. – С. 19-21.

ДОДАТОК

Патент України на корисну модель №87562 «Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах методом ЕПР-спінових міток під час сушіння»

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 87562

**СПОСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ
ВОЛОГИ В КАПЛЯРНО-ПОРИСТИХ КОЛОЇДНИХ
МАТЕРІАЛАХ МЕТОДОМ ЕПР-СПІНОВИХ МІТОК ПІД ЧАС
СУШІННЯ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **10.02.2014.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

М.В. Ковіня





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **87562** (13) **U**
(51) МПК
G01N 24/10 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2013 10871	(72) Винахідник(и): Погожих Микола Іванович (UA), Ромоданов Ігор Сергійович (UA), Пак Аліна Володимирівна (UA), Пак Андрій Олегович (UA)
(22) Дата подання заявки: 10.09.2013	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.02.2014	(73) Власник(и): ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ, вул. Клочківська, 333, м. Харків, 61051 (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.02.2014, Бюл.№ 3	

(54) СПОСІБ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ВОЛОГИ В КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ КОЛОЇДНИХ МАТЕРІАЛАХ МЕТОДОМ ЕПР-СПІНОВИХ МІТОК ПІД ЧАС СУШІННЯ

(57) Реферат:

Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах під час сушіння включає розміщення вологого зразка матеріалу в середовищі із заданою відносною вологістю та температурою. При цьому вологий зразок матеріалу розміщують у резонаторі ЕПР-спектрометра та висушують до рівноважного вологовмісту, реєструють масу зразка й ЕПР-сигнал, та за площами під сигналами, які пропорційні кількості вологи, що виконує роль розчинника, та кількості вологи, що не є розчинником, визначають відповідні кількості вологи і форми зв'язку її з матеріалом.

UA 87562 U

Корисна модель належить до харчової промисловості, а саме до дослідження та аналізу властивостей капілярно-пористих колоїдних матеріалів, до яких належить більша частина харчової сировини та продуктів, і може бути використаний в переробній галузі сільськогосподарської продукції, харчоконцентратній та харчовій галузях промисловості.

5 Відомі способи дослідження вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах, що включають термодинамічні або молекулярно-кінетичні методи отримання інформації про її фракційний склад [1, 2].

Недоліком цих способів є велика тривалість проведення вимірювань, недостатня чутливість до кількості та стану вологи, складні інтерпретація та аналіз експериментальних даних і низька кореляція результатів, отриманих різними способами.

10 Найбільш близьким технічним рішенням до корисної моделі є спосіб визначення фракційного складу вологи в матеріалах [3], який полягає в наступному. Зразок поміщають в піч дериватографа із заданою відносною вологістю та температурою в ній. Висушують та за результатами дериватографічного аналізу будують залежність логарифму швидкості зневоднення від зворотного значення абсолютної температури зразка, визначають точки залому на отриманому графіку та відповідні значення втрати вологи на дериватограмі.

15 Недоліком цього способу дослідження системної вологи капілярно-пористих колоїдних матеріалів є те, що він являється по суті термодинамічним способом, при цьому інформація про стан молекул води в матеріалі отримується не в явному вигляді, а за допомогою розрахунків.

20 В основу корисної моделі поставлена задача розробити спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах під час сушіння, до складу якого входили б термодинамічні та молекулярно-кінетичні методи дослідження, а отримана інформація була б поєднанням експериментальних даних отриманих за їх допомогою, шляхом використання методу ЕПР-спінових міток (ЕПР - електронний парамагнітний резонанс).

25 Поставлена задача вирішується тим, що у відомому способі визначення фракційного складу вологи в матеріалах, який включає розміщення вологого зразка матеріалу в середовище із заданою відносною вологістю та температурою, згідно з корисною моделлю, вологий зразок матеріалу розміщують у резонатор ЕПР-спектрометра та висушують до рівноважного вологовмісту, при цьому реєструють масу зразка й ЕПР-сигнал, та за площами під сигналами, які пропорційні кількості вологи, що виконує роль розчинника, та кількості вологи, що не є розчинником, визначають відповідні кількості вологи і форми зв'язку її з матеріалом.

30 Спосіб здійснюється наступним чином. Досліджуваний вологий зразок розміщується в резонатор ЕПР-спектрометра та висушується до рівноважного вологовмісту потоком підігрітого до визначеної температури повітря. В процесі зневоднення фіксується маса зразка та безперервно реєструється ЕПР-сигнал спініченого зразка.

35 Як спінова мітка під час ЕПР досліджень використовується іон Mn^{2+} солі $MnSO_4$. Спінова мітка вводиться в досліджуваний зразок, який є капілярно-пористим колоїдним матеріалом, шляхом використання як зволожуючої рідини розчину солі $MnSO_4$ відповідної концентрації.

40 На кресленнях представлено: фіг. 1 - ЕПР-спектри для: а - порошку солі $MnSO_4$; б - її розчину; с - зразка капілярно-пористого колоїдного матеріалу; на фіг. 2 - площа під 6-піковим (а) та 1-піковим (б) ЕПР-сигналом для зразка модельного капілярно-пористого колоїдного матеріалу під час сушіння.

45 Спектр ЕПР спініченого матеріалу (Фіг. 1а) складається з двох: спектр, який представляє собою 6 піків однакової ширини (Фіг. 1б), та спектр, який складається із однієї широкої лінії (Фіг. 1с). 6-піковий спектр - це спектр, який дає іон Mn^{2+} солі $MnSO_4$, коли сіль знаходиться в розчиненому стані; 1-піковий - відповідає кристалічному стану солі $MnSO_4$.

З теорії методу ЕПР [4], відомо, що спектри із 1 піка та із 6 піків можуть бути описані рівняннями Гауса (1) та Лоренца (2), які мають вид:

$$I_G = I_0^G \cdot \exp\left(-\frac{(H - H_0)^2}{\Delta H_G^2}\right), \quad (1)$$

$$50 \quad I_L = I_0^L \cdot \left(1 + \frac{(H - H_0)^2}{\Delta H_L^2}\right)^{-1}, \quad (2)$$

де I_G, I_L - поточне значення інтенсивності сигналу; I_0^G, I_0^L - максимальне значення інтенсивності сигналу; H, H_0 - поточне значення напруженості магнітного поля та значення напруженості, за якої сигнал має максимум; $\Delta H_G^2, \Delta H_L^2$ - ширина лінії.

Наступним кроком знаходять основні параметри досліджуваних ліній (спектрів порошку солі $MnSO_4$ та її розчину), а саме: інтенсивність (I_0), значення напруженості магнітного поля, за якого спостерігається максимум лінії поглинання (H_0), ширину лінії (ΔH). Функція (3), що описує спектр порошку солі $MnSO_4$, складається з однієї функції виду (1) або (2), а функція (4) для її розчину - із шести, кожна з яких має свою величину H_0 :

$$f_{1p}(H, I_0^{1p}) = I_0^{1p} \cdot e^{-\frac{(H-H_0^{1p})^2}{\Delta H_{1p}^2}},$$

$$f_{1p}(H, I_0^{1p}) = I_0^{1p} \cdot \left(1 + \frac{(H-H_0^{1p})^2}{\Delta H_{1p}^2}\right)^{-1}; \quad (3)$$

$$f_{6p}(H, I_0^{6p}) = \sum_{k=1}^6 I_0^{6p} \cdot e^{-\frac{(H-H_{0k}^{6p})^2}{\Delta H_{6p}^2}},$$

$$f_{6p}(H, I_0^{6p}) = \sum_{k=1}^6 I_0^{6p} \cdot \left(1 + \frac{(H-H_{0k}^{6p})^2}{\Delta H_{6p}^2}\right)^{-1}; \quad (4)$$

де індекс $1p$ - для широкої лінії, а $6p$ - для спектра із 6 піків.

Функція $f_{ККРТ}(H, I_0^{1p}, I_0^{6p})$ для вологого досліджуваного зразка знаходиться як сума функцій для порошку солі $MnSO_4$ та її розчину:

$$f_{ККРТ}(H, I_0^{1p}, I_0^{6p}) = f_{1p}(H, I_0^{1p}) + f_{6p}(H, I_0^{6p}). \quad (5)$$

Апроксимація вибраною функцією отриманих експериментальних даних для досліджуваного зразка проводиться шляхом варіювання значеннями амплітуд вихідних функцій I_0^{1p} та I_0^{6p} . Визначені амплітуди використовуються для знаходження площ під функцією, що описує 15
одиночну лінію, та під функцією із шести піків. Площа під спектром розраховується як інтеграл від аналітичних функцій у нескінченних границях:

$$S_{1p} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{1p}(H, I_0^{1p}) dH, \quad (6)$$

$$S_{6p} = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{6p}(H, I_0^{6p}) dH. \quad (7)$$

Вважається, що площа під 6-піковим сигналом (S_{6p}) пропорційна кількості спінів електронів Mn^{2+} , які знаходяться в розчині, а площа під 1-піковим (S_{1p}) - кількості спінів електронів Mn^{2+} , які випали в осад через недостатню кількість розчинника. Якщо досліджуваний зразок капілярно-пористого колоїдного матеріалу, сигнал ЕПР якого описується функцією (5), висушувати, то внаслідок зневоднення площа S_{1p} буде збільшуватися, а S_{6p} - зменшуватися. Пояснюється це тим, що кількість води, яка може бути розчинником, зменшується, а кількість солі $MnSO_4$, яка випала в осад, - збільшується. По мірі висушування сигнал із шести піків перетвориться в сигнал, що представляє собою широку лінію. За характером залежностей розрахованих площ від вологовмісту зразка можна зробити висновок про те, яка саме за формою зв'язку волога видалається на тій, чи іншій ділянці.

Таким чином, розраховуючи площі під сигналами в процесі сушіння вологого зразка та будуючи залежності цих площ від вологовмісту зразка, можна дослідити процес видалення розчинника із найближчого оточення мітки, тобто іона Mn^{2+} .

На фігурі 2 наведено приклад отримуваних залежностей для зразка модельного капілярно-пористого колоїдного матеріалу.

З наведених залежностей видно, що для 6-пікового сигналу (Фіг. 2а): за зменшення вологовмісту, відносно початкового, S_{6p} зменшується до досягнення певних величин вологовмісту, за яких мають місце локальні мінімум та максимум кривої. При подальшому зменшенні вологовмісту локальних екстремумів немає. Для 1-пікового сигналу (Фіг. 2б) залежність зворотна.

Кожну із кривих можна розбити на 4 характерні ділянки.

На першій ділянці відбувається інтенсивне видалення вологи з поверхні матеріалу та нагрівання зразка сушильним агентом. Через зменшення кількості системної вологи, зменшується кількість солі, яка знаходиться в розчині, результатом чого є зменшення S_{6p} та збільшення S_{1p} .

5 На другій ділянці видалення вологи продовжується, але розчинна здатність системної вологи збільшується через підвищення температури і кількість розчиненої солі $MnSO_4$, а, відповідно, і іонів Mn^{2+} в розчині, зростає. В результаті цього S_{6p} збільшується, а S_{1p} - зменшується.

10 Третя ділянка відповідає видаленню вологи змочування: S_{6p} монотонно зменшується, а S_{1p} - монотонно збільшується.

На четвертій ділянці відбувається збільшення кута нахилу кривої до осі вологовмісту. Пояснюється це тим, що мітка, тобто іон Mn^{2+} , є найбільш чутливою до найближчого свого оточення, а оскільки характер кривих стає більш різким, то це свідчить про видалення вологи із макро- та мікрокапілярів, а також частини вологи полімолекулярної сорбції.

15 Оскільки дослідження вологи проводиться у даному випадку непрямым способом, тобто досліджується стан та оточення мітки, то на перших двох ділянках аналіз експериментальних даних ускладнений зміною розчинності солі $MnSO_4$. Таким чином, дослідження системної вологи проводиться лише на третій та четвертій ділянках, причому окремо для кожної ділянки, оскільки чутливість мітки на них різна.

20 ПІР спектри отримувались під час сушіння вологих зразків, тобто досліджувалась кінетика процесу видалення вологи, тому кількість молів води на третій та четвертій ділянках можна визначити за формулами:

$$v_{w3}(\tau) = v_{w3}(\tau) \cdot A_{13}(v_{w3}) + v_{w3}(\tau) \cdot A_{23}(v_{w3})$$

$$v_{w4}(\tau) = v_{w4}(\tau) \cdot A_{14}(v_{w4}) + v_{w4}(\tau) \cdot A_{24}(v_{w4})$$

25 де А з індексом "1" відповідає частині вологи, яка є розчинником, а з індексом "2" - частині води, яка не розчиняє сіль $MnSO_4$.

Коефіцієнти А є тангенсами кута нахилу апроксимаційних прямих на відповідних ділянках кривих, які описують зміну площі під 6-піковим та 1-піковим ЕПР-сигналами під час сушіння вологого зразка:

$$A_{13} = \operatorname{tg}\alpha_{13}; A_{14} = \operatorname{tg}\alpha_{14};$$

$$A_{23} = \operatorname{tg}\alpha_{23}; A_{24} = \operatorname{tg}\alpha_{24}.$$

30 Приклад знаходження апроксимаційних прямих наведених на фігурі 2.

Таким чином, до складу запропонованого способу дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах методом ЕПР-спінових міток під час сушіння входять термодинамічний та молекулярно-кінетичний методи дослідження, а отримана інформація є поєднанням експериментальних даних, отриманих за їх допомогою.

35 Джерела інформації:

1. Д. Эйзенберг, В. Кауцман Структура и свойства воды. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1975 г. - 280 с.

2. Вода в пищевых продуктах и для пищевых продуктов: Монография / гл. редактор Н.И. Погожих; Харьк. гос. ун-т пит. и торговли. - Х.: ХГУПТ, 2013. - 177 с.

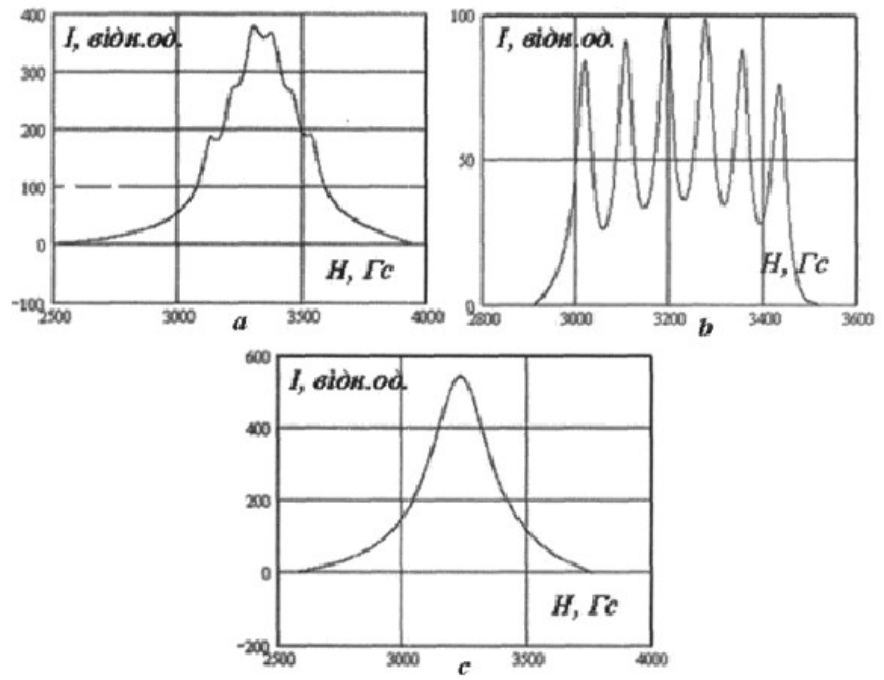
40 3. Пат. РФ № 2296974 МПК G01N 15/00 Способ определения фракционного состава влаги в материалах / В.М. Арапов (RU), М.В. Мамонтов (RU), М.В. Арапов (RU). - Заявл. 19.07.2005; Оubl. 10.04.2007; Бюл. № 13. - 5 с.

4. Дж. Вертц, Дж. Болтон Теория и практические приложения метода ЭПР. - М.: Издательство "Мир", 1975 г. - 550 с.

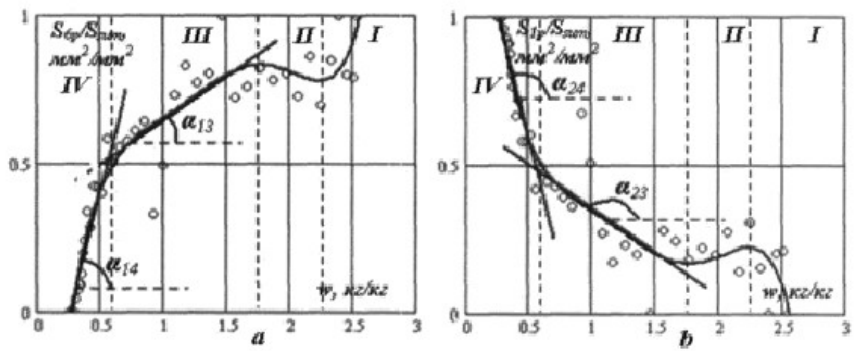
45

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

50 Спосіб дослідження динамічної поведінки вологи в капілярно-пористих колоїдних матеріалах під час сушіння, що включає розміщення вологого зразка матеріалу в середовищі із заданою відносною вологістю та температурою, який **відрізняється** тим, що вологий зразок матеріалу розміщують у резонаторі ЕПР-спектрометра та висушують до рівноважного вологовмісту, при цьому реєструють масу зразка й ЕПР-сигнал, та за площами під сигналами, які пропорційні кількості вологи, що виконує роль розчинника, та кількості вологи, що не є розчинником, визначають відповідні кількості вологи і форми зв'язку її з матеріалом.



Фиг. 1



Фиг. 2

Комп'ютерна верстка І. Скворцова

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

Наукове видання

ПАК Андрій Олегович
ПАК Аліна Володимирівна
ПОГОЖИХ Микола Іванович
ОНИЩЕНКО В'ячеслав Миколайович
СМЕТАНКІНА Наталя Володимирівна

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕФЕКТУ ІНДУКОВАНОГО
ТЕПЛОМАСООБМІНУ**

Монографія

Підп. до друку 14.02.2023 р.
Об'єм даних 5,8 Мб.