

УДК 53.043:664

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.180078

Розробка концептуальної реалізації апарата з індукованим тепломасообміном для випарювання та ректифікації

М. І. Погожих, А. О. Пак, А. В. Пак, А. Б. Горальчук, С. М. Сабадаш,
М. А. Чеканов

Обґрунтована необхідність пошуку рішень проблем ефективного використання енергетичних ресурсів за умови забезпечення вимог до екологічності виробництв під час виконання таких технологічних операцій як випарювання та ректифікація. Відзначено перспективність пошуку та застосування індукованих процесів, які характеризуються високою енергоефективністю і екологічністю.

Досліджено кінетику температури під час ефекту індукованого тепломасообміну складових внутрішнього об'єму термостата за умови використання різних рідин у його внутрішньому середовищі.

Дослідженнями встановлена неможливість досягнення рідиною у внутрішньому виділеному об'ємі термостата температури кипіння за умови протікання ефекту індукованого тепломасообміну, що доведено візуальним спостереженням та значенням її температури. Впродовж експерименту за атмосферного тиску температура термостата дорівнювала 115...116 °С, а температура об'ємної води не перевищувала 97 °С. Встановлено для температури термостата 105...106 °С та атмосферного тиску температура етилового спирту не перевищувала 72...73 °С, а для води – 83...85 °С за умови протікання ефекту індукованого тепломасообміну.

Встановлено, що етиловий спирт та вода переходять до газового стану під час ефекту індукованого тепломасообміну окремо. Фіксувати видалення рідкої фази компонентів суміші можливо за стрибкоподібним переходом кінетики температури рідини. Встановлено для суміші етилового спирту з водою під час ефекту індукованого тепломасообміну за температури термостата 105 °С та атмосферного тиску кипіння рідкої фази не відбувалось.

Запропоновано концептуальне рішення технічної реалізації універсального апарата з використанням ефекту індукованого тепломасообміну для виконання технологічних операцій випарювання та ректифікації без фази кипіння. За даним концептуальним рішенням створено лабораторний макет установки, в якому випарювання проводиться за атмосферного тиску за температури рідкої фази 83...85 °С. Економічний ефект розробки досягається за рахунок спрощення обладнання та скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу порівняно з вакуум-випарним апаратом

Ключові слова: ефект індукованого тепломасообміну, операція випарювання, ректифікація, кінетика температури, обтюратор термостата

1. Вступ

За останнє сторіччя споживання енергії в світі зросло в 25 разів і становить в індустріально розвинутих країнах 300 ГДж на одного жителя [1]. Енергетична потужність світового виробництва подвоюється кожні 12 років, а обсяг промислового виробництва – кожні 15 років. За останнє десятиліття промислове навантаження на навколишнє середовище зросло в 2,5...3 рази [2]. Можна прогнозувати і подальше стрімке зростання енергоспоживання.

Таким чином, на сучасному етапі розвитку галузей промисловості країн світу існує необхідність пошуку рішень проблем ефективного використання енергетичних ресурсів за умови забезпечення вимог до екологічності виробництв.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Особливу важливість, у цьому плані, представляють процеси тепло- та масообміну, які широко застосовуються у промисловості [3] для виконання таких технологічних операцій як випарювання та ректифікація [4]. Перераховані операції, як правило, характеризуються високими енерговитратами на процеси тепло- та масообміну та складністю обладнання для їх реалізації.

Випарювання використовується в хімічній, харчовій, фармацевтичній та інших галузях промисловості. Існує більше 80 різновидів випарних апаратів лише з паровим обігрівом [5]. Однак фізичною основою процесу в існуючих випарних апаратах є концентрування розчинів (часто твердих речовин у воді) частковим випаровуванням розчинника через кипіння, що обумовлює високі витрати теплоти на його реалізацію.

Випарювання проводиться за атмосферного, зниженого або підвищеного тиску за рахунок підведення ззовні теплоти. В результаті виконання даної операції підвищуються концентрація, густина та в'язкість розчину, а також температура його кипіння. Слід відмітити, температура кипіння розчинів завжди вища за температуру кипіння розчинників і зростає зі збільшенням концентрації розчиненої речовини і зовнішнього тиску [6]. Це встановлює обмеження на використання даної операції за атмосферного тиску для розчинів, що містять термолабільні речовини. Випарювання таких розчинів проводиться за зниженого тиску, що тягне за собою ускладнення обладнання та збільшення енерговитрат на його функціонування.

Ректифікацію широко застосовують в промисловості, наприклад, для отримання ректифікованого етилового спирту, з відділенням сивушних масел і альдегідних фракцій, для виділення бензинів, гасу та інших фракцій з нафти, тощо [7]. Ректифікація полягає у розділенні рідких сумішей на компоненти, що відрізняються температурами кипіння, шляхом постійного випаровування рідини і конденсації пари.

На виробництвах все частіше застосовують альтернативні процеси і методи розділення рідких фаз. До них відносять: випаровування через мембрану [8], що здійснюється в апаратах плівкового типу; протитечійну кристалізацію з безперервним масообміном [9] та ін. Однак, незважаючи на все більше поширення цих та інших альтернативних процесів і методів, ректифікація як і раніше зберігає своє значення в хімічній, харчовій, переробній галузях промисловості.

Проводять ректифікацію в ректифікаційних колонах, в яких здійснюється багаторазовий контакт між потоками парової і рідкої фаз. Рухлива сила ректифікації – різниця між концентраціями компонентів в паровій фазі від рівноважної для даного складу рідкої фази. В залежності від температур кипіння рідин, що підлягають розділенню, ректифікацію проводять за різного тиску: атмосферного, зниженого, підвищеного [10]. Однак незалежно від конструкції ректифікаційних апаратів та умов забезпечення даної технологічної операції фізичною основою ректифікації є процеси кипіння та конденсації. Виходячи з цього, ректифікація – один із найбільш енергоємних технологічних процесів.

Однак на теперішній час під час виконання технологічних операцій випарювання та ректифікації проводиться в основному інтенсифікація тепломасообмінних процесів. Інтенсифікація досягається, як правило, за рахунок зниження температури кипіння, шляхом зниження тиску у апараті, а енергетична ефективність – за рахунок конструкційної раціоналізації існуючого обладнання та раціонального використання вторинної теплоти.

Таким чином, очевидною існує необхідність пошуку нових підходів та принципів для виконання даних технологічних операцій. При цьому перспективним є пошук та застосування індукованих процесів, які самовільно не протікають, а тільки за умови подолання деякого енергетичного активаційного бар'єру. Такі процеси характеризуються високою енергоефективністю і екологічністю.

Одним із таких індукованих процесів є процес, в основі якого лежить ефект індукованого тепломасообміну (ІнТМО) [11]. Ефект ІнТМО полягає у ефективному розсіянні теплової енергії через фазовий перехід рідини I роду. До теперішнього часу ефект ІнТМО на практиці застосовувався лише для зневоднення вологих колоїдних капілярно-пористих матеріалів [12]. Однак результати дослідження ефекту ІнТМО [13], отримані на теперішній час, доводять, що можливості його практичного застосування можуть бути достатньо широкими.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення енергоефективності харчових, хімічних та фармацевтичних виробництв шляхом застосування інноваційного ефекту ІнТМО для виконання технологічних операцій випарювання та ректифікації.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- дослідити кінетику температури під час ефекту ІнТМО складових внутрішнього об'єму термостата: газової та рідкої фаз, обтюратора;
- дослідити кінетику температури під час ефекту ІнТМО складових внутрішнього об'єму термостата за умови використання в якості рідкої фази води, етилового спирту та їх суміші;
- розробити з використанням результатів дослідження кінетики температури рідини під час ефекту ІнТМО концептуальне рішення технічної реалізації енергоефективного апарата із застосуванням даного ефекту для виконання технологічних операцій випарювання та ректифікації без фази кипіння.

4. Матеріали і методи дослідження кінетики температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнтМО

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувалися в експерименті

Для досліджень обрано найпростіший варіант організації ефекту ІнтМО – термостат з обтюратором, що утримує рідину та газ (рис. 1). Даним дослідженням проводиться моделювання процесів випарювання, концентрування та згущення з використанням ефекту ІнтМО.

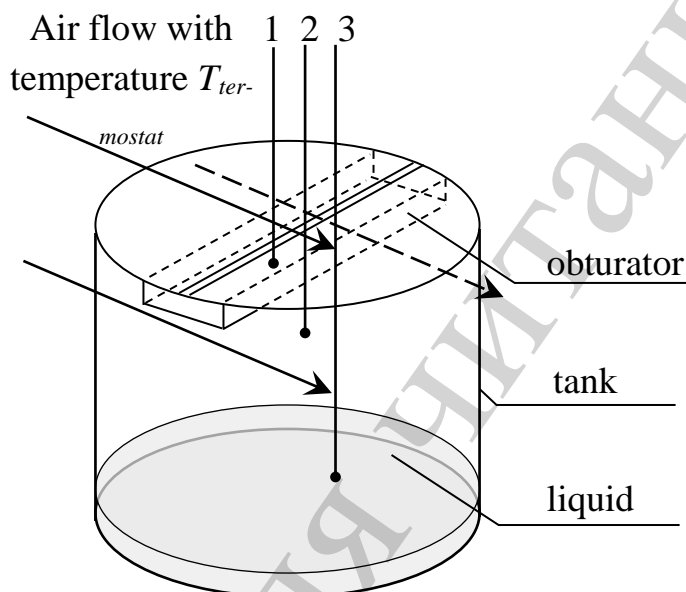


Рис. 1. Схема апарата для моделювання випарювання та концентрування та згущення з використанням ефекту ІнтМО за температури термостата більшої за температуру кипіння рідини у його внутрішньому об'ємі: 1, 2, 3 – термопари

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. 1).

4.2. Методика дослідження кінетики температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнтМО

Дослідження характеру ефекту ІнтМО проводилось за атмосферного тиску та температури термостата більшої за температуру кипіння рідини, яка знаходиться у його внутрішньому виділеному об'ємі. Так, за атмосферного тиску 99...102 кПа для води цією температурою є температура більша за 99...100 °С, а для етилового спирту – більша за 77...78 °С.

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, термопари 2 і 3 – відповідно температуру газу та температуру рідкої фази у внутрішньому об'ємі термостата.

Реєстрація сигналів від термопар проводилась з використанням аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів фірми DCON Utility (країна-виробник USA).

5. Результати досліджень кінетики температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнТМО

Кінетика температури ефекту ІнТМО в термостаті зі зволеним обтюратором наведена на рис. 2. 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.

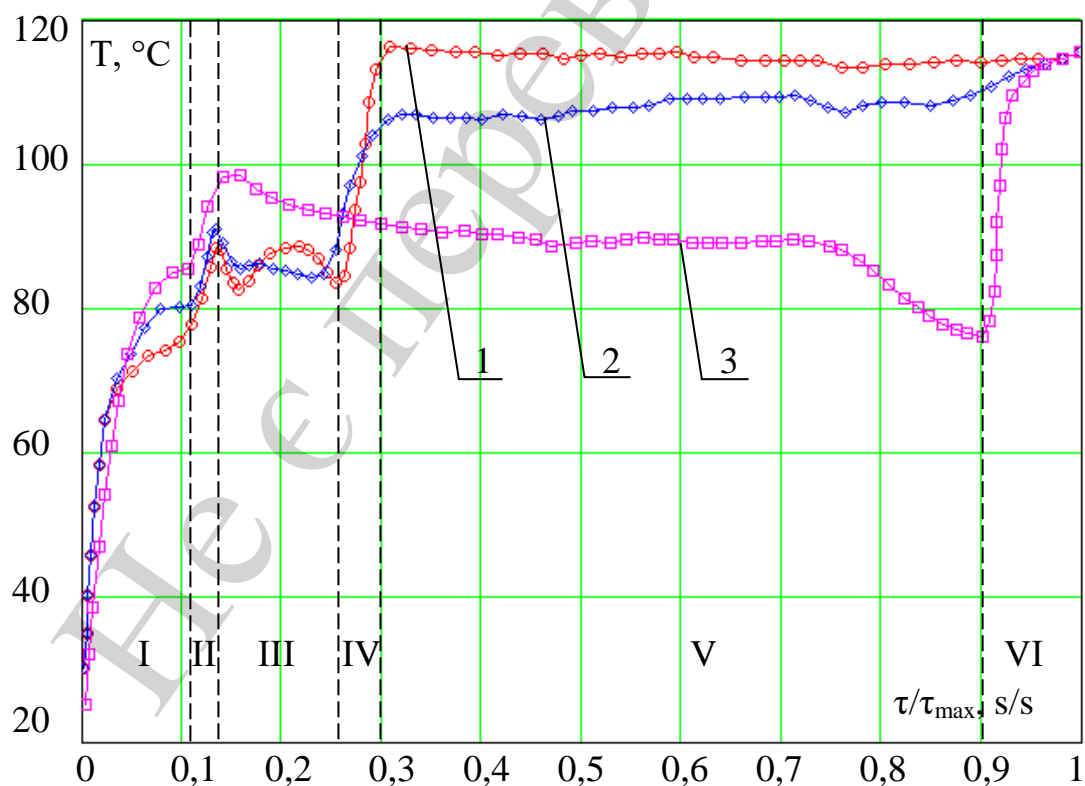


Рис. 2. Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата (1, 2, 3 – термопари з рис. 1) під час ефекту ІнТМО за температур термостата, °С: I – 95...96; II–VI – 115...116

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 обтюатора. Оскільки обтюатор являє собою отвір в термостаті з капілярно-пористим тілом, а в даному дослідженні обтюатор 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. 2). 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 $p, V = \text{const}$. При цьому на початку третьої ділянки (III) ентальпія внутрішнього середовища термостата дорівнює:

$$I_1 = c_{\text{termostat1}} m_{\text{termostat1}} T_1 + r \cdot m_{\text{liquid}}, \quad (1)$$

а в кінці п'ятої ділянки:

$$I_2 = c_{\text{termostat2}} m_{\text{termostat2}} T_2, \quad (2)$$

де $c_{\text{termostat1}}, m_{\text{termostat1}}, T_1$ – теплоємність, маса та температура внутрішнього середовища термостата, яке складається з рідини, газу та КПТ обтюатора на початку ІнтМО; $c_{\text{termostat2}}, m_{\text{termostat2}}, T_2$ – теплоємність, маса та температура внутрішнього середовища термостата, яке складається з газу та обтюатора на закінченні ефекту ІнтМО; m_{liquid} – маса рідини у виділеному внутрішньому об'ємі термостата; r – питома теплота пароутворення рідини.

Зміна ентальпії під час ефекту ІнтМО дорівнює:

$$\Delta I = I_2 - I_1. \quad (3)$$

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

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. Це доводить, по-перше, візуальне спостереження, а по-друге, кінетика температури від термопари 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». 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. 2.

Такий же результат отриманий і для етилового спирту, і для суміші спирту та води. На рис. 3 наведено кінетики температури складових внутрішнього виділеного об'єму термостата (рис. 1) під час ІнтМО, де в якості рідкої фази по черзі використовувались етиловий спирт та вода.

Під час експерименту, результати якого наведені на рис. 3, 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. 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.

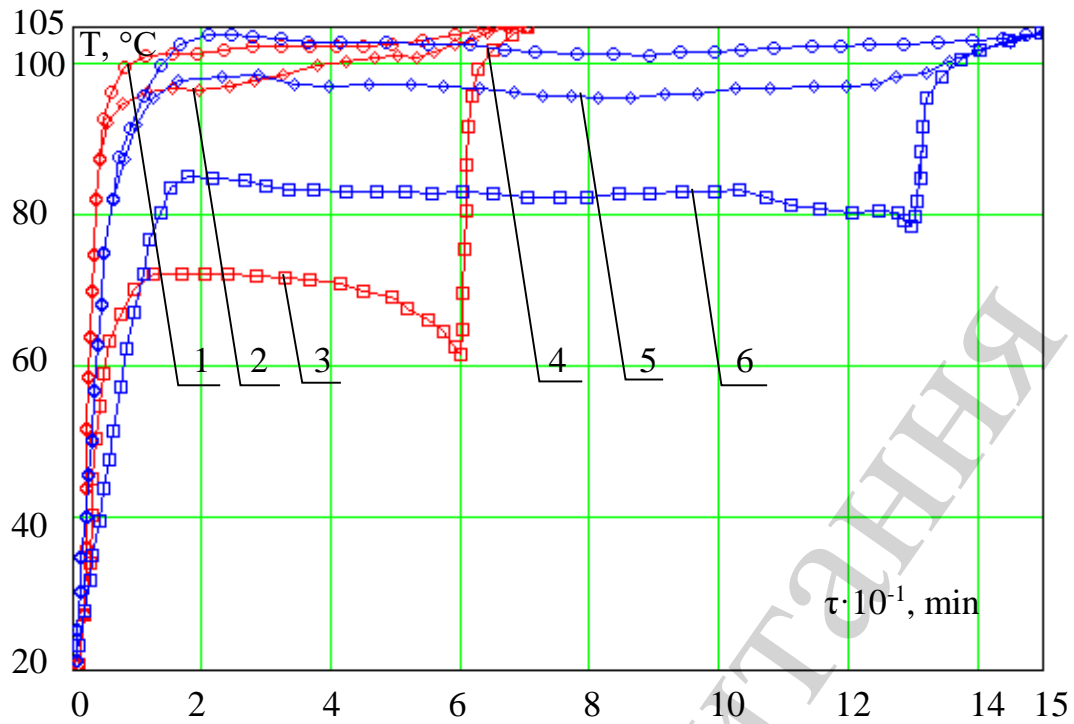


Рис. 3. Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ІнтМО за умови використання в якості рідкої фази: 1, 2, 3 – етилового спирту (відповідно сигнал від термопар 1, 2, 3 з рис. 1); 4, 5, 6 – води (відповідно сигнал від термопар 1, 2, 3 з рис. 1)

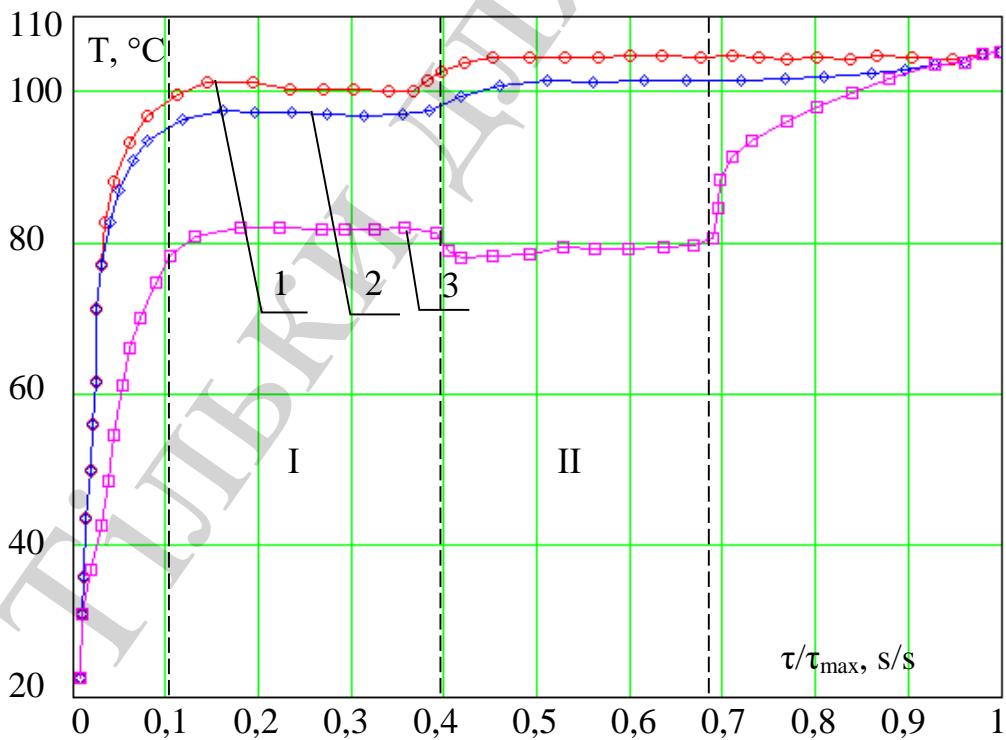


Рис. 4. Кінетика температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнтМО за умови використання в якості рідкої фази суміші етилового спирту та води у об'ємному співвідношенні 1:1 (1, 2, 3 – сигнали від термопар з рис. 1)

6. Обговорення результатів досліджень кінетики температури складових внутрішнього об'єму термостата під час ефекту ІнтМО

Дослідженнями кінетики температури складових внутрішнього об'єму термостата встановлено неможливість досягнення об'ємною водою у внутрішньому виділеному об'ємі термостата температури кипіння за умови протікання ефекту ІнтМО. Даний факт доведений візуальним спостереженням та значенням температури об'ємної рідини в термостаті.

За умови використання у якості рідкої фази суміші етилового спирту та води встановлено, 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.

Необхідно відзначити, з точки зору практичного застосування ефекту ІнтМО у промисловості дана особливість може бути використана для таких технологічних операцій як ректифікація, випарювання або дистиляція без фази кипіння. При цьому слід відмітити, 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.

Встановлений факт неможливості кипіння рідкої фази за умови протікання ефекту ІнтМО дозволив розробити концептуальне рішення технічної реалізації апарата з використанням даного ефекту для виконання технологічних операцій випарювання та ректифікації (рис. 5) без фази кипіння.

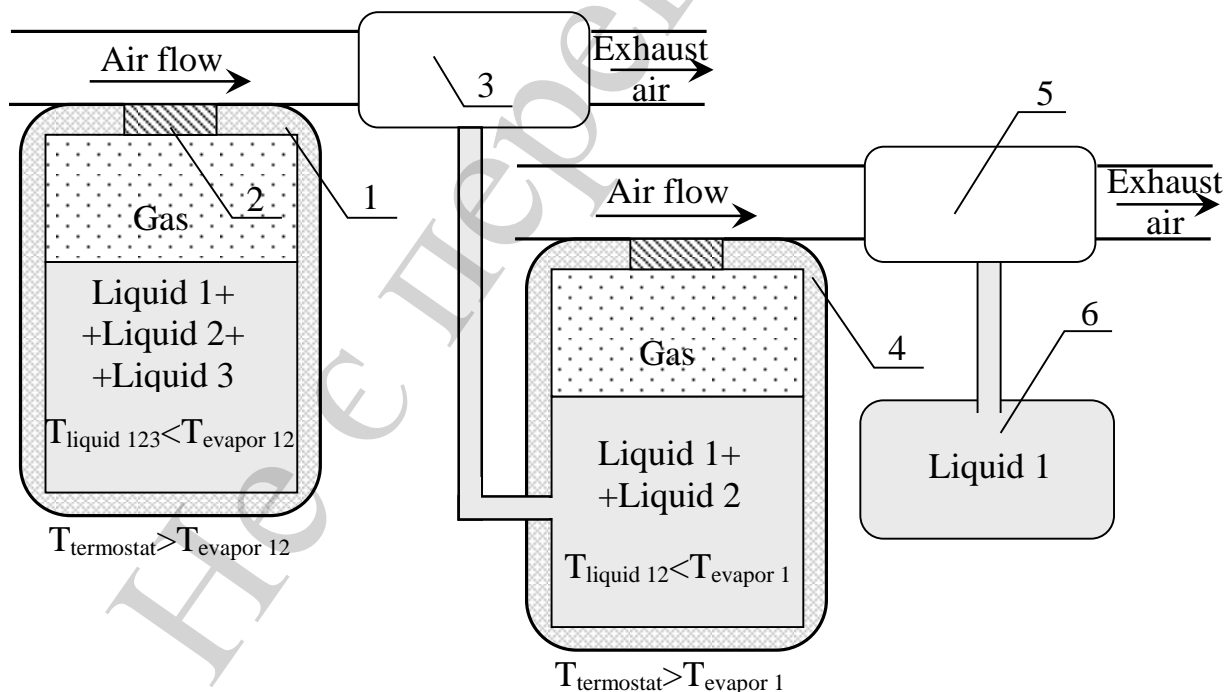


Рис. 5. Концептуальні рішення практичного застосування теплоенергетичних апаратів з використанням процесу ІнтМО для ректифікації, переганяння або дистиляції: 1, 4 – термостати; 2 – обтюратор; 3, 5 – конденсатори; 6 – збірник для рідини

Організувати реалізацію даних технологічних операцій з використанням ефекту ІнтМО можна в термостатах, внутрішнє середовище яких являє закритою ємністю із зазором, в якому розміщений штучно створений обтюратор (рис. 5). На рисунку наведено приклад розділення суміші трьох рідин з різною температурою кипіння з використанням ефекту ІнтМО в термостаті. Будемо вважати, що температури рідин ступенево зростають – $T_{\text{evapor}1} < T_{\text{evapor}2} < T_{\text{evapor}3}$. У першому термостаті (1) проводиться відділення рідини 1 та рідини 2 від рідини 3. Потік повітря, який виносить пару рідини 1 та 2 із термостату 1, надходить до конденсатора 3, де пара рідин 1 та 2 конденсується та надходить до другого термостату (4). В другому термостаті проводиться відділення рідини 1 від рідини 2. Пара рідини 1 конденсується у конденсаторі 5 та надходить до збірника 6. Кількість рідин, які підлягають розділенню, визначає необхідну кількість ступенів «термостат – конденсатор».

Необхідно відмітити, що наведене концептуальне рішення є універсальними. Його універсальність полягає в можливості використання одного апарата для виконання і операції випарювання, і операції ректифікації за мінімальних конструкційних змін у апараті.

За даним концептуальним рішенням створено лабораторний макет установки, в якому випарювання проводиться за атмосферного тиску за температури рідкої фази 83...85 °С. Для порівняння енерговитрат на процес випарювання проведено концентрування соку чорниці в розробленій лабораторній установці та у вакуум-випарному апараті, який широко-застосовується для виконання даної операції.

Необхідно відмітити, що зазвичай у харчоконцентратному виробництві під час отримання концентратів соків випарюванням, процес випарювання проводять за тиску менше атмосферного. Так для того, щоб кипіння відбувалось за температури 83...85 °С, тиск повинен дорівнювати 0,5...0,6 атм. Забезпечення таких умов потребують ускладнення випарного обладнання та додаткових енерговитрат. Очевидною перевагою випарювання у термостаті з використанням ефекту ІнтМО є те, що випарювання за тих же температур (83...85 °С) відбувається за атмосферного тиску. При цьому тривалість процесу, як за першого способу, так і за другого відрізняється не більше ніж на 10 % від загальної. Енерговитрати у вакуум-випарному апараті склали 1,57 МДж на одиницю продукції, а у розробленій лабораторній установці 1,19 МДж. Розрахунки доводять, що в розробленій установці відбувається скорочення енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу порівняно з вакуум-випарним апаратом, що доводить досягається економічну привабливість розробки.

В подальших дослідженнях планується проведення масштабування розробленої лабораторної установки для випарювання та ректифікації з ефектом ІнтМО без фази кипіння з метою створення промислової установки. Також планується розробка основних функціональних вузлів даного обладнання та вибір раціональних режимів його функціонування.

7. Висновки

1. Встановлена неможливість досягнення об'ємною рідиною у внутрішньому виділеному об'ємі термостата температури кипіння за умови протікання ефекту ІнтМО, що доведено візуальним спостереженням та значенням її температури. Впродовж експерименту за атмосферного тиску температура термостата дорівнювала 115...116 °С, а температура об'ємної води не перевищувала 97 °С. Встановлено для температури термостата 105...106 °С та атмосферного тиску температура етилового спирту не перевищувала 72...73 °С, а для води – 83...85 °С за умови протікання ефекту індукованого тепломасообміну.

2. Встановлено, що для суміші етилового спирту та води всередині термостата на кінетиці температури наявний стрибкоподібний перехід, який відповідає закінченню випаровування спирту в термостаті та початку переходу рідкої води в газовий стан. Важливим результатом є встановлення факту, що етиловий спирт та вода переходять до газового стану під час ІнтМО окремо, при цьому фіксувати видалення рідкої фази компонентів суміші можна за кінетикою температури. Встановлено для суміші етилового спирту з водою під час ефекту індукованого тепломасообміну за температури термостата 105 °С та атмосферного тиску кипіння рідкої фази не відбувалось.

3. Розроблено концептуальне рішення технічної реалізації універсального апарата з використанням ефекту ІнтМО для виконання технологічних операцій випарювання та ректифікації без фази кипіння. За даним концептуальним рішенням створено лабораторний макет установки, в якому випарювання проводиться за атмосферного тиску за температури рідкої фази 83...85 °С. Економічна привабливість розробки полягає у зменшенні енерговитрат на одиницю продукції більш ніж у 1,3 разу порівняно з вакуум-випарним апаратом.

Література

1. Bilgen, S. (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 890–902. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.004>
2. Cabezas, H. (2017). Editorial overview: Energy and environmental engineering. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 17, 98–99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.08.006>
3. Berk, Z. (2018). Heat and mass transfer, basic principles. *Food Process Engineering and Technology*, 79–126. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812018-7.00003-8>
4. Burdo, O., Bandura, V., Zykov, A., Zozulyak, I., Levtrinskaya, J., Marenchenko, E. (2017). Development of wave technologies to intensify heat and mass transfer processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (11 (88)), 34–42. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>
5. Zhang, L., Kong, S.-C. (2012). Multicomponent vaporization modeling of bio-oil and its mixtures with other fuels. *Fuel*, 95, 471–480. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.009>
6. Augusto, C. M., Ribeiro, J. B., Gaspar, A. R., Ferreira, V. R., Costa, J. J. (2012). A mathematical model describing the two stages of low-pressure-

vaporization of free water. *Journal of Food Engineering*, 112 (4), 274–281. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.05.013>

7. Huang, H.-J., Ramaswamy, S., Tschirner, U. W., Ramarao, B. V. (2008). A review of separation technologies in current and future biorefineries. *Separation and Purification Technology*, 62 (1), 1–21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.12.011>

8. Camacho, L., Dumée, L., Zhang, J., Li, J., Duke, M., Gomez, J., Gray, S. (2013). Advances in Membrane Distillation for Water Desalination and Purification Applications. *Water*, 5 (1), 94–196. doi: <https://doi.org/10.3390/w5010094>

9. Alvarez, A. J., Myerson, A. S. (2010). Continuous Plug Flow Crystallization of Pharmaceutical Compounds. *Crystal Growth & Design*, 10 (5), 2219–2228. doi: <https://doi.org/10.1021/cg901496s>

10. Stichlmair, J. G. (2010). Distillation or Rectification. *Chemical Engineering and Chemical Process Technology-Volume II: Unit Operations—Fluids and Solids*, 68.

11. Pogozhikh, M., Pak, A. (2017). The development of an artificial energo-technological process with the induced heat and mass transfer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (8 (85)), 50–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91748>

12. Погожих, М. І., Пак, А. О., Пак, А. В., Жеребкін, М. В. (2017). Технічна реалізація апаратів з використанням процесу індукованого тепломасообміну. *ScienceRise*, 6 (35), 29–33. doi: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.103600>

13. Погожих, М. І., Пак, А. О., Пак, А. В., Жеребкін, М. В. (2017). Аналіз процесу індукованого тепломасообміну методом фазового простору. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 1 (25), 132–143.