

УДК 621.365.5:664

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ІНДУКОВАНОГО ТЕПЛОМАСООБМІНУ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТУ

**Погожих М.І.¹ д.т.н., професор, Пак А.О.¹ д.т.н., професор,
Онищенко В.М.¹ д.т.н., доцент, Пак А.В.² к.т.н., доцент**

*Державний біотехнологічний університет¹
ННІ Українська інженерно-педагогічна академія²*

Проведено аналіз стану динамічної системи, в якій реалізується ефект індукованого тепломасообміну методом фазового простору. Наведено фазовий портрет процесу тепломасообміну в термостаті за двома шляхами еволюції системи: тепломасообмін без енергії активації та тепломасообмін з енергією активації – ІнтМО.

Одним із способів якісного аналізу стану системи (механічної, хімічної, термодинамічної і т. ін.) є метод фазового простору [1, 2]. Полягає він у наступному. На координатних осях відкладають поточні значення змінних стану аналізованої динамічної системи. Їх зміні 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 [3].

Скористаємося методом фазового простору для аналізу стану динамічної системи, в якій реалізується ефект індукованого тепломасообміну (ІнтМО) [4]. Під динамічною системою розуміється термостат, у внутрішньому виділеному об'ємі якого знаходиться три фази тверда (колоїдне капілярно-пористе тіло (ККПТ)) рідка та газова. Газове середовище у внутрішньому виділеному об'ємі термостата сполучається з оточуючим термостат середовищем через обтюратор.

Першою узагальненою координатою для побудовання фазового простору обрано температуру всередині термостату T , яка обумовлює напрям та величину потоку теплоти до внутрішнього середовища термостату.

Другою узагальненою координатою є парціальний тиск p пари рідини у внутрішньому газовому середовищі термостата. При цьому слід вважати у відповідності до феноменологічної гіпотези ефекту ІнтМО, 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.

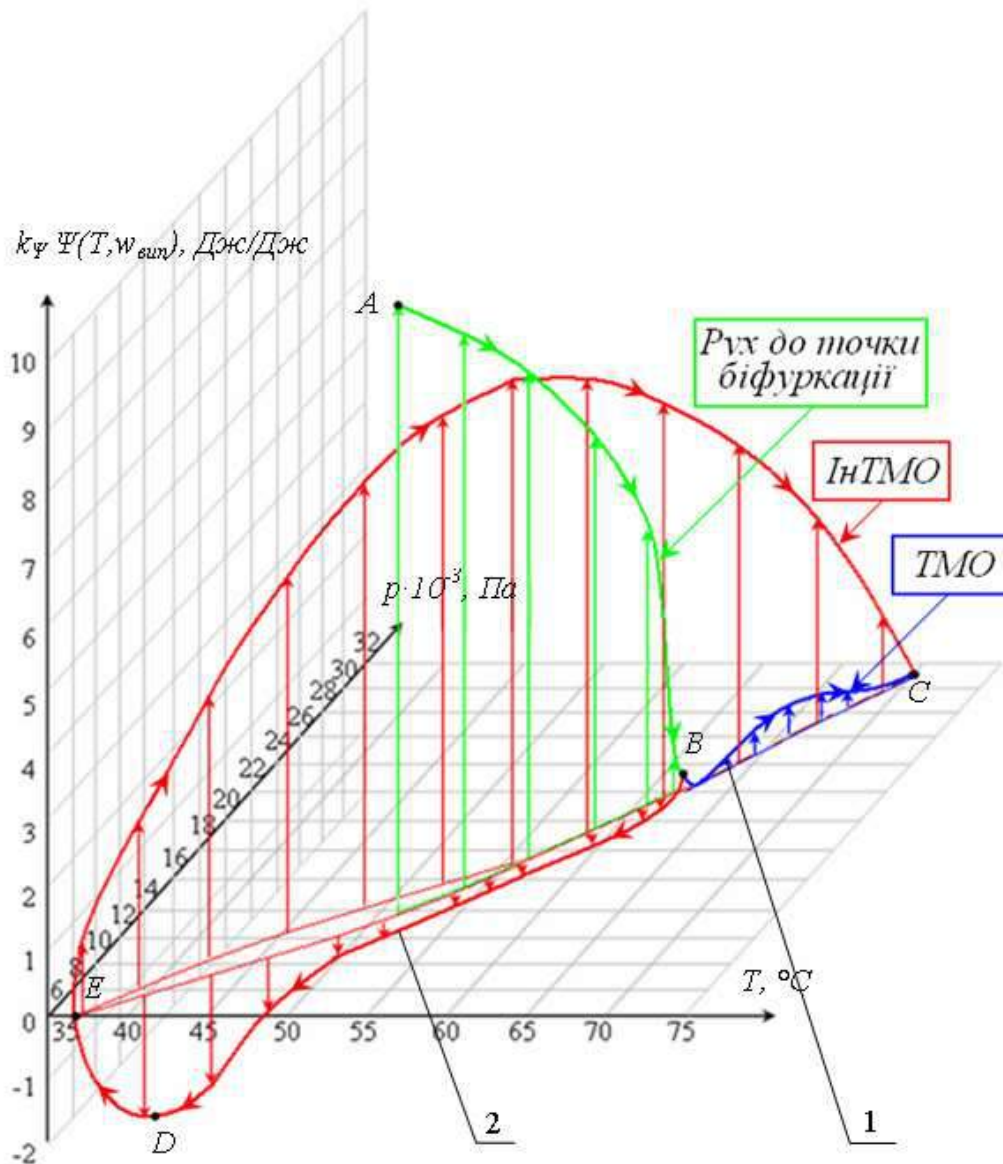
Третьою узагальненою координатою є відношення енергії, поглинутої внутрішнім середовищем термостата, до енергії, розсіяної даним середовищем, яке вводиться рівнянням:

$$\frac{C_{\text{сист}} \cdot dT}{r \cdot dw_{\text{вип}}} = \Psi(T, w_{\text{вип}}), \quad (1)$$

де $C_{сист}$ – питома теплоємність системи (на 1 кг сухих речовин тіла), Дж/(К·кг сух.реч.); r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; $w_{вин} = m_p / m_{с.р.}$ – питома кількість рідини, що перейшла у газовий стан (на 1 кг сухих речовин тіла), кг/кг сух.реч.

Координата $\Psi(T, w_{вин})$ обрана безрозмірною з метою отримання зручного масштабу для виявлення характеру поведінки системи та особливих точок фазового портрету, як під час тепломасообміну (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. 1: тепломасообмін без енергії активації – ТМО та тепломасообмін з енергією активації – ІнТМО [5].



ТМО (1) – тепломасообмін без енергії активації;
ІнТМО (2) – тепломасообмін з енергією активації

Рис. 1. Фазовий портрет процесу тепломасообміну в термостаті

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 [5].

Під час ІнТМО 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) [2]. 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

прирошення 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 «оточуюче 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.

Список використаних джерел

1. 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.
2. Steven Strogatz. Non-linear Dynamics and Chaos: With applications to Physics, Biology / Steven Strogatz // Chemistry and Engineering. – 2001. – 515 p. ISBN 9780738204536.
3. 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
4. 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)
5. 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.
6. Пак А.О., Пак А.В., Погожих М.І., Онищенко В.М., Сметанкіна Н.В. Наукові основи ефекту індукованого тепломасообміну: монографія. – Харків: Міська Друкарня, 2023. – 144 с. ISBN 978-617-619-276-3. (<https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/24177>)