

УДК 663.551

## ПІДВИЩЕННЯ ККД ТАРИЛОК В КОЛОННИХ МАСООБМІННИХ АПАРАТАХ

Булій Ю.В.<sup>1</sup>, Ободович О.М.<sup>2</sup>, Бондар М.В.<sup>3</sup>, Сидоренко В.В.<sup>4</sup><sup>1</sup>канд. техн. наук, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, 01601, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1905-3706>, e-mail: [yvbuliy@gmail.com](mailto:yvbuliy@gmail.com)<sup>2</sup>докт. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>, e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)<sup>3</sup>канд. техн. наук, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, Київ, 01601, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5775-006X>, e-mail: [bondmik@ukr.net](mailto:bondmik@ukr.net)<sup>4</sup>канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03680, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>, e-mail: [vrangel08@i.ua](mailto:vrangel08@i.ua)<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2026.4>

Для дослідження фазової рівноваги між рідиною і парою в системі етиловий спирт–вода розроблений прилад, конструкція якого дозволила підвищити точність результатів і скоротити час досягнення рівноважного стану до 30–40 хв. Отримані експериментальні дані щодо фазової рівноваги в діапазоні значень тиску від 103 до 50,6 кПа. Термодинамічна перевірка результатів показала задовільну ступінь узгодженості розрахункових і експериментальних даних. Розроблені способи масообміну між рідиною і парою в режимі контрольованих циклів затримки і переливу рідини та конструкції масообмінних апаратів для їх реалізації. Встановлені гідродинамічні режими роботи тарілок. Експериментально доведено, що подовження часу контакту фаз на тарілках до 30–60 с дозволяє суттєво підвищити їх ККД і скоротити витрати гріючої пари на 40 %.

To study the phase equilibrium in the ethanol-water system, a device has been developed, the design of which makes it possible to increase the accuracy of the results and reduce the time to reach the equilibrium to 30–40 min. Experimental data on phase equilibrium in the range of pressure values from 103 to 50.6 kPa were obtained. Thermodynamic validation showed a satisfactory degree of consistency of calculated and experimental data. Methods of mass transfer between liquid and vapour in the mode of controlled cycles of delay and overflow of liquid and designs of mass transfer apparatuses for their realization have been developed, hydrodynamic modes of operation of trays have been determined. It is experimentally proved that increasing the contact time of phases on plates up to 30–60 s allows to increase the efficiency of trays and reduce the heating steam consumption by 40 %.

Бібліографія 17, рис. 5.

**Ключові слова:** фазова рівновага, масообмінний апарат, тарілки, етиловий спирт, контрольовані цикли.

## Вступ

Технічний прогрес у спиртовій промисловості нерозривно пов'язаний з розробкою і впровадженням високоефективних енергозберігаючих колонних масообмінних апаратів. Для розділення багатокомпонентних сумішей застосовують тарілчасті контактні пристрої, за допомогою яких відбувається ступінчастий контакт фаз по висоті колони [1,2]. Коефіцієнт корисної дії (ККД) тарілок залежить від конструкції, діаметра і вільного перерізу колони, її завантаження, міжтарілкової відстані, швидкості пари, фізичних властивостей суміші, яка підлягає розділенню тощо. ККД визначають дослідним шляхом.

Останнім часом зусилля дослідників спрямовані на удосконалення конструкції тарілок з метою забезпечення найбільш інтенсивного контакту пари та рідини,

ефективність якого визначають за ступенем досягнення фазової рівноваги. Технологічні розрахунки тарілчастих масообмінних апаратів припускають миттєве перенесення легких компонентів пари та рідини, не враховуючи інтервал їх контакту. Існує межа, нижче якої час контакту рідини та пари недостатній для досягнення фазової рівноваги, тому ККД відомих типів тарілок не перевищують 0,4–0,6 [3].

Проектування і впровадження колонних масообмінних апаратів потребує достатньої кількості достовірних даних щодо фазової рівноваги в системі етанол — вода. Точність отриманих результатів залежить від досконалості приладу і методики проведення аналізу дослідних проб. До теперішнього часу для досліджень використовували прилади циркуляційного типу: Отмера, Свентославського, Бушмакіна та їх

модифікації, які мають ряд суттєвих недоліків: слабе перемішування кубової рідини, наявність бризковиносу, подовжена у часі тривалість досягнення фазової рівноваги, конденсація пари на внутрішній поверхні приладів (ефект дефлегмації), який призводить до зміни концентрації легколетких компонентів в парі в сторону її збільшення і появи систематичної похибки [4,5].

**Метою роботи** було дослідження фазової рівноваги між рідиною і паром в системі етиловий спирт – вода в діапазоні значень тиску від 103 до 50,6 кПа в зоні низьких концентрацій спирту; вибір методів термодинамічної перевірки і обробки експериментальних даних для контролю їх достовірності; розробка способів масообміну між рідиною і паром в колонних апаратах циклічної дії для підвищення ККД тарілок; дослідження ефективності роботи ректифікаційної колони циклічної дії у виробничих умовах.

**Матеріали і методи.** Методи досліджень — аналітичні, розрахункові, фізико-хімічні та хроматографічні з використанням приладів та методики досліджень, що застосовуються у виробництві спирту етилового ректифікованого [6,7].

**Виклад основних результатів досліджень.** Для дослідження фазової рівноваги в Київському технологічному інституті харчової промисловості (нині НУХТ) розроблений прилад, конструкція якого дозволяє виключити вищевказані недоліки (рис. 1).

Прилад містить термостійку колбу 1, електричні спіралі 2 для нагрівання рідини, циркуляційні труби 3, кільцевий відбійник 4 з отворами 5, зонти 6, відвідну трубу

ку 7, холодильник 8, збірник конденсату 9, лічильник 10 крапель конденсату 11, термометричну кишеню 12 і термометри 13.

Його основною відмінною особливістю є те, що прилад приєднується до системи регулювання тиску, а стабілізація температури його внутрішньої поверхні здійснюється не паром, а стікаючою плівкою рідини, яка знаходиться у рівновазі з паром. Таке технічне рішення забезпечує рівномірне кипіння водно-спиртової рідини, виключає її випаровування, запобігає коливанню тиску і температури і дозволяє досягати фазову рівновагу протягом 30–40 хв. [8–10].

На рис. 2 показано схему включення приладу в роботу. Установка включала ебуліометр 1, холодильники проб 2, вловлювач крапель 3 пробовідбірники 4, вакуум-насос 5 і диференційний манометр для вимірювання тиску 6 [11].

Відбір проб конденсату пари і рідини здійснювали у сталому режимі, який визначали в момент встановлення сталої температури в парі і рідині. Інтенсивність кипіння рідини контролювали за допомогою лічильника крапель. Достовірність результатів досліджень залежала від обраної методики визначення концентрації спирту в пробах. Для цього використовували газохроматографічний, рефрактометричний, пікнометричний, флотажний, біхроматно-йодометричний і колориметричний методи [6,7]. Встановлено, що вибір методу аналізу залежить від концентрації водно-спиртового розчину. Так, в зоні низьких концентрацій (0,5 % мас.) доцільно використовувати колориметричний метод, в інтервалі концентрацій

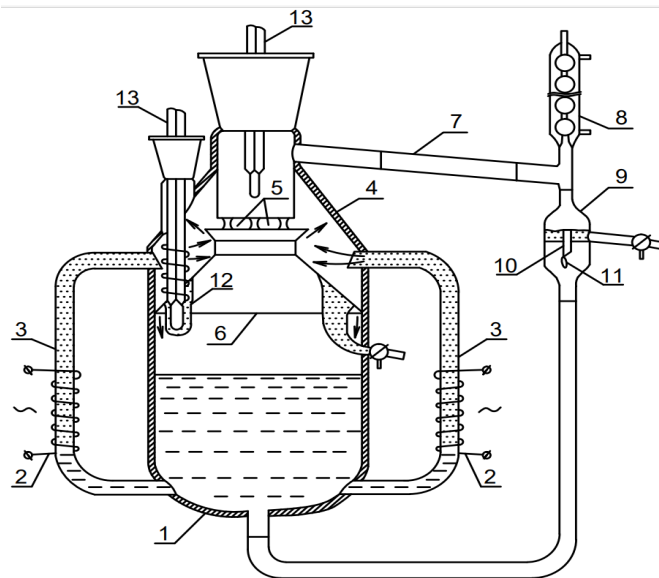


Рис. 1. Прилад для дослідження фазової рівноваги

Fig. 1. Instrument for phase equilibrium study

від 0,5 до 3 мас. % — біхроматно-йодометричний, в інтервалі від 3 до 35 мас. % — рефрактометричний, а в зоні більш високих концентрацій — пікнометричний методи. Відносна похибка досліджень не перевищувала 0,5 %.

Відомо, що фазова рівновага в системі етанол – вода добре вивчена для атмосферного тиску і досліджена для чотирьох значень тиску в межах від 50,6 до 6,66 кПа з кроком 10 кПа. В літературних джерелах відсутні експериментальні дані щодо дослідження фазової рівноваги в діапазоні від 103 до 50,6 кПа [12–15]. Особливий інтерес представляють дослідження в зоні низьких концентрацій етанолу — менше 3 мол. %, в яких працюють нижні частини бражних і ректифікаційних колон. Крім того, для теорії і практики ректифікації важливо знати область інверсії кривої фазової рівноваги за тиску, нижчого за атмосферний, по відношенню до аналогічної кривої за атмосферного тиску. Наявність таких достовірних даних дозволить більш обґрунтовано вирішити питання розподілу тиску між колонами в брагоректифікаційних установках.

Температуру пари і рідини визначали термометрами з ціною поділки 0,1 °С, тиск вимірювали з точністю до 0,133 кПа. Було досліджено водно-спиртові розчини концентрацією 0,006–88,1 мол. % з кроком 0,02–0,1 мол. % в зоні концентрацій дослідних розчинів від 0 до 3,0 мол. % і з кроком 2,0 мол. % в зоні більш високих концентрацій. Значення тиску змінювали в діапазоні 99,21–15,27 кПа з середнім кроком 13,33 кПа.

Критерієм для контролю достовірності отриманих результатів було вибір методів термодинамічної

перевірки і обробки експериментальних даних. З цією метою використовують методи Бушмакіна, Керінгтона–Редліха–Кістера, Вільсона та ін. [13,14]. Останнім часом широке визнання знайшов термодинамічний метод Цубоко-Катаями [15]. За отриманими експериментальними даними проводилось моделювання фазової рівноваги. В якості моделюючого рівняння використовували рівняння Цубоко–Катаями, найбільш просте із числа вдалих варіантів модифікації рівняння Вільсона. Рівняння Цубоко–Катаями було вихідним для розрахунку коефіцієнтів активності компонентів бінарної системи  $j_1$  і  $j_2$ , на основі яких розраховували концентрацію етанолу в парі в умовах рівноважного стану фаз. Це рівняння дає можливість визначати ступінь узгодженості  $D$  експериментальних і розрахункових даних за методом Редліха–Кістера, тобто встановити наявність в експериментальних даних систематичної похибки. Рівняння має наступний вигляд:

$$\ln j = \ln \frac{X_1 + V_2 X_2 / V_1}{X_1 + \lambda_{1,2} X_2} + (\beta - \beta_v) X_2; \quad (1)$$

$$\ln j = \ln \frac{X_2 + V_1 X_1 / V_2}{X_2 + \lambda_{2,1} X_1} + (\beta - \beta_v) X_1, \quad (2)$$

де  $V_1, V_2$  – молярні об'єми спирту і води;  $X_1, X_2$  – молярні долі компонентів спирту і води;  $\lambda_{1,2}, \lambda_{2,1}$  – параметри бінарної взаємодії компонентів;  $\beta, \beta_v$  – змінні величини.

$$\beta_v = \frac{V_2/V_1}{X_1 + V_2 X_2 / V_1} - \frac{V_1/V_2}{X_1 V_1 / V_2 + X_2}; \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\lambda_{1,2}}{X_1 + \lambda_{1,2} X_2} - \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{2,1} X_1 + X_2}; \quad (4)$$

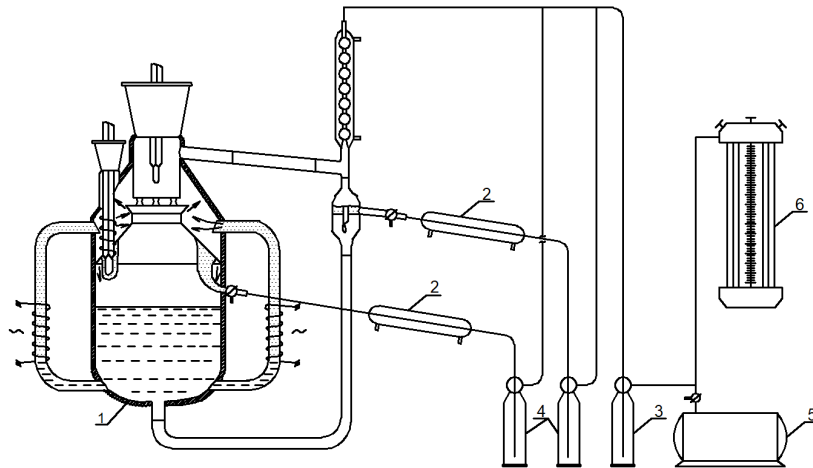


Рис. 2. Установка для дослідження фазової рівноваги в системі етиловий спирт–вода за тиску, нижчого за атмосферний

Fig. 2. Setup for the study of phase equilibrium in the ethanol-water systemt under pressures below atmospheric pressure

$V_{1,2}, V_{2,1}$ -відношення молярних об'ємів;

$$V_{1,2} = V_2/V_1; V_{2,1} = V_1/V_2. \quad (5)$$

Міжмолекулярна взаємодія компонентів суміші залежить в першу чергу від локальних концентрацій  $a_{ij}$ , виражених в об'ємних долях. Ці концентрації входять у вірогідні члени енергетичного розподілу Больцмана:

$$\frac{P_{1,1}}{P_{2,1}} = \frac{X_1 \exp\left(-\frac{a_{1,1}}{RT}\right)}{X_2 \exp\left(-\frac{a_{2,1}}{RT}\right)}; \quad \frac{P_{1,2}}{P_{2,2}} = \frac{X_1 \exp(-a_{1,2}/RT)}{X_2 \exp(-a_{2,2}/RT)} \quad (6)$$

де  $P_{1,1}$  – вірогідність знаходження молекул типу 1 поблизу одне одного;  $P_{2,2}$  – вірогідність знаходження молекул типу 1 поблизу одне одного;  $P_{1,2}$  – вірогідність знаходження молекул типу 1 і 2 поблизу одне одного.

Об'ємні долі спирту  $Z_1$  і води  $Z_2$ , виражені через цю вірогідність, дорівнюють:

$$Z_1 = \frac{P_{1,1}V_1}{P_{1,1}V_1 + P_{2,1}V_2} = \frac{1}{1 + \frac{X_2V_2}{X_1V_1} \exp[-(a_{2,1}-a_{1,1})/RT]} = \frac{X_1}{X_1 + \lambda_{1,2}X_2}; \quad (7)$$

$$Z_2 = \frac{1}{1 + \frac{X_1V_1}{X_2V_2} \exp[-(a_{1,2}-a_{2,2})/RT]} = \frac{X_2}{\lambda_{2,1}X_1 + X_2}; \quad (8)$$

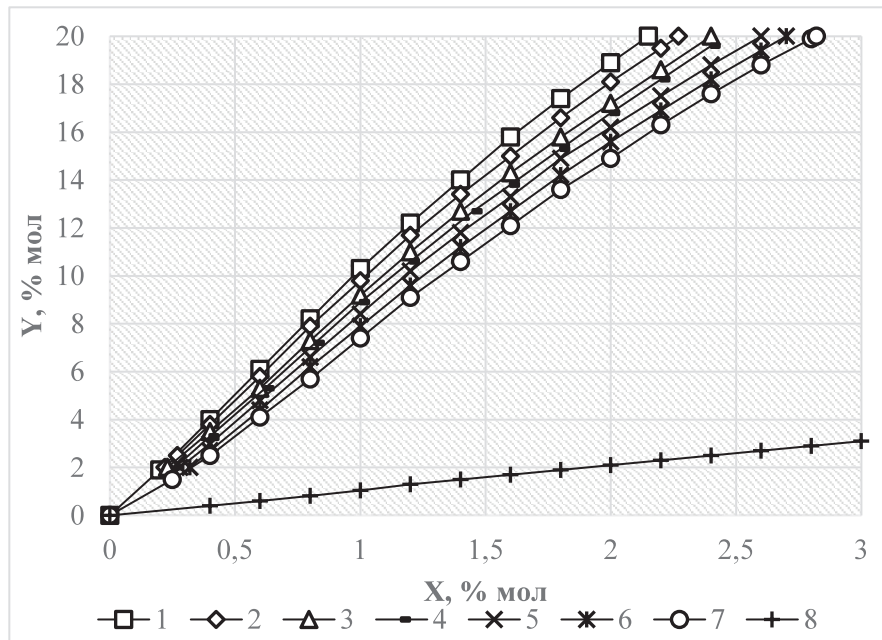
$$\lambda_{1,2} = \frac{V_2}{V_1} \exp[-(a_{2,1} - a_{1,1})/RT] = \frac{V_2}{V_1} \exp\left(-\frac{\lambda_{1,2}}{RT}\right); \quad (9)$$

$$\lambda_{2,1} = \frac{V_1}{V_2} \exp[-(a_{1,2} - a_{2,2})/RT] = \frac{V_1}{V_2} \exp\left(-\frac{\lambda_{2,1}}{RT}\right). \quad (10)$$

Отримані таким чином параметри рівняння Цубоко–Катаями дають досить задовільні апроксимації для аналізу процесів, в яких можливе встановлення фазової рівноваги. Параметри рівняння розраховували методом нелінійних регресій [5,12]. Оскільки  $\lambda_{1,2}$  і  $\lambda_{2,1}$  незалежні від температури (тиску) як мінімум до першої апроксимації, а тиск під час досліджень змінювався в порівняно вузьких межах (15,23–99,21 кПа), розрахункові параметри для етилового спирту і води були сталими і відповідно дорівнювали:  $\lambda_{1,2} = 416,045$  і  $\lambda_{2,1} = 184,058$  для всіх значень тиску. Ці значення використовували для моделювання фазової рівноваги для вказаних значень тиску. Метод Цубоко–Катаями дозволив визначити ступінь узгодженості експериментальних даних  $D$  шляхом розв'язання інтеграла Редліха-Кістера:

$$D = \frac{\int_0^1 \ln dx_1}{\int_0^x \ln \frac{1}{j_2} dx_1 / + \int_x^1 \ln \frac{1}{j_2} dx_1} \leq 0,02. \quad (11)$$

Результати розрахунку показали задовільну ступінь узгодженості розрахункових і експериментальних даних



**Рис. 3. Криві фазової рівноваги системи етанол-вода за тиску  $P$ , кПа:**  
 1 – 99,21; 2 – 85,74; 3 – 71,37; 4 – 57,27; 5 – 43,43; 6 – 29,33; 7 – 15,23  
**Fig. 3. Phase equilibrium curves of ethanol-water system under pressure  $P$ , kPa**  
 1 – 99,21; 2 – 85,74; 3 – 71,37; 4 – 57,27; 5 – 43,43; 6 – 29,33; 7 – 15,23

для системи етанол–вода за тиску, нижчого за атмосферний, отриманих за допомогою розробленої методики і представленої на рис. 2 установки. Розрахункове значення  $D$  не перевищувало 0,02. На основі експериментальних даних було побудовано графічні залежності, наведені нижче.

На рис. 3 показано криві фазової рівноваги системи етанол–вода за тиску  $P$ , нижчого за атмосферний, в зоні концентрацій 0–3 % мол.

Із представлених графіків видно, що із зменшенням тиску леткість етилового спирту суттєво зменшувалась і досягала мінімальної величини при концентрації етанолу, близької до нуля.

На рис. 4 показано зміну коефіцієнтів випаровування етанолу  $K$  в залежності від тиску  $P$  при концентрації етанолу, нижчої за 3 % мол. Із представлених графіків видно, що при концентрації етанолу, нижчої від 1,2–1,4 мол. %, коефіцієнт  $K$  зменшувався, причому тим швидше, чим нижчий залишковий тиск в системі. Так, при концентрації етанолу 0,006 мол. % при зменшенні тиску від 99,21 до 15,23 кПа коефіцієнт випаровування зменшувався від 10,5 до 3,9. Аномальна або асимптотична поведінка коефіцієнта випаровування при зменшенні концентрації спиртового розчину нижче 1,2–1,4 мол. % і залишкового тиску в системі нижче атмосферного пояснюється тим, що в даних умовах фазова рівновага бінарної системи етанол–вода наближається до критичного стану, в якому більшість фізико-хімічних характеристик можуть зазнавати різкої зміни, аж до

кількох порядків, що у даному випадку характерно для коефіцієнта  $K$ .

На рис. 5 показана інверсія кривих фазової рівноваги за тиску  $P$ , нижчого за атмосферний, по відношенню до аналогічної кривої за атмосферного тиску. Інверсія кривих фазової рівноваги в контексті фазових діаграм означає зміну напрямку кривої рівноваги при зміні тиску. Із представлених на рис. 5 графіків видно, що в зоні значень тиску 15,23–99,21 кПа інверсія кривих рівноваги відбувається в інтервалі концентрацій етанолу від 4,30 до 13,15 % мол.

Враховуючи результати фундаментальних досліджень, в НУХТ у співробітництві з ТОВ «ТІСЕР» було розроблено способи масообміну між рідиною і паром в режимі контрольованих циклів затримки і переливу рідини та конструкції масообмінних колонних апаратів циклічної дії для їх реалізації [16,17]. Для забезпечення максимально можливого ККД відомих типів тарілок необхідно було створити умови, за яких відбувалася задана у часі примусова затримка рідини на тарілках до повного насичення пари легколеткими компонентами рідини, а рідини — важколеткими компонентами пари. Для реалізації способу масообмінні колонні апарати було оснащено тарілками з рухомими сегментами, з'єднаними з приводними механізмами (пневмоциліндрами двобічної дії компанії FESTO), дія яких відбувалися відповідно до програми контролера.

Система управління включала щит, в якому був розташований контролер, і комп'ютер. Контролер M340

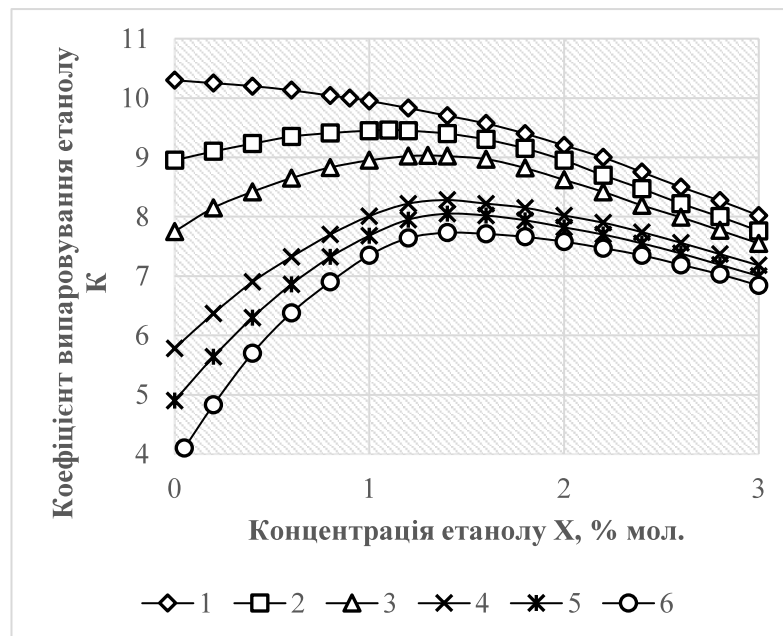


Рис. 4. Зміна коефіцієнтів випаровування етанолу  $K$  в залежності від тиску  $P$

Fig. 4. Variation of ethanol evaporation coefficients  $K$  as a function of pressure  $P$

включав процесор, мережевий модуль, блоки аналогових і дискретних входів/виходів. На комп'ютері була виконана умовна візуалізація технологічного процесу та надані необхідні засоби управління процесом. Для створення програмного управління пневмоциліндрами використано програмне середовище Unity Pro. Текст програми розроблений на двох мовах – FBD та ST. Для віддаленого управління виконавчим механізмом пневмоциліндрами та збору інформації від дискретних датчиків про їх положення через послідовний інтерфейс зв'язку, простоти монтажу пневматичної системи управління на об'єкті за рахунок підключення виконавчих механізмів шлангами через швидко роз'ємні з'єднання щита управління в системі автоматизації було передбачено використання стандартної електропневматичної шафи серії EPCB-RIO-MPA-32/32 з типом інтерфейсу зв'язку Profibus-DP з блоком підготовки повітря.

Встановлено гідродинамічні режими роботи тарілок: швидкість пари у вільному перерізі колони, оснащеної сітчастими тарілками, не повинна перевищувати 0,7 м/с, лускоподібними 1,2 м/с; оптимальна швидкість пари в отворах сітчастої тарілки становить 7,5–8,0 м/с, лускоподібної 12–14 м/с; для інтенсивного переливу рідини швидкість пари в отворах не повинна перевищувати 1,5–1,0 м/с.

Дослідження проводили у виробничих умовах ТОВ «Сторонибаський спиртовий завод» в процесі розгонки спиртовмісних фракцій. Час перебування рідини на тарілках розгінної колони становив 30–40 с. Встановлено, що в циклічному режимі альдегіди, естери і

акролеїн видалялися в повній мірі, ступінь вилучення вищих спиртів сивушної олії зросла на 38 %, а метилового спирту – на 15,6 %. При цьому кратність концентрування головних домішок збільшилась на 25 %, вищих спиртів на 40 %, метанолу на 34 %, акролеїну – на 36 %, а ізопропілового спирту на 42 %, а витрати гріночої пари зменшились на 40 % у порівнянні з типовою колоною стаціонарної дії.

## ВИСНОВКИ

1. Термодинамічна перевірка фазової рівноваги бінарної системи етиловий спирт – вода за тиску, нижчого за атмосферний, підтвердила достовірність отриманих експериментальних даних.

2. Враховуючи те, що леткість етанолу при зниженні тиску в зоні низьких концентрацій падає, при проектуванні БРУ, що працюють при зменшеному тиску, доцільно вакуумувати епюраційну, розгінну колони і колону кінцевого очищення.

3. При проектуванні бражних і спиртових колон, що працюють під розрідженням, необхідно враховувати миттєве зменшення коефіцієнтів випаровування етанолу в зоні концентрацій, нижчих від 1,2–1,4 % мол.

4. Встановлено, що фазова рівновага між рідиною і паром на теоретичній тарілці в ідеальних умовах досягається протягом 30–40 хв.

5. Подовження часу контакту пари і рідини на тарілках до 30-60 с в колонних масообмінних апаратах циклічної дії дозволяє наблизити ефективність кожної реальної тарілки до ефективності теоретичної, суттєво

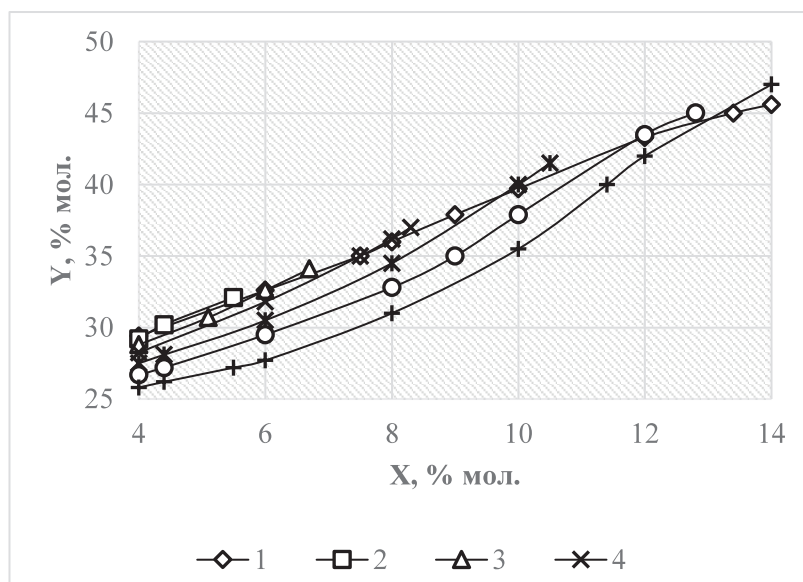


Рис. 5. Інверсія кривих фазової рівноваги за тиску, нижчого за атмосферний

Fig. 5. Inversion of phase equilibrium curves under pressures below atmospheric pressure

підвищити ККД тарілок і ступінь розділення багатокомпонентних сумішей шляхом створення умов, близьких для досягнення рівноважного стану фаз.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Шиян П.Л. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика: Монографія. К.: Видавничий дім «Асканія», 2009. 424 с.
2. Маринченко В.О., Домарецький В.А., Шиян П.Л., Швець В.М., Цыганков П.С., Жолнер І.Д. Технологія спирту / під ред. проф. В.О. Маринченко. Вінниця: «Поділля – 2000», 2003. 496 с.
3. Цыганков П.С., Цыганков С.П. Руководство по ректификации спирта. М.: ПИЩЕПРОМИЗДАТ, 2001. 400 с.
4. Морачевский А.Г., Смирнова Н.А., Пиотровская Е.М. и др.; Термодинамика равновесия жидкость – пар / під ред. А.Г. Морачевского. Л.: Химия, 1989. 344 с.
5. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч. Ч.1. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 304 с.
6. ДСТУ 4222:2003. Горілки, спирт етиловий та водно-спиртові розчини. Газохроматографічний метод визначення вмісту мікрокомпонентів. Чинний від 2004-01-01. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 18 с.
7. Янчевський, В.К., Ковальчук, В.П., Кравчук, З.Д., Попова, В.М., Олійник С.І. Інструкція по хіміко-технологічному контролю лікєро – горілчаного виробництва. Київ: УкрНДІспиртбіопрод, 1999. 459 с.
8. Цыганков П.С. Шиян П.Л., Булий Ю.В. Прибор для определения фазового равновесия бинарных и многокомпонентных систем при давлениях ниже атмосферного. Реахимтехника–2: Всесоюзная научная конференция. Днепропетровск: ДХТИ, 1984.
9. Цыганков П.С. Шиян П.Л., Булий Ю.В. Прибор для исследования фазовых равновесий жидкость – пар. Интенсификация технологии и совершенствование оборудования перерабатывающих отраслей АПК: Республиканская научно-техническая конференция. Киев: КТИПП, 1989.
10. Булий Ю. В. Прилад для дослідження фазової рівноваги в системі етанол – вода. Біотехнології продовольчих продуктів: проблеми і перспективи : Матеріали Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 10 груд. 2024 р. Київ, 2024. С. 92–94.
11. Устройство для исследования фазовых равновесий жидкость – пар : а. с. 1226229 СССР : G 01 N 25/02 / П. С. Цыганков, П.Л. Шиян, Ю.В. Булий. № 3802600/24-25 ; заявл. 12.10.1984 ; опубл. 23.04.1986, Бюл. № 15. 3 с.
12. Коган, В.Б., Фридман В.М., Кафаров В.В. Равновесие между жидкостью и паром . Л.: Наука, 1966. Т.1. 642 с.
13. Малежик, И.Ф. Расчет фазового равновесия бинарных и многокомпонентных систем спиртового производства. Известия вузов. Пищевая технология. 1973. № 2. С.148–151.
14. Процюк Т.Б., Метюшев Б.Д., Девятко В.И., Стабников В.Н. Равновесие жидкость – пар системы этанол – вода под атмосферным давлением. Известия вузов. Пищевая технология. 1969. № 1. С.129 – 132.
15. Стабников В.М., Процюк Т.Б., Ющенко Н.М. Изучение равновесия жидкость – пар в системе этанол – вода при различных давлениях/ Известия вузов. Пищевая технология. 1972. № 3. С.149 – 151.
16. Спосіб масообміну між рідиною і парою в колонному апараті : пат. 123917 Україна : (2021.01) В01D 3/30. № а201902118 ; заявл. 01.03.2019 ; опубл. 23.06.2021, Бюл. № 25.
17. Колонний масообмінний апарат циклічної дії : пат. 124773 Україна : В01D 3/30 (2006.01). № а201906568; заявл. 12.06.2019 ; опубл. 17.11.2021, Бюл. № 46.

## ENCHANCEMENT OF TRAY EFFICIENCY IN COLUMN MASS-EXCHANGE APPARATUS

Bulii Yu.V.<sup>1</sup>, Obodovych O.M.<sup>2</sup>, Bondar M.V.<sup>3</sup>, Sydorenko V. V.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD (Engin.), National University of Food Technologies, 68, Volodymyrska str., Kyiv-33, 01601, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1905-3706>, e-mail: yvbuliy@gmail.com

<sup>2</sup>Dr. Sci. (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>, e-mail: tdsittf@ukr.net

<sup>3</sup>PhD (Engin.), National University of Food Technologies, 68, Volodymyrska str., Kyiv-33, 01601, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5775-006X>, e-mail: bondmik@ukr.net

<sup>4</sup>PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>, e-mail: vrangel08@i.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2026.4>

Technological calculations of the column mass-exchange apparatus assume instantaneous transfer of volatile components of vapour and liquid phases, without considering the residence time the liquid on the trays. There is a threshold below which the contact time between the phases is insufficient to reach equilibrium, and as a result, the efficiency of commonly used tray types does not exceed 0.4-0.6.

The aim of the work was to study the phase equilibrium between liquid and vapour in the ethanol-water system under subatmospheric pressure; to select appropriate methods for thermodynamic validation of experimental data; to develop approaches for modeling mass transfer between liquid and vapour in cyclic column apparatuses in order to increase tray efficiency; and to evaluate their effectiveness in processing of ethanol-containing fractions under industrial conditions.

Research methods included analytical, computational, physicochemical and chromatographic techniques using instruments and methodologies applied in the production of rectified ethanol. The custom-designed experimental apparatus was developed, which allowed to increase the accuracy measurements and reduced the time required to

achieve phase equilibrium to 30–40 min. Experimental data on phase equilibrium in the ethanol-water system were obtained in the pressure range of 103 to 50.6 kPa specifically in the low ethanol concentration region (below 3.0 mol. %), which corresponds to the operation conditions in the lower sections of distillation and rectification columns. Based on the experimental data, phase equilibrium modeling was performed for the specified pressure. The Tsuboko-Katayama equation was used for modeling. Thermodynamic validation of the results demonstrated a satisfactory level of agreement between calculated and experimental data. Phase equilibrium curves were constructed, the relationship between ethanol evaporation coefficients and pressure was established, and the inversion of equilibrium curves was identified.

Mass transfer methods between liquid and vapor under controlled cycles of liquid holdup and overflow have been developed, along with designs of mass-exchange apparatus for their implementation. The hydrodynamic operating modes of trays under cyclic conditions have been determined. Experimental results have shown that the extending the contact time between phases on the trays to 30-60 seconds significantly increases the efficiency and reduces steam consumption up to 40%.

References 17, fig. 5.

**Key words:** phase equilibrium, mass transfer apparatus, plates, ethanol, controlled cycles.

1. *Shyian P.L.* Innovatsiini tekhnolohii spyrtovoi promyslovosti. Teoriia i praktyka: Monohrafiia [Innovative technologies of the alcohol industry. Theory and practice: Monograph]. K.: Vydavnychiy dim «Askaniia», 2009. 424 p. (in Ukr.)

2. *Marynchenko V.O., Domaretskyi V.A., Shyian P.L., Shvets V.M., Tsyhankov P.S., Zholner I.D.* Tekhnolohiia spyrty [Alcohol technology] / ed. prof. V.O. Marynchenko. Vinnytsia: «Podillia – 2000», 2003. 496 p. (in Ukr.)

3. *Cygankov P.S., Cygankov S.P.* Rukovodstvo po rektifikacii spirta [Guide to Alcohol Rectification]. M.: PIShhEPROMIZDAT, 2001. 400 p. (in Rus.)

4. *Morachevskij A.G., Smirnova N.A., Piotrovskaya E.M.* et al.; Termodinamika ravnovesiya zhidkost' – par [Thermodynamics of liquid-vapor equilibrium] / ed. A.G. Morachevskij. L.: Ximiya, 1989. 344 p. (in Rus.)

5. *Walas S.* Fazovy'e ravnovesiya v ximicheskoy texnologii [Phase Equilibria in Chemical Engineering] : In two Volumes. Volume 1. Translated from English. M.:Mir, 1989. 304 p. (in Rus.)

6. DSTU 4222:2003. Horilky, spyrty etylovyi ta vodno-spyrtovi rozchyny. Hazokhromatohrafichnyi metod vyznachennia vmistu mikrokomponentiv [Vodkas, ethyl alcohol and water-alcohol solutions. Gas chromatographic method for determining the content of microcomponents]. Effective from 2004-01-01. Official publication. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2003. 18 p. (in Ukr.)
7. Yanchevskiy, V.K., Kovalchuk, V.P., Kravchuk, Z.D., Popova, V.M., Oliinyk S.I. Instruktziia po khimiko-tekhnologichnomu kontroliu likero – horilchanoho vyrobnytstva [Instructions for chemical and technological control of liquor and vodka production ]. Kyiv: UkrNDIspyrtybioproduct, 1999. 459 p. (in Ukr.)
8. Cygankov P.S. Shiyan P.L., Bulij Yu.V. Pribor dlya opredeleniya fazovogo ravnovesiya binarny`x i mnogokomponentny`x sistem pri davleniyax nizhe atmosfernogo [Device for determining phase equilibrium of binary and multicomponent systems at pressures below atmospheric]. Reaximtexnika-2: Vsesoyuznaya nauchnaya konferenciya. Dnepropetrovsk: DXTI, 1984. (in Rus.)
9. Cygankov P.S. Shiyan P.L., Bulij Yu.V. Pribor dlya issledovaniya fazovy`x ravnovesij zhidkost` – par [Device for studying liquid-vapor phase equilibria]. Intensifikaciya tekhnologii i sovershenstvovanie oborudovaniya pererabaty`vayushhix otraslej APK: Respublikanskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya. Kiev: KTIPP, 1989. (in Rus.)
10. Bulii Yu. V. Prylad dlia doslidzhennia fazovoi rivnovahy v systemi etanol – voda [Device for studying phase equilibrium in the ethanol-water system]. Biotekhnolohii prodovolchych produktiv: problemy i perspektyvy : Proceedings of the International and Practical Conference, Kyiv, 10.12. 2024. Kyiv, 2024. P. 92–94. (in Ukr.)
11. Ustrojstvo dlya issledovaniya fazovy`x ravnovesij zhidkost` – par [Device for studying liquid-vapor phase equilibria]: author`s certificate 1226229 USSR : G 01 N 25/02 / P.S. Cygankov, P.L. Shiyan, Yu.V. Bulij. № 3802600/24-25; declared. 12.10.1984 ; published. 23.04.1986, bulletin. № 15. 3 p. (in Rus.)
12. Kogan, V.B., Fridman V.M., Kafarov V.V. Ravnovesie mezhdz zhidkost`yu i parom [Equilibrium between liquid and vapor ]. L.: Nauka, 1966. V.1. 642 p. (in Rus.)
13. Malezhyk, Y.F. Raschet fazovoho ravnovesiya bynarnykh y mnohokomponentnykh system spyrtovoho proyzvodstva [Calculation of phase equilibrium of binary and multicomponent systems of alcohol production]. Yzvestiya vuzov. Pyshechevaia tekhnolohiya. 1973. № 2. P.148–151. (in Rus.)
14. Proczyuk T.B., Metyushev B.D., Devyatko V.I., Stabnikov V.N. Ravnovesie zhidkost` – par sistemy` e`tanol – voda pod atmosferyny`m davleniem [Liquid-vapor equilibrium of the ethanol-water system under atmospheric pressure]. Izvestiya vuzov. Pishhevaya tekhnologiya. 1969. № 1. P.129 – 132. (in Rus.)
15. Stabnikov V.M., Proczyuk T.B., Yushhenko N.M. Izuchenie ravnovesiya zhidkost` – par v sisteme e`tanol – voda pri razlichny`x davleniyax [Study of liquid-vapor equilibrium in the ethanol-water system at different pressures ]. Izvestiya vuzov. Pishhevaya tekhnologiya. 1972. № 3. P.149 – 151. (in Rus.)
16. Sposib masoobminu mizh ridynoiu i paroiu v kolonnomu aparati [Mass transfer method between liquid and vapor in a column apparatus ] : pat. 123917 Ukraine : (2021.01) B01D 3/30. № a201902118 ; declared 01.03.2019; published 23.06.2021, bulletin. № 25. (in Ukr.)
17. Kolonnyi masoobminnyi aparat tsyklichnoi dii [Column mass exchange apparatus of cyclic action] : pat. 124773 Ukraine : B01D 3/30 (2006.01). № a201906568; declared. 12.06.2019; published 17.11.2021, bulletin. № 46. (in Ukr.)

Отримано 17.09.2025

Received 17.09.2025

Прийнято до друку 05.02.2026  
Accepted for publication 05.02.2026