

УДК 66.04.54

doi:10.20998/2413-4295.2024.01.08

ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ В ПРОЦЕСІ ВИПАРОВУВАННЯ РОЗЧИНІВ У ВИПАРНИХ АПАРАТАХ

Д. І. НЕЧИПОРЕНКО^{1*}, Т. Б. НОВОЖИЛОВА¹, А. О. САКУН¹, Є. В. ПОНОМАРЕНКО²

¹Кафедра Хімічна техніка та промислова екологія, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

²Кафедра Інтегровані технології, процеси і апарати Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА

*e-mail: Dmytro.Nechyporenko@khp.edu.ua

АНОТАЦІЯ Сьогодні, у зв'язку з різким подорожчанням енергоносіїв, у всьому світі надзвичайно гостро стоять питання зниження енерговитрат та обмеження шкідливих викидів у навколишнє середовище практично у всіх галузях промисловості. Тому в статті розглянуто питання енергозбереження під час процесу випарювання різноманітних розчинів у багатокорпусних випарних установках на підприємствах хімічної та харчової промисловості. В даний час на будь-якому підприємстві багатокорпусні випарні установки, що застосовуються для випарювання розчинів, є споживачами дуже великої кількості тепла і вимагають значних капітальних витрат. Відомо, що принцип багатоступеневого випарювання дає значний економічний ефект порівняно з одноступінчастим. Тому найбільш важливими завданнями зниження енерговитрат в процесі випарювання є: по-перше – зменшення витрати гріючої пари на одиницю випареної води, що досягається за рахунок паралельної подачі живильного розчину по корпусах багатокорпусної випарної установки і підігріву вихідного розчину до температури, близької до температури кипіння вторинними теплоносіями – конденсатом та екстрапаром першого корпусу випарного апарату; по-друге – удосконалення конструкції поверхні нагріву камери, що гріє та руху розчину і гріючого теплоносія. За допомогою розробленого програмного комплексу для автоматичного виконання теплотехнічних розрахунків багатокорпусних випарних станцій було проведено дослідження впливу температури пари, що гріє, на розміри поверхні теплообміну за інших рівних умов для чотирикорпусної та п'ятикорпусної випарних установок, а також досліджено процес кипіння розчину в широко щілинних каналах камери, що гріє, випарного апарату при різних режимах його роботи. Наведено розроблену конструкцію розчинної та парової пластин гріючої камери випарного апарату, яка дозволяє оптимізувати рух рідинної та парорідинної фази розчину в процесі нагріву. Отримані результати дозволяють видати рекомендації щодо найефективніших режимів роботи багатокорпусних випарних установок, а також встановити шляхи інтенсифікації їх роботи.

Ключові слова: випарний апарат; багатокорпусна випарна установка, конденсат; екстрапар; циркуляція; підживлення

WAYS TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION IN THE EVAPORATION PROCESS OF SOLUTIONS IN EVAPORATION APPARATUS

D. NECHIPORENKO¹, T. NOVOZHILOVA¹, A. SAKUN¹, E. PONOMARENKO²

¹Department of chemical engineering and industrial ecology, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

²Department of Integrated Technologies, Processes and Equipment, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Today, in connection with the sharp increase in the price of energy sources, the issue of reducing energy consumption and limiting harmful emissions into the environment in almost all industries is extremely acute all over the world. The issues of energy saving in the process of evaporation of various solutions in multi-effect evaporation plants at chemical and food industry enterprises are considered. It is known that the principle of multi-stage evaporation gives a significant economic effect compared to a single-stage one. Currently, at any enterprise, multi-body evaporation plants used for evaporation of solutions are consumers of a very large amount of heat and require significant capital costs. The most important tasks of reducing energy costs are: firstly, reducing the consumption of heating steam per unit of evaporated water, which is achieved through parallel supply of a nutrient solution through the housings of a multi-effect evaporation plant and heating the initial solution to a temperature close to the boiling point with secondary coolants - condensate and extra steam of the first evaporator housing; secondly, improving the design of the heating surface of the heating chamber and establishing optimal modes of movement of the solution and heating coolant. Using the developed software package for automatically performing thermal engineering calculations of multi-effect evaporation stations, a study was carried out of the influence of the temperature of the heating steam on the dimensions of the heat exchange surface, all other things being equal, for four-effect and five-effect evaporation plants, and also the process of boiling of the solution in the wide slot channels of the heating chamber of the evaporator was investigated. device under different operating modes. The developed design of the solution and steam plates of the heating chamber of the evaporator is presented, which allows optimizing the movement of the liquid and vapor-liquid phases of the solution during its heating. The results obtained make it possible to give recommendations on the most effective operating modes of multi-effect evaporation plants, as well as to establish ways to intensify their operation.

Keywords: evaporator; multi-effect evaporation plant, condensate; extrapair; circulation; recharge

Вступ

Зниження енерговитрат і зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище є дуже актуальним

питанням сьогодення і може бути досягнуто розробкою новітніх програм математичного моделювання роботи випарних установок (ВУ) та

впровадженням у виробництво раціональних теплових схем і конструкцій апаратів, які передбачають такий розподіл теплоносіїв стосовно технологічного процесу, при якому забезпечувались би задані технологічним регламентом параметри (температура, концентрація, тиск і т.і.) при мінімальній витраті теплової та електричної енергії.

1. Оптимізація роботи багатокорпусних випарних установок

Практично на будь-якому підприємстві де використовують процес концентрування різноманітних розчинів, встановлюється випарна установка, яка призначена для згущення розчину до необхідного вмісту сухих речовин. Процес випарювання широко застосовується в хімічній, харчовій та фармацевтичній галузях промисловості, а також при очищенні стічних вод від різних токсинів.

З метою економії первинної пари процес випарювання зазвичай проводиться у багатокорпусних випарних установках (БКВУ) з багаторазовим використанням теплоти вторинної пари [1,2]. Відомо, що принцип багатоступеневого випарювання дає значний економічний ефект порівняно з одноступінчастим. В даний час на будь-якому підприємстві БКВУ, що застосовуються для випарювання розчинів, є споживачами дуже великої кількості тепла і вимагають значних капітальних витрат. Однак теплотехнічні розрахунки БКВУ і досі залишаються дуже трудомісткими у зв'язку з труднощами створення автоматизованої системи для її розрахунку, що пов'язано з великою кількістю параметрів, що змінюються в процесі роботи БКВУ. При складанні раціональних теплових схем необхідно враховувати та використовувати новітні досягнення як в апаратному оформленні, так і в теплотехнічних розрахунках. Тому оптимізація роботи БКВУ може значно скоротити енерговитрати без значних капітальних вкладень.

Найбільш важливими завданнями зниження зазначених витрат є: по-перше – зменшення витрати гріючої пари на одиницю випареної води, що досягається за рахунок паралельної подачі живильного розчину по корпусах БКВУ і підігріву вихідного розчину до температури, близької до температури кипіння вторинними теплоносіями – конденсатом та екстрапаром першого корпусу випарного апарату (ВА); по-друге – удосконалення конструкції поверхні нагріву камери, що гріє [2,3].

В основу алгоритму розрахунку було покладено принципову схему прямої випарної станції, представлена на рис. 1.

У цій схемі максимальну кількість підігрівачів вихідного розчину було прийнято n_k+3 . Дійсна кількість підігрівачів може бути меншою за максимальну і зазвичай вибирається в залежності від конкретних умов виробництва.

З проведеного аналізу чисельного експерименту можна зробити такі висновки:

1. Підвищення температури пари, що гріє, призводить до значного зниження поверхні нагріву гріючої камери ВУ. Однак підвищення температури, у свою чергу, дуже сильно впливає на термостійкість розчини. Тому необхідно обирати такі конструкції камер, що гріють, в яких час знаходження термостійких розчинів зводилося б до мінімуму

2. При подачі вхідного розчину на першу випарну установку БКВУ $f_1=(50, 60, 70, 80)$ % ознака, що відповідає схемі підігріву розчину, коли другий підігрівач обігривається конденсатом пари першого корпусу, а третій – екстрапаром першого корпусу, виключається, так як спостерігається зростання площі поверхні теплообміну.

3. З усіх розглянутих варіантів кращий варіант з примусовою циркуляцією розчину по корпусах $f_1=(80-20-0-0)$ %, так як при цій схемі площа теплообмінної поверхні зменшується майже на 50 % однак в водночас збільшуються енерговитрати на насосне обладнання та його експлуатацію.

4. Площі при природній циркуляції та розподілі підживлення по корпусах $f_1=(50-35-15-0)$ % зростають майже на 17 % у порівнянні зі схемою $f_1=(60; 70 \text{ та } 80-0)$ %, а при примусовому – на 11 %.

5. Витрата гріючої пари, при природній і примусовій циркуляції та розподілі $f_1=(50-35-15-0)$ % менше на 10%, ніж при схемі живлення $f_1=(60; 70 \text{ і } 80)$ %.

- ✓ простотою пристрою;
- ✓ компактністю;
- ✓ малою металоємністю;
- ✓ високим коефіцієнтом теплопередачі;
- ✓ малим часом контакту розчину з поверхнею нагрівання;
- ✓ легкістю зміни величини поверхні, що гріє;
- ✓ доступністю поверхні, що гріє, для механічного чищення від накипу.

Мінімальний час контакту розчину з поверхнею, що гріє, дозволяє випарювати такі розчини, які по своїх фізико-хімічних властивостях дуже чутливі до тривалих впливів високої температури.

Незважаючи на всі ці переваги, ВА із ШПКГ, поки ще не знайшли широкого застосування в нашій країні. Це пояснюється тим, що вони мало вивчені, відсутні дані про їхню роботу й вплив різних способів руху розчину в каналах на продуктивність апарата.

Дослідженням процесу кипіння розчину в тонкій плівці (орієнтовно 2-8 товщини прикордонного шару, на наш погляд приділялася недостатня увага. В основному вивчалися процеси кипіння розчинів або у великому об'ємі, або в повністю заповненої розчином, що рухається, трубці [5].

2. Удосконалення конструкції поверхні нагріву камери, що гріє

Останнім часом для випарювання розчинів у багатьох галузях промисловості знайшов застосування новий тип випарного апарата, поверхня теплообміну якого виконана з листового матеріалу

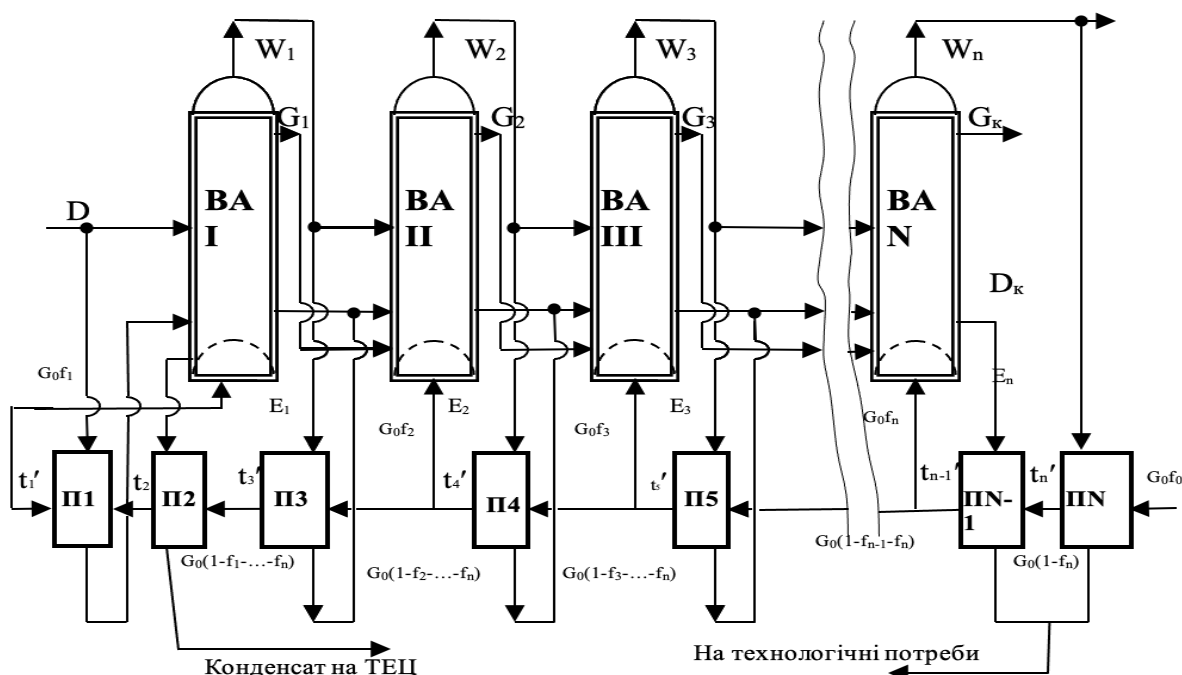


Рис. 1 – Прямоточна багатокорпусна випарна установка:

BA 1, BA 2, ..., BAN – випарні апарати відповідно за ступенями підігріву; П1, П2, ..., ПN – підігрівачі вихідного розчину; D1 – пар, що гріє; W1, W2, ..., Wn, – вторинні пари; G0 – вихідний розчин; t1, t2, ..., tn – температури вихідного розчину після відповідного підігрівача; E1, E2, ..., En, – екстрапари по корпусах ВА; f – підживлення ВА вихідним розчином

різного профілю [4]. Це випарні апарати з розбірними або нерозбірними ширококанальними пластинчастими камерами, що гріють (ШПКГ).

Ці апарати в порівнянні із традиційними трубчастими ВА характеризуються наступними перевагами:

У зв'язку з тим і сьогодні практично відсутня надійна методика теплового розрахунку ВА зі стікаючою плівкою. Найвний розрахунковий нормативний матеріал дає завищене значення коефіцієнта тепловіддачі, тому що рівняння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі має вигляд:

$$\alpha = \frac{2,35 + 0,047 Re^{0,2} + 0,0021 Re^{0,8} Pr^{0,65}}{(v^2 Re)^{0,333}}$$

Дане рівняння не враховує вплив на процес теплообміну теплового навантаження (корисної різниці температур). Тому це рівняння дає значно завищене значення коефіцієнта тепловіддачі.

При розробці існуючих методів розрахунку також не враховувались наступні фактори:

- ✓ імовірність зародження на поверхні нагріву парових пухирців;
- ✓ швидкість пароутворення (ріст парових пухирців і частота їх відриву від поверхні нагріву);
- ✓ напрям руху парових пухирців що відірвалися у плівці.

Відомо, що процес кипіння – це безперервне і постійне утворення з розчинника парової фази у вигляді окремих парових пухирців.

Головною умовою випару розчинника з розчину при кипінні є перегрів розчину до температури насичення при тиску поза плівкою, тобто система повинна бути в стані статичної рівноваги.

Згідно з законом зростання ентропії імовірність зародження парового пухирця на поверхні нагріву може бути описана вираженням $e^{a(s_1-s_2)}$, в експоненті якого стоїть зміна ентропії при безперервному переході системи зі стану з більшою ентропією «s1» у стан з меншою ентропією «s2», що і відповідає стану рівновазі. Зміна ентропій визначається термодинамічною постійною « ϑ_t », яка залежить відповідно від тиску, при якому безпосередньо проводиться процес випаровування й типу розчину. З рівнянь теплового балансу й Клайперона-Клаузіуса було знайдено

$$\vartheta_t = \frac{r\rho''}{c\rho}$$

де r – схована теплота пароутворення при досягненні системи рівноважного стану, Дж/кг; ρ'' , ρ – відповідно щільності пари і розчину при рівноважному стані системи, кг/м³; c – теплоємність розчину, Дж/кг·К.

Таким чином, імовірність зародження парового міхура носить експонентний характер і є функцією $e^{a\vartheta_t}$, де a безрозмірний коефіцієнт.

Як відомо процес випаровування розчинника з розчину здійснюється в наступній послідовності.

Спочатку паровий пухирець утворюється в центрі паротворення, потім росте в об'ємі й при досягненні критичного розміру відривається від поверхні нагрівання й спливає у плівці, що рухається уздовж неї, захоплюючи за собою деяку кількість розчину із пристенної зони (так званий прикордонний шар) до верхньої поверхні плівки.

Простір, який звільнився після відриву пухирця, миттєво заповнюється новою порцією розчину і при досягненні температури, що перевищує температуру насичення на величину термодинамічної постійної « ϑ_1 » (ентропія « s_1 ») знову починається зародження нового пухирця. У процесі вспиття парового пухирця з навколишнього його розчину випаровується розчинник і тому він росте у геометричному розмірі. З вище наведеного зрозуміло що від зовнішньої поверхні плівки паровий пухирець відривається в паровий простір з температурою рівноваги (ентропія « s_2 »).

З усього вищевикладеного можливо зробити наступні висновки: інтенсивність теплообміну при кипінні розчину залежить від швидкості пароутворення на поверхні нагріву (частота зародження й відриву парового пухирця) і безумовно від швидкості вспиття парового пухирця – процес турбулізації плівки розчину.

Як відомо, швидкість пароутворення визначається питомим тепловим потоком « q », який передається від поверхні нагрівання до розчину який нагрівається, й термодинамічними характеристиками пари, що утвориться ($r \rho^*$), тобто

$$\omega = \frac{q}{r \rho^*}.$$

Як ми уже казали одним з провідних факторів, що впливають на інтенсивність тепловіддачі при кипінні в плівці, є швидкість вспиття парового пухирця тому що паровий пухирець, що спливає викликає процес турбулізації плівки розчину, а швидкість видалення парового пухирця із плівки в парову зону впливає на частоту відриву парового пухирця від поверхні нагрівання. На формування кількості парових пухирців й швидкість їх вспиття зазвичай впливають так звані сили поверхневого натягу – системи «пара-рідина».

Відомо що від величини сил поверхневого натягу залежить товщина плівки та режим випару й вспиття парового пухирця.

Режими випару й вспиття парового пухирця відповідно характеризуються критеріями випару Рейнольдса й вспиття Вебера:

$$\text{Re} = \frac{q}{r \rho^* v} \left(\frac{\sigma}{g \rho} \right)^{0,5};$$

$$\text{We} = \frac{\rho^* \omega^2}{\sigma} \left(\frac{\sigma}{g \rho} \right)^{0,5}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі є функція наступних змінних

$$\alpha = f(q; \sigma; \rho; \rho^*; r; v; \omega^2).$$

З урахуванням сказаного, методом аналізу розмірності було отримане рівняння для процесу теплообміну при кипінні в поверхні, що рухається уздовж, нагрівання плівки, що має вигляд

$$\text{Nu} = x_1 \text{Re}^{x_2} \cdot \text{We}^{x_3} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot e^{a \vartheta_1},$$

де x_1, x_2, x_3, a – безрозмірні коефіцієнти.

Для перевірки на адекватність отриманого рівняння були проведені експерименти на лабораторній установці, що представляє собою випарний апарат з ШПКГ, із шириною каналу від 8 до 12 мм [6-10].

Необхідно відзначити, що при кипінні розчину в каналі турбулізація потоку створюється за рахунок пухирців пари, які утворюються й відриваються від поверхні, що гріє, то на відміну від гофрованої пластини пластинчастих теплообмінників, ширококанальна пластина випарного апарата може виконуватися плоскою із привареними до неї ребрами жорсткості [11,12].

Значним недоліком ШПКГ є підвищений гідравлічний опір щілини, що викликає необхідність установки насоса для створення примусової циркуляції розчину [13-17].

Тому була проведена дослідницька робота із ШПКГ з шириною каналу 10-12 мм, по вивченню процесу кипіння розчину у відносно великому об'ємі. Збільшення ширини каналу камери, що гріє, до 10-12 мм у свою чергу дозволило до деякої міри знизити гідравлічний опір каналів камери, що гріє.

3. Мета й завдання експериментальної роботи

Метою даної експериментальної роботи було:

- ✓ визначення оптимальних умов роботи ВА із ШПКГ;
- ✓ визначення основних технічних характеристик ВА із ШПКГ;
- ✓ конструктивне оформлення вузлів ВА із ШПКГ.

Звідси впливають конкретні завдання дослідження:

1. Визначення залежності продуктивності випарного апарата із ШПКГ, від питомого теплового навантаження при постійній ширині щілини, рівної 10 мм.
2. Визначення гідравлічних опорів ШПКГ при різних режимах роботи ВА.
3. Визначення оптимальних умов роботи ВА із ШПКГ.
4. Конструктивне відпрацювання вузлів ВА.

Для рішення поставлених завдань передбачався наступний порядок і обсяг робіт:

1. Розробка конструкції ширококанальної пластини і її виготовлення.
2. Виготовлення моделі ВА із примусовою циркуляцією та ШПКГ із плоских пластин з привареними упорами.
3. Монтаж, налагодження установки й оснащення її контрольно-вимірювальними приладами.

4. Вихід на робочі режими й вивчення процесу випарювання розчинів у ВА із ШПКГ при плівковому режимі кипіння з висхідно-падаючим і з падаюче-висхідним потоком розчину в каналі при двох варіантах уведення киплячого розчину в сепаратор.

5. Обробка отриманих експериментальних даних.

6. Розрахунок техніко-економічних показників ВА із ШПКГ і видача рекомендацій із застосування.

На рис. 2 наведено схеми ВУ для вивчення процесу випарювання розчинів.

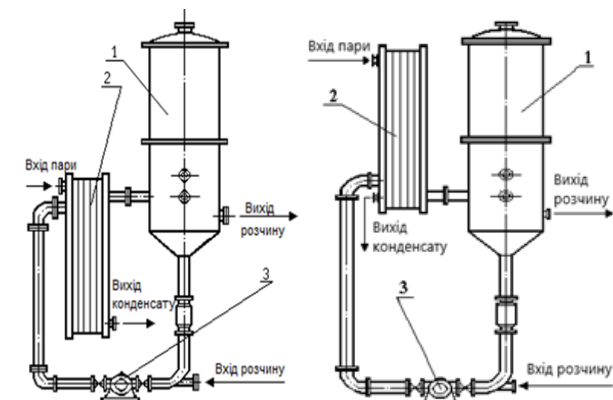


Рис. 2 – Випарна установка з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє: а) з падаюче-висхідним потоком розчину в каналі; б) з висхідно-падаючим потоком розчину в каналі 1 - сепаратор; 2 - розбірна ширококанальна пластинчаста камера, що гріє; 3 - насос

Під час проведення досліджень змінювалися:

- параметр упарювання від $\vartheta_{тер} = 0,0569$ °С до $\vartheta_{тер} = 0,441$ °С;

- корисна різниця температур від $\Delta t_n = 10$ °С до $\Delta t_n = 25$ °С;

- відношення площ перерізу зворотної циркуляційної труби до площі перерізу каналів гріючої камери від $n_{ц} = 0,1$ до $n_{ц} = 0,3$;

- теплове навантаження від $q = 23000$ Вт/м² до $q = 74250$ Вт/м².

4. Обговорення

Грунтуючись на отриманих даних, були побудовані графіки залежності питомого теплового навантаження q від корисної різниці температур Δt_n та коефіцієнта тепловіддачі α_2 від Δt_n , які показані відповідно на рис. 3 та 4.

З рис. 3 видно, що збільшення корисної різниці температур призводить до збільшення теплового навантаження. На характер цього збільшення впливає параметр упарювання.

Як видно з рис. 4, зменшення параметра упарювання призводить до збільшення в'язкості розчину та обсягу паророзчинної суміші в зоні кипіння. Перше призводить до зменшення коефіцієнта тепловіддачі ($\alpha \sim \mu^{-0,49}$), а друге – до збільшення гідравлічного опору контуру циркуляції.

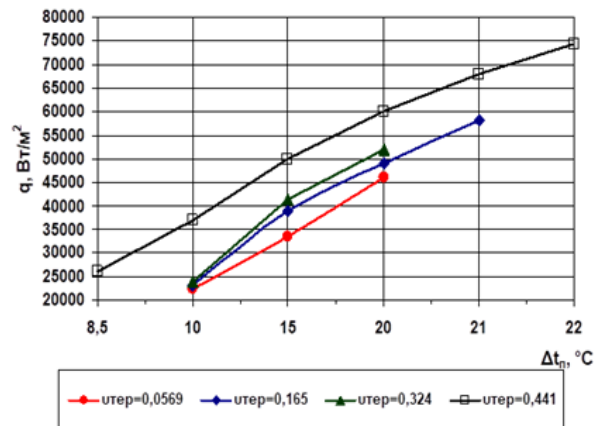


Рис. 3 – Залежність питомого теплового навантаження q від корисної різниці температур Δt_n

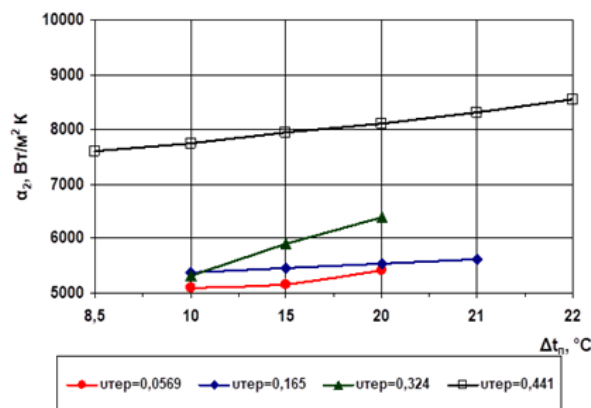


Рис. 4 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі α_2 від корисної різниці температур Δt_n при $n_{ц} = 0,15$

При значенні $n_{ц} = 0,05 \div 0,1$ в канал надходить мала кількість розчину і можливий повний перехід розчину, що випаровується, в парову фазу. При цьому має місце повне утворення парової фази (заповнення каналів паром) та утворення тонкої плівки розчину на поверхні нагріву.

Збільшення значення $n_{ц}$ більше 0,16 призводить до значного збільшення зони конвективного теплообміну та зменшення зони бульбашкового кипіння, що призводить до зменшення інтенсивності перенесення тепла.

Як видно з проведеного аналізу роботи гріючої камери ВА для максимальної інтенсифікації процесу випарювання необхідно, щоб кратність руху розчину $n_{ц}$ по контуру дорівнювала 0,15.

Висновки

На підставі отриманих результатів експериментів з вивчення роботи ВА з розбірною ширококанальною пластинчастою камерою, що гріє, можна зробити наступні висновки:

- ВА з ШПКГ мають високі теплотехнічні показники та відносяться до найбільш ефективних конструкцій.

- Ефективність роботи ВА залежить від характеру руху розчину.

- На ефективність роботи ВА впливає характер введення паророзчинної суміші в сепаратор. Так, продуктивність ВА з тангенціальним введенням на 8-10% нижче, ніж при прямому введенні.

- Гідрравлічний опір ШПКГ зі стікаючою плівкою вище ніж у трубчастих (до 1800 кг/м²) тому цей тип камери можна використовувати лише в апаратах з примусовою циркуляцією.

- Коефіцієнт теплопередачі ВА з ШПКГ майже на 60% вище, ніж ВА з трубчастою камерою, що гріє.

Список літератури

1. Кулінченко В. Р., Ткаченко С. Й. *Теплопередача з елементами масообміну (Теорія і практика процесу). Навч. посіб.* Вінниця: ВНТУ, 2012. 180 с.
2. Кулінченко В. Р. Мирончук В. Г. *Випарювання і випарні апарати у розрахунках і конструюванні: Навч. посіб.* К.: Кондор, 2006.– 392 с.
3. Шевель С. В., Воробійов М. В. *Теплообмін при кипінні. Навч. посіб.* з дисципліни «Теплообмін при фазових перетворюваннях і випромінюванні». Київ КП ім. Ігоря Сікорського, 2021. 55 с.
4. Данилов Ю. Б. *Науково-практичні засади створення енергозберігаючого теплообмінного та випарного обладнання нафтохімічного комплексу України: дис. д-ра техн. наук / Ю. Б. Данилов. Х., 2008. 376 с.*
5. Михайличенко В. П., Пітак І. В., Новожилова Т. Б. Дослідження процесів гідродинаміки у випарному апараті з примусовою циркуляцією та кипінням розчину в трубах ScienceRise. Харків. НВП ПП «Технологічний центр». 2017. № 4 (33). 76. С. 41-45. doi:10.15587/2313-8416.2017.97799.
6. Фокін В. С., Данилов Д. Ю., Нечипоренко Д. І. Дослідження процесу кипіння розчину в щільних каналах камери, що гріє. *Інтегровані технології й енергозбереження.* Харків. НТУ «ХПІ», 2008. №3. С. 16-20.
7. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V. Investigation of two-phase flow hydrodynamics of heat exchange tube outlet falling film evaporator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2021. № 864. doi: 10.1063/5.0068409.
8. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V., Khomyakova T. V. Mathematical model of two-phase flow processes in heat exchange tubes of the falling film evaporator. *AIP Conference Proceedings.* 2021. № 2388. doi: 10.1088/1755-1315/864/1/012037.
9. Нечипоренко Д. І., Панасенко В. О., Новожилова Т. Б. Дослідження процесу кипіння розчинів у розбірній ширококанальній пластинчастій грючій камері випарного апарату. *Праці НДІОХІМ.* 2010. Т. 76. С. 107–112.
10. Матісс Д. Ю., Жабина І. О. Шляхи зниження енерговитрат при випаровуванні розчинів у багатокорпусних випарних установках. *X Міжнародна науково-практична студентська конференція магістрантів (05–08 квітня 2016 року): матеріали конференції: у 3-х ч. – Ч. 3 / за ред. проф. Є.І. Сокола.* Харків : НТУ «ХПІ», 2016. С. 47-48.
11. Михайличенко В. П., Ракова К. О. Шляхи зниження енерговитрат при виробництві напівсолодких вин. *XI Міжнародна науково-практична конференція*

магістрантів та аспірантів: матеріали конф., 18-21 квітня 2017 р.: Ч. 3. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. С. 27.

12. Нечипоренко Д. І., Слізаров А. П. Інтенсифікація процесу сушіння молока. *Modern research in world science. Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua".* Львів, Україна. 2023. С. 308-311.
13. Yu N., Hu H., Xia W., Zhao Z., & Cheng. Iron diselenide/carbon black loaded mushroom-shaped evaporator for efficiently continuous solar-driven desalination. *Journal of Colloid and Interface Science.* 2024. 658. P. 238-246.
14. de Paula C. H., Duarte W. M., Rocha T. T. M., de Oliveir, R. N., & Maia A. A. T. Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. *International Journal of Refrigeration.* 2020. 113. P. 10-20.
15. Xu J., Wang G., Zhu L., Jiang G., Lei Y., Zeng Z., & Xue L. Superwetting reduced graphene oxide/alginate hydrogel sponge with low evaporation enthalpy for highly efficient solar-driven water purification. *Chemical Engineering Journal.* 2023. 455. P. 140704.
16. Fan T., Lan S., & Li Y. Synergistic, Adaptive, Continuous-flow, and Low-carbon Solar Evaporation and Electrochemical Treatment (SEET) System—A Combined Numerical and Experimental Study. *Separation and Purification Technology.* 2023. 323. P. 124354
17. Xie M., Zhang P., Cao Y., Yan Y., Wang Z., & Jin C. A three-dimensional antifungal wooden cone evaporator for highly efficient solar steam generation. *npj Clean Water.* 2023. 6(1). 12. doi: 10.1038/s41545-023-00231-3.

References (transliterated)

1. Kulichenko V., Tkachenko C. *Heat transfer with mass transfer elements (Theory and practice of the process).* Education manual. Vinnitsia. VNTU, 2012. 180 p.
2. Kulichenko V. Myronchuk V. *Evaporation and evaporation devices in calculations and design: Study.* Manual. K. Condor, 2006. 392 p.
3. Shevel E., Vorobyov M. *Heat exchange during boiling.* Education manual from the discipline "Heat exchange during phase transformations and radiation". Kyiv. KPI named after Igor Sikorsky 2021. 55 p.
4. Danilov Yu. *Scientific and practical principles of creating energy-saving heat exchange and evaporative equipment of the petrochemical complex of Ukraine:* dissertation. Dr. Tech. of Sciences / Yu. Danilov. Kh., 2008. 376 p.
5. Mihaylichenko V., Pitak I., Novozhylova T. Research of hydrodynamics processes in the evaporator with forced circulation and boiling of solution in pipes. 2017. ScienceRise, 2017, 4(2), pp. 41-45, doi:10.15587/2313-8416.2017.97799.
6. Fokin V., Danilov D., Nechyporenko D. Research of the boiling process of the solution in the slit channels of the heating chamber. *Integrated technologies and energy saving.* Kharkiv. NTU "KhPI", 2008, 3, pp. 16-20.
7. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V. Investigation of two-phase flow hydrodynamics of heat exchange tube outlet falling film evaporator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 2021, 864, doi: 10.1063/5.0068409.
8. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V., Khomyakova T. V. Mathematical model of two-phase flow processes in heat exchange tubes of the falling film

- evaporator. *AIP Conference Proceedings*, 2021, 2388, doi: 10.1088/1755-1315/864/1/012037.
9. Nechyporenko D., Panasenko V., Novozhilova T. Study of the boiling process of solutions in the collapsible wide-channel plate heating chamber of the evaporating apparatus. *Proceedings of NDIOHIM*, 2010, 76, pp. 107–112.
 10. Matisse D., Zhabina I. Ways of reducing energy consumption during the evaporation of solutions in multi-body evaporation plants *X International scientific and practical student conference of master's students (April 05–08, 2016): conference materials: in 3 parts - Part 3 / edited by Prof. E. Sokol – Kharkiv: NTU "KhPI"*, 2016. P. 47–48.
 11. Mihaylichenko V., Rakova K. Ways to reduce energy consumption in the production of semi-sweet wines *XI International scientific and practical conference of master's and postgraduate students: conference materials, April 18–21, 2017: Part 3*. Kharkiv. NTU "KhPI", 2017. P. 27.
 12. Nechiporenko D., Yelizarov A. Intensification of the milk drying process Modern research in world science. *Proceedings of the 12th International scientific and practical conference. SPC "Sci-conf.com.ua"*. Lviv, Ukraine. 2023, pp. 308–311.
 18. Yu N., Hu H., Xia W., Zhao Z., & Cheng. Iron diselenide/carbon black loaded mushroom-shaped evaporator for efficiently continuous solar-driven desalination. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 658, pp. 238–246.
 19. de Paula C. H., Duarte W. M., Rocha T. T. M., de Oliveir, R. N., & Maia A. A. T. Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113, pp. 10–20.
 20. Xu J., Wang G., Zhu L., Jiang G., Lei Y., Zeng Z., & Xue L. Superwetting reduced graphene oxide/alginate hydrogel sponge with low evaporation enthalpy for highly efficient solar-driven water purification. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455, pp. 140704.
 21. Fan T., Lan S., & Li Y. Synergistic, Adaptive, Continuous-flow, and Low-carbon Solar Evaporation and Electrochemical Treatment (SEET) System—A Combined Numerical and Experimental Study. *Separation and Purification Technology*, 2023, 323, pp. 124354.
 13. Xie M., Zhang P., Cao Y., Yan Y., Wang Z., & Jin C. A three-dimensional antifungal wooden cone evaporator for highly efficient solar steam generation. *npj Clean Water*, 2023, 6(1), 12, doi: 10.1038/s41545-023-00231-3.

Відомості про авторів (About authors)

Нечипоренко Дмитро Ігорович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID:0000-0002-5570-1061; E-mail: Dmytro.Nechyporenko@khi.edu.ua.

Dmytro Nechiporenko – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID:0000-0002-5570-1061; E-mail: Dmytro.Nechyporenko@khi.edu.ua.

Новожилова Тетяна Борисівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID:0000-0003-2551-6954; E-mail: Tetiana.Novozhylova@khi.edu.ua.

Tatiana Novozhilova – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID:0000-0003-2551-6954; E-mail: Tetiana.Novozhylova@khi.edu.ua.

Сакун Антоніна Олегівна – доктор філософії в галузі екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-1079-7856; E-mail: baranova647@gmail.com.

Antonina Sakun – PhD, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor at the chemical engineering and industrial ecology Department, Kharkiv, Ukraine; ORCID:0000-0002-1079-7856; E-mail: baranova647@gmail.com.

Пономаренко Євгенія Дмитрівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Інтегровані технології, процеси і апарати м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0004-0185-7644; E-mail: yevheniia.ponomarenko@khi.edu.ua.

Eugenia Ponomarenko – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor at the Department of Integrated Technologies, Processes and Equipment Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0004-0185-7644; E-mail: yevheniia.ponomarenko@khi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Нечипоренко Д. І., Новожилова Т. Б., Сакун А. О. Пономаренко Є. Д. Шляхи зниження енерговитрат а процеси випаровування розчинів у випарних апаратах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 1 (19). С. 58–64. doi: 10.20998/2413-4295.2024.01.08.

Please cite this article as:

Nechiporenko D., Novozhilova T., Sakun A., Ponomarenko E. Ways to reduce energy consumption in the evaporation process of solutions in evaporation apparatus. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 1(19), pp. 58–64, doi:10.20998/2413-4295.2023.01.08.

*Надійшла (received) 06.02.2024
Прийнята (accepted) 16.03.2024*