

Бабак Т.Г., доцент, Биканов С.М., к.техн.н., доцент, Горбунов К.О., к.техн.н., професор, Пономаренко Є.Д., доцент, Соловей Л.В., ст.викл.

ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПОТОКІВ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ГЕТЕРОАЗЕОТРОПНОЇ СУМІШІ ФУРФУРОЛ-ВОДА НА ДВОХ ВІДГІННИХ КОЛОНАХ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: тепла інтеграція, пінч-аналіз, ректифікація, гетероазеотропні суміші, порогова задача, оптимізація тепломережі

Промислове розділення азеотропних сумішей є одним з найбільш поширених процесів в хімічно-технологічних системах. Ректифікація азеотропних сумішей потребує спеціальних методів організації цього процесу у зв'язку з особливостями процесу кипіння. Азеотропні суміші мають сильні відхилення від закону Рауля для ідеальних розчинів, у відповідності до яких парціальний тиск компонента насиченої пари пропорційний мольній частці відповідного компонента у розчині. При цьому, за третім законом Коновалова, розчинам, склад рівноважної пари над якими співпадає із складом розчинів, відповідають точки екстремуму на кривій залежності загального тиску пари (або температури кипіння) від складу розчину. Азеотропні суміші поділяються на позитивні та негативні, в яких температура кипіння азеотропу відповідає відповідно мінімуму або максимуму на ізобарі діаграми рівноважності рідина-пара для бінарної системи.

Суміш фурфурол-вода належить до класу частково-розчинних (гетероазеотропних) сумішей позитивних азеотропних сумішей. В цьому випадку ректифікація проводиться на двох колонах або в одноколонному апараті, при забезпеченні одним, а може і двома відстійниками, що дозволяють у значний мірі полегшити процес розділення за рахунок природнього процесу самовідділення шарів [1, 2].

Будь який процес ректифікації потребує велику потужність енергоносіїв як для нагріву та випаровування, так і для конденсації пар та охолодження технологічних потоків. У випадку розділення гетероазеотропних сумішей використання відстійників потребує додаткових енерговитрат – на охолодження для забезпечення температури ефективного розшарування гетероазеотропної суміші при відповідній температурі та нагріву фракції для повернення до колони.

Усі ці фактори є підставами для використання теоретично обґрунтованої та практично доведеної методики до проектування енергоефективних хіміко-технологічних систем, якою є пінч-аналіз [3, 4, 5]. Принципи пінч-аналізу щодо побудування систем оптимального використання теплової енергії технологічних потоків та, відповідно, споживання енергії зовнішніх енергоносіїв мають місце у різноманітних сферах виробництва, тобто у нафтохімічній, харчовій, фармацевтичній, хімічній [6, 7, 8, 9, 10].

Теплова інтеграція потоків процесу розділення суміші фурфурол-вода, що реалізована на різних варіантах технологічних схем (з використанням однієї ректифікаційної колони) розглянуто у роботах [11, 12, 13].

Розглянемо процес ректифікації гетероазеотропної суміші фурфурол-вода на двох колонах. Енерго-функціональна схема процесу зображена на рис 1. Початкова суміш фурфурол-вода з витратою $F = 6840$ кг/год, температурою $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ та масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_F = 0,5$ подається до установки. Разом з потоками парів G_1 , G_2 , які утворюються в обох колонах, потік вихідної суміші поступає до теплообмінника-змішувача, де пари повністю конденсуються та суміш охолоджується до температури $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, та відправляється до відстійника, де суміш розділяється на легку та важку фракції. Після того, як легка фракція з витратою Φ_1 з масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_{\text{лф}} = 0,095$ нагрівається у теплообміннику до температури $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ (температура кипіння азеотропу) і подається до верхньої частини першої колони, у якій відбувається поділ цієї суміші на пару з температурою конденсації $98\text{ }^{\circ}\text{C}$, з витратою G_1 і з масовою часткою фурфуролу $\bar{y}_1 = 0,317$ та кубовий залишок з витратою W_1 і масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_{W1} = 0,0002$. Кубова рідина першої колони, майже чиста вода, яка безперервно відводиться при температурі $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, охолоджується у холодильнику і направляється до ємності з температурою $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Важка фракція з відстійника, яка збагачена фурфуролом, з витратою Φ_2 та з масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_{\text{вф}} = 0,932$ нагрівається у теплообміннику до температури $99\text{ }^{\circ}\text{C}$, після чого подається у якості флегми до другої колони, де поділяється на пару з витратою G_2 , температурою $99\text{ }^{\circ}\text{C}$ і масовою часткою фурфуролу $\bar{y}_2 = 0,4$ та кубовий залишок. Цей кубовий залишок є майже чистим фурфуролом. Він постійно виходить з кубу колони при температурі $161\text{ }^{\circ}\text{C}$, витратою W_2 й масовою часткою фурфуролу $\bar{x}_{W2} = 0,999$ та потрапляє до охолоджувача, після якого надходить далі до ємності з температурою $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для забезпечення процесу випаровування в колонах та підігріву флегми використовується водяна пара високого тиску. В теплообміннику-змішувачі, холодильниках дистилляту та кубового залишку охолоджуючою утилітою є вода.

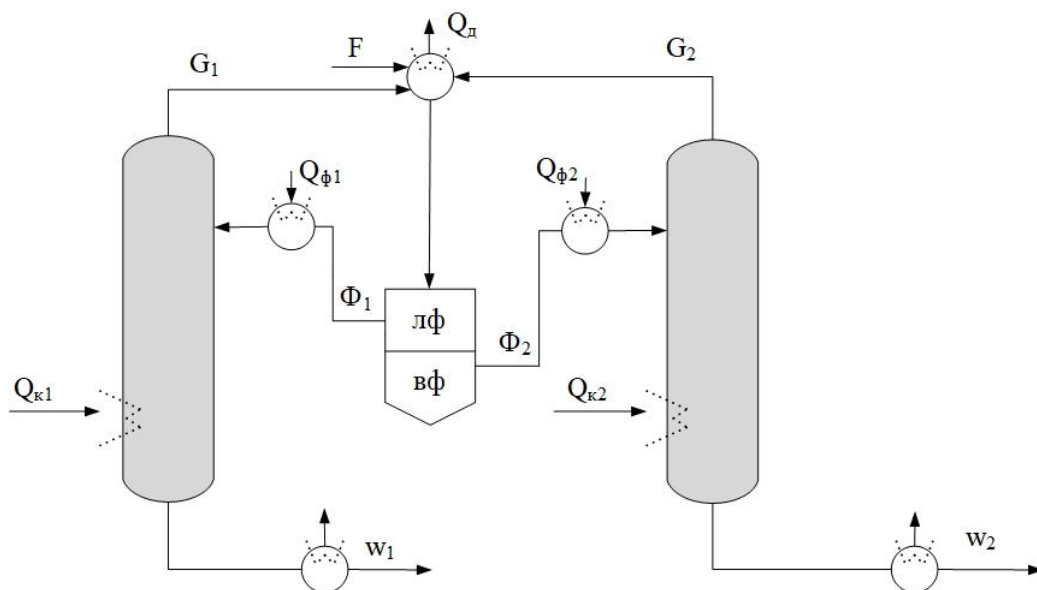


Рисунок 1 – Енерго-функціональна схема процесу ректифікації гетероазеотропної суміші фурфурол-вода на двох відгінних колонах

На основі даних було розраховано матеріальний та тепловий баланс процесу, виділено технологічні потоки та обчислено їх характеристики, що представлені у табл. 1.

Таблиця 1 – Таблиця технологічних потоків процесу ректифікації суміші фурфурол-вода

Потік	Температура		Витрата G , кг/с	Питома теплоємність c , кДж/(кг·°C)	Питома теплота пароутворення r , кДж/кг	Теплове навантаження, кВт
	T_p , °C	T_k , °C				
Пара з колони G_1	98	98	0,405	–	1699	688,617
Пара з колони G_2	99	99	0,12	–	1551	185,758
Конденсат пари з колони 1	98	40	0,405	3,381	–	79,492
Конденсат пари з колони 2	99	40	0,12	3,172	-	22,409
Кубовий залишок W_1	100	30	0,945	4,179	–	277,714
Кубовий залишок W_2	161	30	0,951	1,663	–	207,066
Кипіння в кубі колони 1	100	100	0,405	–	1699	731,379
Кипіння в кубі колони 2	161	161	0,12	–	1551	297,947
Флегма Φ_1	40	98	1,355	3,941	–	309,598
Флегма Φ_2	40	99	1,07	1,831	–	115,668
Початкова суміш F	30	40	1,9	2,92	–	55,48

Оцінюючи теплове навантаження встановленого на установці теплообмінного обладнання, можна зробити висновки, що існуюча схема ректифікаційної установки потребує для функціонування 1454,592 кВт потужності гарячих утиліт та 1405,576 кВт потужності холодних утиліт. При цьому рекуперація енергії складає 55,48 кВт за рахунок постачання потоку початкової суміші безпосередньо до теплообмінника-змішувача.

Аналізуючи характеристики технологічних потоків, треба відмітити, що процеси випаровування в кубовій частині колон не мають серед інших потоків партнерів для теплообміну. З іншого боку, логічно залишити теплообмінник-змішувач як пристрій, але можна зменшити його навантаження. Якщо для суміші, що виходить з теплообмінника-змішувача, вимагати повну відсутність парової фази, тобто вона повинна бути рідинною сумішшю фурфурол-вода, можна підвищити температуру виходу з теплообмінника-змішувача до 98 °C.

Таким чином, отримаємо ще один технологічний потік – потік, що прямує з теплообмінника-змішувача до відстійника, при цьому його треба охолодити від 98 °C до 40 °C, тобто до температури розділення у відстійнику. Назвемо цей потік Φ . Для нього були розраховані витрата, масова частка фурфуролу та питома теплоємність.

Для теплової інтеграції з використанням принципів та засобів пінч-аналізу сформуємо нову таблицю потоків (табл. 2), до якої включимо потік суміші з теплообмінника змішувача до відстійника, потоки живлення до верхньої частини обох колон та потоки кубових залишків. Скоригуємо позначення в термінах пінч-аналізу, тобто будемо називати початкову температуру потоку температурою постачання, а кінцеву – цільовою температурою, відповідно T_s та T_t . Далі розрахуємо потокову теплоємність $CP = \Delta H / |T_s - T_t|$, кДж/кг. Величину ΔH , кДж, в подальшому будемо називати зміною ентальпії, або зміною тепловмісту потоку.

Таблиця 2 – Потокова таблиця для пінч-інтеграції

№ потоку	Найменування потоку	Тип потоку	T_s , °C	T_t , °C	G , кг/с	CP , кДж/кг	ΔH , кВт
1	Ф	гарячий	98	40	2,425	7,298	423,305
2	W_1	гарячий	100	30	0,945	3,967	277,714
3	W_2	гарячий	161	30	0,951	1,581	207,066
4	Φ_1	холодний	40	98	1,355	5,338	309,598
5	Φ_2	холодний	40	99	1,07	1,96	115,668

Для отримання цільових значень потужності зовнішніх утиліт було побудовано складені криві та розглянуто варіанти їх відносного розміщення на температурно-ентальпійній діаграмі при варіації значення ΔT_{\min} , тобто мінімальної відстані між гарячою та холодною складеною кривою по осі температури.

Було встановлено, що при $\Delta T_{\min} = 14,4665$ °C зникає потреба в гарячих утилітах, тобто ми маємо порогову задачу (рис. 2). В цьому випадку не має сенсу зменшувати мінімальну температурну різницю в теплообмінному обладнанні ΔT_{\min} , бо при цьому необхідна мінімальна потужність зовнішніх утиліт, а також рекуперації, залишається постійною. Температура пінча гарячих потоків дорівнює 98 °C, холодних потоків – 83,5335 °C

Для розташування теплообмінного обладнання треба обрати близьке до отриманого, але таке значення ΔT_{\min} , що можна використовувати при розрахунку теплообмінників, тому оберемо $\Delta T_{\min} = 14$ °C. В цьому разі буде відбуватися невеличке зближення складених кривих уздовж осі ентальпії і ми будемо отримувати потребу в охолодженні потоків вище та нижче пінча, а саме 3,41 кВт вище пінча та 479,44 кВт нижче пінча. За означенням пінч розподіляє систему теплових потоків на дві термодинамічно збалансовані підсистеми, одна з яких є джерелом тепла, а інша стоком тепла. Розподілення системи потоків при використанні $\Delta T_{\min} = 14$ °C – це використання псевдо пінча, через який буде перетікати невелика кількість теплової енергії.

Побудуємо сіткову діаграму, з урахуванням температури гарячих потоків на лівій псевдо пінча 98 °C, холодних потоків – 84 °C та розташуємо теплообмінне обладнання.

Вище пінча маємо жорстке обмеження на відсутність гарячих утиліт, тому розміщення теплообмінного обладнання проводиться спочатку від псевдопінча, а потім корегується від боку найвищих температур потоків. Після встановлення теплообмінника Т2 на потоці 3 є надлишок теплової енергії на 3,405 кВт більший, ніж може прийняти потік 4 для досягнення цільової температури. Тому корегуємо температуру потоку 3 на виході з теплообмінників Т3, Т2. Тобто, потік 3 не охолоджується до температури 98 °C, а тільки до 100,2 °C.

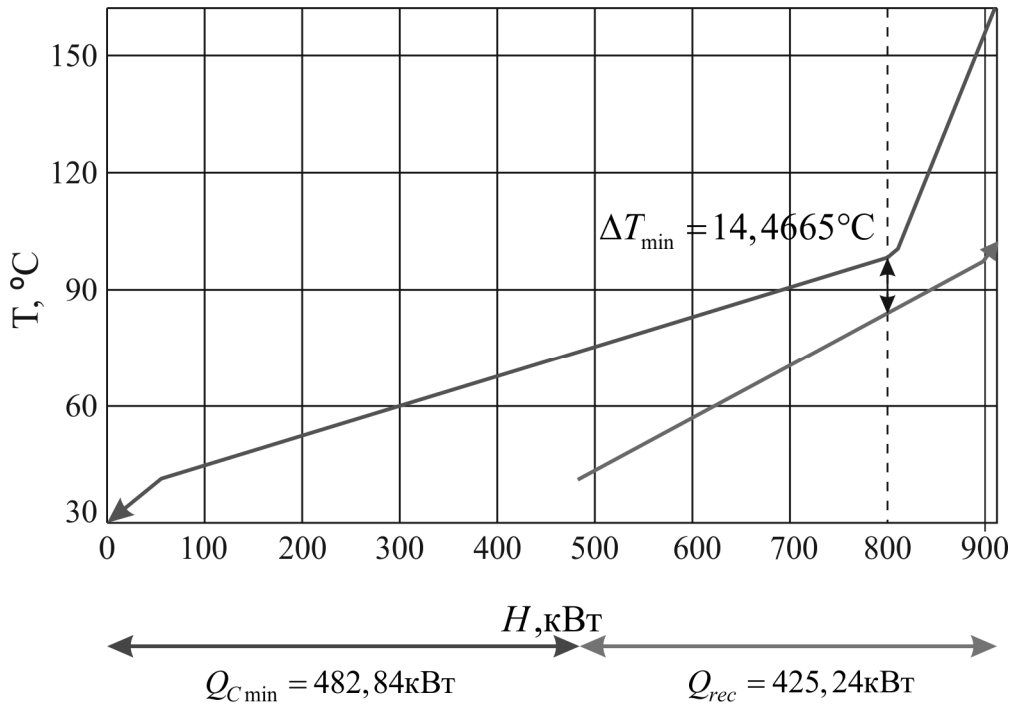


Рисунок 2 – Складені криві процесу для $\Delta T_{\min} = 14,4665 \text{ } ^\circ\text{C}$

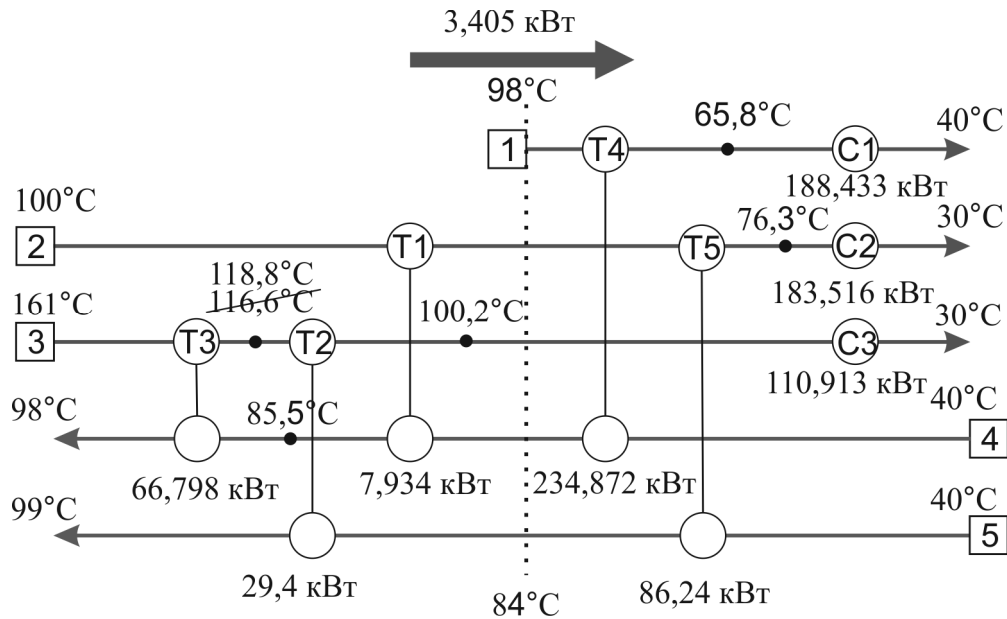


Рисунок 3 – Сіткова діаграма з розташуванням теплообмінного обладнання з використанням псевдопінча $14 \text{ } ^\circ\text{C}$

Принципово, можна зупинитися на одержаному проекті, але можна побачити подальші кроки удосконалення, а саме, спробувати спростити схему розташування теплообмінного обладнання. Тобто відмовитися від встановлення теплообмінних апаратів з малим навантаженням, що було реалізовано у роботі [14].

Скористуємося аналізом мережі щодо наявності циклів. Цикл у мережі надає ступені вільності для зміни навантаження теплообмінників в рамках циклу, але при цьому треба контролювати порушення ΔT_{\min} , що обране для системи в цілому.

В даному випадку виявлено цикл, що зображено на рис. 4

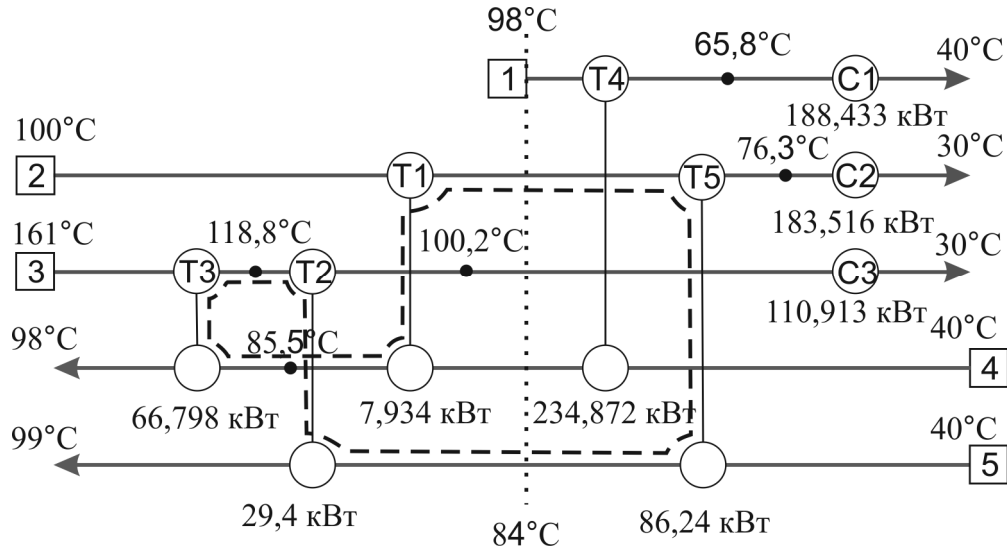


Рисунок 4 – Цикл через псевдопінч

В межах циклу фігурує теплообмінник T1 з малим навантаженням 7,934 кВт, тому було прийняте рішення його позбутися, що призводить до розбиття циклу. Навантаження цього пристрою потрібно розподілити між теплообмінниками циклу, що передбачає також коригування температури за частиною мережі, що входить до циклу. Отриману мережу представлено на рис. 5.

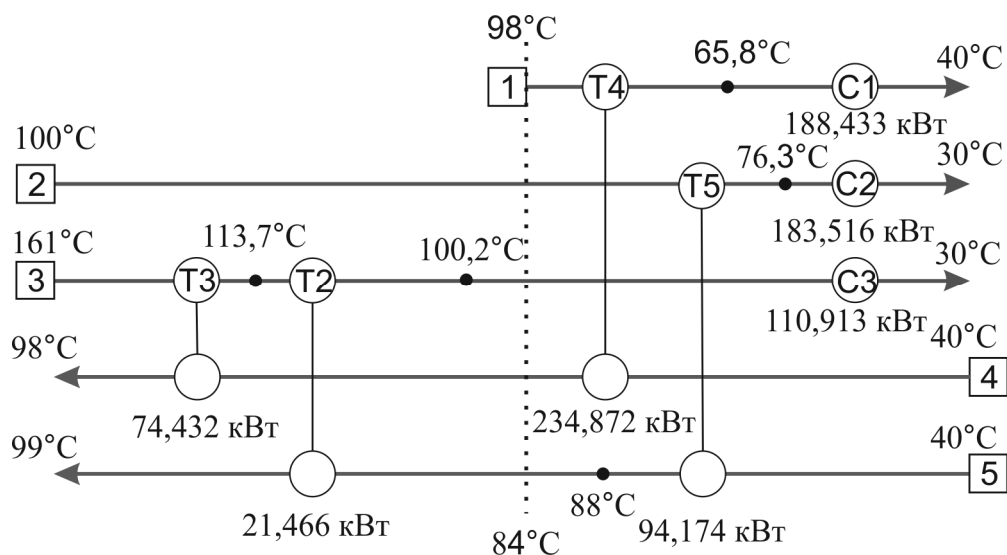


Рисунок 5 – Оптимізація мережі теплообмінників за рахунок розбиття циклу

На теплообміннику T2 відбувається порушення ΔT_{\min} , але в даному випадку немає ступенів вільності для відновлення ΔT_{\min} . Це дуже не шкодить проекту в цілому, бо

порушення стосується тільки одного з теплообмінних апаратів. Також треба відмітити, що прийнята величина ΔT_{\min} досить велика і прийнятна навіть для трубчатих теплообмінних пристроїв.

У відповідності до сіткової діаграми було розраховане теплообмінне обладнання в рамках пропозицій фірми Alfa Laval (табл. 3).

Таблиця 3 – Теплообмінне обладнання до установці

Назва	Тип пластин	Кількість пластин	Площа, м ²	Ціна, грн
T2	TL3P	19	1,309	60 847,08
T3	T5M	13	1,092	59 292,9
T4	T5M	26	2,184	75 235,93
T5	TL3B	25	1,863	65 153,73
C1	T5M	41	1,764	68 524,31
C2	T5M	22	1,848	69 866,63
C3	TL3P	37	2,549	82 628,78

Підводячи підсумки, при реалізації проекту модернізації отримуємо 980,332 кВт замість 1405,576 потужності зовнішніх утиліт для охолодження, 1029,326 кВт замість 1454,592 для підігріву. Сумарна потужність рекуперації завдяки інтеграції складає 425,244 кВт.

Література

1. Коган В.Б. Азеотропная и экстрактивная ректификация / В.Б. Коган. – Л.: ГОСХИМИЗДАТ, 1961. – 316 с.
2. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. – Изд. 3-е, перераб. / С.А. Багатуров. – М.: Химия, 1974. – 440 с.
3. Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester. McGraw-Hill, John Wiley and Sons Ltd. 2005. 687 p.
4. Kemp Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. – OXFORD. Elsevier Ltd. 2007. 396 p.
5. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М. Основы интеграции тепловых процессов.– Харьков: НТУ «ХПИ». 2000.–456 с.
6. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М., Болдырев С.А., Арсеньева О.П., Тарновский М.В. Интеграция тепловых процессов на установке первичной переработке нефти АВТ А 12/2 при работе в зимнее время. // Теоретические основы химической технологии. – 2009.–Т.43.–№6.–С. 665–676.
7. Ulyev L., Vasiliev M., Boldyryev S. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. // Journal of Environmental Management, 2018, vol. 222, pp. 454–464. doi: 10.1016 /j.jenvman. 2018.05.062.
8. Babak T., Golubkina O., Ponomarenko Y., Solovey L., Khavin G. The investigation of the process streams in the multi-effect evaporation plant for the concentration of sorghum syrup // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.– V. 3, No. 8 (93) (2018). – Energy Saving Technologies and Equipment, – P. 52–58.

9. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЕВ Л.М., БОЛДЫРЕВ С.А. Улучшение тепловой интеграции на сахарных заводах // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПІ». – 2002. – №2. – С. 11–16.

10. БИКАНОВ С.М., БАБАК Т.Г., ДАНИЛОВ Ю.Б., БИКАНОВА В.В. Застосування методу пінч-аналізу при проведенні теплової інтеграції процесу випарювання хлориду магнію // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків НТУ «ХПІ». – 2020. – №1. С. 13–21.

11. УЛЬЕВ Л.М., ГАРЕВ А.О., МИРОНОВ А.М. Пінч-аналіз процесу ректифікації суміші фурфурол-вода // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 9. – С. 90–97.

12. БАБАК Т.Г., ГОЛУБКИНА О.А., МАЛЫШКО Ю.В., ПОНОМАРЕНКО Е.Д. Модернизация процесса ректификации частично растворимой азеотропной смеси фурфурол-вода // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – №29 (1201). – С. 38–42.

13. БАБАК Т.Г., БАЛЮК С.В., ГОЛУБКИНА О.А., ПОНОМАРЕНКО Е.Д. Оптимизация энергопотребления ректификационной установки на основе интеграции тепловых потоков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – №29 (1201). – С. 43–48.

14. БАБАК Т.Г., БЫКАНОВ С.Н., СОЛОВЕЙ Л.В., УС В.А. Оптимизация потребления энергоносителей в процессе выпаривания водного раствора гидроксида натрия // Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2018. – №40(1316). – С. 33–38.

Bibliography (transliterated)

1. Kohan V.B. Azeotropnaia y ekstraktyvnaia rektyfykatsyia / V.B. Kohan. – L.: HOSKHYMYZDAT, 1961. – 316 p.

2. Bahaturov S.A. Osnovi teoryy y rascheta perehonky y rektyfykatsyy. – Yzd. 3-e, pererab. / S.A. Bahaturov. – M.: Khymyia, 1974. – 440 p.

3. Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester. McGraw-Hill, John Wiley and Sons Ltd. 2005. 687 p.

4. Kemp Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. – OXFORD. Elsevier Ltd. 2007. 396 p.

5. Smyt R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M. Osnovy yntehratsyy teplovykh protsessov. – Kharkov: NTU «KhPY». 2000. – 456 p.

6. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldyrev S.A., Arseneva O.P., Tarnovsky M.V. Yntehratsyia teplovykh protsessov na ustanovke pervychnoi pererabotke nefty AVT A 12/2 pry rabote v zymnee vremia. // Teoretycheskye osnovi khymycheskoi tekhnolohyy. – 2009. – Т.43. – №6. – Р. 665–676.

7. Ulyev L., Vasiliev M., Boldyrev S. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions. // Journal of Environmental Management, 2018, vol. 222, pp. 454–464. doi: 10.1016 /j.jenvman. 2018.05.062.

8. Babak T., Golubkina O., Ponomarenko Y., Solovey L., Khavin G. The investigation of the process streams in the multi-effect evaporation plant for the concentration of sorghum syrup // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – V. 3, No. 8 (93) (2018). – Energy Saving Technologies and Equipment. – P. 52–58.

9. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldyryev S.A. Uluchshenye teplovoi yntehratsyy na sakharnikh zavodakh // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – Kharkiv – NTU «KhPI». – 2002. – №2. – P. 11–16.

10. Bykanov S.M., Babak T.H., Danylov Yu.B., Bykanova V.V. Zastosuvannia metodu pinch-analizu pry provedenni teplovoi intehratsii protsesu vypariuvannia khlorydu mahniiu // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – Kharkiv NTU «KhPI».– 2020.– №1. P. 13–21.

11. Ulyev L.M., Hariiev A.O., Myronov A.M. Pinch-analiz protsesu rektyfikatsii sumishi furfuroi-voda // Visnyk NTU «KhPI».– 2013.– № 9.– P. 90–97.

12. Babak T.H., Holubkyna O.A., Malishko Yu.V., Ponomarenko E.D. Modernyzatsiia protsesa rektyfikatsyy chastychno rastvorimoj azeotropnoi smesy furfuroi-voda // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriia: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv. – Kh.: NTU «KhPI». – 2016. – №29 (1201).– P. 38–42.

13. Babak T.H., Baliuk S.V., Holubkyna O.A., Ponomarenko E.D. Optymyzatsiia enerhopotrebleniia rektyfikatsyonnoi ustanovky na osnove yntehratsyy teplovikh potokov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriia: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv.– Kh.: NTU «KhPI».– 2016.– №29 (1201).– P. 43–48.

14. Babak T.H., Bykanov S.N., Solovei L.V., Us V.A. Optymyzatsiia potrebleniia enerhonosytelei v protsesse viparyvaniia vodnoho rastvora hydroksyda natryia // Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu «KhPI». Seriia: Innovatsiini doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv, 2018. – №40(1316). – P. 33–38.

УДК 66.045.53

Бабак Т.Г., доцент, Биканов С.М., к.техн.н., доцент, Горбунов К.О., к.техн.н., професор, Пономаренко Є.Д., доцент, Соловей Л.В., ст. викл.

ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПОТОКІВ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ГЕТЕРОАЗЕОТРОПНОЇ СУМІШІ ФУРФУРОЛ-ВОДА НА ДВОХ ВІДГІННИХ КОЛОНАХ

Процес ректифікації азеотропних сумішей має місце в багатьох галузях хімічної промисловості. Цей процес потребує значних енерговитрат, як на підігрів та випаровування технологічних потоків, так і на конденсація пари та охолодження продуктів. Витрати зовнішньої енергії суттєво залежать від засобів організації процесів розділення.

Пінч-аналіз є одним з сучасних методів проектування хіміко-технологічних систем з метою оптимального використання зовнішніх джерел енергії шляхом максимальної теплової інтеграції технологічних потоків системи, враховуючи обмеження конкретного виробництва, вимоги екологічної безпеки та захисту довкілля.

В даній роботі розглядається тепла інтеграція процесів розділення гетероазеотропної суміші фурфурол-вода на двох колонах, в кожній з яких легкокиплячим є азеотроп, а низькокиплячим – один з компонентів.

Було розраховано тепловий та матеріальний баланс ректифікаційної установки та сформовано таблицю даних потоків, тобто проведено екстракцію даних хіміко-технологічної системи. Серед загальної множини теплових потоків було обрано підмножину для інтеграції

Для обраних теплових потоків, що підлягають тепловій інтеграції, було побудовано складені криві та проаналізовано їх взаємне розташування на температурно-ентальпійній діаграмі. Цей аналіз показав, що для визначеного значення мінімальної температурної різниці в теплообмінному обладнанні ΔT_{\min} , отримуємо порогову задачу. Проблему було сформульовано для значення ΔT_{\min} , трохи меншого, ніж порогове значення, що привело до невеликого збільшення споживання зовнішніх енергоносіїв.

Було розглянуто опції подальшого удосконалення мережі теплообмінників та було виявлено наявність циклу через псевдопінч, що дало змогу прибрати теплообмінник з низьким навантаженням та перерозподілити це навантаження на інші. Відновлення ΔT_{\min} в даному випадку неможливе, бо маємо жорсткі умови по відсутності гарячих утиліт.

Продемонстрована значна економія витрат потужності зовнішніх утиліт.

Для модернізації було підібране сучасне теплообмінне обладнання фірми Alfa Laval на усі позиції, що потребується.

Ключові слова: тепла інтеграція, пінч-аналіз, ректифікація, гетероазеотропні суміші, порогова задача, оптимізація тепломережі.

Бабак Т.Г., доцент, Быканов С.Н., к.техн.н., доцент,
Горбунов К.А., к.техн.н., професор, Пономаренко Е.Д., доцент, Соловей Л.В., ст. преп.

ТЕПЛОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПОТОКОВ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОАЗЕОТРОПНОЙ СМЕСИ ФУРФУРОЛ-ВОДА НА ДВУХ ОТГОННЫХ КОЛОННАХ

Процесс ректификации азеотропных смесей имеет место во многих отраслях химической промышленности. Этот процесс требует значительных энергозатрат как на нагрев и испарение технологических потоков, так и на конденсацию паров и охлаждение продуктов. Потребление внешней энергии существенно зависит от способов организации процессов разделения.

Пинч-анализ является одним из современных методов проектирования химико-технологических систем с целью оптимального использования внешних источников энергии путем максимальной тепловой интеграции технологических потоков системы, с учетом ограничений конкретного производства, требований экологической безопасности и защиты окружающей среды.

В данной работе рассматривается тепловая интеграция процессов разделения гетероазеотропной смеси фурфурол-вода на двух колонах, в каждой из которых легкокипящим является азеотроп, а низкокипящим – один из компонентов.

Были рассчитаны тепловой и материальный баланс ректификационной установки и сформирована таблица данных потоков, то есть, проведена экстракция данных химико-технологической системы. Из общего множества тепловых потоков было выбрано подмножество для интеграции.

Для выбранных тепловых потоков, подлежащих тепловой интеграции, были построены составные кривые и проанализировано их взаимное расположение на температурно-ентальпійній діаграмме. Этот анализ показал, что для определенного значения минимальной температурной разности в теплообменном оборудовании ΔT_{\min} , имеет место пороговая задача. Проблему было сформулировано для значения ΔT_{\min} несколько меньшего, чем пороговое значение, что привело к небольшому увеличению потребления внешних энергоносителей.

Были рассмотрены опции дальнейшего усовершенствования сети теплообменников, и было выявлено наличие цикла через псевдопинч, что дало возможность удалить теплообменник с низкой нагрузкой и перераспределить эту нагрузку между другими. Восстановление ΔT_{\min} в данном случае невозможно, ибо принято жесткое ограничение по отсутствию горячих утилит.

Продемонстрирована значительная экономия затрат мощности внешних утилит.

Для модернизации было подобрано современное теплообменное оборудование фирмы Alfa Laval на все необходимые позиции.

Ключевые слова: тепловая интеграция, пинч-анализ, ректификация, гетероазеотропные смеси, пороговая задача, оптимизация теплосети.

Babak T., Bykanov S., Gorbunov K., Ponomarenko Ye., Solovey L.

STREAMS HEAT INTEGRATION IN THE SEPARATION PROCESS OF THE FURFURAL-WATER HETEROAZEOTROPIC MIXTURE BY USING TWO STRETCHING COLUMNS

The process of azeotropic mixtures rectification takes place in many branches of the chemical industry. This process requires significant energy consumption both for heating and evaporation of process streams, and for vapor condensation and cooling of products. The consumption of external energy essentially depends on the methods of separation processes organization.

Pinch analysis is one of the modern methods for designing chemical-technological systems with the aim of optimal use of external energy sources by maximizing the heat integration of system process streams, taking into account the limitations of a particular manufacture, the requirements of environmental safety and environmental protection.

In this paper the heat integration of the heteroazeotropic furfural-water mixture separation process by two columns was considered. In each column the azeotrope is a light-boiling one, and one of the mixture components is a low-boiling one.

The heat and material balances of the rectifying plant were calculated and the table of its streams was formed, that is, the data of the chemical-technological system were extracted. From the total set of heat streams, the subset was selected for heat integration.

Composite curves for the selected heat streams subject to heat integration were built and their relative position on the temperature-enthalpy diagram was analyzed. This analysis showed that for a certain value of the minimum temperature difference in the heat exchange equipment ΔT_{\min} , there is a threshold problem. The problem was formulated for a value of ΔT_{\min} slightly less than the threshold value that led to a slight increase in the consumption of external energy carriers.

Options for further improvement of the network of heat exchangers were considered, and the occurrence of a cycle through the pseudopinch was identified. It gave possibility to remove a heat exchanger with a low load and redistribute this load among to other ones. Restoring ΔT_{\min} in this case is impossible, because a strict restriction on the absence of hot utilities is accepted.

Significant savings in external utilities load have been demonstrated.

For retrofit modern Alfa Laval heat exchange equipment was selected for all the necessary positions.

Keywords: heat integration, pinch analysis, rectification, heteroazeotropic mixtures, threshold problem, heating system optimization.