

І. М. Рищенко, д. техн. н., професор, С. М. Биканов, к. техн. н., доцент,
К. О. Горбунов, к. техн. н., доцент, А. М. Миронов, к. техн. н., доцент,
М. В. Ільченко, к. техн. н., доцент

КОМПЛЕКСНА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ СУМІШІ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ

Вступ. Процеси ректифікації широко використовуються в хімічній та нафтохімічній промисловості для розділення сумішей речовин. При здійсненні процесу початкову суміш нагрівають, в кубі колони відбувається процес випаровування, пари, що виходять із верху колони, підлягають конденсації, також необхідно охолоджувати отримані продукти. Таким чином, процес ректифікації потребує великих витрат гарячих та холодних утиліт. Отже, проблема зменшення енергетичних витрат в процесі ректифікації є актуальною задачею.

Однім із шляхів вирішення цієї задачі є проведення теплової інтеграції процесу ректифікації методом пінч-аналізу [1–3]. Цей метод спочатку застосовувався для нафтохімічних виробництв, де зосереджено багато ректифікаційних колон і теплообмінників. Наприклад, в роботі [4] розглянуто теплову інтеграцію на заводі первинної переробки нафти. Потім цей метод набув розповсюдження і в інших виробництвах. Наприклад, за допомогою пінч-аналізу проведено теплову інтеграцію на підприємствах харової промисловості, при виробництві цукру [5], здійснено теплову інтеграцію при випарюванні солей [6]. Проведення теплової інтеграції процесу ректифікації досліджувалось в різних роботах. Наприклад, в роботі [7] показано інтеграцію процесу ректифікаційної при виробництва етилового спиту. Комплексна теплова інтеграція процесу ректифікації суміші метанол-етанол досліджувалась в роботі [8]. Процес ректифікації суміші метанол-вода досліджувався в роботі [9]. Застосування термокомпресії та методів пінч-аналізу для проведення процесу ректифікації суміші вода-оцтова кислота показано в роботі [10]. Проведено теплову інтеграцію суміші фурфурол-вода на двох відгінних колонах в роботі [11].

Постановка задачі. Оскільки питання зменшення енерговитрат в процесі ректифікації є актуальною задачею, покажемо проведення комплексної теплової інтеграції при ректифікації суміш бензол-толуол. Для рішення задачі використаємо метод пінч-аналізу із застосуванням термокомпресії пара, який виходить із верху колони.

Основна частина. Продуктивність ректифікаційної установки безперервної дії дорівнює 11 т/год початкової суміші, її склад 52 % мас. бензолу, склад дистилляту та кубового залишку 96 % та 2,5 % мас. відповідно. За основу візьмемо принципову технологічну схему ректифікації. Для укладання таблиці основних технологічних потоків треба було визначити їх розрахункові характеристики. На основі матеріального та теплового балансу процесу ректифікації розраховано витрати потоків, їх температури, визначено їх теплоємності та теплове навантаження. В якості технологічних потоків, які підлягають тепловій інтеграції, було обрано три гарячих та два холодних потоки. Гарячі потоки це дистиллят, кубовий залишок та пар, що виходить із верху колони. Холодні потоки складають початкова суміш та куб колони. Потоків теплоємності (CP) та теплове навантаження (ентальпія) потоків (ΔH) розраховуємо за формулою [1]:

$$\Delta H = G \cdot c \cdot (T_s - T_T) = CP \cdot \Delta T.$$

В роботі [12] проведено теплову інтеграцію суміші бензол-толуол, але вона була зовнішньою, без використання термокомпресії. У деяких роботах [10, 13] вказувалось на можливість застосування термокомпресії в процесі ректифікації. Пари, що виходять із верху колони, стискаються в компресорі до тиску, який забезпечує достатнє підвищення температури пара для того, щоб його можна було використати для обігрівання куба колони. Було досліджено можливість застосування термокомпресії і в процесі ректифікації суміші бензол-толуол. Розраховано, що необхідний ступінь стискання парів в нашому випадку дорівнює трьом: $P_2/P_1 = 3$. Очікувана температура пара після стискання дорівнює близько 126 °С, температура його конденсації 121 °С. Така температура конденсації достатня, щоб забезпечити процес випаровування в кубі колони.

Отже, початкові дані для проведення комплексної теплової інтеграції: витрати, температури, потокові теплоємності та теплове навантаження основних технологічних потоків процесу ректифікації суміші бензол-толуол наведено в потоковій таблиці 1.

Таблиця 1 – Потоківі дані технологічної схеми процесу ректифікації бензол-толуол

№	Назва потоку	Тип	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_T, ^\circ\text{C}$	G, кг/с	CP, кВт/°C	$\Delta H (Q), \text{кВт}$
1	P	гор.	82	30	1,618	2,977	154,804
2	W	гор.	109	30	1,438	2,593	204,847
3	Пар G	гор.	126	121	5,112	373,493	1867,463
4	F	хол.	25	91	3,056	5,541	365,706
5	Куб	хол.	109	109	–	–	1867,463

Побудовано складові криві існуючого процесу (рис. 1), з яких видно, що для існуючого процесу рекуперація тепла відсутня. Необхідна кількість тепла гарячих утиліт для існуючої схеми (з можливою термокомпресією) складає $Q_H=2233,16 \text{ кВт}$, холодних $Q_C=2227,11 \text{ кВт}$.

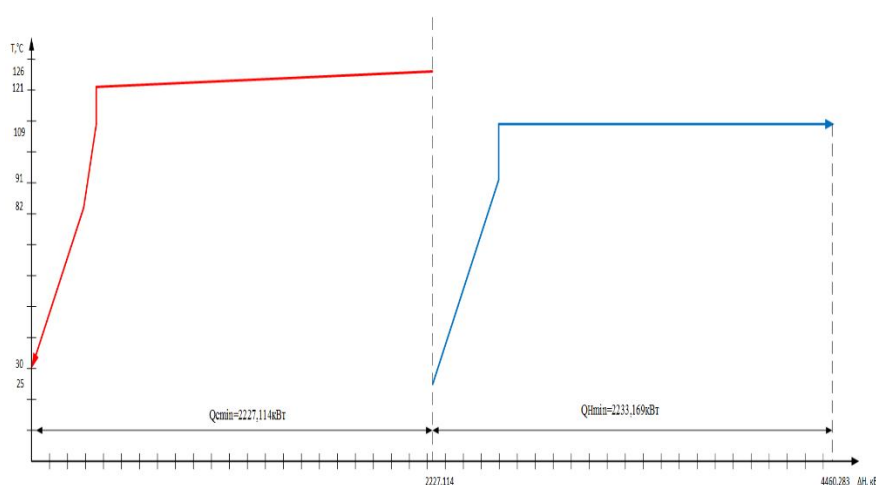


Рисунок 1 – Складові криві існуючого процесу

Надалі, на основі техніко-економічних міркувань, задаємо мінімальну різницю температур, яка для існуючого процесу складає 12 градусів: $\Delta T_{\min} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$. Зрушуємо складові криві уздовж ентальпійної осі і отримуємо розташування складових кривих для заданої мінімальної різниці температур $\Delta T_{\min} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2).

Перекриття кривих вказує на можливість отримати рекуперацію тепла у кількості $Q_{\text{рек}}=2186,82 \text{ кВт}$ для процесу ректифікації суміші бензол-толуол із використанням термокомпресії. При цьому мінімальна кількість гарячих утиліт складає $Q_{\text{Нmin}}=46,35 \text{ кВт}$, холодних $Q_{\text{Сmin}}=40,29 \text{ кВт}$. Ці результати підтверджуються розрахунками за методом табличного алгоритму, за допомогою якого уточнено температури пінча гарячих і холодних потоків, які становлять $T_{\text{Нпінч}}=82 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Спінч}}=70 \text{ }^\circ\text{C}$.

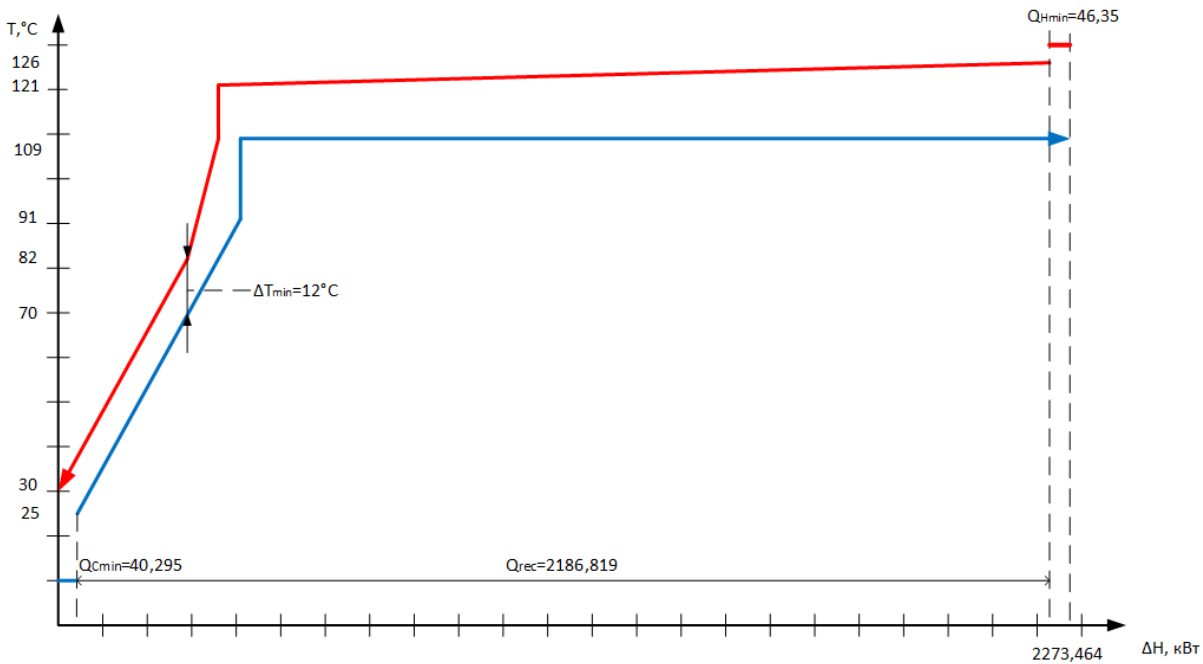


Рисунок 2 – Складові криві для $\Delta T_{\min} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$

На основі отриманих даних будуємо сіткову діаграму для розташування теплообмінників. Розташування здійснюємо згідно *CP* та *N* правилами. Згідно *CP* правилам, потік початкової суміші № 4 нижче пінча довелось розщепити на два потоки.

В результаті отримуємо чотири рекуперативних теплообмінників: РТ1, РТ2, РТ3, РТ4, один підігрівач Н (П) для нагрівання початкової суміші та два холодильники: для дистилляту С1 (Х1) і кубового залишку С2 (Х2) (рис.3). Рекуперативний теплообмінник РТ4 встановлюється в кубі колони, в нього подається пар із верху колони, який стискається компресором (термокомпресія). Інші рекуперативні теплообмінники РТ1, РТ2, РТ3 використовують тепло дистилляту та кубового залишку для підігріву початкової суміші. Розраховуємо поверхню теплообміну і запропонуємо для забезпечення рекуперації тепла пластинчасті теплообмінники фірми Alfa Laval.

Керуючись отриманою сітковою діаграмою, будуємо технологічну схему процесу ректифікації суміші бензол-толуол після реконструкції.

Як видно із схеми (рис. 4) пар, що виходить із верху колони, стискається в компресорі К. При цьому його тиск підвищується до трьох атмосфер, а його температура після стискання збільшується і становить близько $126 \text{ }^\circ\text{C}$ і він подається для обігрівання куба колони. Для забезпечення цього в кубі розташовано рекуперативний теплообмінник РТ4.

У ньому пар, згідно розрахунків, конденсується при температурі 121 °С, передаючи тепло конденсації для випаровування суміші, яка знаходиться в кубі колони. Після конденсації цей потік дроселюється, скидаючи тиск до атмосферного, потім сепарується у відстійнику Е1. Несконденсований пар направляється на рецикл, а рідина насосом перекачується у розподільвач Р1, де розділяється на дистиллят і флегму. Для забезпечення процесу термокомпресії, згідно розрахунків, може бути застосовано компресор, який забезпечує ступень стискання, що дорівнює трьом, наприклад, гвинтовий компресор MYSOM STM510L потужністю 315 кВт.

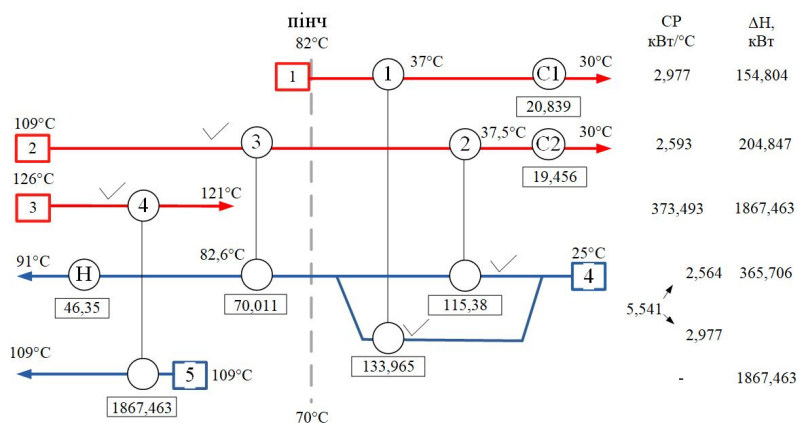


Рисунок 3 – Сіткова діаграма процесу ректифікації суміші бензол-толуол після реконструкції із використанням термокомпресії

Потік початкової суміші для забезпечення його нагрівання перед подачею у колону, спочатку розділяється на два потоки у розподільвачі Р2 та підігрівається у рекуперативних теплообмінниках РТ1 і РТ2 завдяки теплу дистилляту та кубового залишку. Потім два потоки об'єднуються і поступають у рекуперативний теплообмінник РТ3, де додатково підігріваються до 83 °С теплом потоку кубового залишку. Остаточне нагрівання потоку початкової суміші здійснюється у підігрівачі Н (П), де він підігрівається до цільової температури 91 °С, з якою він надходить до колони.

Холодильники С1 (Х1) та С2 (Х2) забезпечують охолодження дистилляту та кубового залишку до цільової кінцевої температури 30 °С.

Для реалізації подібної схеми було підібрано пластинчаті теплообмінники фірми Alfa Laval: чотири рекуперативних РТ1-РТ4, холодильники С1 (Х1), С2 (Х2) і підігрівач Н (П).

Висновки. Проведено комплексну теплову інтеграцію процесу ректифікації суміші бензол-толуол із застосуванням методу пінч-аналізу та використанням термокомпресії. Побудовано складові криві існуючого процесу та після реконструкції для мінімальної різниці температур $\Delta T_{\min} = 12^\circ\text{C}$. Для цієї мінімальної різниці температур було отримано мінімальні цільові значення гарячих та холодних утиліт, які склали $Q_{H\min}=46,35$ кВт та $Q_{C\min}=40,29$ кВт відповідно. У порівнянні із принциповою технологічною схемою процесу ректифікації значення гарячих та холодних утиліт становило $Q_H=2233,16$ кВт та $Q_C=2227,11$ кВт, що вказує на суттєве зменшення їх кількості. Зменшення споживання утиліт забезпечено рекуперацією тепла завдяки встановленню чотирьох рекуперативних теплообмінників та застосуванням термокомпресії. Компресор для забезпечення процесу потребує потужності 315 кВт. Побудовано сіткову діаграму, розташовано теплообмінники і отримано технологічну схему процесу ректифікації суміші

бензол-толуол після реконструкції. З урахуванням вартості теплообмінників, компресору, іншого обладнання та затрат на автоматизацію, строк окупності складає приблизно від двох до двох с половиною років.

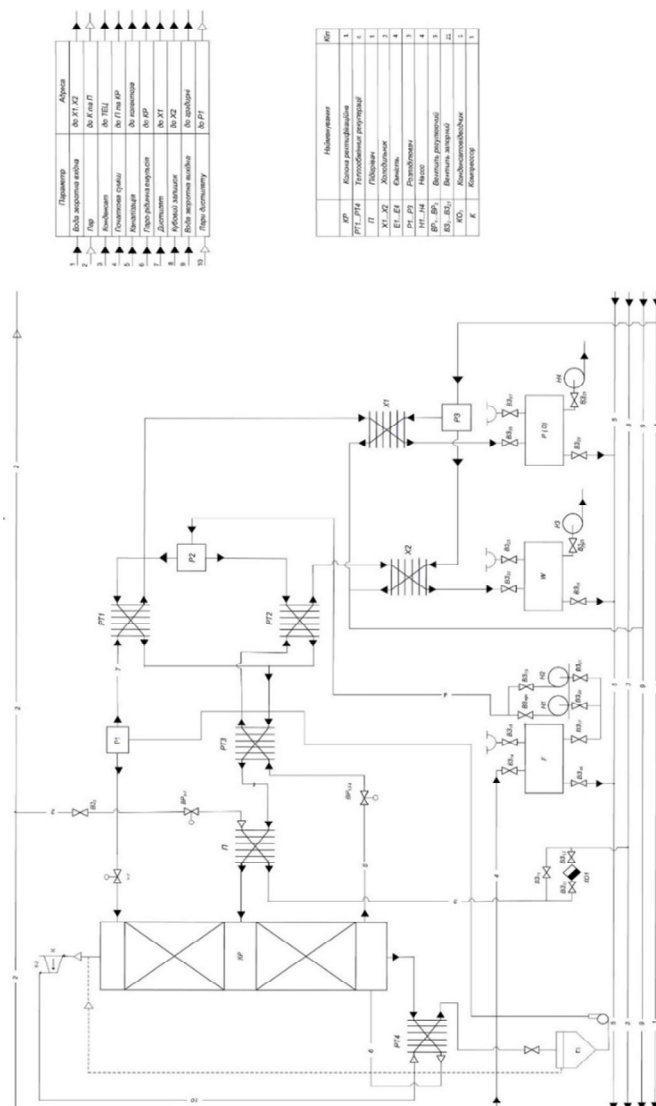


Рисунок 4 – Технологічна схема процесу ректифікації суміші бензол-толуол після реконструкції із використанням термокомпресії

Література

1. Смит Р., Клемеш Й., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.О., УЛЬЄВ Л.М. Основи інтеграції теплових процесів.– Харків: НТУ «ХПІ». 2000.–456 с.
2. Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester. McGraw-Hill, John Wiley and Sons Ltd. 2005. 687 p.
3. Kemp Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. – OXFORD. Elsevier Ltd. 2007. 396 p.
4. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.О., УЛЬЄВ Л.М., БОЛДИРЕВ С.О., АРСЕНЬЄВА О.П., ТАРНОВСЬКИЙ М.В. Інтеграція теплових процесів на установці первинної переробки

нафти АВТ А 12/2 при роботі у зимовий час. // Теоретичні основи хімічної технології. – 2009.–Т.43.–№6.–С. 665–676.

5. Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Ульєв Л.М., Болдирєв С.О. Покращення теплової інтеграції на цукрових заводах. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПІ». – 2002. – №2. – С. 11–16.

6. Биканов С.М., Бабак Т.Г., Данилов Ю.Б., Биканова В.В. Застосування методу пінч-аналізу при проведенні теплової інтеграції процесу випарювання хлориду магнію. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПІ». – 2020. – №1. – С. 13–21.

7. Рябова І.Б., Гарєв А.О., Граєв Л.А., Горбунов К.О. Інтеграція технологічних потоків бражної та епюраційної колони в процесі виробництва ректифікованого етилового спирту. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПІ». – 2021. – №2. – С. 30–40.

8. Биканов С.М., Перевертайленко О.Ю., Гарєв А.О., Горбунов К.О., Рябова І.Б., Гапонова О.О., Кармазіна Ю.А. Дослідження доцільності використання механічної рекомпресії при комплексної теплової інтеграції ректифікаційних колон // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) – Одеса: 2013 – Вип. 43. – Том 1. – 209 с. – С. 127–131.

9. Комплексна тепла інтеграція процесу ректифікації із використанням термокомпресії. // Биканов С.М., Бабак Т.Г., Горбунов К.О., Рищенко І.М. Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків. – НТУ «ХПІ». – 2022. – №3. – С. 12–21.

10. Використання енергетичного потенціалу процесу ректифікації суміші вода-оцтова кислота. // Рябова І.Б., Селіхов Ю.А., Коцаренко В.О., Горбунов К.О., Бабак Т.Г. // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій (ОНАХТ) – Одеса: 2016 – Вип. 1. – Том 80. – С. 113–117.

11. Бабак Т.Г., Биканов С.М., Горбунов К.О., Пономаренко Є.Д., Соловей Л.В. / Теплова інтеграція потоків процесу розділення гетероазетропної суміші фурфурол-вода на двох відгінних колонах. // Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1. – С. 3–13.

12. Чернишов І.С., Бабак Т.Г., Фесенко Е.О., Топунова Т.В. Енергоефективна інтеграція теплової схеми при ректифікації суміші бензол-толуол. // Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – № 1. – С. 9–18.

13. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Компенсуючий тепловий насос в процесах хімічної технології. Хімічна промисловість. – 2000. – №9. – с. 454.

Bibliography (transliterated)

1. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Ulev L.M. Osnovi Integratsiyi teplovih protsesiv.– Harkiv: NTU «HPI». 2000.–456 p.

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

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

4. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Ulev L.M., Boldirev S.O., Arseneva O.P., Tarnovskiy M.V. Integratsiya teplovih protsesiv na ustanovtsi pervinnoyi pererobki nafti AVT A 12/2 pri roboti u zimoviy chas. // Teoretichni osnovi himichnoyi tehnologiyi. – 2009.–Т.43.–#6.–Р. 665–676.

5. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Ulev L.M., Boldirev S.O. Pokraschennya teplovoyi Integratsiyi na tsukrovih zavodah. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv – NTU «HPI». – 2002. – #2. – P. 11–16.

6. Bikanov S.M., Babak T.G., Danilov Yu.B., Bikanova V.V. Zastosuvannya metodu pinch-analizu pri provedenni teplovoyi Integratsiyi protsesu viparyuvannya hloridu magniyu. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv – NTU «HPI». – 2020. – #1. – P. 13–21.

7. Ryabova. I.B., Garev A.O., Graev L.A., Gorbunov K.O. Integratsiya tehnologichnih potokiv brazhnoyi ta epyuratsiynoyi koloni v protsesi virobnitstva rektifikovanogo etilovogo spirtu. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv – NTU «HPI». – 2021. – #2. – P. 30–40.

8. Bikanov S.M., Perevertaylenko O.Yu., Garev A.O., Gorbunov K.O., Ryabova I.B., Gaponova O.O., Karmazina Yu.A. Doslidzhennya dotsilnosti vikoristannya mehanichnoyi re-kompresiyi pri kompleksnoyi teplovoyi Integratsiyi rektifikatsiynih kolon // Naukovi pratsi Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy (ONAHT) – Odessa: 2013 – Vip. 43. – Tom 1. – P. 127–131.

9. Kompleksna teplova integratsiya protsesu rektifikatsiyi iz vikoristannyam termo-kompresiyi. // Bikanov S.M., Babak T.G., Gorbunov K.O., Ryshchenko I.M. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv. – NTU «HPI». – 2022. – #3. – P. 12–21.

10. Vikoristannya energetichnogo potentsialu protsesu rektifikatsiyi sumishi voda-otstova kislota. // Ryabova I.B., Sellhov Yu.A., Kotsarenko V.O., Gorbunov K.O., Babak T.G. // Naukovi pratsi Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy (ONAHT) – Odessa: 2016 – Vip. 1. – Tom 80. – P. 113–117.

11. Babak T.G., Bikanov S.M., Gorbunov K.O., Ponomarenko E.D., Solovey L.V. / Teplova integratsiya potokiv protsesu rozdilennya geteroazeotropnoyi sumishi furfurol-voda na dvoh vidginnih kolonah. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya / Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. – Harkiv : NTU «HPI», 2023. – # 1. – P. 3–13.

12. Chernishov I.S., Babak T.G., Fesenko E.O., Topunova T.V. Energoefektivna integratsiya teplovoyi shemi pri rektifikatsiyi sumishi benzol-toluol. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya / Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal. – Harkiv : NTU «HPI», 2009. – # 1. – P. 9–18.

13. Aynshteyn V.G., Zaharov M.K., Nosov G.A. Kompensuyuchiy teploviy nasos v protsesah himichnoyi tehnologiyi. Himichna promislovist. – 2000. – #9. – p. 454.

УДК 66.045.53

І. М. Рищенко, д. техн. н., професор, С. М. Биканов, к. техн. н., доцент,
К. О. Горбунов, к. техн. н., доцент, А. М. Миронов, к. техн. н., доцент,
М. В. Ільченко, к. техн. н., доцент

КОМПЛЕКСНА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ СУМІШІ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ

Здійснено комплексну теплову інтеграцію процесу ректифікації суміші бензол-толуол. Теплова інтеграція проводилась за допомогою методів пінч-аналізу та із застосуванням термокомпресії. За основу взята принципова технологічна схема ректифікації

суміші бензол-толуол продуктивністю 11 т/год. Для даної продуктивності на основі матеріального та теплового балансу розраховано витрати потоків, їх температури, теплове навантаження, потокові теплоємності. На основі розрахованих даних сформовано поточкову таблицю. Для інтеграції обрано три гарячих потоки: дистиллят, кубовий залишок та пар з верху колони, та два холодних потоки: початкова суміш та куб колони. Для здійснення термокомпресії розраховано необхідний ступень стиску парів. Для визначеного ступеня стискання розраховано температуру пара після стиску та температуру його конденсації. На основі техніко-економічних міркувань для даної технологічної схеми процесу ректифікації визначено мінімальну різницю температур $\Delta T_{\min}=12$ °С. Для обраної ΔT_{\min} побудовано складові криві потоків. За допомогою метода табличного алгоритму визначено температуру пінча для гарячих і холодних потоків, які становлять $T_{\text{Нпінч}}=82$ °С, $T_{\text{Спінч}}=70$ °С. Визначено мінімальну кількість гарячих і холодних утиліт: Q_{Hmin} та Q_{Cmin} . Для обраного ΔT_{\min} отримано рекуперацію тепла у кількості $Q_{\text{рек}}=2186,82$ кВт. Побудовано сіткову діаграму, розташовано теплообмінники у відповідності із CP та N правилами. Запропоновано технологічну схему процесу ректифікації після реконструкції із використанням термокомпресії. Модернізована схема включає використання чотирьох рекуперативних теплообмінників, одного підігрівача та двох холодильників для досягнення цільових температур потоків. Для здійснення термокомпресії пропонується встановити компресор. В якості теплообмінного обладнання запропоновано використання пластинчатих теплообмінників фірми Alfa Laval. Строк окупності запропонованого рішення складає приблизно два–два з половиною роки.

Ключові слова: тепла інтеграція, пінч-аналіз, гарячі та холодні утиліти, складові криві, сіткова діаграма, рекуперація, ректифікація, бензол, толуол, термокомпресія.

И. М. Рыщенко, д. техн. н., профессор, С. Н. Быканов, к. техн. н., доцент,
К. А. Горбунов, к. техн. н., доцент, А. Н. Миронов, к. техн. н., доцент,
М. В. Ильченко, к. техн. н., доцент

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕПЛОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСИ БЕНЗОЛ-ТОЛУОЛ

Осуществлена комплексная тепловая интеграция процесса ректификации смеси бензол-толуол. Тепловая интеграция проводилась с помощью методов пинч-анализа и с применением термокомпрессии. За основу взята принципиальная технологическая схема ректификации смеси бензол-толуол производительностью 11 т/ч. Для данной производительности на основе материального и теплового баланса рассчитаны расходы потоков, их температуры, тепловая нагрузка, поточные теплоемкости. На основе рассчитанных данных сформирована поточная таблица. Для интеграции выбрано три горячих потока: дистиллят, кубовый остаток и пар из верхней части колонны, и два холодных потока: начальная смесь и куб колонны. Для осуществления термокомпрессии рассчитана необходимая степень сжатия паров. Для определенной степени сжатия рассчитана температура пара после сжатия и температура его конденсации. На основе технико-экономических соображений для данной технологической схемы процесса ректификации определена минимальная разница температур $\Delta T_{\min}=12$ °С. Для выбранной ΔT_{\min} построены составляющие кривые потоков. С помощью метода табличного алгоритма определена температура печная для горячих и холодных потоков, составляющих $T_{\text{Нпінч}}=82$ °С, $T_{\text{Спінч}}=70$ °С. Определено минимальное количество горячих и холодных утиліт: Q_{Hmin} и Q_{Cmin} . Для выбранного ΔT_{\min} получена рекуперация тепла в количестве $Q_{\text{рек}}=2186,82$ кВт.

Построена сетевая диаграмма, расположены теплообменники в соответствии с *CP* и *N* правилами. Предложена технологическая схема процесса ректификации после реконструкции с использованием термокомпрессии. Модернизированная схема включает в себя использование четырех рекуперативных теплообменников, одного подогревателя и двух холодильников для достижения целевых температур потоков. Для осуществления термокомпрессии предлагается установить компрессор. В качестве теплообменного оборудования предложено использование пластинчатых теплообменников фирмы Alfa Laval.

Срок окупаемости предлагаемого решения составляет примерно два-два с половиной года.

Ключевые слова: тепловая интеграция, пинч-анализ, горячие и холодные утилиты, составные кривые, сетевая диаграмма, рекуперация, ректификация, бензол, толуол, термокомпрессия.

I. M. Ryshchenko, S. M. Vykanov, K. O. Gorbunov, A. M. Myronov, M. V. Ilchenko

COMPLEX THERMAL INTEGRATION OF THE RECTIFICATION PROCESS OF THE BENZENE-TOLUENE MIXTURE

Comprehensive thermal integration of the benzene-toluene mixture rectification process was carried out. Thermal integration was carried out using pinch analysis methods with using thermocompression. The principle technological scheme of rectification of the benzene-toluene mixture with a productivity of 11 t/h is taken as a basis. For this performance, the consumption of flows, their temperatures, heat load, and flow heat capacities are calculated on the basis of the material and heat balance. Based on the calculated data, a flow table was created. Three hot streams are selected for integration: the distillate, the tailings, and the vapor from the top of the column, and two cold streams: the initial mixture and the column cube. The necessary degree of vapor compression is calculated for thermocompression. For a given degree of compression, the temperature of the steam after compression and the temperature of its condensation were calculated. Based on the technical and economic considerations, the minimum temperature difference $\Delta T_{\min}=12$ °C was determined for this technological scheme of the rectification process. For the selected ΔT_{\min} , the component curves of the flows are constructed. Using the table algorithm method, the temperatures of the furnace for hot and cold flows were determined, which are $T_{\text{Hpinh}}=82$ °C, $T_{\text{Cpinh}}=70$ °C. The minimum number of hot and cold utilities is determined: Q_{Hmin} and Q_{Cmin} . For the selected ΔT_{\min} , heat recovery was obtained in the amount of $Q_{\text{rek}}=2186,82$ kW. A grid diagram is constructed, heat exchangers are located in accordance with *CP* and *N* rules. A technological scheme of the rectification process after reconstruction using thermocompression is proposed. The upgraded scheme includes the use of four recuperative heat exchangers, one heater and two coolers to achieve target flow temperatures. It is recommended to install a compressor for thermocompression. The use of Alfa Laval plate heat exchangers is proposed as heat exchange equipment. The payback period of the proposed solution is approximately two to two and a half years.

Keywords: heat integration, pinch analysis, hot and cold utilities, composite curves, net diagram, recuperation, rectification, benzene, toluene, thermocompression.