

Рищенко І.М., д.техн.н., професор, Биканов С.М., к.техн.н., доцент, Бабак Т.Г., доцент, Горбунов К.О., к.техн.н., професор

## КОМПЛЕКСНА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОКОМПРЕСІЇ

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків*

**Ключові слова:** ректифікація, тепла інтеграція, пінч-аналіз, гарячі утиліти, складені криві, технологічні потоки, тепловий насос, термокомпресія, теплообмінник.

Процес ректифікації знаходить широке розповсюдження в багатьох галузях промисловості. Також відомо, що проведення ректифікації потребує значних витрат енергії, яка витрачається на нагрівання початкової суміші до температури кипіння та випаровування суміші. Також необхідно охолоджувати компоненти, які отримуються при розділенні. Тому пошук технологічних схем процесу ректифікації, що забезпечують максимальне зниження енерговитрат, є актуальною задачею.

Один з сучасних підходів до проектування технологічних схем, що спрямовані на забезпечення ресурсо- і енергозбереження, є пінч-аналіз [1, 2, 3]. Використання методів пінч-аналізу дозволяє досягти максимальної рекуперації тепла в хіміко-технологічній системі шляхом інтеграції теплових потоків. Спочатку ці методи застосовувалися в нафтогазових виробництвах, де існує велика кількість теплообмінного об'єднання і питання раціонального використання тепла поставало дуже актуально (це питання, наприклад, розглянуто в роботі [4]), потім використовувались для енергозбереження у харчовій промисловості [5], при випарюванні солей [6] та в інших галузях хімічної промисловості.

Методи пінч-аналізу неодноразово застосовувались при інтеграції процесів ректифікації [7–10]. В роботі [10] було розглянуто застосування теплового насоса і класичних методів пінч-інтеграції в процесі розділення легких вуглеводнів. Ці методи було вирішено застосувати для рішення проблеми, що розглядається.

У роботі [11] було розглянуто теплову інтеграцію суміші метанол-вода, але вона проводилась без застосування «внутрішньої» інтеграції – без застосування термокомпресії і охоплювала «зовнішню» інтеграцію, тобто теплову інтеграцію потоків дистиляту, кубового залишку, пара з верху колони і початкової суміші та суміші в кубі. В даній роботі відбувається спроба провести комплексну теплову інтеграцію процесу ректифікації суміші метанол-вода з використанням як «зовнішньої» інтеграції з використанням методу пінч-аналізу, так і «внутрішньої» інтеграції – з використанням термокомпресії (теплового насосу).

Розглянемо комплексну теплову інтеграцію процесу ректифікації на прикладі розділення суміші метанол-вода продуктивністю 8450 кг/год. Вміст низько киплячого компонента (метанолу) в початковій суміші  $\bar{x}_F = 41\%$  мас, в дистиляті  $\bar{x}_P = 98\%$  мас, в кубовому залишку  $\bar{x}_W = 3\%$  мас. Така установка може бути використана на виробництві отримання метанолу методом неповного окислення вуглеводнів природного газу киснем повітря. За основу візьмемо принципову схему ректифікації, яку зображено на рис. 1.

За такою схемою початкова суміш метанолу та води  $F$  підігривається до температури кипіння в підігривачі  $\Pi$  і надходить у колону. В кубі колони відбувається випаровування суміші завдяки теплу випарника  $B$ . Пара, що надходить зверху колони у кількості  $G$ , конденсується в дефлегматорі  $D$ . Сконденсована рідина розділяється на флегму  $\Phi$ , яка направляєється в колону та дистиллят  $P$  – практично чистий метанол, який охолоджується в холодильнику  $X1$ . Кубовий залишок  $W$ , який відбирається із низу колони, охолоджується в холодильнику  $X2$ .

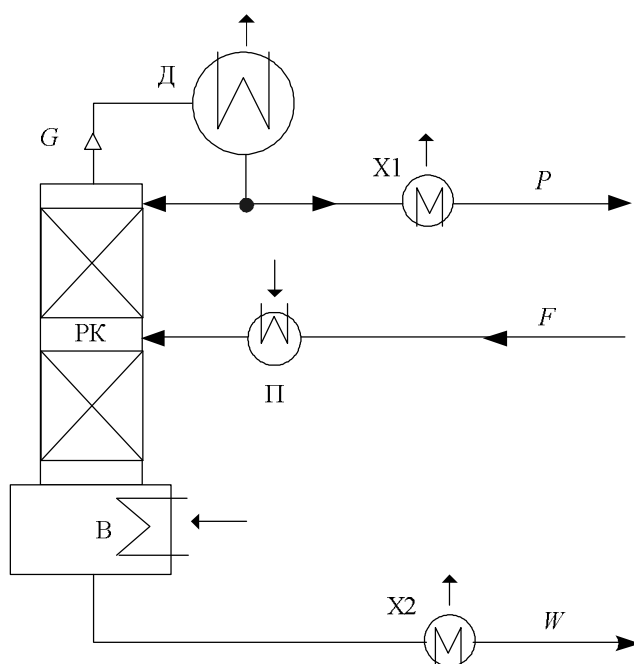


Рисунок 1 – Принципова технологічна схема процесу ректифікації метанол-вода  
 РК – ректифікаційна колонна, Д – дефлегматор,  $\Pi$  – підігривач, В – випарник куба,  
 X1, X2 – холодильники дистилляту та кубового залишку

В якості агента, що гріє, в підігривачі початкової суміші та випарнику куба використовується водяна пара. В дефлегматорі, холодильниках дистилляту та кубового залишку, охолоджуючою рідиною є вода.

Як впливає з принципової технологічної схеми, рекуперація тепла за такою компоновкою не відбувається. Розрахунки показують, що витрата гріючої пари на проведення процесу складає 1,43 кг/с (при  $P_{гп} = 3$  атм), витрата води на охолодження 36,05 кг/с при різниці температур 20°C. Загальна потужність енергоносіїв складають: гарячого: 3099,34 кВт (гаряча утиліта), холодного 3023,1 кВт (холодна утиліта). Кількість тепла, яке необхідно витратити на підігрівання початкової суміші за такою схемою, складає 409,64 кВт. Кількість тепла яке необхідно відводити для охолодження кубового залишку і дистилляту складає 483,4 кВт. Розрахунки проведено на основі матеріального та теплового балансу колони.

Розглянемо варіант інтеграції процесу ректифікації суміші метанол-вода за допомогою теплової інтеграції технологічних потоків на основі пінч-аналізу.

Основними технологічними потоками ректифікаційної установки є потоки початкової суміші  $F$  (холодний потік), дистиллят  $P$ , кубовий залишок  $W$  і потік пари зверху колони (гарячі потоки), а також потік куба колони (холодний потік). Дані, які було роз-

раховано і які характеризують теплові потоки, були занесені в таблицю потоків (табл. 1). Для потоків рідини, які не мають фазового переходу – це значення масової витрати  $G_m$ , кг/с; початкової  $T_s$  та кінцевої  $T_t$  температури, °С; питомої теплоємності  $c$ , кДж/кг·°С; потокової теплоємності  $CP$ , кВт/°С ( $CP = G_m \cdot c$ ); зміни потокової ентальпії (або теплове навантаження)  $\Delta H$ , кВт ( $\Delta H = CP \cdot |T_s - T_t|$ ). Для потоків, в яких відбувається конденсація або випаровування (фазовий перехід) приймаємо приблизну рівність початкової і кінцевої температури, в цьому випадку потокова теплоємність  $CP = \infty$ . Ці потоки характеризує питома теплота пароутворення  $r$ , кДж/кг та зміна потокової ентальпії (теплове навантаження)  $\Delta H$ , кВт.

Усі технологічні потоки, що наведені в табл.1 умовно можна розбити на дві групи. Перша група це потоки із великим споживанням енергії зовнішніх утиліт: це потік кипіння в кубі колони і потік пара із верху колони. Друга група – потоки із істотно меншим споживанням енергії – це потоки без фазового переходу. Тому для інтеграції за допомогою рекуперативних теплообмінників була обрана друга група потоків – потік початкової суміші, дистилату та кубового залишку.

Таблиця 1 – Таблиця потоків ректифікаційної установки

№	Найменування потоку	$G_m$ , кг/с	$T_s$ , °С	$T_t$ , °С	$c$ , кДж/кг·°С	$CP$ , кВт/°С	$r$ , кДж/кг	$\Delta H$ , кВт
1	F (хол.)	2,347	30	79	3,562	8,36	–	409,64
2	P (гар.)	0,938	65	30	2,623	2,46	–	86,10
3	W (гар.)	1,409	98,5	30	4,116	5,80	–	397,30
4	потік пара з верху колони $G$ (гар.)	2,261	65	65	–	–	1123,3	2539,7
5	потік куба колони (хол.)	–	98,5	98,5	–	–	–	2689,7

За даними табл. 1 було побудовано складені криві гарячих та холодних потоків. Для визначення точки пінча зрушуємо гарячу та холодну складені криві таким чином, щоб мінімальна відстань між ними по осі ординат  $\Delta T_{min}$  дорівнювало 15 °С (рис. 2). Вибір мінімальної різниці температур  $\Delta T_{min}$  проводився з урахуванням оптимального співвідношення енергетичних та капітальних затрат.

В результаті визначено, що при розміщенні теплообмінників за правилами пінч-аналізу можна рекуперувати 359,5 кВт теплової енергії, при цьому мінімальна температурна різниця в теплообміні обладнанні при протиточній організації руху теплоносіїв не буде перевищувати  $\Delta T_{min}$ .

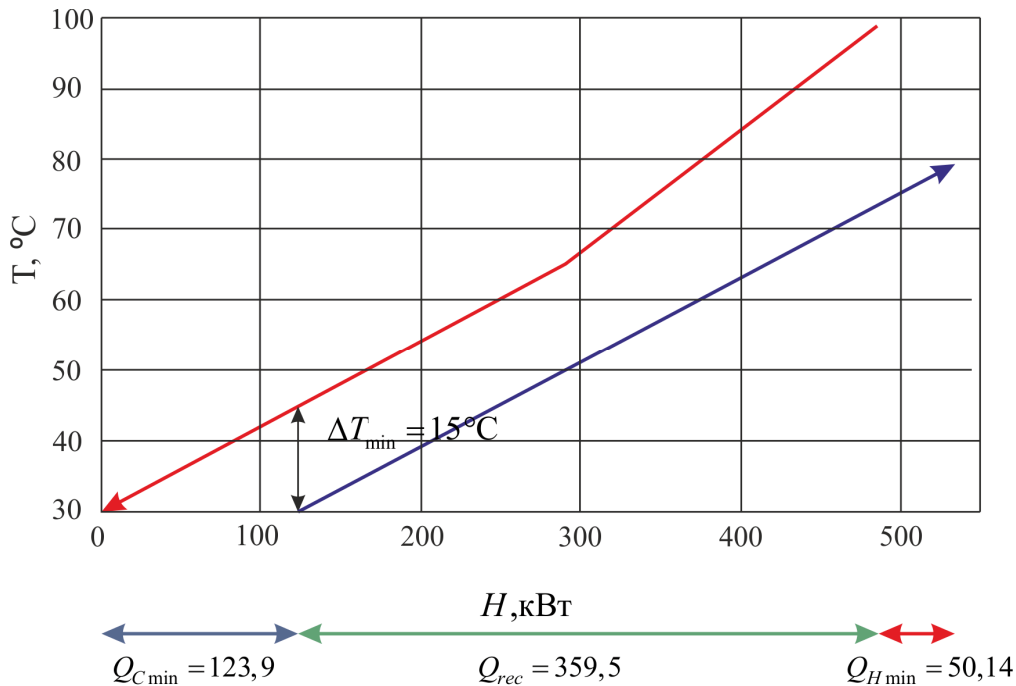


Рисунок 2 – Складені криві теплових потоків 1, 2, 3

На основі розрахованих даних будуюмо сіткову діаграму і розміщуємо теплообмінники у відповідності із пінч-правилами, що дозволяє досягнути максимальної рекуперації тепла, яка відповідає  $\Delta T_{\min} = 15^\circ\text{C}$  (рис. 3).

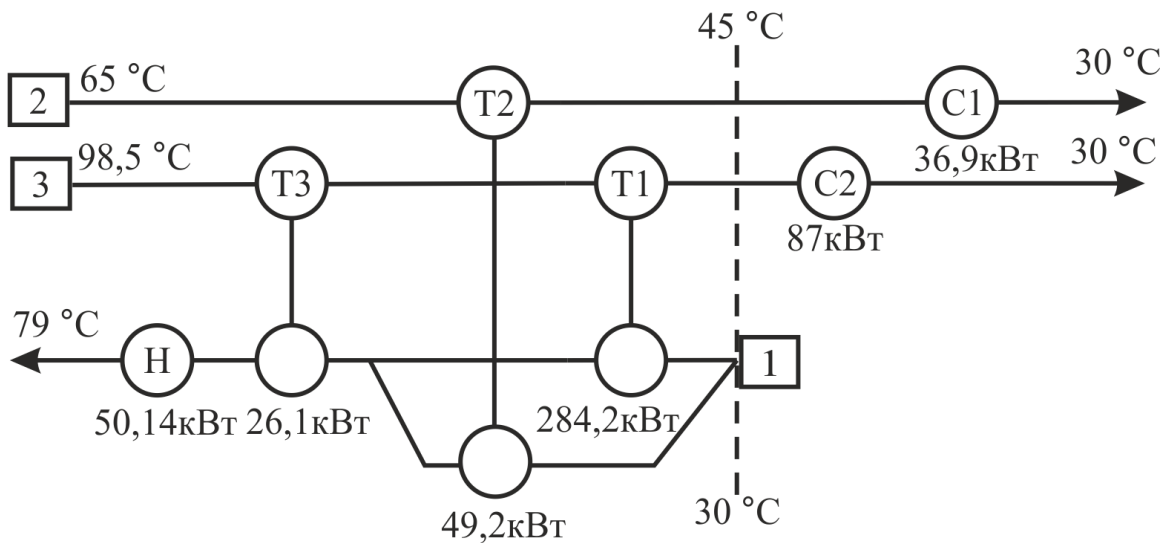


Рисунок 3 – Сіткова діаграма з встановленим теплообмінним обладнанням

Із представленої схеми випливає, що тепло дистилляту та кубового залишку використовується для підігріву початкової суміші. Завдяки цьому кількість тепла, необхідне для підігрівання початкової суміші (гарячі утиліти) зменшилось на 359,5 кВт і склало  $Q_{H\min} = 50,14$  кВт, а кількість тепла, яке необхідно відводити для охолодження дистилляту та кубового залишку (холодні утиліти), знизилось на 359,5 кВт і склало  $Q_{C\min} = 123,9$  кВт.

В деяких працях [10, 12] вказується на можливість застосування теплового насосу (або термокомпресії) при проведенні процесу ректифікації. Було вирішено запропонувати застосування теплового насосу (термокомпресії) і в даній роботі. В цьому випадку у верхній частині колони замість дефлегматора необхідно встановити компресор. Пара у кількості  $G$ , що виходить із вершу ректифікаційної колони, потрапляє в компресор, де відбувається її стискання. При цьому температура пари підвищується, і якщо розрахувати необхідну ступінь стискання, то вона може бути використана для обігріву куба колони.

Витрата пари  $G$  визначалась з матеріального балансу колони і в значній мірі залежала від флегмового числа, яке в нашому випадку за розрахунками дорівнює 1,41. Також до загальної витрати пари необхідно додати невеличку додаткову кількість пари, яка повертається в колону після обігріву куба колони. Ця додаткова кількість пари визначалась згідно формулі, наведеної у роботі [12]:

$$DX = G \frac{c(T - T_1)}{r^*}.$$

Необхідна ступінь стискання пари в компресорі  $P_2/P_1$  обиралась з урахуванням необхідної температури пари, яка досягається при стисканні у компресорі. Ця температура, в свою чергу, визначається температурою кипіння суміші метанол-вода в кубі колони  $t_w$  та температурою пари (приблизно дорівнює  $t_p$ ), яка виходить з верха колони і потрапляє до компресора. При розрахунках отримано, що необхідна ступінь стискання пари дорівнює шести ( $P_2/P_1 = 6$ ). Це дозволяє підвищити температуру пари після стискання до  $119^\circ\text{C}$ . Цієї температури достатньо, щоб забезпечити сталу роботу куба-випарника. Розраховано, що для забезпечення цього процесу потрібен компресор потужністю 800 кВт і насос потужністю 30 кВт. Варіант технологічної схеми процесу ректифікації суміші метанол-вода із тепловим насосом (термокомпресією) – «внутрішньою» інтеграцією, і тепловою інтеграцією рідких технологічних потоків – «зовнішньою» інтеграцією, представлено на рис. 3.

За такою схемою «зовнішня» теплова інтеграція відбувається так, як вказано на сітковій діаграмі: тепло дистиляту та кубового залишку використовується для підігрівання початкової суміші. Але тут додається «внутрішня» інтеграція: компресор, який може бути встановлено зверху колони замість дефлегматора, стискає пару, що виходить з колони і підвищує його температуру до  $119^\circ\text{C}$ . Пара після компресора направляється на обігрівання кубу колони. Це відбувається в додатковому теплообміннику-випарнику ДВ, який необхідно встановити в кубі колони. Кількість тепла, що передається при конденсації пари в цьому теплообміннику складає 2404,5 кВт. Після ДВ конденсат – рідина, практично чистий метанол, проходить через дросель, де скидається тиск до атмосферного і потрапляє до сепаратора, а із сепаратора насосом перекачується до розподільвача, де як зазвичай, розділяється на дистилят і флегму. Після дроселювання та сепарації частка пари із сепаратора повертається у верх колони, змішується із основною масою пари і йде на стискання у компресор (пунктирна лінія на рис. 4). Завдяки застосуванню теплового насосу (термокомпресії) витрата гріючої пари на обігрів куба колони скорочується більш ніж у 9 разів. Теплове навантаження теплообмінника-випарника куба колони В знижується з 2689,7 кВт до 285,2 кВт. Застосування теплового насосу (термокомпресії) дозволяє відмовитись від дефлегматора і не витратити воду на конденсацію пари.

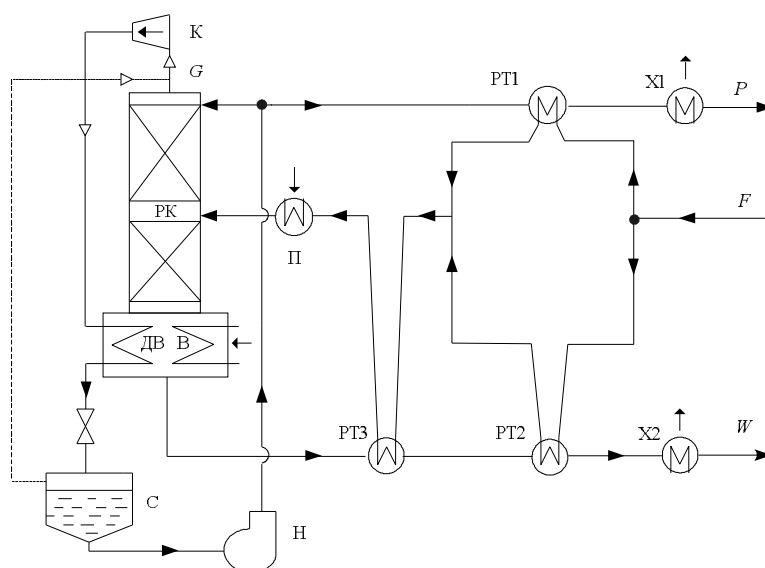


Рисунок 4 – Технологічна схема процесу ректифікації суміші метанол-вода із тепловим насосом (термокомпресією), і тепловою інтеграцією основних технологічних потоків  
 РК – ректифікаційна колонна, К – компресор, П – підігрівач початкової суміші,  
 В – випарник куба, ДВ – додатковий випарник, X1,2 – холодильники,  
 PT1, PT2, PT3 – рекуперативні теплообмінники, С – сепаратор, Н – насос

**Висновки.** Таким чином, в роботі було розглянуто теплову інтеграцію процесу ректифікації суміші метанол-вода. Встановлено, що при варіанті технологічної схеми із застосуванням теплового насоса (термокомпресії) та з тепловою інтеграцією основних технологічних потоків (рис.4) вдалось знизити витрати гарячого енергоносія з 3099,34 кВт до 335,34 кВт, тобто на 89,2 % у порівнянні із процесом, який проводиться за принциповою схемою. Компресор та насос, які необхідно встановити в цьому випадку, вживають відповідно 800 и 30 кВт електроенергії. Але оскільки питома вартість електроенергії менш, ніж питома вартість гріючої пари, то застосування теплового насоса виглядає перспективним. Кількість холодних утиліт вдалось знизити з 3023,1 кВт до 123,9 кВт, тобто на 95,7 % у порівнянні з принциповою схемою (рис. 1). Звісно, така комплексна теплова інтеграція (рис. 4) потребує встановлення нових теплообмінників, встановлення компресора, насоса, ємкості (сепаратора), прокладення нових трубопроводів та встановлення відповідних засобів автоматизації, що призведе до збільшення капітальних затрат. Однак, збільшення капітальних затрат в даному випадку виправдано, оскільки в результаті капіталовкладень зменшується енергоємність виробництва, що і дасть, в перспективі, економічну доцільність.

В роботі [13], в якій також було запропоновано використовувати тепловий насос, вдалось повністю відмовитись від використання гріючої пари для випарника кип'ятильника в кубі та підігрівача початкової суміші. Уся кількість тепла, що було отримано від конденсації пари, який було отримано завдяки стисканню в компресорі, вистачило для забезпечення процесу випаровування в кубі колони та підігрівання початкової суміші. Таким чином, економія гарячої утиліти досягла 100 %. Нам цього не вдалось досягти. Це може бути пояснено співвідношенням питомої теплоти випаровування низько киплячого (НК) та високо киплячого (ВК) компонентів суміші, які переважно містяться відповідно в дистилаті та кубовому залишку. В нашому випадку, наприклад,

при температурі 60 °С, питома теплота пароутворення метанолу (НК)  $r_{НК} = 1110,4$  кДж/кг, води  $r_{ВК} = 2356,9$  кДж/кг. Таким чином,  $r_{НК} < r_{ВК}$ . В роботі [13] розділяється суміш вода-оцтова кислота і там вода НК, а оцтова кислота ВК, її питома теплота пароутворення  $r_{ВК} = 406,4$  кДж/кг (при 118 °С) і там маємо інше співвідношення:  $r_{НК} > r_{ВК}$ , яке і дозволяє досягти більшу економію гарячої утиліти у випадку застосування теплового насоса (термокомпресії).

### Література

1. Smith R. Chemical Process Design and Integration. Chichester. McGraw-Hill, John Wiley and Sons Ltd. 2005. 687 p.
2. Kemp Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. – OXFORD. Elsevier Ltd. 2007. 396 p.
3. Смит Р., Клемеш Й., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М. Основы интеграции тепловых процессов.– Харьков: НТУ «ХПИ». 2000.– 456 с.
4. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М., Болдырев С.А., Арсеньева О.П., Гарновский 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.
5. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М., Болдырев С.А. Улучшение тепловой интеграции на сахарных заводах. // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків – НТУ «ХПИ». – 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. // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків НТУ «ХПИ».– 2020.– №1. С. 13–21.
7. Ульєв Л.М., Гарєв А.О., Миронов А.М. Пінч-аналіз процесу ректифікації суміші фурфурол-вода. // Вісник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 9. – С. 90–97.
8. 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.
9. Рябова І.Б., Гарєв А.О., Гарєв Л.А., Горбунов К.О. Интеграція технологічних потоків бражної та епіюраційної колони в процесі виробництва ректифікованого етилового спирту. // Интегровані технології та енергозбереження. – 2021. №2.– С. 30–40.
10. Интеграция теплового насоса в процесс разделения легких углеводов / Ульєв Л.М., Зебешев Т.З., Рябова І.Б., Васильєв М.А. // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2016. – Т. 80, вип. 1.– С. 8–14.
11. Застосування методів пінч-аналізу для підвищення енергоефективності ректифікаційної установки / Т.Г. Бабак, С.М. Биканов, Є.Д. Пономаренко // Комп'ютерне моделювання і керування в техніці та технологіях (КМКТТ-2021) : збірник наукових статей Дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції, 12–14 травня 2021 р. – Київ : Інтерсервіс, 2021. – С. 143–148.
12. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Компенсирующий тепловой насос в процессах химической технологии. / Химическая промышленность.– 2000.– №9.– С. 454–462.

13. Гарев А.О., Чернышов И.С., Бабак Т.Г., Колесник С.А. Способы экономии энергоносителей в ректификационных установках. / Интегровані технології та енергозбереження. – 2009.– №4.– С. 70–74.

**Bibliography (transliterated)**

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

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

3. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov.– Harkov: NTU «HPI». 2000.– 456 p.

4. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldyrev S.A., Arseneva O.P., Tarnovskiy M.V. Integratsiya teplovyih protsessov na ustanovke pervichnoy pererabotke nefli AVT A 12/2 pri rabote v zimnee vremya. // Teoreticheskie osnovyi himicheskoy tehnologii. – 2009.– Т.43.–#6.– P. 665–676.

5. Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M., Boldyrev S.A. Uluchshenie teplovoi integratsii na saharnyih 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 teplovoi integratsiyi protsesu viparyuvannya hloridu magniyu. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv NTU «HPI».– 2020.– #1.– P. 13–21.

7. Ulyev L.M., GarEv A.O., Mironov A.M. Pinch-analiz protsesu rektifikatsiyi sumishi furfurool-voda. // Visnik NTU «HPI». – 2013. – # 9. – P. 90–97.

8. 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.

9. Ryabova I.B., Garev A.O., Garev L.A., Gorbunov K.O. Integratsiya tehnologichnih potokiv brazhnoyi ta epuratsiyanoi koloni v protsesi virobnitstva rektifikovanogo etilovogo spiritu. // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 2021. #2.– P. 30–40.

10. Integratsiya teplovogo nasosa v protsess razdeleniya legkih uglevodorodov / Ulyev L.M., Zebeshev T.Z., Ryabova I.B., Vasilev M.A. // Naukovi pratsi [Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy]. – 2016. – Т. 80, vip. 1.– P. 8–14.

11. Zastosuvannya metodiv pInch-analizu dlya pidvischennya energoefektivnosti rektifikatsiyanoi ustanovki / T.G. Babak, S.M. Bikanov, E.D. Ponomarenko // Komp'yuterne modelyuvannya i keruvannya v tehnitsi ta tehnologiyah (KMKTТ-2021) : zbirnik naukovih statey Dev'yatoyi mizhnarodnoyi naukovopraktichnoyi konferentsiyi, 12–14 travnya 2021 r. – Kiyiv : Interservis, 2021. – P. 143–148.

12. Aynshteyn V.G., Zaharov M.K., Nosov G.A. Kompensiruyuschiy teplovoi nasos v protsessah himicheskoy tehnologii. / Himicheskaya promyshlennost.– 2000.– #9.– P. 454–462.

13. Garev A.O., Chernyishov I.S., Babak T.G., Kolesnik S.A. Sposoby ekonomii energonositeley v rektifikatsionnyih ustanovkah. / Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 2009.– #4.– P. 70–74.



УДК 621:664(076)

Рищенко І.М., д.техн.н., професор, Биканов С.М., к.техн.н., доцент, Бабак Т.Г., доцент, Горбунов К.О., к.техн.н., професор

### **КОМПЛЕКСНА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОКОМПРЕСІЇ**

Процес ректифікації знаходить широке розповсюдження в багатьох галузях промисловості і потребує значних витрат енергії. Пошук технологічних схем процесу ректифікації, яке забезпечує максимальне зниження енерговитрат, є актуальною задачею.

Один з сучасних підходів до проектування технологічних схем, що спрямовані на забезпечення ресурсо- і енергозбереження, є пінч-аналіз. В даній роботі було вирішено застосувати методи пінч-аналізу і тепловий насос (термокомпресію) для комплексної теплової інтеграції процесу ректифікації суміші метанол-вода.

На основі матеріального і теплового балансу ректифікаційної колони було розраховано характеристики основних технологічних потоків процесу ректифікації суміші метанол-вода: їх витрати, температури, питому теплоємність, потокову теплоємність та зміну потокової ентальпії (теплове навантаження). Сформовано потокову таблицю. Побудовано складені криві процесу для мінімальної різниці температур  $\Delta T_{\min}$ , визначено точку пінча і мінімальні значення потужності гарячих та холодних утиліт. На основі розрахованих даних побудовано сіткову діаграму і розташовано теплообмінники у відповідності із пінч-правилами, що дозволяє досягнути максимальної рекуперації тепла, яка відповідає обраному  $\Delta T_{\min}$ .

Для застосування теплового насоса (термокомпресії) було розраховано необхідну ступінь стисання пари в компресорі  $P_2/P_1$ . Вона була обрана з урахуванням необхідної температури пари, яка достатня для обігріву куба колони. На основі цих розрахунків розроблено технологічну схему процесу ректифікації метанол-вода із тепловим насосом (термокомпресією) і тепловою інтеграцією основних технологічних потоків. Така схема дає значну економію гарячих та холодних утиліт у порівнянні із проведенням процесу ректифікації суміші метанол-вода за принциповою технологічною схемою.

**Ключові слова:** ректифікація, тепла інтеграція, пінч-аналіз, гарячі утиліти, складені криві, технологічні потоки, тепловий насос, термокомпресія, теплообмінник.

Рыщенко И.М., д.техн.н., профессор, Биканов С.Н., к.техн.н., доцент, Бабак Т.Г., доцент, Горбунов К.А., к.техн.н., профессор

### **КОМПЛЕКСНАЯ ТЕПЛОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОКОМПРЕССИИ**

Процесс ректификации находит широкое применение в различных областях промышленности и требует значительных затрат энергии. Поиск технологических схем процесса ректификации, который обеспечивает максимальное снижение энергозатрат, представляется актуальной задачей.

Один из современных подходов к проектированию технологических схем, направленных на ресурсо- и энергосбережение, является пинч-анализ. В данной работе было решено применить методы пинч-анализа и тепловой насос (термокомпресию) для комплексной интеграции процесса ректификации смеси метанол-вода.

На основе материального и теплового баланса ректификационной колонны были рассчитаны характеристики основных технологических потоков процесса ректифика-

ции смеси метанол-вода: их расходы, температуры, удельные теплоемкости, потоковые теплоемкости и изменение потоковой энтальпии (тепловая нагрузка). Сформирована потоковая таблица. Построены составные кривые процесса для минимальной разницы температур  $\Delta T_{\min}$ , определена точка пинча и минимальные значения горячих и холодных утилит. На основе рассчитанных данных построена сеточная диаграмма и размещены теплообменники в соответствии с пинч-правилами, что позволяет достигнуть максимальной рекуперации тепла, которое отвечает выбранному  $\Delta T_{\min}$ .

Для применения теплового насоса (термокомпресии) была рассчитана необходимая степень сжатия пара в компрессоре  $P_2/P_1$ . Она была выбрана с учетом необходимой температуры пара, которая была достаточной для обогрева куба колонны. На основе этих расчетов разработана технологическая схема процесса ректификации метанол-вода с тепловым насосом (термокомпресией) и тепловой интеграцией основных технологических потоков. Такая схема дает значительную экономию горячих и холодных утилит по сравнению с проведением процесса ректификации смеси метанол-вода по принципиальной технологической схеме.

**Ключевые слова:** ректификация, тепловая интеграция, пинч-анализ, горячие утилиты, составные кривые, технологические потоки, тепловой насос, термокомпресия, теплообменник.

Ryshenko I.M., Bykanov S.M., Babak T.G., Gorbynov K.A.

### **COMPLEX THERMAL INTEGRATION OF THE RECTIFICATION PROCESS USING THERMAL COMPRESSION**

The rectification process is widespread in many industries and requires significant energy consumption. The search for technological schemes of the rectification process, which ensures the maximum reduction of energy consumption, is a relevant task.

One of the modern approaches to the design of technological schemes aimed at ensuring resource and energy saving is pinch analysis. In this work, it was decided to apply the methods of pinch analysis and heat pump (thermo-compression) for complex thermal integration of the methanol-water mixture rectification process.

On the basis of the material and heat balance of the rectification column the characteristics of the main technological flows of the methanol-water mixture rectification process were calculated: their consumption, temperatures, specific heat capacity, flow heat capacity, and enthalpy change (heat load). A flow table has been created. Composite process curves for the minimum temperature difference  $\Delta T_{\min}$  were constructed, the pinch point and the minimum power values of hot and cold utilities were determined. Based on the calculated data, a grid diagram was constructed and heat exchangers were located in accordance with the pinch rules, which allows to achieve the maximum heat recovery that corresponds to the selected  $\Delta T_{\min}$ .

For the use of a heat pump (thermo-compression), the required degree of steam compression in the  $P_2/P_1$  compressor was calculated. It was chosen taking into account the necessary steam temperature, which is sufficient for heating the cube of the column. Based on these calculations a technological diagram of the methanol-water rectification process with a heat pump (thermo-compression) and thermal integration of the main technological flows was developed. Such a scheme provides a significant saving of hot and cold utilities in comparison with carrying out the process of rectification of the methanol-water mixture according to the principle technological scheme.

**Keywords:** rectification, thermal integration, pinch analysis, hot utilities, composite curves, technological flows, heat pump, thermal compression, heat exchanger.