

Найбільші значення термічні маси встановлені при використанні композитних адсорбентів «силікагель – натрій сульфат», що відповідає максимальним значенням граничної адсорбції та теплоти адсорбції, що сприяє зменшенню розмірів адсорбційного модуля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sangwon S., Kawakami H., Mikšík F., Takata N., Thu Kyaw, Miyazaki T. Thermodynamic analysis and impact of thermal masses on adsorption cycles using MaxsorbIII/R245fa and SAC-2/R245fa pairs. *International Journal of Refrigeration*, 2021. Vol. 123. P. 52–62
2. Gluesenkamp K. R., Frazzica A., Velte A., Metcalf S., Yang Z., Rouhani M., Corey B., Ming Q., Laurenz E., Rivero-Pacho A., Hinners S., Critoph R., Bahrami M., Földner G., Hallin I. Experimentally Measured Thermal Masses of Adsorption Heat Exchangers. *Energies*, 2020. Vol. 13. P. 1150
3. Freni A., Maggio, G., Sapienza A., Frazzica A., Restuccia G., Vasta S. Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration. *Applied Thermal Engineering*, 2016. Vol. 104. P. 85–95
4. Sukhyi K. M., Belyanovskaya E. A., Sukhyi M. P. Technology Development for Adsorptive Heat Energy Converters: *Emerging Research and Opportunities*. San Francisco: IGI-GLOBAL, USA. 2020 328 p.

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПИНЧ-АНАЛІЗУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

Бабак Т. Г., Биканов С. М., Пономаренко Є. Д.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПИНЧ-АНАЛИЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Бабак Т. Г., Быканов С. Н., Пономаренко Е. Д.

APPLICATION OF THE PINCH ANALYSIS TECHNIQUES FOR THE RECTIFYING PLANT ENERGY EFFICIENCY IMPROVING

Babak T., Bykanov S., Ponomarenko Ye.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Харків, Україна

tgbabak@gmail.com

sergiobyk1980@gmail.com

yevgeniya.ponomarenko@gmail.com

Для підвищення енергоефективності процесу ректифікації суміші метанол-вода було запропоновано проект модернізації мережі теплообмінного обладнання ректифікаційної установки. Було проведено екстракцію даних процесу, побудовано складені криві теплових потоків, визначено недоліки в рекуперації тепла. Для обраного $\Delta T_{\min} = 7^\circ\text{C}$ обчислено цільові значення потужності зовнішніх утиліт та побудовано мережу теплообмінників. Підібрано сучасні пластинчаті теплообмінні апарати. Оцінка терміну окупності проекту складає півроку.

Ключові слова: ректифікаційна установка, рекуперація енергії, пінч-аналіз, порогова задача, пластинчаті теплообмінники

Для повышения энергоэффективности процесса ректификации смеси метанол-вода был предложен проект модернизации сети теплообменного оборудования ректификационной установки. Проведена экстракция данных процесса, построены составные кривые тепловых потоков, выявлены недостатки в рекуперации тепла. Для выбранного $\Delta T_{\min} = 7^\circ\text{C}$ вычислены целевые значения мощности внешних утилит и спроектирована сеть теплообменников. Подобраны современные пластинчатые теплообменные аппараты. Оценка срока окупаемости проекта составляет полгода.

Ключевые слова: ректификационная установка, рекуперация энергии, пинч-анализ, пороговая задача, пластинчатые теплообменники

The retrofit of the rectifying plant heat exchanger network was proposed to improve the methanol-water mixture refining process energy efficiency. Process data extraction was done, the composite curves were constructed, the shortcomings in heat recovery were exposed. The target values of utilities for the selected $\Delta T_{\min} = 7^\circ\text{C}$ were calculated, the heat exchanger network was designed. Modern plate heat exchangers were selected. The estimated payback period of the design is half a year.

Keywords: rectifying plant, heat recovery, pinch analysis, threshold problem, plate heat exchangers

ВСТУП

Серед існуючих методів розділення рідких бінарних сумішей процеси перегонки є одними з найбільш енергоємних. При цьому багаторазова конденсація пари з одночасним випаровуванням рідини і утворенням пари нового складу робить процес ректифікації значно більш ефективним, ніж інші процеси перегонки. Тому енергозбереження в процесах ректифікації є актуальним.

Крім прямих витрат на поділ важливу роль відіграє мінімізація допоміжних енерговитрат, яка може бути досягнута на стадії проектування або модернізації установки з використанням пінч-аналізу. Застосування пінч-аналізу дозволяє домогтися істотної фінансової економії за рахунок мінімізації використання зовнішніх енергоносіїв шляхом максимального застосування рекуперації теплоти в рамках даної енерготехнологічної системи. У разі модернізації існуючих виробництв методи пінч-аналізу дозволяють максимально використовувати вже встановлене обладнання в нових робочих мережах, що знижує інвестиції в реконструкцію [1, 2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для модернізації з метою підвищення енергоефективності було обрано процес ректифікації суміші метанол-вода. Продуктивність ректифікаційної установки складає 11880 кг/год. Масові частки метанолу у початковій суміші, дистиляті та кубовому залишку дорівнюють 0,5; 0,97; 0,05 відповідно.

В існуючій схемі ректифікаційної установки (рис. 1) використовується тепло кубового залишку для попереднього підігріву початкової суміші, тобто є технологічно обґрунтована рекуперація енергії теплових потоків.

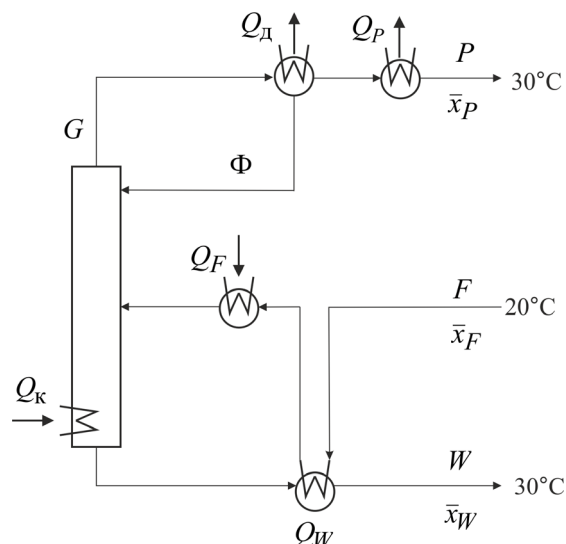


Рис. 1. Енерго-функціональна схема процесу ректифікації суміші метанол-вода

На енерго-функціональній схемі позначено такі теплообмінні апарати: кубовий випарник з навантаженням $Q_K = 4184,18$ кВт, дефлегматор з навантаженням $Q_D = 4118,14$ кВт, охолоджувач дистилату з навантаженням $Q_P = 161,99$ кВт, рекуперативний теплообмінник з навантаженням $Q_W = 455,2$ кВт та підігрівач вхідної суміші з навантаженням $Q_F = 194,76$ кВт. Потужність рекуперації – $Q_{рек} = 455,2$ кВт.

Для аналізу ефективності використання теплової енергії та для подальшої інтеграції технологічних потоків було проведено екстракцію даних процесу (в тому числі розрахунки матеріального та теплового балансів), що були занесені у потокову таблицю (табл. 1).

В таблиці наведено початкові і кінцеві температури технологічних потоків (T_S і T_T), їх витрати (G , кг/с), питомі теплоємності (C , кДж/ (кг·К)), питомі теплоти пароутворення (r , кДж/кг), потокові теплоємності (CP , кВт/К), зміни тепловмісту або ентальпії потоків (ΔH , кВт), де $\Delta H = G \cdot C \cdot (T_S - T_T) = CP \cdot \Delta T$.

На основі поточкових даних було побудовано складені криві процесу. Якщо розташувати їх на температурно-ентальпійній діаграмі таким чином, щоб проекція їх перекриття дорівнювала потужності рекуперації 455,2 кВт, можна побачити, що мінімальна відстань між ними по осі температур $\Delta T_{min} = 24$ °С (рис. 2). Тобто, згідно принципам пінч-аналізу, існуюча потужність рекуперації може бути реалізована при мінімальній температурній різниці в теплообмінному обладнанні 24 °С.

В рекуперативному теплообміннику, що встановлено, на холодній стороні температурна різниця між потоком початкової суміші та кубового залишку 10 °С. З цього можна зробити висновок, що поверхня рекуперативного теплообміну в установці більша за необхідну, тобто реалізація передачі тепла недостатньо ефективна.

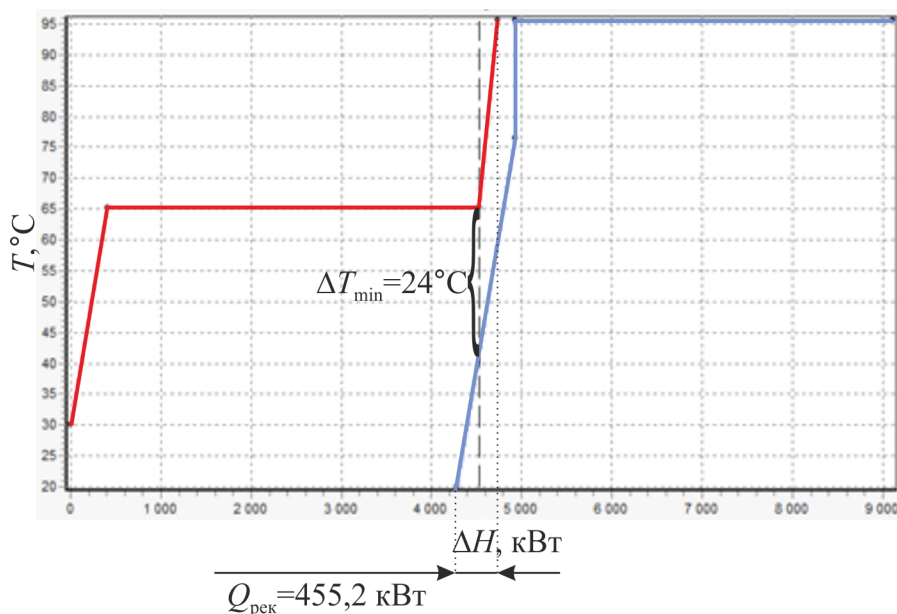
РІШЕННЯ ЗАДАЧІ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Для вибору мінімальної різниці температур в теплообмінному обладнанні було розглянуто варіанти розташування складених кривих для різних значень ΔT_{min} . Було встановлено, що при $\Delta T_{min} = 7,1447$ °С мінімальна необхідна потужність гарячих утиліт Q_{Hmin} дорівнює потужності кубового випарника. Треба відзначити, що для випарювання суміші у кубовому випарнику неможливо здійснити за рахунок тепла

інших потоків системи, тобто можна видалити потік, що випарюється, з системи потоків для інтеграції. В такому разі отримуємо порогову задачу [1–3] зі значенням $\Delta T_{\text{пор}} = \Delta T_{\text{min}} = 7,1447^\circ\text{C}$ (рис. 3).

Таблиця 1. Таблиця поточкових даних процесу

№	Потік	Тип	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_t, ^\circ\text{C}$	$G, \text{кг/с}$	$C, \text{кДж/ (кг}\cdot\text{K)}$	$CP, \text{кВт/К}$	$r, \text{кДж/кг}$	$\Delta H, \text{кВт}$
1	Дистилят	гар	65,3	30	1,614	2,843	4,589	–	161,99
2	Кубовий залишок	гар	95,6	30	1,686	4,116	4,589	–	455,2
3	Пара з верху колони	гар	65,3	65,3	3,624	–	–	1136,4	4118,14
4	Початкова суміш	хол	20	76,4	3,3	3,897	7,578	–	666,9
5	Потік в кубовому випарнику	хол	95,6	95,6	3,624	–	–	–	4184,18

Рис. 2. Складені криві при потужності рекуперації $Q_{\text{рек}} = 455,2 \text{ кВт}$

Для порогової задачі характерно, що при встановленні мінімальної відстані між складеними кривими по осі температур $\Delta T_{\text{пор}}$, зникає потреба в використанні однієї, а може і обох, зовнішніх утиліт. При цьому вибір ΔT_{min} меншим за $\Delta T_{\text{пор}}$ не змінює цільового значення зовнішньої утиліти з ненулевою потужністю. Тобто збільшення поверхні теплообміну не тягне за собою зменшення потужності утиліт. В даному випадку при $\Delta T_{\text{пор}} = 7,1447^\circ\text{C}$ $Q_{H\text{min}} = 0 \text{ кВт}$, $Q_{C\text{min}} = 4085,38 \text{ кВт}$, максимальна потужність рекуперації $Q_{\text{рек}} = 649,95 \text{ кВт}$.

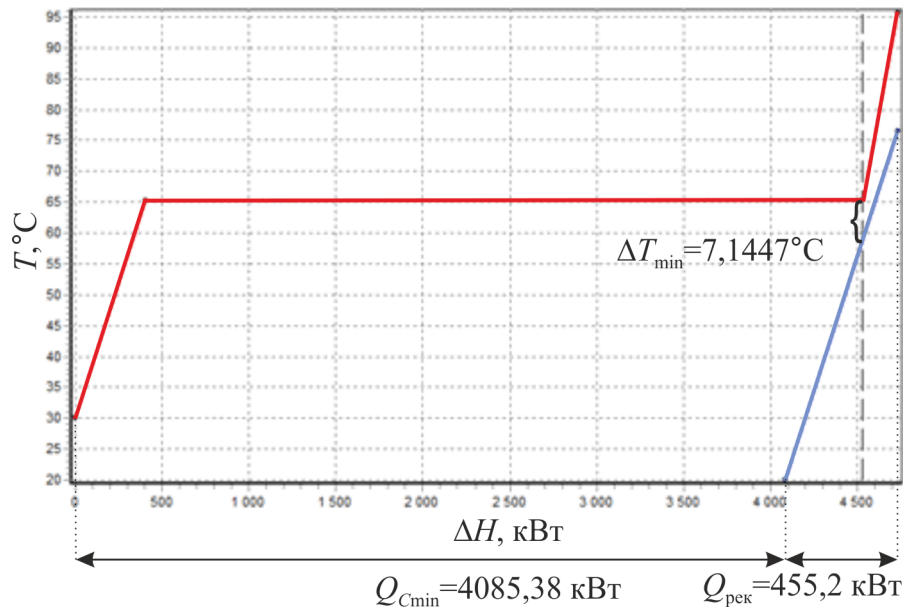


Рис. 3. Складені криві при $\Delta T_{\text{пор}} = \Delta T_{\text{min}} = 7,1447^\circ$

Оберемо для проектування мережі теплообмінників близьке до $\Delta T_{\text{пор}} = 7,1447^\circ\text{C}$ значення $\Delta T_{\text{min}} = 7^\circ\text{C}$.

Пінч характеризується взагалі тим, що поділяє систему потоків на дві підсистеми, одна з яких є джерелом тепла, а інша – стоком. Відсутність передачі тепла через пінч забезпечує мінімальне споживання зовнішніх утиліт. В класичній пінч-задачі пінч визначається місцем максимального зближення по температурній осі складених кривих.

У випадку порогової задачі розташування «істинного» пінча, відповідає тому кінцю складених кривих, де відсутня потреба в утилітах.

Місце, в якому в нашій задачі мінімальна відстань по температурній осі $\Delta T_{\text{min}} = 7^\circ\text{C}$, є «псевдо-пінчем», тому що через нього здійснюється невеликий перетік енергії, в даному випадку він дорівнює 1,67 кВт.

Для обраного $T_{\text{min}} = 7^\circ\text{C}$, було побудовано сіткову діаграму потоків, де температура пінча гарячих потоків дорівнює $65,3^\circ\text{C}$, холодних $58,3^\circ\text{C}$.

Розташування теплообмінників, як і для класичної пінч-задачі починається від області максимального зближення складених кривих, в даному випадку, «псевдо-пінча», але треба здійснювати рух і з іншого температурного кінця області вище «псевдо-пінча», де є жорстке обмеження $Q_{H\text{min}} = 0$ кВт. Таким чином здійснюється корегування температур потоків в області «псевдо-пінча».

Мережа теплообмінників, що побудована, реалізує потужність рекуперації $Q_{\text{рек}} = 649,95$ кВт, споживання зовнішніх утиліт $Q_{H\text{min}} = 0$ кВт (без урахування кубового випарника), $Q_{C\text{min}} = 4085,38$ кВт з переносом через пінч 1,67 кВт (рис. 4).

Для встановлення на позиції рекуперативних теплообмінників Т1-Т4 було обрано пластинчаті теплообмінні апарати фірми *Alfa Laval* (табл. 2).

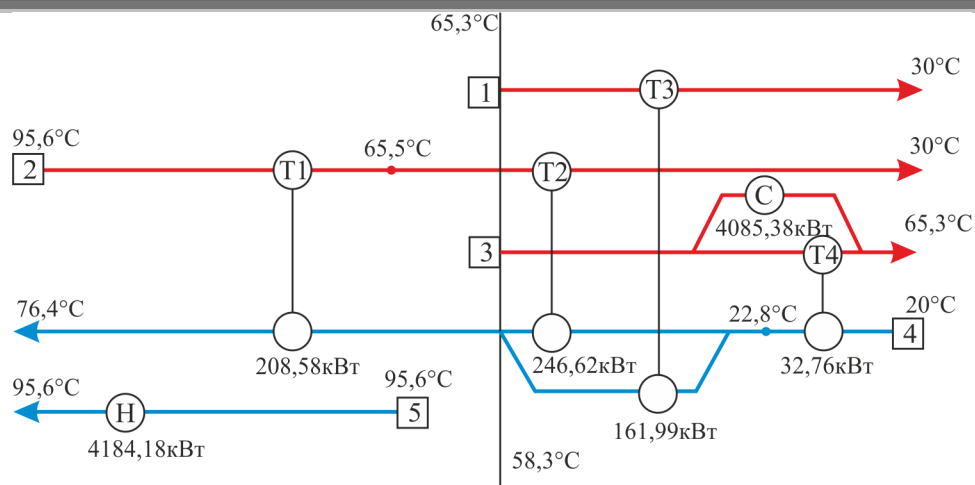


Рис. 4. Сіткова діаграма проекту модернізації ректифікаційної установки

Таблиця 2. Параметри теплообмінного обладнання

Позиція	T1	T2	T3	T4
Тип пластини	T5M	TL6B	TL6B	T5M
Кількість пластин	34	37	31	22
Площа поверхні, м ²	2,856	9,435	7,905	1,848

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Використання пінч-аналізу дозволяє виявити можливості підвищення енергоефективності розглянутого процесу. Потужність рекуперації збільшено з 455,2 кВт до 649,95 кВт, тобто економія енергії складає 194,75 кВт. Економічні розрахунки показали, що можна одержати річну економію 1841695 грн при 778881 грн капітальних вкладень. Прогнозована ефективність капітальних вкладень проекту – 1,9 грн. /грн. Розрахунковий термін окупності проекту складе приблизно півроку.

ВИСНОВКИ

1. Виявлено недоліки використання енергії технологічних потоків.
2. Обрано значення мінімальної температурної різниці в теплообмінному обладнанні T_{min} та знайдено відповідні цільові значення потужності утиліт.
3. Проведено інтеграцію теплових потоків з урахуванням специфіки рішення порогової задачі та підбрано сучасне теплообмінне обладнання.
4. Продемонстровано економічну доцільність проекту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л. Л. Товажнянский и др. Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. 456 с.
2. Kemp I. C. Pinch Analysis and Process Integration. A User Guide on ProcessIntegration for the Efficient Use of Energy / I. C. Kemp. – Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, 2007. 396 p.
3. Бабак, Т. Г. Використання пінч-аналізу при інтеграції потоків процесу випаровування водного розчину гідроксиду натрію / Бабак Т. Г., Демірський О. В., Хавін Г. Л. // Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ-2019 : збірник наукових статей Сьомої міжнародної науково-практичної конференції, 6-8 травня 2019 року, м. Київ / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ХТФ, КХТП. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 28-34.