

УДК 621:664(076)

Ульєв Л.М., Мельниковська Л.О., Терещенко В.М.

## **МІНІМІЗАЦІЯ ПОВЕРХНІ ТЕПЛООБМІНУ У ПРОЦЕСІ КОНЦЕНТРУВАННЯ ФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ**

*НТУ "ХПІ", Харків*

**Актуальність та постановка задачі.** Потенціал цивілізації постійно розвивається, завдяки чому чисельність населення людства росте. Основним ресурсом, що забезпечує умови існування та розвитку сучасної цивілізації, стала енергія, за допомогою якої забезпечується не тільки виробництво продуктів харчування, але й задовольняються інші потреби людини.

На початок 20 сторіччя екстенсивне використання сільськогосподарських земель дозволяло забезпечувати продуктами харчування приблизно 1 мільярд. жителів планети. Сьогодні чисельність населення Землі зросла більш, ніж у 6 разів, і забезпечення людей харчуванням зараз і в майбутньому неможливе без інтенсивної обробки сільськогосподарських земель. Це потребує використання мінеральних добрив, що забезпечують високі та стійкі врожаї. До основних елементів, які необхідні для забезпечення життєдіяльності рослин, відносять фосфор [1].

Для виробництва простих і складних фосфоровміщуючих добрив використовується фосфорна кислота. В наш час економічно найбільш вигідним є екстракційний спосіб отримання фосфорної кислоти. Це зв'язано з меншим його питомим енерговикористанням, порівняно з термічним способом, і простою можливістю екстракційної очистки кінцевого продукту.

Зменшення питомих енерговитрат при виробництві фосфорної кислоти позитивно діє не тільки на конкурентоздатність виробника, але й на зовнішнє середовище внаслідок зменшення викидів шкідливих речовин та емісії парникових газів [2].

Найбільш ефективними методами енергозбереження у процесах, що використовують хіміко-технологічні методи переробки та виробництва продуктів, є методи інтеграції процесів, а насамперед – метод пінч-аналізу.

Автори в роботі [3] виконали пінч-систему процесу концентрування фосфорної кислоти в екстракційному процесі її виробництва. При інтеграції використовувався метод з максимальною рекуперацією енергії.

**Мета.** У даній роботі розглядається можливість інтеграції с мінімізацією площі поверхні теплообміну.

**Опис технологічного процесу.** Для концентрування екстракційної фосфорної кислоти використовується однокорпусна випарна установка, що працює під вакуумом. Принципова технологічна схема процесу наведена на рисунку 1, за допомогою якого маємо короткий опис процесу концентрування фосфорної кислоти. Фосфорна кислота концентрацією 30 % подається до випарного апарату АВ, як показано на рисунку 1. З нижньої частини випарного апарату відводиться циркуляційний потік концентрованої кислоти та подається на фільтрацію (Ф). Відфільтрована кислота прокачується насосом НЗ через теплообмінник (ТА1), де підігрівається парою, а потім повертається назад до випарного апарату. З нижньої частини випарного апарату відводиться також фосфорна кислота концентрацією 45–52 %, яка поступає до ємності готової кислоти. В теплообміннику ТА1 пара, що підігріває кислоту, конденсується та відводиться двома лініями.

Перший потік спрямовується до збірника конденсату Е1 і потім відводиться з установки. Другий потік конденсату охолоджується у водяному холодильнику С і спрямовується до теплообміннику ТА2 для охолодження сірчаної кислоти. Конденсат у теплообміннику ТА2 підігривається потоком гарячої сірчаної кислоти та насосом Н2 подається в ежектор Е. В ежекторі конденсат змішується з гострою паром, випарюється та надходить до теплообміннику ТА1.

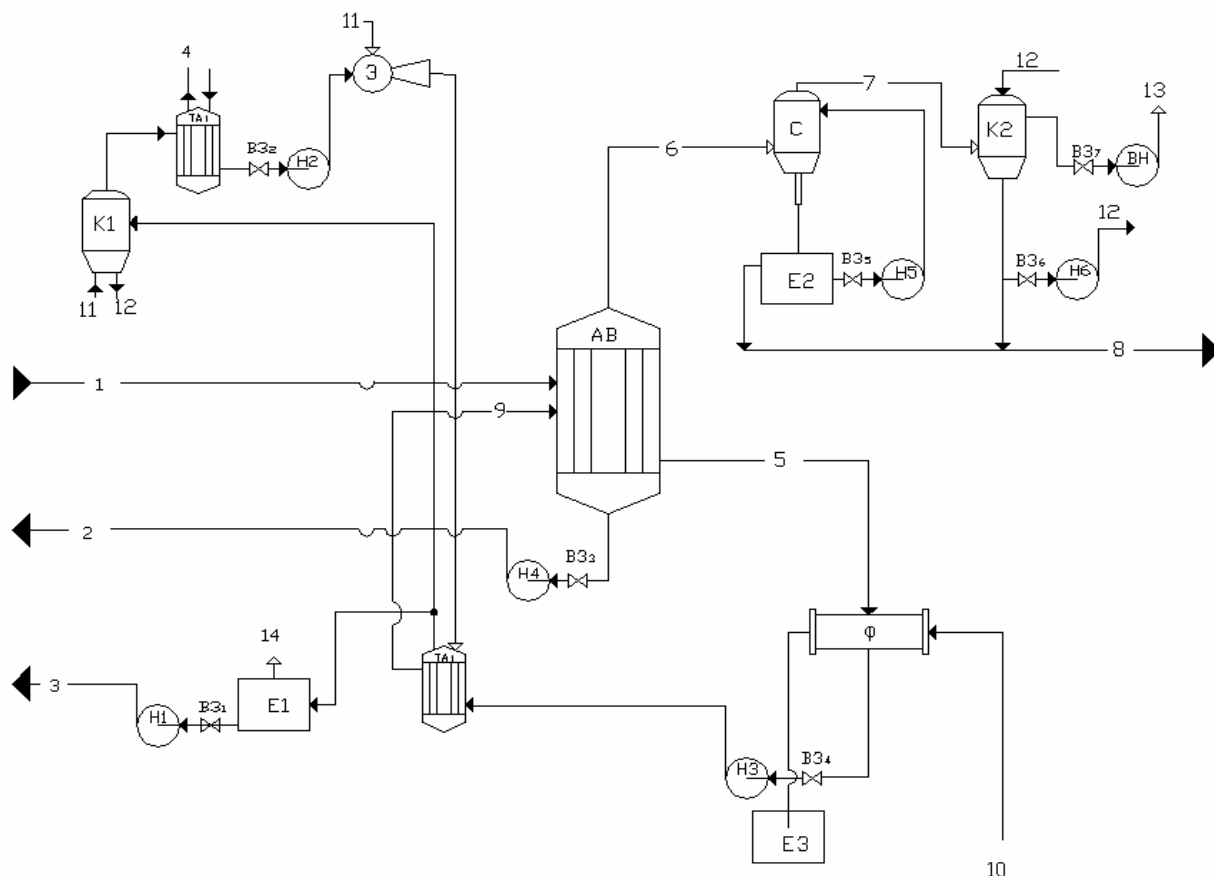


Рисунок 1 – Установа концентрування фосфорної кислоти

Пара з випарника АВ надходить до скрубера С, де відбувається конденсація фторвміщуючих поєднань, для цього в скрубер подають промивну воду. Пара, що сконденсувалася, і вода збираються у барометричній ємності, звідки вода повертається насосом Н5 до скрубера, а балансова кількість відводиться на очисні споруди. Пара та газ з скрубера надходять до конденсатора, де конденсуються водою, що охолоджує. Конденсат відводиться до каналізації. Пара і газ, що не конденсуються, відводяться вакуум насосом і викидаються до атмосфери [4].

За допомогою вивчення технологічного регламенту процесу отримання екстракційної фосфорної кислоти та технологічних схем, що додаються до регламенту, визначені основні технологічні потоки даного процесу та їх характеристики.

Для даного процесу був проведений пінч-аналіз, збудовані гаряча і холодна складові криві, що показані на рисунку 2, також був розроблений проект реконструкції установи концентрування фосфорної кислоти, згідно отриманим даним.

У проекті реконструкції, який забезпечує мінімальне споживання енергії, необхідно використати коло 6 рекуперативних теплообмінних апаратів із загальною площею поверхні  $\sim 1847 \text{ м}^2$ , 2 теплообмінних апарата на гарячих утилітах із загальною площею поверхні теплообміну  $\sim 19 \text{ м}^2$ , і 5 теплообмінних апаратів на холодних утилітах із загальною площею поверхні теплообміну, що дорівнює  $\sim 900 \text{ м}^2$ .

Таким чином, для технологічної схеми проекту реконструкції може знадобитися 13 теплообмінних апаратів із загальною площею поверхні теплообміну, що дорівнює  $\sim 2765 \text{ м}^2$ .

Таблиця 1 – Характеристики технологічних потоків процесу концентрування фосфорної кислоти

№	Потік	Тип	TS, °C	TT, °C	G, т/год	C, кДж/(кг·°C)	г, кДж/г	CP, кВт/°C	H, кВт	$\alpha$ Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )
1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	гар	94	45	44,00	1,49		18,21	892,34	1000
2	Конденсат 1	гар	150	35	15,95	4,19		18,56	2134,6	1500
3	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (45/52%)	гар	73	25	14,45	2,30		9,23	443,13	800
4	Пара 1	гар	72	45	11,15	1,96		6,07	163,91	100
	Конденсат пари	гар	45	45	2,35		2394		1562,	2000
5	Пара 2	гар	45	38	8,80	1,94		4,73	33,11	100
	Конденсат пари 2	гар	38	38	8,00		2411		5357,8	2000
6	Відходи	гар	40	25	10,35	4,19		12,02	180,69	800
7	Конденсат 3	гар	150	35	932	4,19		10,85	1248	1500
8	Конденсат 2	хол	35	150	15,95	4,19		18,56	2134,6	1500
9	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (циркуляційна)	хол	72	78	2040,00	2,30		1303,33	7820	1000

Для того, щоб вичислити цільові значення поверхні теплообміну за допомогою складових кривих, утилітні потоки повинні бути включені до технологічних потоків ХТС, що містяться у складових кривих для формування балансних складових кривих [5]. Для того, щоб їх збудувати, використовуються ті ж самі процедури, що й для складових кривих, що були розглянуті раніше, але з додаванням утилітних потоків.

Балансні складові криві не мають вимог до зовнішніх додаткових енергоджерел, тому що всі потоки знаходяться у повному ентальпійному балансі один з одним. Далі балансні складові криві поділяються на ентальпійні інтервали таким чином, щоб межам ентальпійних інтервалів були точки на ентальпійній вісі, де складові криві змінюють свій нахил.

Маються на увазі всі точки зміни нахилу або розриву, як на гарячій балансній складовій кривій, так і на холодній. Для визначення цільової площі мережевої теплообмінної поверхні спочатку припустимо, що коефіцієнт теплопередачі між теплоносіями  $\epsilon$

постійною величиною і є однаковим для всіх теплообмінних апаратів, що знаходяться у теплообмінній мережі. Площа поверхні теплообміну для такого теплообмінника визначається формулою:

$$A = \frac{Q}{K \Delta T_{\ln}},$$

де  $A$  – площа поверхні теплообміну протиточного теплообмінника;  $Q$  – теплове навантаження теплообмінника;  $K$  – коефіцієнт теплопередачі;  $\Delta T_{\ln}$  – середньологарифмічна різниця температур або середньологарифмічний температурний натиск, який для протиточного теплообмінника визначається як:

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(T_{H_2} - T_{C_1}) - (T_{H_1} - T_{C_2})}{\ln \frac{T_{H_2} - T_{C_2}}{T_{H_1} - T_{C_1}}}.$$

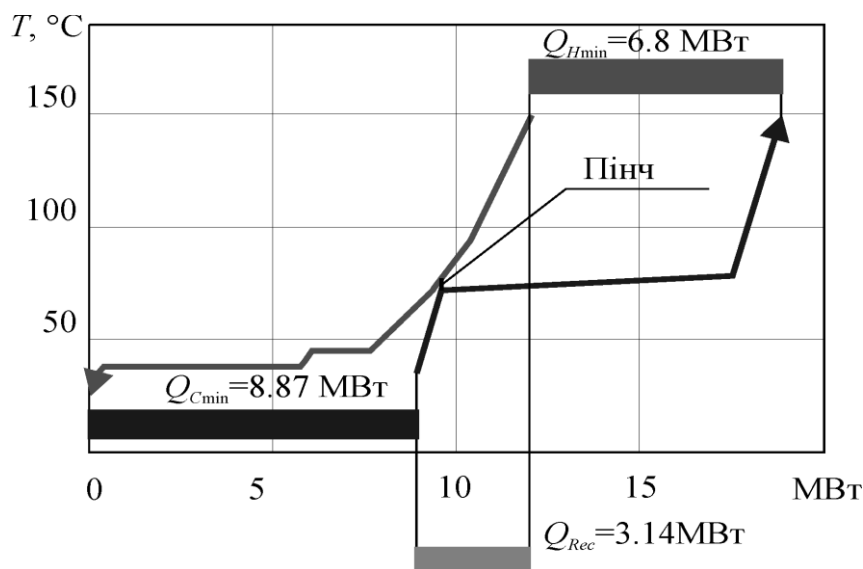


Рисунок 2 – Складові криві для інтегрованого процесу концентрування екстракційної фосфорної кислоти

Загальна цільова площа поверхні теплообміну для усієї теплообмінної системи визначається за формулою:

$$A_{\zeta\bar{a}\bar{a}} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{\Delta T_{\ln}} \sum_{i=1}^{I_k} \sum_{j=1}^{J_k} \frac{Q_{ij}^k}{K_{ij}},$$

де  $Q$  – тепловий натиск між  $i$ -м гарячим і  $j$ -м холодним потоками;  $K_{ij}$  – коефіцієнт теплопередачі між ними;  $I$  – кількість гарячих потоків в  $k$ -му інтервалі;  $J$  – кількість холодних потоків в  $k$ -му інтервалі,  $M$  – число всіх інтервалів.

Введемо індивідуальні коефіцієнти тепловіддачі для кожного потоку  $h$ , тоді коефіцієнти теплопередачі визначаються як:

$$\frac{1}{K_{ij}} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_j},$$

де  $i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J$ .

Тоді значення площі поверхні теплообміну в кожному ентальпійному інтервалі:

$$A_k = \frac{1}{\Delta T_{\ln k}} \left[ \sum_{i=1}^{I_k} \left( \frac{1}{h_j} \sum_{j=1}^{J_k} Q_{ij}^k \right) + \sum_{j=1}^{J_k} \left( \frac{1}{h_j} \sum_{i=1}^{I_k} Q_{ij}^k \right) \right].$$

Далі припускаємо, що у всіх ентальпійних інтервалах здійснюється протиточний теплообмін між теплоносіями, який, у випадку складових кривих, називається вертикальним теплообміном. При визначенні цільового значення площі загальної поверхні теплообміну в мережі ми будемо припускати, що в ентальпійних інтервалах здійснюється вертикальний теплообмін між гарячими потоками, що містяться у гарячій балансній складовій кривій, і холодними потоками з холодної балансної складової кривої.

Спочатку ми повинні збудувати балансні складові криві, як показано на рис. 3, використовуючи повний набір даних з потокової таблиці.

Підкреслимо, що пар, при збудуванні гарячої балансної кривої, розглядався як гарячий потік спільно з технологічними потоками, тому гаряча балансна складова крива зображує непереривну, монотонну функцію від ентальпії. Це також справедливо і для потоку охолоджуючої води у балансній складовій кривій.

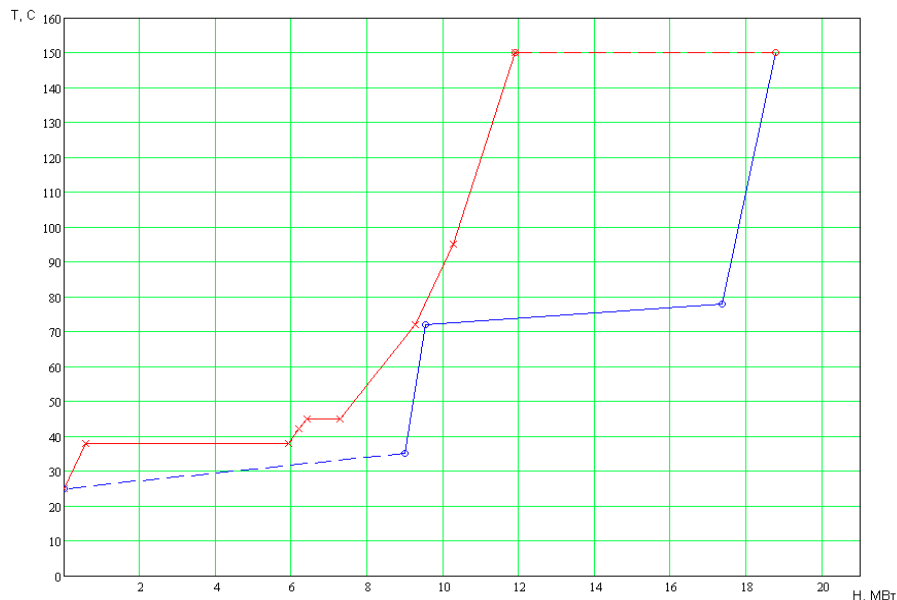


Рисунок 3 – Балансні складові криві для процесу концентрування фосфорної кислоти

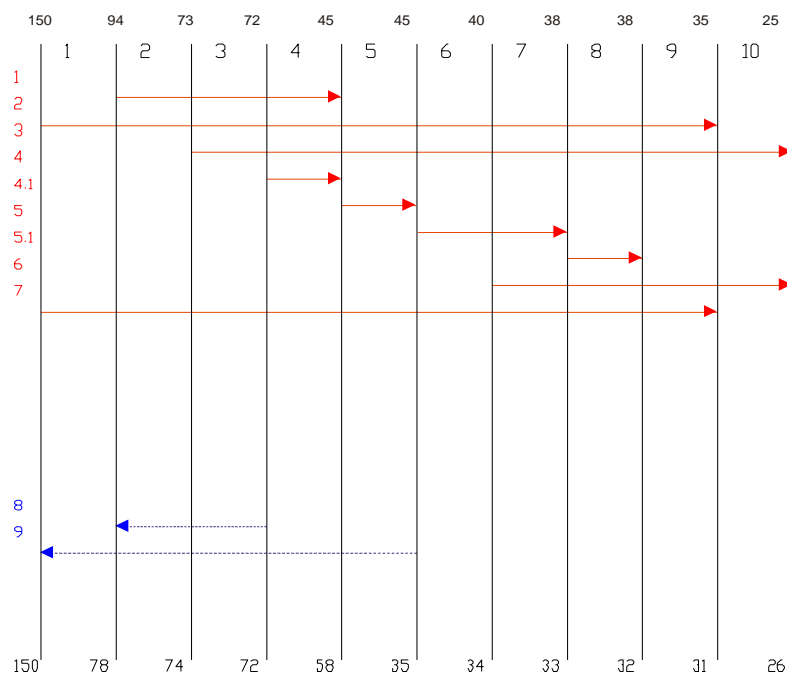


Рисунок 4 – Ентальпійні інтервали популяції технологічних потоків

На рисунку також показані ентальпійні інтервали, на які поділяються балансні складові криві. Межі ентальпійних інтервалів є координатами точок, у яких будь-яка з балансних складових кривих змінює свій нахил [6].

Для того, щоб було простіше визначати площі теплообмінної поверхні, зобразимо популяцію технологічних потоків у ентальпійних інтервалах, як показано на рис. 4.

На рисунку показано безліч потоків для кожного ентальпійного інтервалу разом з гарячими та холодними поточковими температурами.

Необхідно відзначити, що в кожному ентальпійному інтервалі температури холодних і гарячих потоків на межах інтервалу різні.

Знайдемо цільові значення площ поверхні теплообміну в ентальпійних інтервалах.

Для цього побудуємо таблицю, в яку будемо записувати величину членів сумми в кожному інтервалі.

Таблиця 2 – Значення площ для кожного ентальпійного інтервалу

Ентальпійний інтервал	$\Delta\dot{Q}_{lnk}$	Гарячі потоки $\sum(\frac{Q_i}{h_{i k}}$	Холодні потоки $\sum(\frac{Q_i}{h_{i k}}$	$A_k, m^2$
1	73,49	0	3947	53,708
2	42,421	1345	881,26	52,481
3	11,974	837,64	2632	289,776
4	9,442	525,097	18250	1989
5	19,794	1646	0	83,158
6	17,819	2157	0	121,054
7	11,493	0	0	0
8	10,97	251,892	0	22,963
9	8,411	0	0	0
10	9,276	0	0	0
Всього				2612,14

Таким чином, отримана площа теплообміну на 5,5 % менша, ніж площа теплообміну, що була вчислена за допомогою складових кривих, тому це дозволить зекономити 412722 грн за рахунок зменшення площі теплообміну.

**Висновки.** В даній роботі за допомогою апарата складових кривих аналізується процес концентрування фосфорної кислоти. Показано, що інтеграція процесу за допомогою методу мінімізації площі поверхні теплообміну дозволяє отримати систему теплообміну з площею поверхні на 5,5 % меншою, ніж при інтеграції за допомогою методу максимізації потужності рекуперації теплової енергії.

#### Література

1. Беглов Б.М., Жекеев М.К. Перспективы производства фосфора, удобрений и солей различного назначения на основе экстракционной фосфорной кислоты // Химическая промышленность. – 2002. – № 4. – С. 1–3.
2. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ЛЕВЧЕНКО Б.О. Энергетика на межі 21 століття. – Харків: Навч. посібник. – НТУ «ХПИ». – 2006.
3. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЕВ Л.М., БОЛДЫРЕВ С.А., ТЕРЕЩЕНКО В.Н., МЕЛЬНИКОВСКАЯ Л.А. Пинч-интеграция процесса концентрирования ортофосфорной кислоты // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2008. – № 2. – С. 9–17.
4. Копылев В.А. Технология экстракционной фосфорной кислоты. – Л., 1972.
5. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., АНИПКО О.Б., МАЛЯРЕНКО В.А. Основы энерготехнологий промышленности. – Харьков.: Учебник для студентов не теплоэнергетических специальностей НТУ «ХПИ». – 2002.
6. Смит Р., Клемеш Й., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЕВ Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. – Харьков: Библиотека журнала Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2000. – С. 457.

УДК 621:664(076)

Ульев Л.М., Мельниковская Л.А., Терещенко В.Н.

#### **МИНИМИЗАЦИЯ ПЛОЩАДИ ТЕПЛООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ**

В данной работе с помощью аппарата составных кривых анализируется процесс концентрирования фосфорной кислоты. Показано, что интеграция процесса с помощью метода минимизации площади поверхности теплообмена позволяет получить систему теплообмена с площадью поверхности на 5,5 % меньше, чем при интеграции с помощью метода максимизации мощности рекуперации тепловой энергии.

*стаття надійшла до редакції 06.09.2008 р.*