

Л. А. Гарєв, аспірант, І. Б. Рябова, к. техн. н., доцент

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСАХ ВИРОБНИЦТВА РЕКТИФІКОВАНОГО ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: теплова інтеграція, ректифікаційна колона, мережа рекуперативних теплообмінників, енергоефективність, виробництво етилового спирту.

Традиційно в Україні виробляється багато етилового спирту для потреб харчової, фармацевтичної, паливної галузей. Як відомо, актуальнішою проблемою сучасної промисловості є високе питоме споживання енергії в хімічній та переробній промисловості [1], і виробництво етанолу, на жаль, не є виключенням. З 2020 року в Україні знято державну монополію на виробництво спирту, і саме тому, зниження собівартості продукції є необхідною умовою здорової конкуренції виробників етанолу на внутрішньому та зовнішньому ринках. Україна має суттєву сировинну базу для виробництва етилового спирту, що робить цю галузь однією з перспективних для економіки країни. Наданням поштовху для розвинення означеної галузі може стати зниження питомих витрат енергії на виробництво шляхом енергоефективної модернізації підприємств, що вже існують [2,3].

Технологічний процес виробництва етилового спирту є складним та багатостадійним. Велика доля витрат енергії в цьому процесі припадає на процес дистиляції, який вимагає багаторазового випарювання суміші з подальшою конденсацією пари, що утворюється. Дослідження енергетичного потенціалу процесу саме дистиляції вказує на наявність досить великої кількості енергії, яку можна перерозподілити всередині технологічної схеми. Метою даного дослідження було встановити енергетичний потенціал процесу та визначити шляхи модернізації технологічної схеми з метою мінімізації споживання нею енергії зі зовнішніх джерел.

На основі регламентної документації апаратурно-технологічної схеми установки централізованої розгонки головної фракції етилового спирту та звіту з енергоаудиту даної установки було здійснено екстракцію даних технологічних потоків.

Енергоефективну схему обраного технологічного процесу наведено на рис. 1. Відповідно до технологічного регламенту у бражній колоні (БК) відбувається концентрування водно-спиртової рідини; в епюраційній колоні (ЕК) ,відповідно, епюрація спирту-сирцю, виділення головних домішок та метанолу; у ректифікаційній колоні (РК) – підвищення міцності та пастеризація спирту, виведення вищих спиртів з зон їх концентрування; на метанольній колоні (МК) проводиться остаточне очищення етанолу від легколетючих домішок, які відбираються у вигляді ефірної (ЕФ) та метанольної (МФ) фракцій або у вигляді об'єднаної фракції [4]. Схему технологічного процесу отримання етанолу показано на рис. 1.

Рисунок 1 – Енерго-технологічна схема ректифікації етилового спирту на комплексі колон

Задля аналізу з наведеної схеми було обрано низку технологічних потоків, які мають суттєвий енергетичний потенціал, що може бути використаний для теплової інтеграції енергії всередині технологічної схеми [5]. Короткі характеристики обраних для інтеграції потоків є наступними:

1. Пара, що залишає бражну колону. Направляється на підігрів браги, що заходить в БК до рекуперативного теплообмінника Т-1 та конденсатора С-1, де вона конденсується. Початкова температура пари 80 °С, кінцева 76 °С, витрати 0,72 кг/с.
2. Бражний дистиллят БК, що охолоджується у дефлегматорі С-2 та надходить до епіюраційної колони. Початкова температура 76 °С, кінцева 61 °С, витрати 0,72 кг/с.
3. Пара епіюраційної колони, що конденсується в дефлегматорі С-3. Початкова температура 70,7 °С, кінцева 61,4 °С, витрати 1,16 кг/с.
4. Конденсат гріючої пари з куба ЕК, що виходить з кип'ятильнику ЕК Н-2. початкова температура 141 °С, кінцева 60 °С, витрати 0,90 кг/с.
5. Барда, що виходить з кубу бражної колони. Початкова температура 90 °С, кінцева 60 °С, витрати 6,39 кг/с.
6. Лютерна вода, що є гріючим агентом у Т-2. Початкова температура 99 °С, кінцева 81 °С, витрати 2,43 кг/с.
7. Конденсат граючої пари РК, МК, що виходить з кип'ятильників Н-5, Н-6. Початкова температура 100 °С, кінцева 80 °С, витрати 3,8 кг/с.

8. Брага, що нагрівається у теплообміннику Т-1 та у нагрівачі Н-3. Початкова температура 33 °С, кінцева 85 °С, витрати 5,3 кг/с.

9. Нижній продукт бражної колони, що випаровується у кип'ятильнику Н-1, початкова температура 97 °С, кінцева 99 °С, витрати 0,9 кг/с.

10. Рідина в кубі ЕК, що випарюється в кип'ятильнику Н-2. Початкова температура 73 °С, кінцева 78 °С, витрати 1,2 кг/с.

11. Хімічно-небезпечні речовини (ХНР) гідроселекції, що підігріваються в Т-2 перед вводом до колони розділення ефірно-альдегідних фракцій (КРЕАФ). Початкова температура 68 °С, кінцева 79 °С, витрати 1,9 кг/с.

Вода на замес, що підігрівається у нагрівачі Н-9. Початкова температура 66 °С, кінцева 85 °С, витрати 1,5 кг/с.

У схемі, що існує, відбувається утилізація теплоти конденсації пари у дефлегматорі бражної колони Т1 для нагрівання бражки та лютерна вода підігріває ХНР у Т-2.

Для рішення задачі використовувався метод пінч-аналізу, який включає побудову складених кривих, визначення можливої кількості рекуперативного тепла з подальшою побудовою мережі теплообмінників з максимальною рекуперацією теплоти [6, 7, 8, 9]. На базі екстрагованих з технологічної схеми відомостей складено таблицю поточкових даних, що наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Поточкові дані технологічної схеми

№ потоку	Найменування потоку	Тип потоку	G, кг/с	Ts, °С	Tt, °С	CP, кДж/°С	ΔH, кВт
1	Конденсація випару БК на підігрівачах браги	Гарячий	0,72	80	76		1070
2	Охолодження бражного дистиляту БК на дефлегматорі	Гарячий	0,72	76	61	2,36	35
3	Конденсація парів ЕК на дефлегматорах	Гарячий	1,16	70,7	61,4		1970
4	Конденсат гриючої пари з куба БК	Гарячий	0,92	141	60	3,84	311
5	Барда	Гарячий	6,39	90	60	25,4	762
6	Лютерна вода	Гарячий	5,28	99	81	2,8	50,4
7	Конденсат парів РК, МК	Гарячий	3,8	100	80	3,8	76
8	Нагрів браги	Холодний	0,3	33	85	18,9	982
9	Випаровування в БК	Холодний	0,9	97	99		2029
10	Випаровування в ЕК	Холодний	1,2	73	78		2044
11	ХОВ гідроселекції	Холодний	1,9	68	79	7,93	87,23
12	Вода на заміс	Холодний	1,5	66	85	17,32	329

В результаті побудови складових кривих хіміко технологічної системи комплексу колон виробництва спирту були визначені цільові значення гарячих та холодних утиліт для мінімальної різниці температур між потоками в теплообмінній системі, що існує складає, $\Delta T_{\min} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$. Було встановлено, що дана схема використовує лише незначну кількість теплової енергії технологічних потоків та потребує модернізації. Складові криві процесу, що існує, наведені на рис. 2.

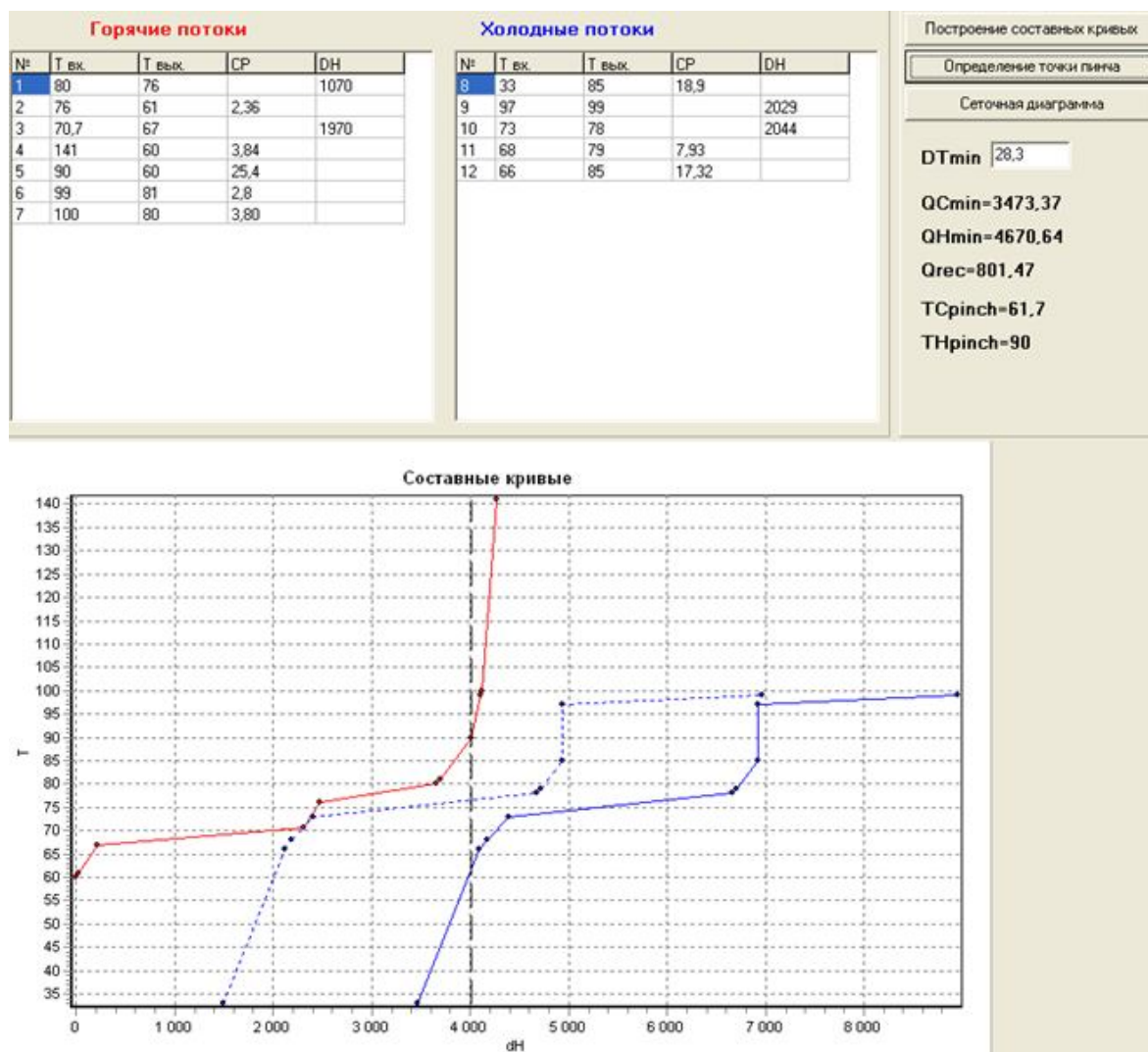


Рисунок 2 – Складові криві інтегрованого процесу з $\Delta T_{\min} = 28,3 \text{ }^\circ\text{C}$

На основі цих даних розробляємо сіткову діаграму для системи технологічних потоків існуючого процесу, основні параметри яких були екстраговані в процесі дослідження роботи комплексу колон по виробництву спирту. Сіткова діаграма існуючого процесу наведена на рис. 3.

Аналіз схеми, яка існує, показав що можливості рекуперації теплоти між технологічними потоками не є вичерпаними, а велике значення температурного напору обумовлення використанням застарілого теплообмінного обладнання [10].

У проєкті реконструкції планується використання вискоєфективного сучасного теплообмінного обладнання – пластинчастих теплообмінних апаратів [11, 12].

Це дозволить розглядати варіанти реконструкції теплообмінної системи для мінімальних значень ΔT_{\min} з урахуванням компромісу між економією гарячих холодних утиліт та капітальних витрат на реконструкцію.

Рисунок 3 – Сіткова діаграма технологічної системи ректифікації етилового спирту

В результаті використання методології пінч-аналізу для даної системи було визначено оптимальне значення $\Delta T_{\min}=10$ °С. Складові криві технологічних потоків ректифікаційної установки при $\Delta T_{\min}= 10$ °С представлені на рис. 4.

Розрахунки показали, що для значення мінімальної різниці температур між гарячими та холодними потоками 10 °С, рекуперація всередині технологічної схеми зростає до 1400 кВт.

Побудова сіткової діаграми модернізованого процесу та розміщення теплообмінного обладнання відбувалося на базі виконаних розрахунків у відповідності до правил пінч-проекування.

При розміщенні теплообмінних апаратів у підсистемі, що знаходиться вище пінча, мають виконуватися такі умови:

$$CP_H \leq CP_C, \quad (1)$$

де CP_C і CP_H – потокові теплоємності холодних та гарячих потоків, кВт/°С.
 В підсистемі нижче пінча мають виконуватися наступні умови:

$$CP_C \leq CP_H \tag{2}$$

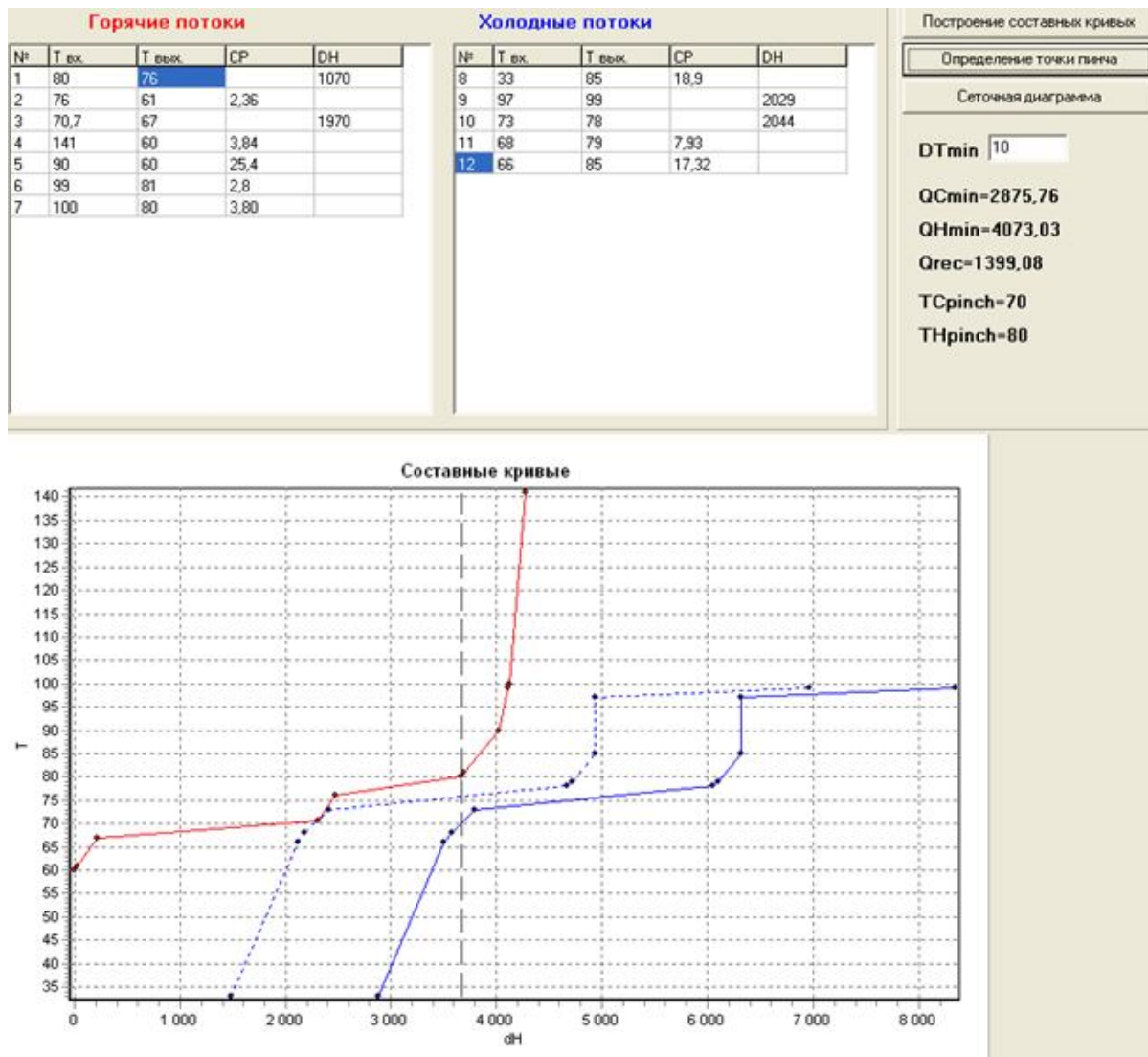


Рисунок 4 – Складові криві процесу інтеграції

На рисунку 5 наведено проектне розміщення теплообмінних апаратів вище й нижче пінча з урахуванням дотримання вимог пінч-проекткування – CP вимог, вимог евристичних відміток та ін. [6].

Були розраховані зміни потокових ентальпій для гарячих та холодних потоків. З метою максимізації теплових навантажень теплообмінників в рекупераційній системі були визначені зміни потокових ентальпій для відповідних температурних інтервалів

Зміна ентальпії гарячих потоків:

$$\Delta H_n = CP_n (T_{PH} - T_{Sn}), \tag{3}$$

де n – номер потоку; T_{PH} – пінч температура гарячих потоків, °С; T_{Sn} – температура по-стачання, °С.

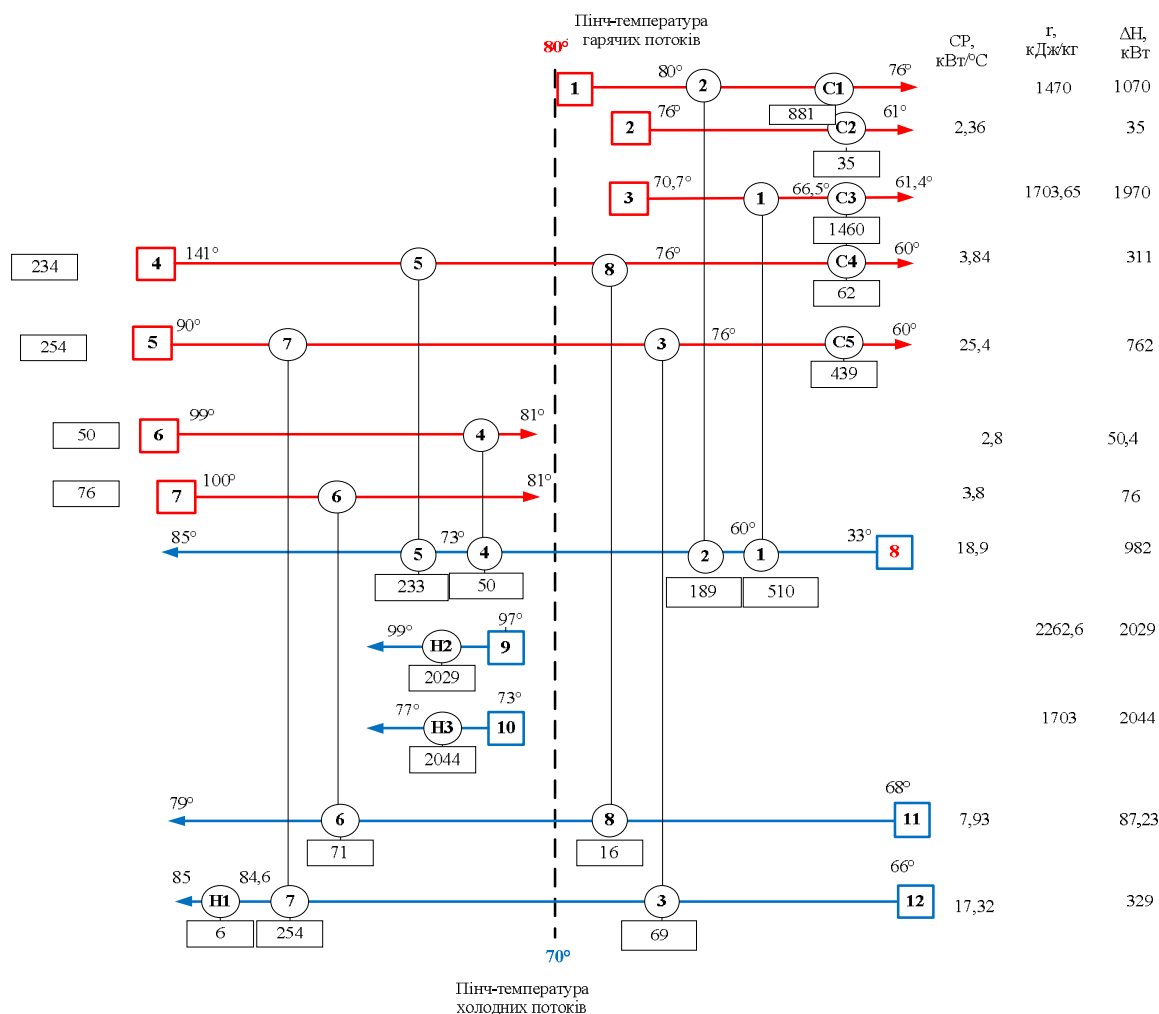


Рисунок 5 – Сіткова діаграма технологічної системи ректифікації етилового спирту

ВИСНОВКИ. Таким чином, в процесі енергоефективної модернізації теплообмінної рекуперативної системи в складі комплексу колон з виробництва спирту отримана значна економія гарячих та холодних утиліт. Енергетичні показники ефективності проекту реконструкції наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Енергетичні показники ефективності проекту

Технологічна схема	Гарячі утиліти Q_{Hmin} , кВт	Холодні утиліти Q_{Cmin} , кВт
До реконструкції	4670,64	3473,37
Після реконструкції	4073,03	2875,76
Економія теплової енергії, %	12,8	17,2

Термін окупності проекту реконструкції теплообмінної рекуперативної системи комплексу колон з виробництва спирта станом складе близько 0,6 року. Розрахунки техніко-економічних показників проекту проведені у відповідності до поточних цін на енергоресурси та актуалізовану інформацію по цінам на теплообмінне обладнання у виробників.

Дослідження, які були проведені в теплообмінних системах виробництву спирту, показали перспективні можливості застосування методів теплової інтеграції задля підвищення енергоефективності хіміко-технологічних систем.

Були визначені подальші напрямки досліджень з метою збільшення енергозберігаючого потенціалу спиртових виробництв. Це пов'язано з застосуванням методу інтеграції теплового насосу, який базується в нашому випадку на використанні технологій механічної рекомпресії парів ректифікаційного комплексу колон. Дослідження в цьому напрямку ведуться та будуть відображені в наступних публікаціях.

Література

1. Енергетична стратегія України до 2035 р. http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564.
2. Бевз, В. В. Розвиток механізму енергозбереження на підприємствах харчової промисловості / В. В. Бевз // Вчені записки : збірник наукових праць. – Київ : КНЕУ, 2011. – № 13. – С. 169–173.
3. Енергоефективність в агробізнесі: виклики майбутнього і як бути до них готовими? <https://www.interagro.in.ua/enerhoefektyvnist-v-ahrobiznesi-vyklyky-maybutn-oho-iaak-buty-do-nykh-hotovymy/> 26–29 жовтня на *AgroEnergyDAY 2020*, м. Київ.
4. Технологія спирту / Під ред. проф. В.О. Маринченка. – Вінниця: „Поділля-2000”, 2003.– 496 с.
5. Linnhoff B. and Vredeveld D.R. Pinch Technology Has Come Of Age. *Chemical Engineering Progress*, 1984, vol. 80, no. 7, pp. 33–40.
6. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульєв Л.М. Основы интеграции тепловых процессов.– Харьков, НТУ «ХПИ», 2000.– 456 с.
7. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2006. – 412 с.
8. Song C., Qiu Y., Liu Q., Ji N., Zhao Y., Kitamura Y., Hou X. Process intensification of cellulosic ethanol production by waste heat integration. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 132, pp. 115–122. doi: 10.1016/j.cherd.2018.01.016.
9. 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.
10. Boldyryev S., Krajačić G., Duić N. Cost Effective Heat Exchangers Network of Total Site Heat Integration. *Chemical Engineering Transaction*, 2016, vol. 52, pp. 541–546. doi: 10.3303/CET1652091.
11. Pan M., Bulatov I., Smith R. Improving heat recovery in retrofitting heat exchanger networks with heat transfer intensification, pressure drop constraint and fouling mitigation. *Applied Energy*, 2016, vol. 161, pp. 611–626. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.073.
12. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в промышленности. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004 . – 232 с.

Bibliography (transliterated)

1. Energetichna strategiya Ukraini do 2035 r. http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564.
2. Bevz, V. V. Rozvitok mehanizmu energozberezhennya na pidpriemstvah harchovoyi promislivosti / V. V. Bevz // Vcheni zapiski : zbirnik naukovih prats. – Kiyiv : KNEU, 2011. – # 13. – P. 169–173.
3. Energoefektivnist v agrobiznesi: vikliki maybutnogo i yak buti do nih gotovimi? <https://www.interagro.in.ua/enerhoefektyvnist-v-agrobiznesi-vyklyky-maybutn-oho-i-iak-butiy-do-nykh-hotovymy/> 26–29 zhovtnya na AgroEnergyDAY 2020, m. Kiyiv.
4. Tehnologiya spirtu / Pid red. prof. V.O. Marinchenka. – VInnitsya: „Podillya-2000”, 2003.– 496 p.
5. Linnhoff B. and Vredeveld D.R. Pinch Technology Has Come Of Age. Chemical Engineering Progress, 1984, vol. 80, no. 7, pp. 33–40.
6. Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M. Osnovy integratsii teplovyih protsessov.– Harkov, NTU «HPI», 2000.– 456 p.
7. Meshalkin V.P, Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A. Osnovy teorii resursoberegayuschih integrirovanyih himiko-tehnologicheskikh sistem. – Harkov: NTU "HPI", 2006. – 412 p.
8. Song C., Qiu Y., Liu Q., Ji N., Zhao Y., Kitamura Y., Hou X. Process intensification of cellulosic ethanol production by waste heat integration. Chemical Engineering Research and Design, 2018, vol. 132, pp. 115–122. doi: 10.1016/j.cherd.2018.01.016.
9. 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.
10. Boldyryev S., Krajačić G., Duić N. Cost Effective Heat Exchangers Network of Total Site Heat Integration. Chemical Engineering Transaction, 2016, vol. 52, pp. 541–546. doi: 10.3303/CET1652091.
11. Pan M., Bulatov I., Smith R. Improving heat recovery in retrofitting heat exchanger networks with heat transfer intensification, pressure drop constraint and fouling mitigation. Applied Energy, 2016, vol. 161, pp. 611–626. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.073.
12. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arseneva O.P. Platinchatyie teploobmenniki v promyshlennosti. – Harkov: NTU «HPI», 2004 . – 232 p.

УДК 66.048.05:665.6

Л. А. Гарев, аспирант, І. Б. Рябова, к. техн. н., доцент

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСАХ
ВИРОБНИЦТВА РЕКТИФІКОВАНОГО ЕТИЛОВОГО СПИРТУ**

Традиційно в Україні виробляється багато етилового спирту для потреб харчової, фармацевтичної, паливної галузей. Україна має суттєву сировинну базу для виробництва етилового спирту, що робить цю галузь однією з перспективних для економіки країни. Зниження собівартості продукції є необхідною умовою здорової конкуренції виробників етанолу на внутрішньому та зовнішньому ринках. Наданням поштовху для розвинення

означеної галузі зниження питомих витрат енергії на виробництво шляхом енергоефективної модернізації підприємств, що виробляють етанол.

На сьогодні одним з методів зменшення питомих витрат енергії на виробництво етилового спирту є метод інтеграції теплових потоків, що базується на пінч-аналізі і не потребує тотальної реконструкції виробництва.

Отримання даних технологічних потоків було здійснено на основі регламентної документації апаратурно-технологічної схеми установки централізованої розгонки головної фракції етилового спирту (ГФЕС) та звіту з енергоаудиту даної установки, який був здійснений на одному з спиртових підприємств України.

Для теплової інтеграції існуючого процесу, було обрано чотири колони установки централізованої розгонки етилового спирту: бражну та епюраційну, ректифікаційну та метанольну. Були розраховані тепловий та матеріальний баланси цих колон установки.

Для максимальної реалізації енергетичного потенціалу технологічних потоків, були використані принципи пінч-проекування та спроектовано сіткову діаграму.

Для оптимізації рекуперації теплової енергії було обрано $\Delta T_{\min} = 10$ °C. Це призвело до необхідності використання енергоефективного теплообмінного обладнання (пластинчатих теплообмінних апаратів). Суттєве зменшення використання зовнішніх утиліт (холодних на 17,2 % та гарячих – на 12,8 %) для обраних технологічних потоків та невеликий термін окупності проекту (близько шести місяців) робить доцільним використання такого роду рішення проблеми.

Ключові слова: тепла інтеграція, ректифікаційна колона, мережа рекуперативних теплообмінників, енергоефективність, виробництво етилового спирту.

Л. А. Гарев, И. Б. Рябова

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА РЕКТИФИЦИРОВАННОГО ЭТИЛОВОГО СПИРТА

Традиционно в Украине производится много этилового спирта для нужд пищевой, фармацевтической, топливной отраслей. Украина имеет существенную сырьевую базу для производства этилового спирта, что делает отрасль одной из перспективных для экономики страны. Снижение себестоимости продукции является необходимым условием здоровой конкуренции производителей этанола на внутреннем и внешнем рынках. Предоставлением толчка для развития указанной отрасли снижение удельных затрат энергии на производство путем энергоэффективной модернизации уже существующих предприятий.

На сегодняшний день одним из методов уменьшения удельных затрат энергии на производство этилового спирта является метод интеграции тепловых потоков, базирующийся на пинч-анализе и не требующий тотальной реконструкции производства.

Получение данных технологических потоков было осуществлено на основе регламентной документации апаратурно-технологической схемы установки централизованной разгонки главной фракции этилового спирта (ГФЭС) и отчета по энергоаудиту данной установки, осуществленного на одном из спиртных предприятий Украины.

Для тепловой интеграции существующего процесса были выбраны четыре колонны установки централизованной разгонки этилового спирта: бражную и эпюрационную, ректификационную и метанольную. Были рассчитаны тепловой и материальный баланс этих колонн установки.

Для максимальной реализации энергетического потенциала технологических потоков были использованы принципы пинч-проектирования и спроектирована сетевая диаграмма.

Для оптимизации рекуперации тепловой энергии было выбрано $\Delta T_{\min} = 10$ °C. Это привело к необходимости использования энергоэффективного теплообменного оборудования. Существенное уменьшение использования внешних утилит (холодных на 17,2 % и горячих – на 12,8 %) для выбранных технологических потоков и небольшой срок окупаемости проекта (около шести месяцев) делает целесообразным использование такого рода решения проблемы.

Ключевые слова: тепловая интеграция, ректификационная колонна, сеть рекуперативных теплообменников, энергоэффективность, производство этилового спирта.

L. A. Hariiev, I. B. Riabova

INTENSIFICATION OF RECOVERY HEAT EXCHANGE IN RECTIFIED ETHYL ALCOHOL PRODUCTION PROCESSES

Traditionally, a lot of ethyl alcohol is produced in Ukraine for the needs of the food, pharmaceutical, and fuel industries. Ukraine has a significant raw material base for the production of ethyl alcohol, which makes this industry one of the most promising for the country's economy. A reduction in the cost of production is a necessary condition for healthy competition of ethanol producers on the domestic and foreign markets. Providing an impetus for the development of the specified industry is the reduction of specific energy costs for production through energy-efficient modernization of existing enterprises.

Today, one of the methods of reducing the specific energy consumption for the production of ethyl alcohol is the method of integration of heat flows, which is based on pinch analysis and does not require a total reconstruction of the production.

Obtaining data on technological flows was carried out on the basis of the regulatory documentation of the equipment and technological scheme of the installation of the centralized distillation of the main fraction of ethyl alcohol and the report on the energy audit of this installation, which was carried out at one of the alcohol enterprises of Ukraine.

For the thermal integration of the existing process, four columns of the centralized ethanol distillation unit were chosen: fermentation and purification, rectification and methanol. The thermal and material balances of these columns of the installation were calculated.

To maximize the energy potential of technological flows, the principles of pinch design were used and a grid diagram was designed.

To optimize heat energy recovery, $\Delta T_{\min} = 10$ °C was chosen. This led to the need to use energy-efficient heat exchange equipment. A significant reduction in the use of external utilities (cold by 17.2 % and hot by 12.8 %) for the selected technological flows and the short payback period of the project (about six months) make it reasonable to use this kind of solution to the problem.

Keywords: heat integration, distillation column, network of recuperative heat exchangers, energy efficiency, ethyl alcohol production.