

Рябова І.Б., к.техн.н., професор, Гарєв А.О., Гарєв Л.А.,
Горбунов К.О., к.техн.н., професор

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОТОКІВ БРАЖНОЇ ТА ЕПЮРАЦІЙНОЇ КОЛОНИ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА РЕКТИФІКОВАНОГО ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

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

Як відомо, однією з найактуальніших проблем сучасної промисловості країн світу, зокрема України, є надвисоке питоме споживання енергії в енергоємних галузях на тлі зовнішньої енергозалежності [1]. Конкуренцездатність продукції цих галузей суттєво залежить від цін на енергоносії, які невідступно зростають. Зменшення питомих витрат енергії на одиницю продукції може вирішити комплекс питань: по-перше, з собівартістю продукції, по-друге, в масштабах держави полегшати енергозалежність від зовнішніх постачальників енергії.

Виробництво етанолу для потреб харчової, фармацевтичної, паливної галузей є достатньо яскравим прикладом технологічного процесу з високими питомими витратами енергії. Детальний аналіз енергетичного потенціалу технологічних потоків з метою вирішення задачі зменшення енерговитрат надихає на розробку більш енергоефективних рішень організації цього процесу [2, 3].

На сьогодні основною сировиною для виробництва етанолу залишається рослинна сировина з високим вмістом крохмалю або крохмальовмісних речовин (картопля, цукровий буряк, зернові культури, кукурудза та ін.). Заключною стадією технологічного процесу отримання етилового спирту є ректифікація (або дистиляція), яка відбувається неодноразово. Такий складний процес виділення спирту високої концентрації призводить навіть до питання доцільності використання зневодненого етанолу в якості альтернативного палива і укладання енергетичного балансу технологічного процесу для оцінювання питомої енергоємності виробництва [4]. Проте, розробка та впровадження нових технологій вимагає значних капітальних вкладень в устаткування та не може бути здійснено у короткий час.

Пошук альтернативних рішень демонструє, що одним з методів, зокрема таким, що не потребує тотальної реконструкції виробництва, є метод інтеграції процесів, що базується на пінч-аналізі. Цей метод можна успішно застосовувати в хімічній, нафтохімічній, харчовій, фармацевтичній та інших галузях промисловості [5]. Модернізація теплообмінних систем існуючих виробництв методом Pinch-технології дозволяє максимально використовувати вже встановлене устаткування, що знижує інвестиції в реконструкцію. Методами Pinch-аналізу можна також визначити вартісний компроміс між цільовими показниками і капітальними вкладеннями при заданому часі окупності, якому повинен задовольняти остаточний проект [6].

Дане дослідження ставить за мету визначення енергозберігаючого потенціалу в процесі ректифікації етилового спирту на існуючому виробництві та створення мережі теплообмінників з максимальною рекуперацією енергії. Враховуючи високу енергоємність процесу, використання методів інтеграції для зменшення енергоспоживання є перспективним для досягнення цільових показників в технологічному процесі.

Як відомо, метод пінч-аналізу, вперше запропонований професором Б. Ліннхоффом, є дуже зручним інструментом створення проектів модернізації хіміко-технологічних систем з метою максимальної рекуперації енергії [7, 8, 9]. Цей метод дозволяє забезпечити вже на ранній стадії проектування оптимальне рішення задач створення теплообмінних систем. Виділення технологічних потоків, що прийматимуть участь в інтеграції, та побудова складових кривих процесу дозволяють провести аналіз можливості рекуперації теплоти всередині технологічної схеми, визначити кількість зовнішніх енергоносіїв та розробити теплообмінну мережу, яка забезпечить цільові значення температур технологічних потоків [10, 11]. Енергозберігаючий ефект при використанні даного методу при реконструкції теплообмінних мереж різноманітних хіміко-технологічних систем є суттєвим, що обумовлює доцільність його застосування при енергоефективному проектуванні [12].

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

Технологічний процес заснований на послідовності русі продуктів від колони до колони та супроводжується наступними технологічними діями:

- у розгінній колоні за рахунок глибокої гідроселекції виділяється більша частина головних домішок;
- у відгінній (сирцевій) колоні відбувається концентрування водно-спиртової рідини;
- в епюраційній колоні протікає епюрація спирту-сирцю, виділення головних домішок та метанолу;
- в ректифікаційній колоні здійснюється підвищення міцності та пастеризація спирту, виведення вищих спиртів з зон їх концентрування;
- в колоні остаточної очистки спирту (при її наявності) проводиться повторна очистка ректифікованого спирту.

Крім ректифікованого спирту при переробці головної фракції, з колон виводиться ефіро-альдегідно-метанольний концентрат, а також відбираються та спрямовуються на повторну очистку непастеризований спирт із конденсаторів ректифікаційної колони та колони остаточної очистки.

На даному етапі роботи для теплової інтеграції існуючого процесу, було обрано дві колони установки централізованої розгінки етилового спирту – бражну та епюраційну. Були розраховані тепловий та матеріальний баланси цих колон установки ГФЕС. Основні параметри технологічних потоків, гарячих та холодних утиліт відображені на енергофункціональній схемі бражної та епюраційної колони (Рис.1) та в таблиці поточкових даних (таблиця 1).

Тепловий потік характеризують його початкова (температура постачання) T_s , °C, і кінцева (цільова) T_t , °C, температура, масова витрата G , кг/с, теплоносія, питома теплоємність c_p , кДж/(кг · °C).

Можна обчислити для зручності потокову теплоємність CP , кВт/°C:

$$CP = G \cdot c_p \quad (1)$$

та зміну ентальпії потоку в його температурному інтервалі:

$$\Delta H_{CP} = \int_{T_s}^{T_t} dt \quad (2)$$

якщо $CP = \text{const}$, тоді

$$\Delta H = CP \cdot (T_t - T_s). \quad (3)$$

Для потоків, у яких відбувається фазовий перехід, визначальною величиною є зміна потокової ентальпії, ΔH , кВт.

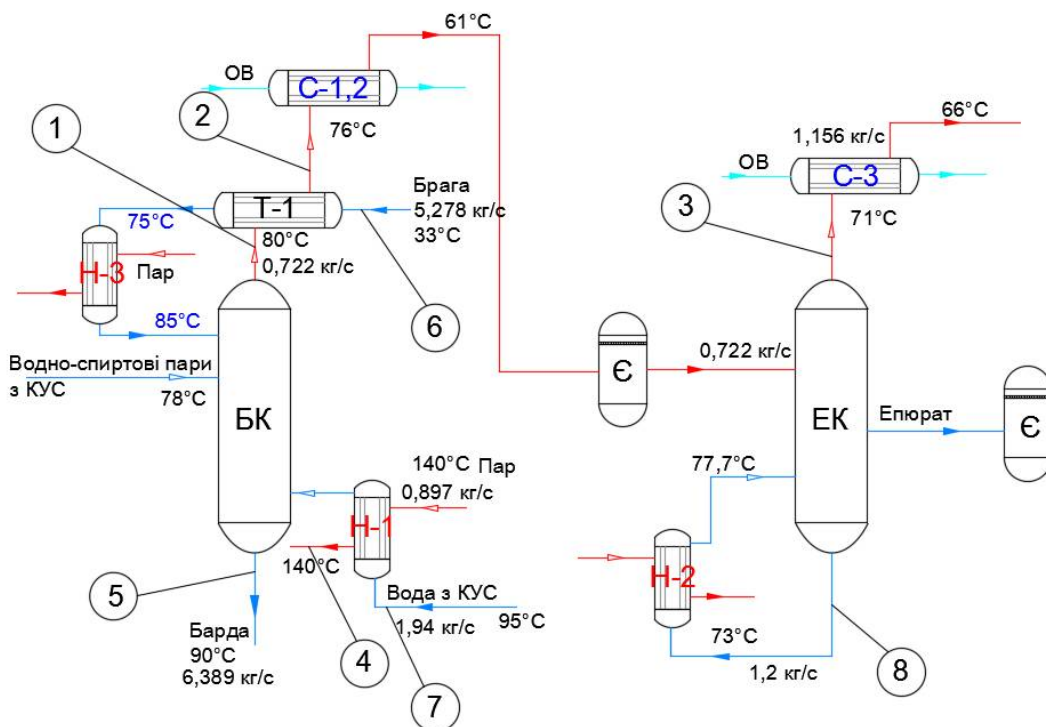


Рисунок 1 – Енерго-функціональна схема бражної та епюраційної колони

При відомих значеннях цільової та початкової температур, величин теплових навантажень на потоки, можна представити їх на температурно-ентальпійній діаграмі. Для цього будуємо складові криві потоків для існуючої схеми (рис. 2).

У схемі, що розглядається, існує часткова інтеграція теплоти технологічних потоків. Так, у дефлегматорі ректифікаційної колони охолоджуючим агентом виступає брага. Складові криві було розміщено таким чином, щоб область рекуперації між гарячими та холодними потоками складала 800 кВт, що дорівнює тепловому навантаженню теплообмінника Т-1. Таким чином, було встановлено, що мінімальна різниця температур між холодними та гарячими складовими кривими для існуючого процесу склала $\Delta T_{\min} = 25^{\circ}\text{C}$.

Було з'ясовано, що процес, що існує, не відповідає принципам пінч-проекування та має значний резерв для рекуперації всередині технологічної схеми.

Для максимальної реалізації енергетичного потенціалу технологічних потоків, необхідно керуватися принципами пінч-проекування та спроекувати сіткову діаграму таким чином, щоб не було переносу через пінч, тобто забезпечувався вертикальний теплообмін між гарячими та холодними потоками в системі.

Таблиця 1 Потокові дані технологічної схеми

№ потоку	Найменування потоку	Тип потоку	G, кг/с	Ts, °C	Tt, °C	CP, кДж/°C	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	67		1970
4	Конденсат гріючої пари з куба БК	Гарячий	0,92	141	60	3,84	311
5	Барда	Гарячий	6,39	90	60	25,4	762
6	Нагрів браги на підігрівачах БК	Холодний	5,28	33	85	18,9	982
7	Випаровування води в БК	Холодний	0,9	97	99		2029
8	Випаровування води в ЕК	Холодний	1,2	73	78		2044

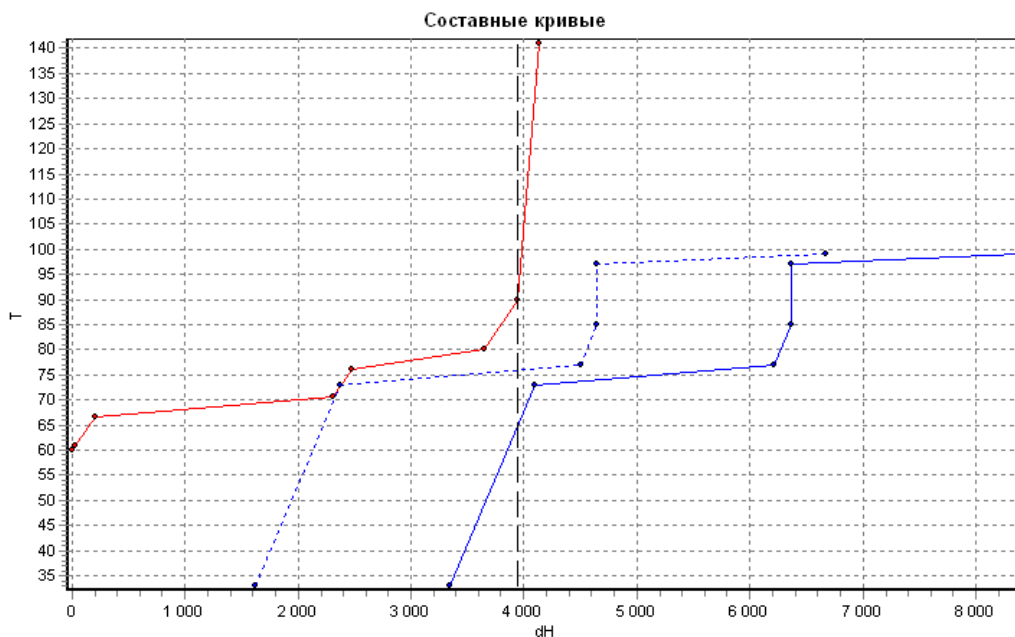


Рисунок 2 – Складові криві процесу до інтеграції з $\Delta T_{\min} = 25^{\circ}\text{C}$

В даному проекті для максимізації рекуперації теплової енергії було задано $\Delta T_{\min} = 3^{\circ}\text{C}$. Це можливо обґрунтувати тим, що для досягнення істотного енерзберігаючого ефекту для даної ХТС потрібно використовувати мінімальні значення ΔT_{\min} .

Складові криві для вищезначеної мінімальної різниці температур наведені на рис. 3. В результаті область рекуперації була збільшена до 2422,5 кВт.

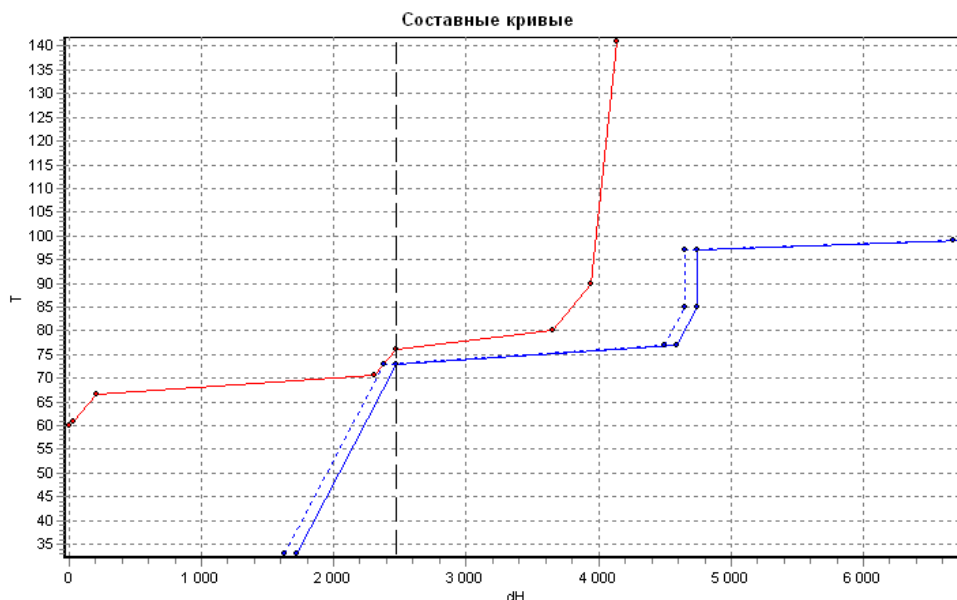


Рисунок 3 – Складові криві інтегрованого процесу з $\Delta T_{\min} = 3^{\circ}\text{C}$

Мережу теплообмінників, з урахуванням нових умов показано на рис. 4.

Для забезпечення роботи теплообмінної системи в цьому випадку були проведені відповідні розрахунки енергоефективного пластинчастого теплообмінного облад-

нання [13], яке може забезпечити роботу при заданих значеннях ΔT_{\min} . Принципове розміщення енергозберігаючого обладнання показано на рис. 5.

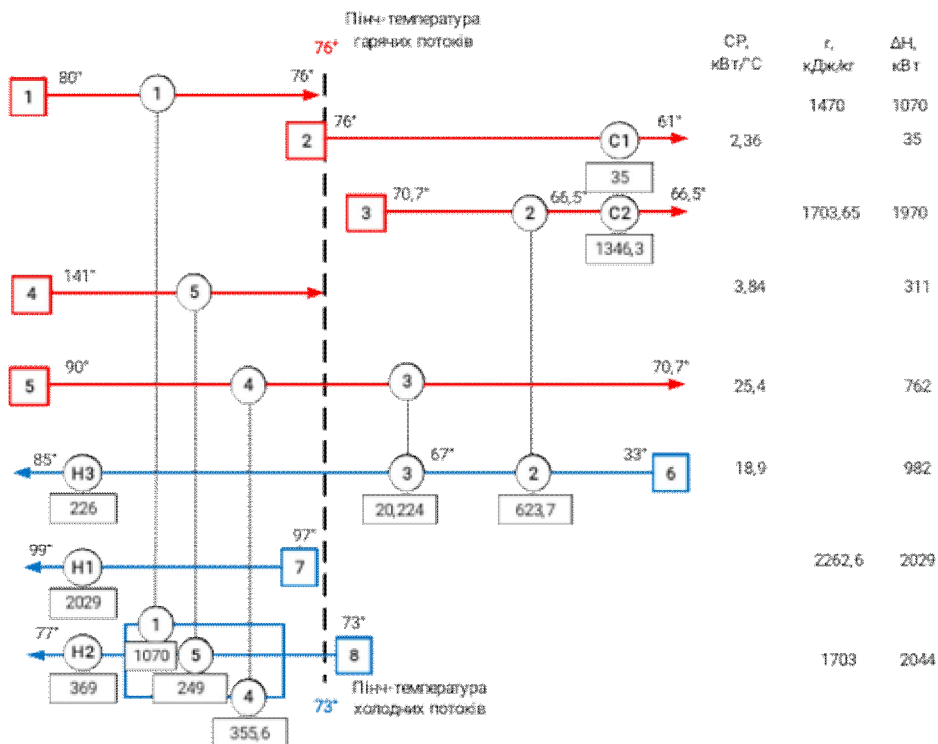


Рисунок 4 – Сіткова діаграма технологічної системи ректифікації етилового спирту

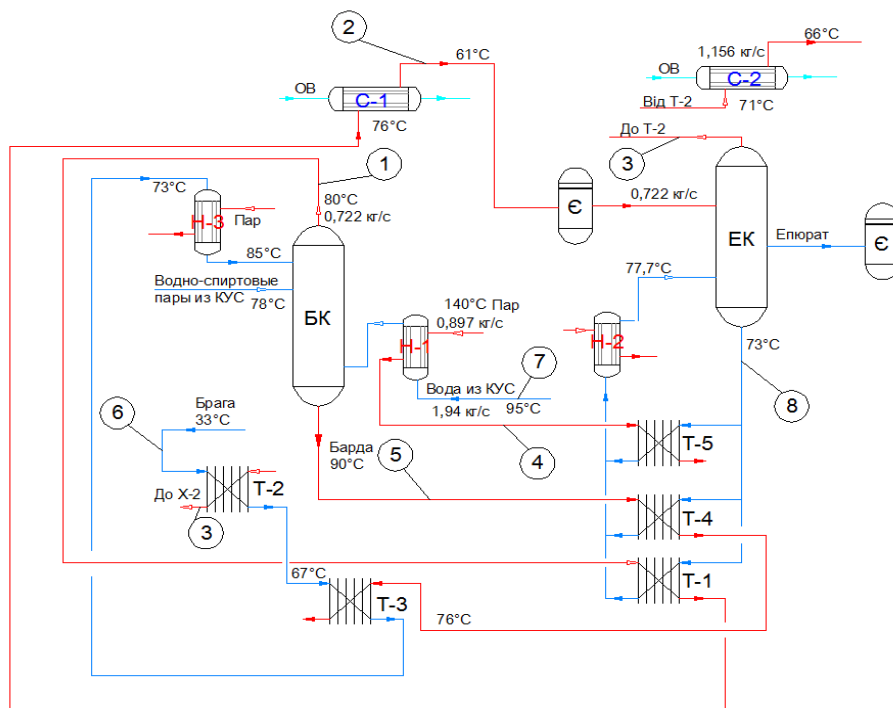


Рисунок 5 – Енергоефективна схема модернізованого технологічного процесу

Література

1. Энергетична стратегія України до 2035 р. http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564
2. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. Изд. 3-е переработанное. – М.: Химия, 1974. – 440 с.
3. Dhole V.R., Linnhoff B. Distillation Column Targets.– Proceedings of ESCAPE–7 Symposium, Elsinore, Denmark, May, 24–28, 1992.
4. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М., Энергоатомиздат, 1990. – 392с.
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., Ульев 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. Boldyryev S. Achievements and perspectives of process integration in CIS countries, Resource-Efficient Technologies 2 (2020) 1–14, Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics University ITMO, St. Petersburg, Russia
13. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в промышленности. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – с.

Bibliography (transliterated)

1. Energetichna strategiya Ukrayini do 2035 r. http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564
2. Bagaturov S.A. Osnovy teorii i rascheta peregonki i rektifikaczii. Izd. 3-e pererabotannoe. – М.: Khimiya, 1974. – 440 p.

3. Dhole V.R., Linnhoff B. Distillation Column Targets.– Proceedings of ESCAPE–7 Symposium, Elsinore, Denmark, May, 24–28, 1992.
4. Tvajdell Dzh., Uejr A. Vozobnovlyaemye istochniki energii. – M., Energoatomizdat, 1990. – 392 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 J., Tovazhnyanskij L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M. Osnovy integraczii teplovykh processov.– Kharkov, NTU «KhPI», 2000.– 456 p.
7. Meshalkin V.P, Tovazhnyanskij L.L., Kapustenko P.A. Osnovy teorii resursoberegayushhikh integrirovannykh khimiko-tekhnologicheskikh sistem. – Kharkov: NTU "KhPI", 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. Boldyryev S. Achievements and perspectives of process integration in CIS countries, Resource-Efficient Technologies 2 (2020) 1–14, Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics University ITMO, St. Petersburg, Russia.
13. Tovazhnyanskij L.L., Kapustenko P.A., Khavin G.L., Arseneva O.P. Plastinchatye teploobmenniki v promyshlennosti. – Kharkov: NTU «KhPI», 2004. – p.

УДК 66.048.05:665.6

Рябова І.Б., к.техн.н., професор, Гарєв А.О., Гарєв Л.А.,
Горбунов К.О., к.техн.н., професор

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОТОКІВ БРАЖНОЇ ТА ЕПЮРАЦІЙНОЇ КОЛОНИ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА РЕКТИФІКОВАНОГО ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

На сьогодні етиловий спирт є речовиною, використання якої поширено у багатьох галузях промисловості. Технологія виробництва етанолу з будь-якої органічної сировини найчастіше включає ректифікацію, яка є енергоємним процесом. Висока ціна

енергоносіїв і постійне її зростання призводять до суттєвого збільшення вартості продукції. Зменшення питомих витрат енергії на одиницю продукції може вирішити комплекс питань: по-перше, зменшити собівартість продукції, по-друге, в масштабах держави, полегшити енергозалежність від зовнішніх постачальників енергії. Детальний аналіз енергетичного потенціалу технологічних потоків з метою вирішення задачі зменшення енерговитрат надихає на розробку більш енергоефективних рішень організації цього процесу.

Пошук альтернативних рішень демонструє, що одним з методів зменшення питомих витрат енергії на виробництво етанолу, зокрема таким, що не потребує тотальної реконструкції виробництва, є метод інтеграції процесів, що базується на пінч-аналізі.

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

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

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

Для максимізації рекуперації теплової енергії було задано $\Delta T_{\min} = 3^{\circ}\text{C}$. Це призвело до необхідності використання енергоефективного теплообмінного обладнання. Суттєве зменшення використання зовнішніх утиліт (холодних на 48% та гарячих – на 38%) для обраних технологічних потоків та невеликий термін окупності проекту (близько трьох місяців) робить доцільним використання такого роду рішення проблеми.

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

Рябова І.Б., Гарев А.О., Гарев Л.А., Горбунов К.А.

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТОКОВ БРАЖНОЙ И ЭПЮРАЦИОННОЙ КОЛОНН В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА РЕКТИФИЦИРОВАННОГО ЭТИЛОВОГО СПИРТА

На сегодня этиловый спирт является веществом, использование которого распространено в многих отраслях промышленности. Технология производства этанола из любого органического сырья чаще всего включает ректификацию, которая является энергоемким процессом. Высокая цена энергоносителей и постоянные её рост приводят к существенному увеличению стоимости продукции. Уменьшение удельных затрат энергии на единицу продукции может решить комплекс вопросов: во-первых, снизить себестоимость продукции, во-вторых, в масштабах государства, облегчить энергозависимость от внешних поставщиков энергии. Детальный анализ энергетического потенциала технологических потоков с целью решения задачи уменьшения энергозатрат на-

целивает на разработку более энергоэффективных решений организации этого процесса.

Поиск альтернативных решений показывает, что одним из методов уменьшения удельных затрат энергии на производство этанола, в частности таким, что не требует тотальной реконструкции производства, является метод интеграции процессов, основанный на пинч-анализе.

Экстракция данных технологических потоков была осуществлена на основе регламентной документации аппаратурно-технологической схемы установки централизованной разгонки ГФЭС (головной фракции этилового спирта) и отчета по энергоаудиту данной установки, который был осуществлен на одном из спиртопроизводящих предприятий Украины.

Для тепловой интеграции существующего процесса, были выбраны две колонны установки централизованной разгонки этилового спирта: бражная и эспурационная. Были рассчитаны тепловой и материальный балансы этих колонн установки ГФЭС.

Для максимальной реализации энергетического потенциала технологических потоков, были использованы принципы пинч-проектирования и построена сетевая диаграмма сети теплообмена.

Для максимизации рекуперации тепловой энергии было задано $\Delta T_{\min} = 3^{\circ}\text{C}$. Это привело к необходимости использования энергоэффективного теплообменного оборудования. Существенное уменьшение использования внешних утилит (холодных на 48% и горячих – на 38%) для избранных технологических потоков и небольшой срок окупаемости (около трех месяцев) делает целесообразным использование такого рода решения проблемы.

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

Riabova I.B., Hariiev A.O., Hariiev L.A., Gorbunov K.O.

HEAT FLOWS INTEGRATION OF DISTILLATION AND EPURATION COLUMNS INTO THE PRODUCTION PROCESS OF RECTIFIED ETHYL ALCOHOL

Today, ethyl alcohol is widely used in many industries. Ethanol production processes from any organic matter often involve rectification, which is an energy-intensive process. The constant increase in the cost of energy leads to a significant growth of the cost of production. Reducing the unit energy consumption can solve a range of important issues: first, that of decreasing production cost, and secondly, that of nationwide dependence on external energy suppliers. A detailed analysis of the thermal energy potential of technological flows aimed at solving the problem of reducing energy consumption inspires the development of more energy-efficient solutions for organizing this processes.

The search for alternative solutions demonstrates that one of the methods of reducing the unit energy consumption for ethanol production, in particular one that does not require a total restructuring of the production lines, is the method of integration of processes based on

pinch analysis.

The extraction of these technological flows was carried out on the basis of the regulatory documentation of the hardware-technological scheme of the centralized ethyl alcohol head fraction distillation plant and the energy audit report of that plant, which was carried out at one of the alcohol enterprises of Ukraine.

A distillation and a purification column were selected from the centralized ethyl alcohol distillation plant for thermal integration of the existing process. The thermal and material balances of the ethyl alcohol head fraction distillation plant columns were calculated.

To maximize the energy potential of the heat flows, the principles of pinch design were applied and a grid diagram of heat exchanger networks was designed.

To maximize the recovery of thermal energy, the difference ΔT_{min} was set to -3°C . This led to the need to use energy-efficient heat exchange equipment. A significant reduction in the use of external utilities (by 48% for cold utility and by 38% for hot utility) for selected heat flows and a short payback period for the project (approximately three months) makes this solution viable.

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