

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Аббас Маатук**



УДК 66.045.1; 662.99

**РЕКУПЕРАТИВНИЙ ТЕПЛОБМІН НА УСТАНОВЦІ  
ГАЗОФРАКЦІЮВАННЯ ТА КОМПРИМУВАННЯ ГАЗОХІМІЧНОГО  
ВИРОБНИЦТВА**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій, процесів і апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Ульєв Леонід Михайлович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри інтегрованих технологій,  
процесів і апаратів.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Ляпощенко Олександр Олександрович**,  
Сумський державний університет, м. Суми,  
доцент кафедри процесів та обладнання хімічних і  
нафтопереробних виробництв;

кандидат технічних наук  
**Болдирєв Станіслав Олександрович**,  
Університет Загребу, м. Загреб, Хорватія,  
провідний експерт з енергоефективності  
Міжнародного центру зі сталого розвитку  
енергетики, водних ресурсів і навколишнього  
середовища.

Захист відбудеться 28 лютого 2018 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий 23 січня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Арутюнян Т.В

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Інтеграція України в світову економіку та європейський вибір народу України, який набув підтримку індустріально розвинених країн, передбачає досягнення рівня життя і енергоефективності економіки країн Європейської Співдружності.

У даний час енергетична ситуація в Україні критична, насамперед внаслідок того, що за рахунок власного видобутку викопного органічного палива Україна сьогодні може лише частково задовольнити потреби: у нафті – на 10-12 %, у природному газі – на 20-25 %, у вугіллі – на 85-90 %.

У той же самий час питоме енергоспоживання в промисловості України в 2-3 рази вище, ніж в економічно розвинених країнах, що свідчить про наявність великого енергозберігаючого потенціалу на промислових підприємствах, а також про можливість зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище. Шляхи та методи підвищення енергоефективності та зниження техногенного навантаження відомі вже чотири десятиліття, і одержали широке поширення в індустріально розвинених країнах.

Насамперед, це методи інтеграції процесів, які дозволяють значно збільшити потужність процесів рекуперації теплової енергії на промислових підприємствах.

Найбільш енергоємними підприємствами є підприємства хімічної нафто – і газопереробної промисловості, тому збільшення рекуперації теплової енергії, яка призводить до зниження споживання первинних енергоджерел і веде до енергонезалежності країни є безумовно актуальною науково-практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконання роботи здійснювалось за планами науково-дослідних робіт кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів Національного технічного університету «ХП» в рамках науково-дослідницької роботи за темою «Создание интегрированных технологий производственных комплексов Республики Казахстан для обеспечения их энергоресурсоэффективности и экологической безопасности» з ТОО «Научно-исследовательский институт «Казахстан инжиниринг»» та Спільного міжнародного Казахстансько-Українського наукового проекту «Моделирование и оптимизация энергосбережения, снижение уровня загрязнения промышленных предприятий на основе интеграций процессов с применением методов пинч-анализа» між університетами ЮКГУ ім. М.О. Ауезова та НТУ «ХП», в яких здобувач був виконавцем окремих етапів, результати дисертації також використовувалися при виконанні наукового проекту, який фінансувався Європейською Комісією - ЕС project “Distributed knowledge-based energy saving networks” – DISKNET (FP7-PEOPLE-2011-IRSES-294933).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні рівня потужності процесу рекуперації теплової енергії на установках газофракціонування і компримування та їх комплексів на газохімічних виробництвах шляхом дослідження та аналізу існуючої системи рекуперативного теплообміну, та наукового обґрунтування методів підвищення потужності процесу рекуперації теплоти, створення методики розрахунку теоретичне обумовленого, та технічно

дозволеного підвищення потужності рекуперативного теплообміну та впровадженні досягнень у науково-технічні розробки та навчальний процес.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- науково дослідити та проаналізувати існуючі процеси рекуперативного теплообміну на установках газофракціювання і компримування та їх комплексів на газохімічних виробництвах, виявити лімітуючі фактори щодо збільшення потужності процесу рекуперації теплової енергії;

- дослідити та науково обґрунтувати методи підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії на установках газофракціювання і компримування та на їх територіальних комплексах газохімічних виробництвах;

- дослідити та науково обґрунтувати методи підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії в існуючих двопотокових системах теплообмінників;

- створити методику розрахунку підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії в існуючих двопотокових системах теплообмінників;

- розробити проект реконструкції для процесів газофракціювання і компримування та їх комплексів на газохімічних виробництвах з підвищеною потужністю процесу рекуперації теплоти;

- виконати енергетично-економічну оцінку технічних заходів що підвищують потужність процесу рекуперативного теплообміну на установках газофракціювання і компримування та їх комплексах.

*Об'єкт дослідження* – процес рекуперативного теплообміну на установках газофракціювання і компримування та їх комплексах.

*Предмет дослідження* – методи підвищення потужності у процесі рекуперативного теплообміну на установках газофракціювання і компримування та їх комплексах.

**Методи дослідження.** У роботі використані основні принципи інтеграції теплових процесів і методики пінч-аналізу. Для визначення споживання зовнішніх енергоносіїв в хіміко-технологічних процесах і кількості енергії рекуперації використані фундаментальні методи термодинаміки та теплопередачі. Для створення проекту реконструкції системи теплообмінних апаратів використано метод сіткових діаграм. Для проведення розрахунків та створення методики розрахунку використано програмні та математичні пакети Microsoft Excel та MathCAD, програма для розрахунку технологічних параметрів теплообмінного обладнання «CAS-200», програмне забезпечення «HILECT» та «Pinch 2.02», для обрахунку можливої величини потужності рекуперації теплоти та побудови кривих енергетичних і економічних залежностей, а також пакет тривимірного твердотілого моделювання AutoCAD. Моделювання виробництва проведено за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення «UniSim Design».

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше визначено залежності величин утиліт, які споживаються процесом та необхідної площі поверхні теплообміну від значення мінімальної рушійної сили теплообміну  $\Delta T_{min}$  в рекуперативній системі процесу за допомогою побудови складових кривих процесу ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів з

отриманням пропан-пентанової, пропан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій;

– вперше знайдено оптимальне значення мінімальної рушійної сили теплообміну  $\Delta T_{min}$  в рекуперативній системі процесу, для якої визначені оптимальні значення зовнішніх утиліт, і побудована імітаційна математична модель системи рекуперації теплової енергії;

– запропоновано і розроблено метод визначення та підвищення питомої потужності процесу рекуперації теплоти на установках ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової, пропан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій за допомогою інтеграції теплової помпи;

– вперше досліджено та побудовано температурні профілі територіального комплексу установок ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів за допомогою яких вирішено задачу підвищення потужності процесу рекуперації теплоти на територіальному комплексі установок ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів;

– вперше вирішено задачу економічно доцільного підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії в двопотоковій системі теплообміну з утилітними шляхами та трьома діючими теплообмінниками, так і для будь-якої їх кількості;

– вперше визначено залежності температур теплоносіїв та теплового навантаження на існуючих та додатковому теплообмінниках як від його площі поверхні теплообміну, так і від інтенсивності теплообміну;

– вперше визначено залежності дисконтованої вартості та простого строку окупності для реконструкції двопотокової системи теплообміну як від додаткової площі поверхні теплообміну, так і від інтенсивності теплообміну;

– вперше створено методичку розрахунку економічно доцільної додаткової поверхні теплообміну в діючій двопотоковій системі теплообміну з утилітними шляхами у вигляді математичної моделі.

**Практичне значення отриманих результатів** для хімічної, газо– та нафтохімічної галузей промисловості полягає в розробці технологічних схем з підвищеною потужністю рекуперативного теплообміну щодо ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової, пропан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракцій. Створені технологічні схеми з підвищеною потужністю рекуперативного теплообміну територіального комплексу установок поділення широкої фракції легких вуглеводнів. Запропоновано технологічні схеми з підвищеною потужністю рекуперативного теплообміну з інтеграцією теплової помпи як для самостійних процесів поділення широкої фракції легких вуглеводнів так і щодо територіального комплексу установок поділення широкої фракції легких вуглеводнів. Розроблено метод інженерних розрахунків підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії у діючій двопотоковій системі теплообміну.

Ці результати підтверджено актом впровадження у міжнародний проект по договору № 203-51 від 03.03.2017 року та актом про можливість використання результатів дисертаційної роботи у діяльності ПЕФ «ОптимЕнерго».

Розроблені наукові положення використовуються в навчальному процесі НТУ «ХП», що також підтверджено актом про використання результатів у навчальному процесі кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів при викладанні дисциплін «Основи інтеграції хіміко-технологічних процесів», «Комп'ютерно-інтегровані системи» та «Процеси та апарати хімічних виробництв» для студентів напряму підготовки 8.05020202 – «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», 8.05130101 – «Хімічна технологія неорганічних речовин», 8.05130102 – «Хімічна технологія органічних речовин», що підтверджено актом впровадження від 18.09.2017 року.

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Здобувачем особисто опрацьовано літературні джерела за темою дисертації, побудовано складені криві процесу ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів широкої фракції легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової, пропан-гексанової, та процесу ректифікації з одержанням бутанової та ізобутанової фракцій, побудовані температурні профілі комплексу таких установок, зроблено аналіз процесу рекуперації теплоти в існуючих системах теплообміну, знайдено потенціал енергозбереженні на цих установках та їх комплексу. Здобувачем науково обґрунтовано підвищення потужності процесу рекуперації теплоти як при інтеграції в системі теплової помпи, так і при теплової інтеграції без неї. Здобувачем вирішено задачу підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії в діючій двопотоковій системі теплообмінників та розроблено методику розрахунку додаткової поверхні в таких системах.

Постановка завдань основних досліджень роботи, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувались здобувачем спільно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи обговорювались і отримали позитивні відгуки на Між-народних науково-практичних конференціях: International Conference of Industrial Technology and Engineering (ICITE, 2015), Shymkent, Kazakhstan; «Інноваційні енерготехнології» (ПАЕМ), (Одеса, 2015); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2015); «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2016); «Innovative Energy Technologies» (Ukraine, Odessa, 2017); «Інноваційні Енерготехнології», (Одеса, 2017); наукових семінарах кафедри ІТПА в НТУ «ХП» (Харків 2015–2017).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 12 наукових працях, з яких: 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному науковому фаховому виданні, 6 – у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації на двох мовах, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 235 сторінок, серед них: 50 рисунків за текстом, 4 з котрих на окремих аркушах, 15 таблиць за текстом, список із 252 найменувань використаних джерел на 29 сторінках, 8 додатків на 62 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність теми дисертації, сформульовано мету досліджень, визначено основні завдання і методи їх розв'язання, викладені наукова новизна та практичне значення результатів роботи. Наведено особистий внесок здобувача, інформацію про апробацію результатів дисертації та публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** дисертації наведено аналітичний огляд публікацій за темою дисертаційної роботи. У результаті огляду виконана класифікація методів збільшення потужності рекуперації теплової енергії в хіміко-технологічних процесах з метою зниження питомого енергоспоживання в промислових процесах. Розглянуто методи внутрішньої теплової інтеграції ректифікаційних колон, як з інтеграцією теплового насоса (ТН) з колоною, так і без інтеграції ТН. Розглянуто роботи, пов'язані з застосуванням методів пінч-аналізу для збільшення потужності процесів рекуперації теплоти на установках хімічних виробництв. Зроблений аналіз робіт, які присвячені збільшення питомої потужності рекуперації теплоти в територіальних виробничих комплексах (Total Site Integration). В аналізі публікацій окремо відзначені роботи піонерів в області інтеграції процесів: професора Б. Ліннхоффа, професора Р. Сміта, професора Й. Клемеша, а також роботи вітчизняних вчених: професора Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО, професора П.О. КАПУСТЕНКО, професора Л.М. УЛЬЄВА. Аналіз літературних даних дозволив зробити постановку завдань для збільшення питомої потужності процесу рекуперації теплової енергії на установках ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів (ШФЛВ) з отриманням пропан-пентанової, пропан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракцій та підібрати методи їх вирішення.

У **другому розділі** зроблено науково-технічний аналіз та наведено характеристики досліджуваних процесів.

Для процесів розділення ШФЛВ наведений матеріальний баланс та вихідні принципи технологічні схеми досліджуваних процесів розділення ШФЛВ. Представлені основні характеристики роботи теплообмінного обладнання в процесах розділення ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової та бутанової фракцій (процес 1) та з отриманням пентан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій (процес 2). Для процесу легкого гідрокрекінгу представлена принципова технологічна схема та таблиця з основними потоковими даними легкого гідрокрекінгу.

Для уточнення розрахованих теплофізичних даних, отримання відсутніх даних для досліджуваних потоків і уточнення теплових навантажень, побудована комп'ютерна модель установки розділення ШФЛВ в програмі «UniSim Design» (рис. 1). Рівняння станів, інтегровані в «UniSim Design» дозволили отримати достовірну модель процесу розділення ШФЛВ.

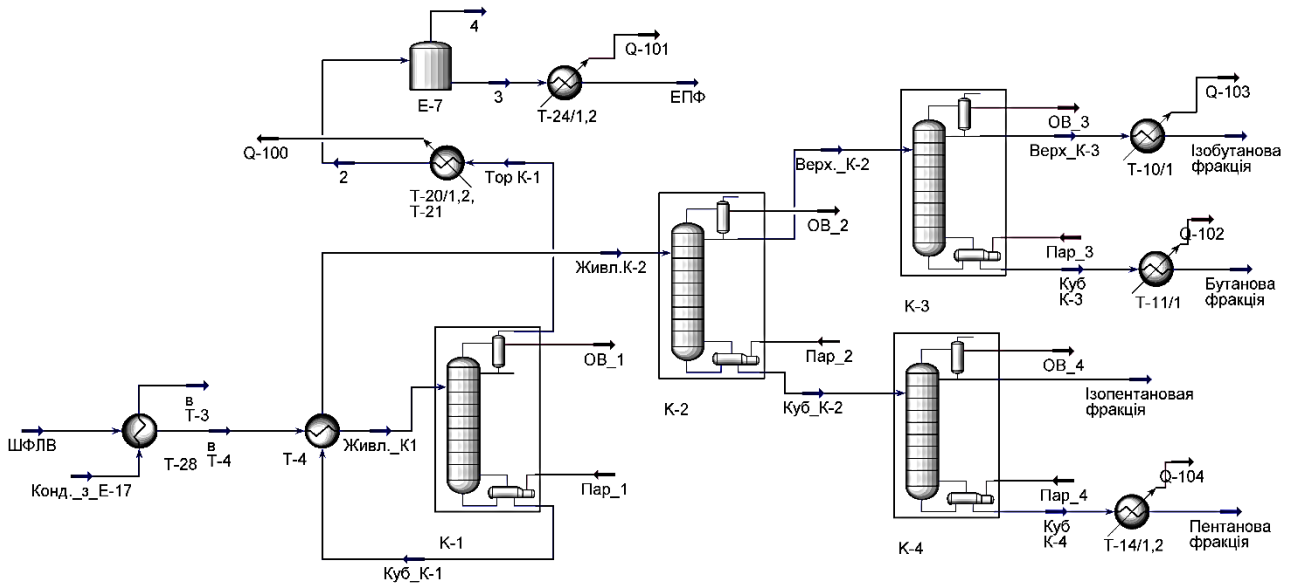


Рисунок 1 –UniSim модель установки другого процесу розділення ШФЛВ; Є – ємності; К-1–К-4 – колони; Т – теплообмінні апарати.

Комп'ютерна модель існуючого процесу дозволила перевірити дані, зібрані на установці та визначити відсутні витрати потоків, теплоємності і приховану теплоту фазового переходу досліджуваних потоків.

**У третьому розділі**, за результатами моделювання, представлено аналіз роботи існуючої системи теплообміну процесів розділення ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракцій, та з отриманням пентан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракцій. Встановлені основні теплофізичні характеристики існуючих процесів розділення ШФЛВ. Так, для процесу з отриманням пропан-пентанової та бутанової фракцій, потужність процесу рекуперації теплової енергії становить 1230 кВт, потужність гарячих утиліт 67274кВт, потужність холодних утиліт 65982 кВт.

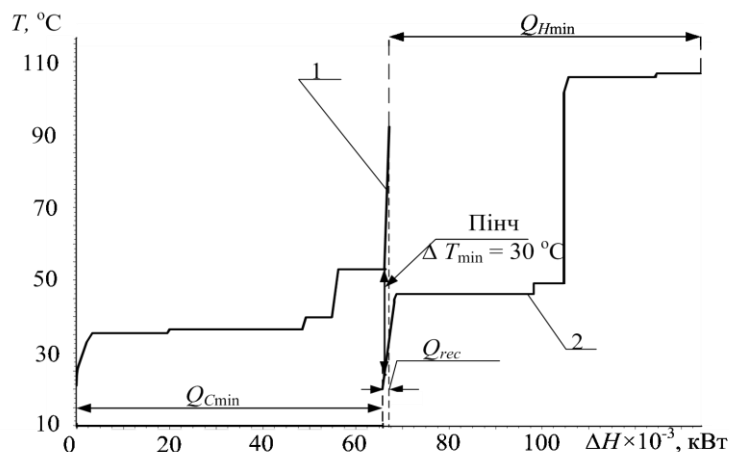


Рисунок 2 – Складові криві процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракції для існуючої теплообмінної системи:

1 – складова крива гарячих потоків; 2 – складова крива холодних потоків.  $Q_{Hmin}$ ,  $Q_{Cmin}$ ,  $Q_{rec}$  – споживана потужність гарячих утиліт, холодних утиліт і потужність рекуперації.  $Q_{Hmin} = 67274$  кВт,  $Q_{Cmin} = 65982$ кВт,  $Q_{rec} = 1230$  кВт.

На основі технологічних даних, отриманих в результаті моделювання існуючого процесу розділення ШФЛВ, з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракцій та з отриманням пентан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракцій, на ентальпійно-температурної діаграмі побудована гаряча і холодна складова крива обраної системи технологічних потоків. Складові криві розміщено таким чином, щоб інтервал перекриття між ними становив величину, яка дорівнює потужності рекуперації теплоти в існуючій системі теплообміну (рис. 2).

У четвертому розділі представлена окрема інтеграція процесів розділення ШФЛВ.

Вибір оптимального проекту реконструкції здійснюється шляхом досягнення такого значення  $\Delta T_{\min}$ , при якому наведені витрати будуть мінімальними. Досягається подібне значення шляхом компромісу між теперішньою вартістю енергії та наведеними капітальними витратами. Вартісні залежності наведених величин від мінімальної різниці температур, спроектовані за допомогою програми «Pinch 02», розробленої на кафедрі інтегрованих технологій, процесів і апаратів НТУ «ХПІ» під керівництвом професора Ульєва Л.М., представлені на (рис. 3) для процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракцій. Побудова вартісних кривих для розглянутого процесу (рис. 3) дозволило визначити значення  $\Delta T_{\min, \text{опт}}$ , яке склало 6 °С.

Побудова складових кривих (рис. 4) для системи потоків технологічного процесу з урахуванням знайденого значення  $\Delta T_{\min, \text{опт}}$  дозволяє визначити цільові енергетичні значення для проекту реконструкції. Для процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракції споживання гарячих утиліт процесом складе – 54914 кВт, споживання холодних утиліт – 53658 кВт, потужність процесу рекуперації в теплообмінній мережі дорівнює 13575 кВт. Для процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пентан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій, як встановлено в працях проф. Ульєва Л.М., споживання гарячих утиліт процесом складе:  $Q_{H\min} = 54914$  кВт,  $Q_{C\min} = 53658$  кВт,  $Q_{\text{rec}} = 13560$  кВт.

Найбільш підходящим інструментом розуміння взаємодії утиліт з процесом є «велика складова крива» (ВСК). ВСК побудована з урахуванням знайденого (рис. 3) оптимального значення температурного напору для процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової та бутанової фракцій та процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пентан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій.

Розроблена схема інтегрованого процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової та бутанової фракцій (рис. 3).

На ВСК (рис. 4, 5) показана можливість установки теплового насоса. Інтеграція теплового насоса з процесом при розміщенні насоса поперек пінча забезпечує енергозбереження за рахунок збільшення потужності процесу рекуперації теплової енергії.

За допомогою програми «UniSim Design» складені комп'ютерна моделі і розраховані потужності теплових насосів (рис. 6, 7).

Ефективність дії теплового насоса часто оцінюють коефіцієнтом перетворення –  $\varepsilon$  (1), який визначається як співвідношення корисної енергії, що передається

процесу, до витраченої на це роботи, т.ч. за допомогою великої складеної кривої можливо визначити теплові навантаження і необхідні температури для інтеграції теплових насосів в ХТС:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{TH}} + W}{W}, \quad (1)$$

де  $Q_{\text{TH}}$  – теплова енергія, що передається компресором теплового насосу (ТН),  
 $W$  – робота компресора.

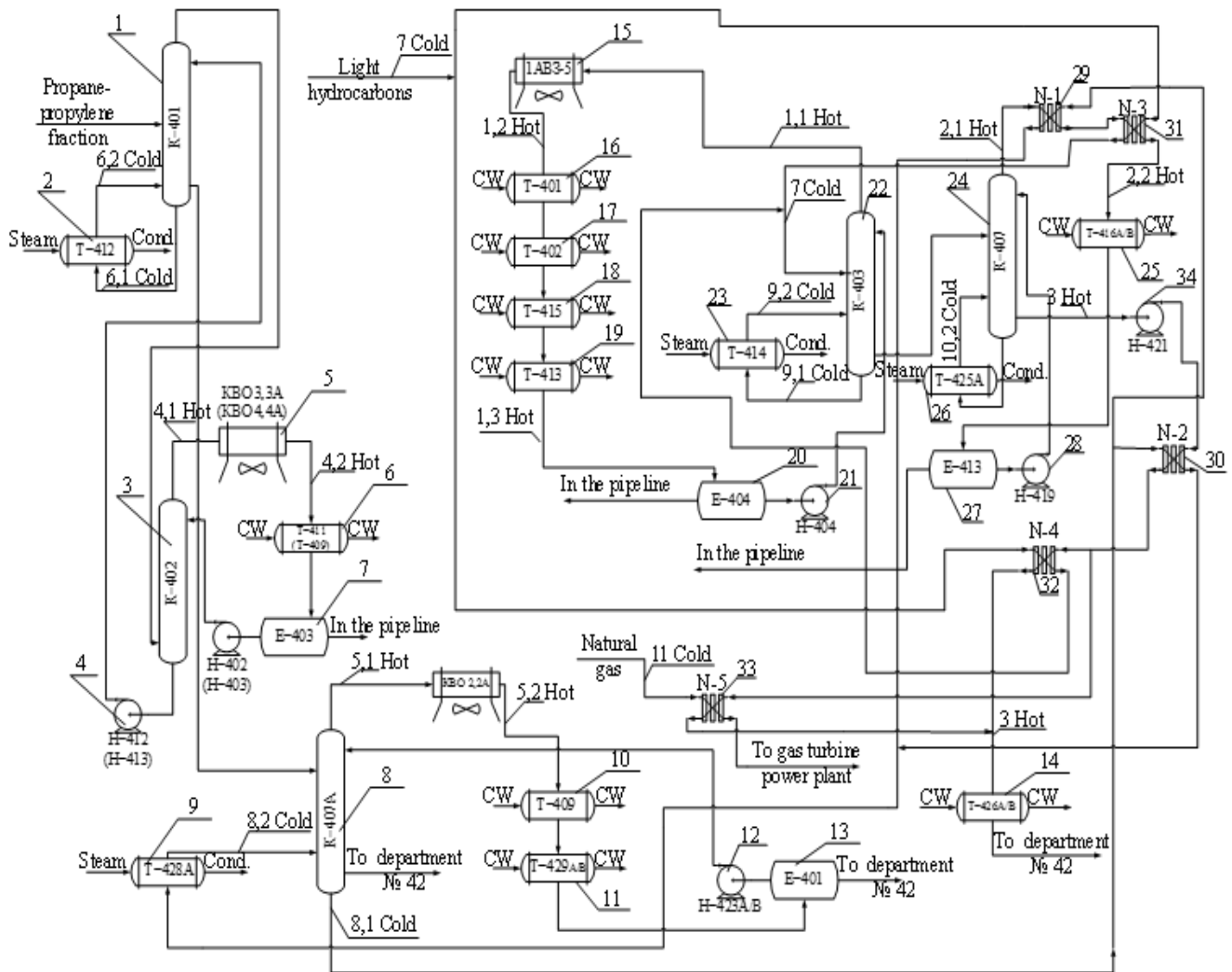


Рисунок 3 – Технологічна схема проекту реконструкції: N-1-N-5 – нові пластинчасті теплообмінники.

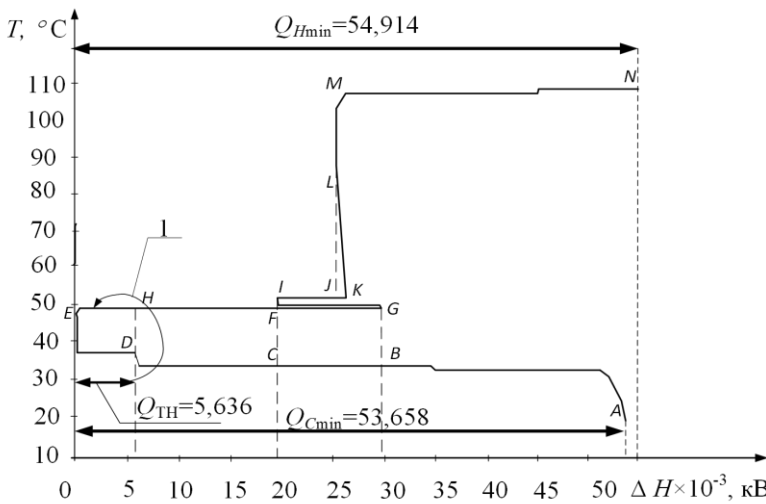


Рисунок 4 – Велика складова крива процесу розділення легких вуглеводнів: 1 – показує можливість інтеграції теплового насоса.; FGI та JKL – кишені рекуперації теплоти.

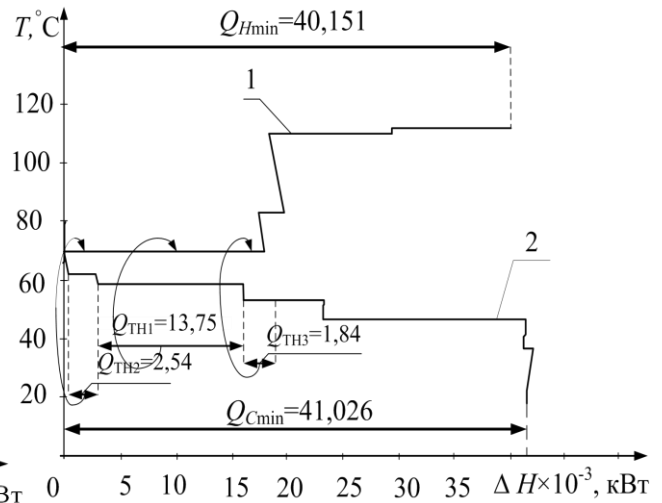


Рисунок 5 – Велика складова крива процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пентан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій: 1 – показує можливість інтеграції теплового насоса.

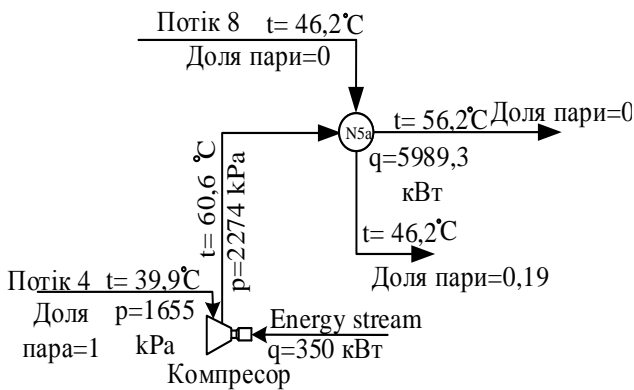


Рисунок 6 – UniSim Design модель підключення теплового насосу для процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової та бутанової фракцій

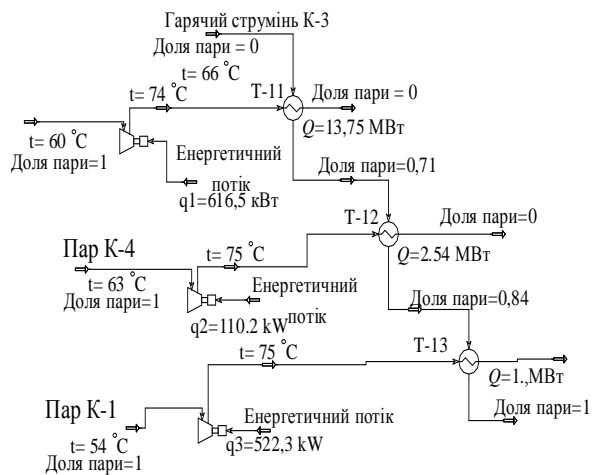


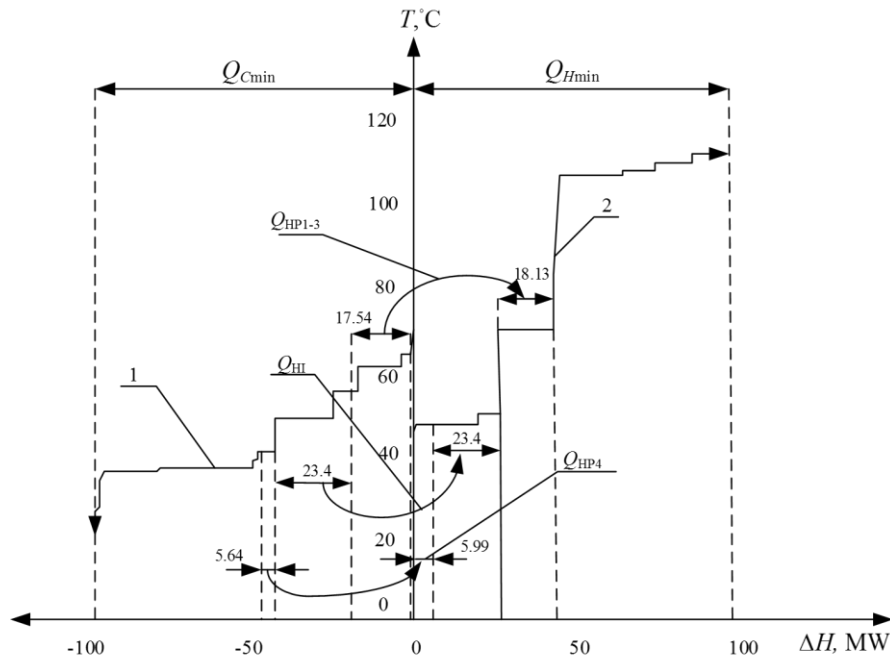
Рисунок 7 – UniSim Design модель підключення теплового насоса для процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пентан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій

Коефіцієнт перетворення для процесу підключення теплового насосу для процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пропан-пентанової та бутанової фракції складає 17, а для процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пентан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій дорівнює 15,5.

У п'ятому розділі представлена спільна інтеграція процесів розділення ШФЛВ. Використання загальних температурних профілів виробничого комплексу уможливило визначення цільових енергетичних значень для декількох процесів.

Побудовані ці профілі з ВСК окремих процесів, які входять у виробничий комплекс. На (рис. 8) показаний температурний профіль комплексу двох процесів.

Рисунок 8 – Total Site Profiles:



1 – Профіль джерела; 2 – сток;  $Q_{HP1-3}$  – теплові насоси, інтегровані в процес №2,  $Q_{HP4}$  – тепловий насос, інтегрований в процес №1;  $Q_{HI}$  – можливість теплової інтеграції між процесом №1 і процесом №2.

Загальний температурний профіль (TSP від англ. Total Site Profile) дозволяє розглянути можливість спільної інтеграції декількох процесів. Також на TSP показані теплові насоси, які інтегровані при окремому розгляді процесів за допомогою інструменту великий складеної кривої.

На температурних профілях показано, що від процесу №2 до процесу №1 можна додатково підвести 23,4 МВт теплової енергії. Для цього потрібна установка двох нових теплообмінників, в яких гарячими теплоносіями є потоки з процесу №2 – це потік №2 (пари К-1) та №6 (пари К-3), холодними теплоносіями є потоки з процесу №1 – потік №6 (підігрів куба К-401) і потік №8 (підігрів куба К-407а).

Зроблена економічна оцінка представлених проектів. Оцінку економічної ефективності інвестиційного проекту здійснено відповідно до міжнародної практики за двома показниками – чистої поточної вартості дисконтованих потоків готівки (NPV) і внутрішньої нормою дохідності (IRR).

NPV (Net Present Value, чиста приведена вартість) – це метод оцінки інвестиційних проектів, заснований на методології дисконтування грошових потоків.

Порівняльна оцінка споживання утиліт і потужність рекуперації в існуючих та запропонованих проектах наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Споживання енергії і потужність рекуперація в існуючій системі теплообміну і системі теплообміну в запропонованих проектах реконструкції

| Енергетична характеристика процесів | Існуюча система теплообміну | Окрема інтеграція | Відсоток від існуючого значення, % | Інтеграція теплових насосів та Total Site інтеграція | Відсоток від існуючого значення, % |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|
| Потужність гарячих утиліт, МВт      | 109,3                       | 95,5              | 87,0                               | 53,6   | 49,0                               |
| Потужність холодних утиліт, МВт     | 108,8                       | 95,1              | 87,0                               | 53,4   | 49,0                               |
| Потужність рекуперації теплоти, МВт | 3,0                         | 16,7              | 565,0                              | 58,7   | 1986,0                             |

Як правило, якщо NPV більше нуля, то проект слід прийняти. Якщо NPV менше нуля, то рекомендується проект відкинути. Коли NPV дорівнює і більше нуля, то це означає, що грошові потоки від проекту достатні, щоб і відшкодувати інвестований капітал, і забезпечити необхідний дохід на цей капітал. Якщо NPV позитивна, значить, проект принесе прибуток, і, чим більше величина NPV, тим вигіднішим є даний проект.

IRR (Internal Rate of Return, внутрішня норма прибутковості) - це також один з основних методів оцінки інвестиційних проектів. IRR – це ставка відсотка, при якій приведена вартість всіх грошових потоків інвестиційного проекту (тобто NPV) дорівнює нулю. Це означає, що при такій ставці відсотка інвестор зможе відшкодувати свої початкові інвестиції, але не більше того. Результати розрахунків економічних параметрів представлених проектів наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Основні економічні показники проектів реконструкції системи теплообміну для процесів розділення ШФЛВ

| Назва позиції                             | Роздільна інтеграція | Інтеграція теплових насосів та Total Site інтеграція |
|---|----------------------|--|
| Нові Т/О, кількість                       | 9                    | 15   |
| Нова поверхня теплообміну, м <sup>2</sup> | 2323                 | 8525   |
| Трубопровід, м.                           | –                    | 600  |
| Насосне обладнання, кількість             | –                    | 4  |
| NPV, дол. США                             | 8 628 101,0          | 34 017 851,8   |
| PI (Індекс прибутковості інвестицій)      | 7,0                  | 7,4  |
| IRR (Внутрішня норма прибутковості)       | 1,54                 | 1,67   |
| PP (Термін окупності), років              | 4,2                  | 4,2  |
| Дисконтований термін окупності, років     | 4,3                  | 4,3  |

У шостому розділі вирішена задача підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії в діючій двопотоковій системі теплообміну (рис. 9).

Вона складається з трьох послідовно з'єднаних теплообмінних апаратів Т-1, Т-2 і Т-3, одного нагрівача (гаряча утиліта) Н, і одного холодильника (холодна утиліта) С. Початкова температура гарячого технологічного потоку дорівнює  $t_{hs} = 287^\circ\text{C}$ , кінцева, дорівнює  $t_{hT} = 39^\circ\text{C}$ . Початкова температура холодного технологічного

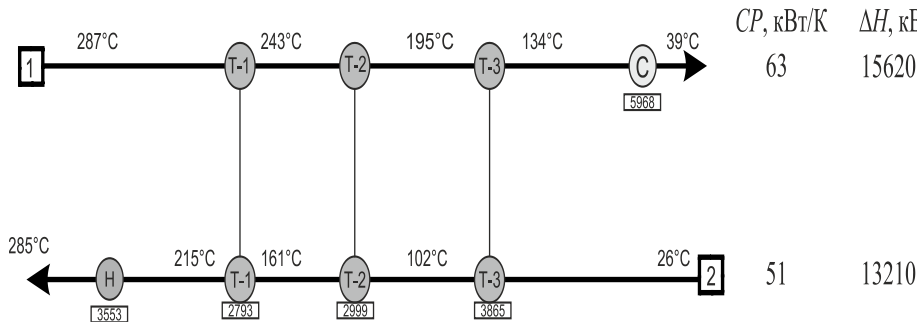


Рисунок 9 – Сіткова діаграма двопотокової задачі теплообміну

потоку дорівнює  $t_{cS} = 26^\circ\text{C}$ , кінцева, дорівнює  $t_{cT} = 285^\circ\text{C}$ . Потужність гарячої утиліти становить значення  $Q_{H\min} = 3617$  кВт, холодної утиліти дорівнює  $Q_{C\min} = 6032$  кВт, потужність рекуперації теплової енергії –  $Q_{REC} = 9592$  кВт.

Потокова теплоємність гарячого технологічного потоку дорівнює  $CP_h = 63$  кВт/град, холодного  $CP_c = 51$  кВт/град. При виконанні проекту рекон-струкції системи теплообміну вважаємо теплофізичні властивості теплоносіїв постійними, їх витрати і параметри теплообмінних апаратів фіксованими, а їх характеристики наведені в табл. 3. Також вважаємо, що теплові втрати в системі теплообміну відсутні.

Побудуємо температурно-ентальпійну діаграму діючої системи теплообміну (рис. 10). Температурно-ентальпійна діаграма системи теплообміну показує можливість зменшення величини гарячих і холодних утиліт, оскільки навантаження на охолодження гарячого потоку дорівнює  $\Delta H_h = CP_h \times (t_{hs} - t_{hT}) = 15620$  кВт, а нагрівання холодного теплоносія  $\Delta H_c = CP_c \times (t_{cS} - t_{cT}) = 13210$  кВт, що більше потужності рекуперації. У розглянутому випадку для зниження значення утиліт необхідно збільшити потужність рекуперації теплової енергії в системі, а для цього необхідно збільшити площу поверхні теплообміну, оскільки параметри існуючих теплообмінників фіксовані.

Таблиця 3 – Характеристики теплообмінних апаратів

| Теплообмінник | Гарячий теплоносій            |       |   | Холодний теплоносій           |       |   | Поверхня теплообміну, $\text{m}^2$ | Коефіцієнт теплопередачі, $\text{кВт}/\text{m}^2\text{град}$ |
|---------------|-------------------------------|-------|---|-------------------------------|-------|---|------------------------------------|--|
|               | Температура, $^\circ\text{C}$ |       | Потокова теплоємність, $\text{кВт}/\text{град}$ | Температура, $^\circ\text{C}$ |       | Потокова теплоємність, $\text{кВт}/\text{град}$ |                                    |  |
|               | Вхід                          | Вихід |   | Вхід                          | Вихід |   |                                    |  |
| Т-1           | 287                           | 243   | 63  | 161                           | 215   | 51  | 214                                | 0,17   |
| Т-2           | 243                           | 195   | 63  | 102                           | 1161  | 51  | 214                                | 0,16   |
| Т-3           | 195                           | 134   | 63  | 26                            | 102   | 51  | 214                                | 0,18   |

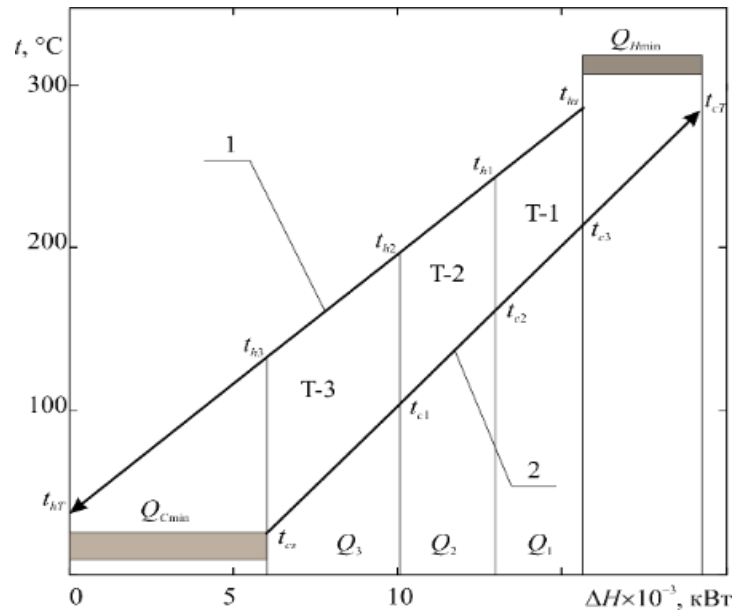


Рисунок 10 – Температурно-ентальпійні профілі теплоносіїв двупотокової системи теплообміну

Паспортні дані насосного обладнання та існуючі перепади тиску теплоносія дозволяють встановити додаткове теплообмінне обладнання в розглянутій системі теплообміну, як на холодній стороні системи, так і на гарячій. Спочатку розглянута установка додаткового теплообмінника на холодній стороні (рис. 11).

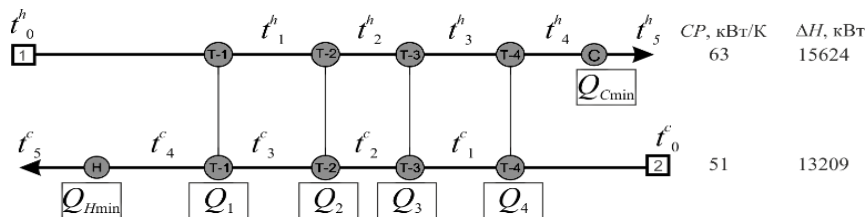


Рисунок 11 – Сіткова діаграма двопотокової системи теплообміну с чотирьома теплообмінниками

Розглянемо, як змінюються температури на теплообмінних апаратах в залежності від теплового навантаження нового теплообмінника Т-4. Для цього напишемо теплові баланси для кожного теплообмінника, припускаючи, що в системі  $N$  апаратів:

$$CP_c(t_{N-i}^c - t_{N-i-1}^c) = CP_h(t_i^h - t_{i+1}^h), \quad i = 0 \dots N-1, \quad (2)$$

де  $t_0^h$  - початкова температура гарячого потоку, в нашому випадку, рівна 287 °С,  $t_0^c$  - початкова температура холодного потоку, в нашому випадку, рівна 26 °С.

З іншого боку, навантаження на теплообмінний апарат визначається, як:

$$Q_i = S_i \Delta T_{\ln i} K_i, \quad i=0 \dots N-1,$$

і тоді для  $i$ -го теплообмінника можна записати:

$$S_i K_i \frac{(t_i^h - t_{i+1}^h) - (t_{N-1}^c - t_{N-i-1}^c)}{\ln \frac{t_i^h - t_{N-1}^c}{t_{i+1}^h - t_{N-i-1}^c}} = CP_h (t_i^h - t_{i+1}^h), i = 0 \dots N - 1. \quad (3)$$

Беручи до уваги (2) отримаємо співвідношення:

$$t_i^h - t_{N-1}^c = (t_{i+1}^h - t_{N-i-1}^c) e^{A_i}, i=0 \dots N-1,$$

$$\text{де } A_i = \frac{S_i K_i}{CP_h} \left( 1 - \frac{CP_h}{CP_c} \right).$$

Враховуючи, що  $N=4$ , тобто в теплообмінній системі 4 теплообмінника, роблячи в системі рівнянь (3) послідовні підстановки, знаходимо температуру холодного потоку на виході з першого теплообмінника:

$$t_4^c = t_0^h - (t_4^h - t_0^c) E,$$

$$\text{де } E = e^{A_1} e^{A_2} e^{A_3} e^{A_4}.$$

Використовуючи вираз для теплового балансу всієї системи теплообміну

$$(t_4^c - t_0^c) CP_c = (t_0^h - t_4^h) CP_h,$$

знайдемо температуру гарячого потоку на виході з 4-го теплообмінника:

$$t_4^h = \frac{t_0^h \left( 1 - \frac{CP_h}{CP_c} \right) + t_0^c (E - 1)}{E - \frac{CP_h}{CP_c}}. \quad (4)$$

Визначимо різницю температур теплоносіїв на холодній стороні теплообмінної системи:

$$\Delta t_m = t_4^h - t_0^c = (t_0^h - t_0^c) \frac{CP_c - CP_h}{E CP_c - CP_h}. \quad (5)$$

З системи рівнянь (2) та (5) знайдемо температури теплоносіїв на вході в теплообмінники і температури теплоносіїв на виході з теплообмінників:

$$t_1^c = b + d \Delta t_m e^{A_4}, \quad (6)$$

$$t_2^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3}, \quad (7)$$

$$t_3^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2}, \quad (8)$$

$$t_4^c = b + d \Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2} e^{A_1}, \quad (9)$$

$$t_1^h = b + g\Delta t_m e^{A_4} e^{A_3} e^{A_2}, \quad (10)$$

$$t_2^h = b + g\Delta t_m e^{A_4} e^{A_3}, \quad (11)$$

$$t_3^h = b + g\Delta t_m e^{A_4}, \quad (12)$$

$$\text{де } b = \frac{CP_c t_0^c - CP_h t_4^h}{CP_c - CP_h}, \quad d = \frac{CP_h}{CP_c - CP_h}, \quad g = \frac{CP_c}{CP_c - CP_h}.$$

Тепер ми можемо записати вирази для обчислення потужності гарячих і холодних утиліт:

$$Q_{C\min} = CP_h (t_4^h - t_5^h), \quad (13)$$

$$Q_{H\min} = CP_c (t_5^c - t_4^c). \quad (14)$$

Використовуючи знайдені температури теплоносіїв на вході і виході теплообмінників (4, 6–12), обчислюємо їх теплові навантаження (рис. 15):

$$Q_i = CP_c (t_{N+1-i}^c - t_{N-i}^c) = CP_h (t_{i-1}^h - t_i^h). \quad (15)$$

У випадку, що розглядається, з технологічних причин використані для реконструкції тільки кожухотрубчасті теплообмінні апарати. Вартість встановлення однієї секції кожухотрубчастого теплообмінника з урахуванням максимальної величини поверхні теплообміну однієї секції визначиться, як:

$$CosT_m = A \left[ \frac{S}{s_m} \right] + B(S)^c,$$

де  $\lceil x \rceil$  функція «стелі» Айверсона,  $s_m = 250 \text{ м}^2$ .

Вартість гарячих утиліт на цій установці включає вартість власного газу, природного газу міської магістралі, вартість рідкого палива, що складається з суміші мазуту, газойлів і дизельних палив. Підсумкова вартість гарячої утиліти становить значення, рівне  $C_H = 120$  дол. США за 1 кВт рік. Вартість холодних утиліт, включає вартість свіжої охолоджуючої води, вартість електроенергії, яка живить приводи насосів і двигунів вентиляторів повітряних холодильників, і вона дорівнює  $C_C = 25$  дол. США на рік.

Приведена вартість встановленого обладнання визначається виразом:

$$C_d = CosT_m \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^{n-1}}, \quad (16)$$

де  $i$  – річна відсоткова ставка,  $n$  – число років.

Приведена вартість енергії в розглянутій системі теплообміну визначається співвідношенням:

$$CE = Q_{H\min}C_H + Q_{C\min}C_C. \quad (17)$$

При збільшенні площі поверхні теплообміну нового теплообмінного апарату його теплове навантаження зростає (рис. 12), а теплове навантаження існуючих теплообмінників зменшується, хоча загальна потужність рекуперації теплоти лише збільшується. Внаслідок цього, потужність гарячих і холодних утиліт зменшується зі збільшенням поверхні теплообміну четвертого апарату (рис. 13). Зменшення теплового навантаження існуючих апаратів відбувається в основному за рахунок

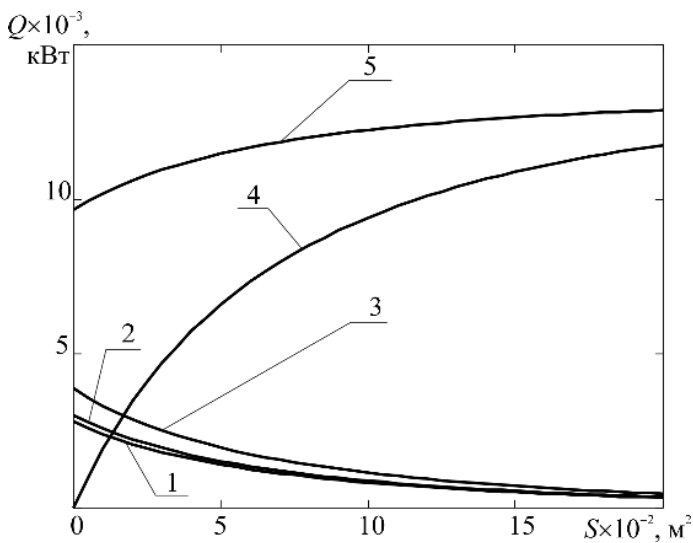


Рисунок 12 – Потужність рекуперації теплової енергії (15):

1 – у першому теплообмінному апараті; 2 – у другому теплообміннику; 3 – у третьому; 4 – у четвертому; 5 - загальна потужність рекуперації теплоти в новій теплообмінній системі.

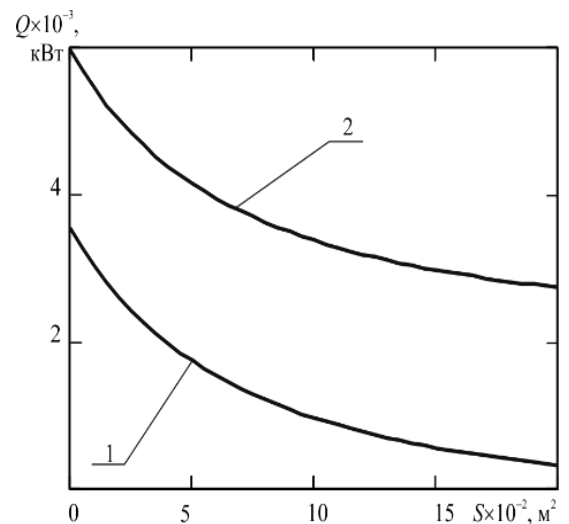


Рисунок 13 – Потужність утиліт (13, 14), які споживаються у процесі:  
1 – холодні; 2 - гарячі.

збільшення теплообмінної поверхні четвертого апарату. Зі зменшенням навантаження на існуючих апаратах відбувається зменшення різниці температур теплоносіїв на них, і зменшення зміни температури теплоносіїв в апаратах (рис. 14). Найбільша різниця температур між теплоносіями, починаючи з деякої величини його поверхні, спостерігається на новому теплообміннику. Як наслідок всі температури теплоносіїв на гарячій стороні нового теплообмінника прагнуть до своїх граничних значень на гарячій стороні, а температура гарячого теплоносія – на холодній стороні нового апарату цільового значення.

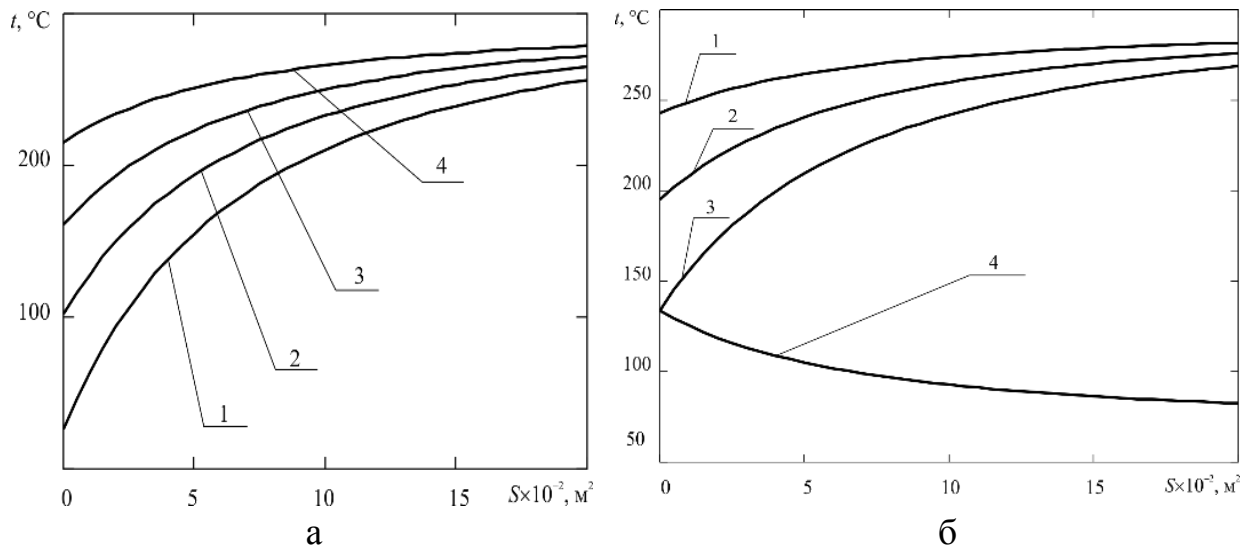


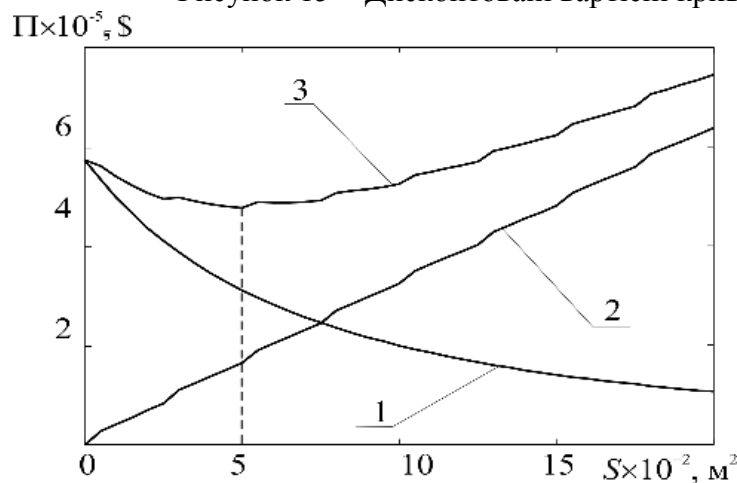
Рисунок 14 а) – зміна температури холодного теплоносія:

1 – температура входу у 4-й теплообмінник, 2 – у 3-й, 3 – у 2-й, 4 – у 1-й;

б) – гарячого теплоносія в залежності від величини площі поверхні теплообміну нового теплообмінника. 1 – температура виходу з 1-го теплообмінника, 2 – з 2-го, 3 – з 3го, 4 – з 4го.

Для того щоб визначитися з необхідною площею поверхні теплообміну нового теплообмінника, побудовано наведені значення капітальних витрат (16) і вартості енергії (17) в залежності від величини його поверхні теплообміну (рис. 15). Збільшення поверхні теплообміну призводить до монотонного зростання її вартості і збільшення вартості секцій теплообмінного розміщення, але вартість енергії внаслідок збільшення потужності рекуперації теплоти монотонно зменшується. У підсумку загальна приведена вартість проекту реконструкції теплообмінної системи є немонотонною функцією. Мінімальне значення відповідає мінімальним приведеним витратам на проект реконструкції, а величина нової площі поверхні теплообміну є оптимальною для проекту реконструкції. У даному випадку оптимальною величиною є поверхня теплообміну площею 500 м<sup>2</sup>. Знайдена також поверхня теплообміну при якій строк окупності є найменшою, і вона дорівнює 250 м<sup>2</sup>.

Рисунок 15 – Дисконтовані вартісні криві:



1 – річна вартість енергії; 2 - приведені капітальні витрати; 3 - загальна приведена вартість проекту реконструкції

Проаналізуємо основні закономірності при розташуванні нового теплообмінного апарату на гарячій стороні системи теплообміну.

Звіт теплообмінників ведеться від гарячого краю системи (рис. 11), тому в даному випадку новий теплообмінний апарат має номер Т-1. Теоретичний аналіз цього випадку енергоефективної реконструкції показує, що інтегральні залежності

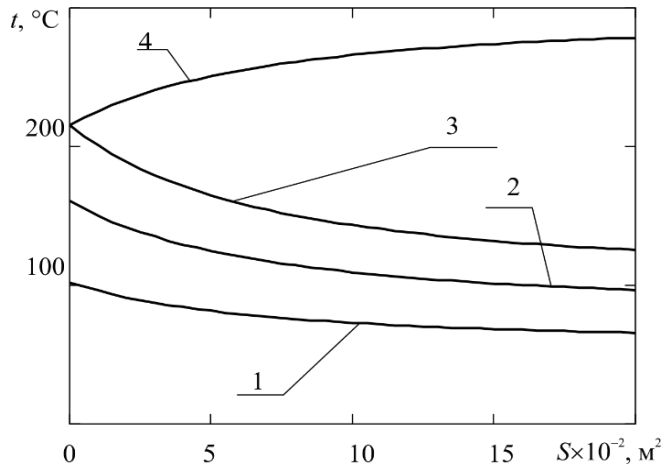


Рисунок 16 – Зміна температури холодного теплоносія в залежності від величини площі поверхні теплообміну нового теплообмінника:

1 - температура виходу з 4-го теплообмінника; 2 - з 3-го, 3 - з 2-го, 4 з 1-го.

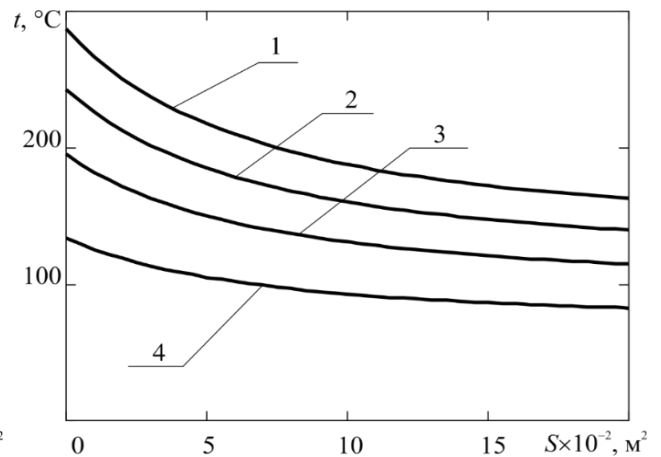


Рисунок 17 – Зміна температури гарячого теплоносія в залежності від величини площі поверхні теплообміну нового теплообмінника:

1 - температура виходу з 1-го теплообмінника; 2 - з 2-го, 3 - з 3-го, 4 з 4-го.

теплообміну в системі не зміняться.

Зміни температур теплоносіїв на вході і виході теплообмінників відрізняються від їх змін в раніше розглянутому випадку. Із збільшенням площі додаткової поверхні теплообміну на Т-1, температура холодного теплоносія на гарячій стороні теплообмінника наближається до цільової температури холодного потоку (рис. 16). Зі збільшенням теплового навантаження на Т-1 температура холодного теплоносія на гарячій стороні існуючих теплообмінників зменшується на відміну від раніше розглянутого випадку (рис. 14). Температура гарячого теплоносія на холодній стороні всіх теплообмінних апаратів зменшується при збільшенні поверхні теплообміну (теплового навантаження на теплообмінник) апарату Т-1 (рис. 17). В раніше розглянутому варіанті ці температури зростають зі збільшенням теплового навантаження нового теплообмінного апарату.

Таким чином, з точки зору експертизи промислової безпеки (ЕПБ) установка нового теплообмінного апарату на гарячій стороні двопотокової системи теплообміну вигідніше, ніж на холодній стороні системи, оскільки температури теплоносіїв на існуючих апаратах зменшуються і ЕПБ для них можна не проводити.

У **Додатках** наведено результати попередніх досліджень систем ректифікації ШФЛВ; протоколи розрахунків імітаційних моделей; протоколи розрахунків теплообмінників, методика та програму обчислення потужності рекуперації теплоти в двопотоковій системі теплообміну; список публікацій здобувача; акти впровадження.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне вирішення актуальної науково-практичної задачі збільшення потужності процесів рекуперації теплової енергії на установках поділу легких вуглеводнів і процесах, супутніх такому поділу. Розроблено та обґрунтовано рекомендації та висновки, які дають змогу моделювати процеси ректифікації легких вуглеводнів, інтенсифікувати процес рекуперації теплової енергії, вирішувати теплотехнічні аспекти під час розроблення нових високоефективних енергозберігаючих теплообмінних систем рекуперації теплової енергії.

1. Аналіз літературних джерел дозволив визначити основні напрямки досліджень збільшення потужності процесу рекуперації теплоти на установках ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів та їх комплексів. До цих напрямків належать, насамперед: теоретичний аналіз процесів теплообміну в системах ректифікації та виявлення лімітуючих факторів до збільшення потужності процесів рекуперації теплоти, дослідження та створення методів збільшення цієї потужності в процесах ректифікації та їх комплексах.

2. Досліджено та науково обґрунтовано методи підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії на установках газофракціювання і компримування та на територіальних комплексах газофракціювання і компримування.

3. Досліджено та науково обґрунтовано методи підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії в існуючих двопотокових системах теплообмінників.

4. Створено методику розрахунку підвищення потужності процесу рекуперації теплової енергії в існуючих двопотокових системах теплообмінників.

5. Розроблені проекти реконструкції для процесів газофракціювання і компримування та їх комплексів на газохімічних виробництвах з підвищеною потужністю процесу рекуперації теплоти. Зроблено енергетично-економічну оцінку технічних заходів що підвищують потужність процесу рекуперативного тепло-обміну на установках газофракціювання і компримування та їх комплексах.

6. Виконано енергетично-економічну оцінку технічних заходів що підвищують потужність процесу рекуперативного теплообміну на установках газо-фракціювання і компримування та їх комплексах.

7. Результати роботи впроваджено у Спільний міжнародний Казахстансько-Український науковий проект «Моделирование и оптимизация энергосбережения, снижение уровня загрязнения промышленных предприятий на основе интеграций процессов с применением методов пинч-анализа» між университетами ЮКГУ ім. М.О. Ауезова та НТУ «ХПІ» та використовуються в навчальному процесі НТУ «ХПІ», що також підтверджено актом про використання результатів у навчальному процесі кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів при викладанні дисциплін «Основи інтеграції хіміко-технологічних процесів», «Комп'ютерно-інтегровані системи» та «Процеси та апарати хімічних виробництв» для студентів напряму підготовки 8.05020202 – «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», 8.05130101 – «Хімічна технологія неорганічних речовин», 8.05130102 – «Хімічна технологія органічних речовин».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Маатук А. Экстракция технологических данных процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропеленовой фракции / Л.М. Ульев, А. Маатук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 7 (1116). – С. 22–28.

*Здобувачем виконано екстракцію даних процесу ректифікації ШФЛВ та пропан-пропеленової фракції.*

2. Маатук А. Пинч-интеграция процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропеленовой фракции на установках газо-фракционирования и компремирования/ Л.М. Ульев, А. Маатук, М.А. Васильев // Наукові праці ОНАХТ, 2015, випуск 47, том 1. – С. 10–15.

*Здобувачем побудовано складові криви щодо системи рекуперації теплоти процесів ректифікації ШФЛВ та пропан-пропеленової фракції.*

3. Маатук А. Пинч-интеграция теплового насоса в процесс разделения легких углеводородов/ Л.М. Ульев, А. Маатук, М.А. Васильев // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків, 2015. – № 3. – С. 8–14.

*Здобувачем розроблено методи інтеграції теплових насосів у процеси ректифікації ШФЛУ.*

4. Маатук А. Интеграция теплового насоса в процесс разделения легких углеводородов/ Л.М. Ульев, Т.З. Зебешев, И.Б. Рябова, М.А. Васильев, А. Маатук // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: ОНАХТ, 2016. – Т. 80. – Випуск 1. – С. 8 – 13.

*Здобувачем побудовано велику складову криву процесу ректифікації ШФЛВ та науково обґрунтовано методи інтеграції теплових насосів у процеси ректифікації ШФЛВ.*

5. Maatouk Abbass. Total Site Integration of Light Hydrocarbons Separation Process / Leonid Ulyev, Mihail Vasilyev, Abbass Maatouk, Neven Duic, Alisher Khusanov // Chemical Engineering Transaction. – 2016. – Vol. 52. –Р. 1–6.

*Здобувачем науково обґрунтовано метод збільшення потужності рекуперативного теплообміну у комплексі установок ректифікації ШФЛВ за допомогою методів інтеграції процесів.*

6. Маатук А. Энергоэффективная реконструкция двухпоточковых теплообменных систем / Л.М. Ульев, А. Маатук // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: ОНАХТ, 2017. – Т. 81. – Випуск 1. – С. 33 – 38.

*Здобувачем вирішено науково-технічну задачу збільшення потужності рекуперативного теплообміну у двопотокової системи теплообміну.*

7. Maatouk A. Heat Energy Integration of Light Hydrocarbons Separation Process / Alisher E. Khusanov, Leonid M. Ulyev, Vasilyev M. Vasilyevich, Botagor M. Kaldybaeva, A. Maatouk // International Conference of Industrial Technology and Engineering (ICITE 2015). Shymkent, Kazakhstan, 2015. – P. 149–155.

*Здобувачем виконано аналіз процесів рекуперації теплоті на установках ректифікації ШФЛВ.*

8. Маатук А. Пинч-интеграция процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропеленовой фракции на установках газофракционирования и компремирования/ Л.М. Ульев, А. Маатук, М.А. Васильев // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології» (ПАЕМ). Одеса: ОНАХТ: – 2015. – С. 185–190.

*Здобувачем побудовано поточкову таблицю та проведено інтеграцію процесів ректифікації ШФЛВ та пропан-пропеленової фракції.*

9. Маатук А. Экстракция данных процессов стабилизации пропан-пропеленовой фракции и разделения широкой фракции легких углеводородов для пинч-анализа/ Л.М. Ульев, А. Маатук // Тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків: ТОВ «Планета-Принт». – 2015.–Ч. II. – С. 309.

*Здобувачем проведено екстракцію даних процесу ректифікації ШФЛВ.*

10. Маатук А. Интеграция теплового насоса в процесс разделения легких углеводородов / Л.М. Ульев, Т.З. Зебешев, И.Б. Рябова, М.А. Васильев, А. Маатук // Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв», Одеса: ОНАХТ, 2016. – С. 266–271.

*Здобувачем виконано інтеграцію процесу ректифікації ШФЛВ та у інтегровану систему теплообміну процесу ректифікації ШФЛВ інтегровано тепловий насос.*

11. Maatouk A. Energy Efficient Reconstruction of Two-Flow Heat Exchanger System/ L.M. Ulyev, A. Maatouk // Abstracts of VI International Scientific-Practical Conference «Innovative Energy Technologies». – Ukraine, Odessa, 2017. Odessa National Academy of Food Technologies. – 2017. – P. 32.

*Здобувачем представлено принципи вирішення науково-технічної задачі збільшення потужності рекуперативного теплообміну у двопотокової системи теплообміну.*

12. Маатук А. Реконструкция теплообменных систем с утилитными путями / Л.М. Ульев, А. Маатук // Збірник праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні Енерготехнології» Одеса: ОНАХТ, 2017. – С. 106–111.

*Здобувачем представлено постановку науково-технічної задачі збільшення потужності рекуперативного теплообміну у двопотокової системи теплообміну.*

## АНОТАЦІЇ

**Маатук Аббас. Рекуперативний теплообмін на установці газофракціонування та компремування газохімічного виробництва.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018 р.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення потужності рекуперації теплової енергії в процесах ректифікації широкой

фракції легких вуглеводнів (ШФЛВ) і супутніх їм процесах. За допомогою програмного забезпечення *UniSim Design* побудовані імітаційні моделі процесів поділу ШФЛВ.

Побудова складових кривих процесу ректифікації для існуючої теплообмінної рекуперативної системи дозволили визначити потужність гарячих і холодних утиліт, які процес ректифікації споживає в даний час.

В результаті запропонованого проекту реконструкції потужність рекуперації теплової енергії збільшиться на 1102 %, потужності гарячих і холодних утиліт знизяться на 18,37 % і 18,67% відповідно.

Аналіз інтегрованої системи теплообміну процесу ректифікації ШФЛВ за допомогою Великої складової кривої (ВСК) дозволив усунути обмежувальний фактор збільшення потужності рекуперації за допомогою створення методу оптимальної інтеграції теплового насоса (ТН) у вже інтегрований процес ректифікації. Побудовані імітаційні *UniSim Design* моделі інтеграції ТН в обидва процеси ректифікації, які підтвердили збільшення потужності рекуперації теплової енергії в процесі ректифікації ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракції, щодо існуючого процесу, на 1590 %, а потужність гарячих і холодних утиліт знижується на 72% і 73% відповідно. При інтеграції теплового насоса в процес ректифікації ШФЛВ з отриманням пентан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракцій потужність рекуперації збільшиться на 1233 %, а споживання гарячих і холодних утиліт знижується на 53% і 54% відповідно.

За допомогою ВСК процесів ректифікації вперше побудований тепловий профіль комплексу різних установок ректифікації ШФЛВ, аналіз якого дозволив визначити додаткові місця розташування рекуперативних теплообмінників, що дало можливість збільшити потужність рекуперації теплової енергії на 23,4 МВт. В результаті інтеграції комплексу установок загальна потужність рекуперації теплової енергії збільшилася на 1986 %, а потужність гарячих і холодних утиліт зменшилася на 51%.

В дисертації також вирішена задача збільшення потужності рекуперації теплоти в існуючій двопотокової теплообмінній системі і створено метод та програма розрахунку додаткової площі поверхні теплообміну для двопотокових систем рекуперації теплової енергії.

*Ключові слова:* рекуперація, тепла енергія, ректифікація, широка фракція легких вуглеводнів, інтеграція процесів, тепловий насос, імітаційна модель, теплообмін, теплообмінна мережа, теплообмінний апарат, пінч аналіз, *UniSim Design*, *Total Site*.

**Маатук Аббас. Рекуперативный теплообмен на установке газофракционирования и компремирования газохимического производства. На правах рукописи.**

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2017 г.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи повышения мощности рекуперации тепловой энергии в процессах ректификации широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) и сопутствующих им процессах. Для решения данной задачи был обследован процесс рекуперации тепловой энергии в цехе газофракционирования нефтеперерабатывающего завода, состоящий из двух линий ректификации ШФЛУ.

С помощью программного обеспечения *UniSim Design* построены имитационные модели процессов разделения ШФЛУ.

Анализ технологических процессов, их регламентов, данных имитационных моделей позволил записать потоковую таблицу исследуемых процессов, которая является цифровым образом технологических потоков, участвующих в системе теплообмена установки. Также построена сеточная диаграмма существующей энерготехнологической системы установки ректификации ШФЛУ с получением пропан-пентановой и бутановой фракций и определена мощность процессов рекуперативного теплообмена на установке. Построение составных кривых процесса ректификации для существующей теплообменной рекуперативной системы позволили определить мощность горячих и холодных утилит, которые процесс ректификации потребляет в настоящее время.

В результате предложенного проекта реконструкции мощность рекуперации тепловой энергии увеличится на 1102 %, мощности горячих и холодных утилит снизятся на 18,37 % и 18,67% соответственно.

Построены имитационные *UniSim Design* модели интеграции ТН в оба процесса ректификации, которые подтвердили увеличение мощности рекуперации тепловой энергии в процессе ректификации ШФЛУ с получением пропан-пентановой и бутановой фракций, по отношению к существующему процессу, на 1590 %, а мощность горячих и холодных утилит снижается на 72% и 73% соответственно. При интеграции теплового насоса в процесс ректификации ШФЛУ с получением пентан-гексановой, бутановой и изобутановой фракций мощность рекуперации увеличится на 1233 %, а потребление горячих и холодных утилит снижается на 53% и 54% соответственно.

Для дальнейшего увеличения мощности процессов рекуперации тепловой энергии выполнен анализ всего территориального комплекса установок ректификации ШФЛУ. С помощью БСК процессов ректификации впервые построен тепловой профиль комплекса различных установок ректификации ШФЛУ, анализ которого позволил определить дополнительные места расположения рекуперативных теплообменников, что дало возможность увеличить мощность рекуперации тепловой энергии на 23,4 МВт. В итоге интеграции комплекса установок общая мощность рекуперации тепловой энергии увеличилась на 1986 %, а мощность горячих и холодных утилит уменьшилась на 51%.

В диссертации также решена задача увеличения мощности рекуперации теплоты в существующей двух потоковой теплообменной системе с наличием утилитных путей. Определены зависимости температур теплоносителей и тепловых нагрузок на теплообменном оборудовании от дополнительной площади поверхности теплообмена и интенсивности теплопередачи. Определено наиболее приемлемое

размещение новой поверхности теплообмена и найдены значения площади поверхности теплообмена для минимальной приведенной стоимости проекта реконструкции и минимального срока окупаемости.

*Ключевые слова:* рекуперация, тепловая энергия, ректификация, широкая фракция легких углеводородов, интеграция процессов, тепловой насос, имитационная модель, теплообмен, теплообменная сеть, теплообменный аппарат, пинч анализ, *UniSim Design, Total Site*.

**Maatouk Abbass. Regenerative heat exchange in the fractionation and compression of the gas of chemical production. Manuscript.**

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in specialty 05.17.08 – «Processes and equipment of chemical technology» – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2018.

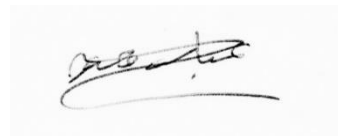
The thesis is devoted to solution of actual scientific and applied problem of increasing the capacity of recovering thermal energy in the processes of distillation of wide fraction of light hydrocarbons (WFLH) and associated processes.

On the basis of theoretical analysis of the system flow of the gas rectification process using the methods of pinch analysis were constructed a grid diagram and a flowsheet of the reconstruction project and the main parameters of the new heat exchangers were defined. The power of recuperation thermal energy will increase by 1102 %, power of hot and cold utilities will be reduced by 18,37 % and 18,67%, respectively in the proposed project.

Based on simulation UniSim Design model of integration of HP in both of the process of rectification, which confirmed the increasing power of recovering thermal energy in the process of gas rectification with production of propane-butane and pentane fractions with respect to the existing process, 1590 %, and the power of hot and cold utilities is reduced by 72% and 73%, respectively. When you integrate the heat pump into the process of rectification of raw WFLH from the receipt of pentane-hexane, butane and isobutane factions power recovery will increase by 1233 % and the consumption of hot and cold utilities is reduced by 53% and 54%, respectively.

Using the GCC processes built for the first time the thermal profile of the set of different plants fractionation WFLH, the analysis of which allowed increasing the capacity of thermal energy recuperation at 23.4 MW. In the end, the Total Site integration of complex installations, the total capacity of thermal energy recuperation increased by 1986 % and power of hot and cold utilities decreased by 51%.

*Key words:* recuperation, thermal energy, rectification, wide fraction of light hydrocarbons, process integration, heat pump, simulation model, heat transfer, heat exchanger network, heat exchanger, pinch analysis, UniSim Design, Total Site.



Підписано до друку 23.01.2018 р. Формат 60x90/16.  
Папір офсетний. Друк – цифровий. Ум. друк. арк. – 0,9.  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. №17110502

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., свідоцтво ВО4№022953)  
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1 тел. 7-170-354  
[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)