0<sup>7</sup>

ОСТАПЕНКО ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

У ДБ 621.5 64: 629.463. .25

УДОСКОНАЛЕННЯ ХОЛОДИЛЬНО-СИСТЕМИ КОМПЛЕКСУ  
НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ КОНДЕНСАЦІЇ ПОПУТНОГО  
НАФТОВОГО ГАЗУ  
АВТОРЕФЕРАТ

дисертація на здобуття наукового ступеня

Співзакладач  
Є

співзакладач 05.05.

додаткова вакуумна та  
система компримування

шасисна техніка.<sup>1</sup>

кандидата технічних наук

Одеса - 2014

Дисертація ^рукописом.

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій (ОНАХТ).

Міністерство освіти і науки (МОИ) України.

Науковий керівник:

доктор

ОНАХТ

Автореф

Удосконалення холоди

ти



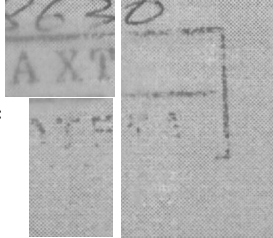
уОІ8630

кондиціювання повітря, директор інституту холоду,  
кріотсхнологій та екоенергетики ім. В.С.  
Мартин о вського,  
Одеської національної академії харчових технологій  
МОИ України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
Лавренченко Георгій Костянтинович,  
президент української асоціації виробників  
технічних газів. "УА-Сигма"

■ ш  
Г'



г. і п \*

доктор технічних наук, професор  
Лабай Володимир Йосифович,  
професор кафедри тсплогопостачаїшя та  
вентиляції національного університету  
"Львівська Політехніка"

Захист дисертації відбудеться « 26 » червня \_\_\_\_\_ 2014 року в ауд.108 о  
і4:30- годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 41.088.03 в Одеській  
гї-зггп'стяпї.'ній ях-япсмїї хапчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1;3,

Б \_\_\_\_\_

'ці ОНАХТ за адресою: вул.  
ваєв В. І.



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2030 року пріоритетними напрямками розвитку енергетичного сектора економіки країни є створення високоефективних енергетичних систем і комплексів та вирішення завдань раціонального використання енергетичних ресурсів в енергоємних галузях. Вирішення завдань вдосконалення енергетичних комплексів газопереробних підприємств (ГПП), оптимізації структури, підвищення ефективності споживання і генерації енергоресурсів багато в чому залежить від режимів роботи ГПП, особливостей технологічних процесів кожного агрегату і установки, складу сировини, що переробляється, кліматичних умов та інших факторів, які, як правило, нестабільні. В умовах впровадження нових енергозберігаючих технологій переробки попутного нафтового газу (ПНГ), як сировини на газопереробних підприємствах, розвитку діючих та створення нових газохімічних комплексів, потрібно відповідне енергетичне забезпечення технологічних виробництв і створення високоефективних систем енергозабезпечення газопереробних підприємств. Сучасні тенденції розвитку газота нафтопереробної промисловості визначили вибір предмета дослідження дисертаційної роботи, що полягає в оптимізації експлуатаційних і проєктованих характеристик систем холодопостачання.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно до програми фундаментальних і пошукових досліджень, що відповідають Постанові Верховної Ради України про затвердження програми енергоефективності за Кіотським протоколом від 1 березня 2010 р., Указу президента України № 174 від 28.02.08 «Про невідкладні заходи щодо забезпечення ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів», відповідно до закону України про енергозбереження, статті 8 з основних положень. № 74/94-ВР від 01.07.94, Енергетичної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням від 15 березня 2006 року № 145-р.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної дисертаційної роботи є вдосконалення холодильної установки комплексу низькотемпературної конденсації (НТК) попутного нафтового газу на прикладі технологічної схеми газопереробного комбінату, отримання даних про продуктивність і працездатність холодильної установки на неізоентропному робочому тілі.

Для досягнення зазначеної мети вирішувались такі наукові завдання:

- вибір ефективного робочого тіла та проведення аналізу роботи холодильної установки з метою визначення найефективнішої концентрації суміші холодоагенту;
  - визначення втрат холодильною установкою та знаходження шляхів їх зниження;
  - визначення оптимального режиму роботи установки для кожного періоду року;
- запропонування варіанту модернізації холодильної установки;

дослідження впливу режимних параметрів холодильної системи на енергосфektivність комплексу низькотемпературної конденсації.

Об'єкт дослідження - схема холодильної установки комплексу низькотемпературної конденсації попутного нафтового газу газопереробного комплексу.

Предмет дослідження - працездатність, холодопродуктивність і режимні параметри холодильної установки комплексу низькотемпературної конденсації попутного нафтового газу.

**Методи досліджень:**

- системний аналіз існуючих схемних рішень установок низькотемпературної переробки газової сировини;
- ексергетичний аналіз холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції;
- пінч-аналіз холодильної системи;
- чисельний експеримент та аналітичне дослідження ефективності холодильної установки;
- аналіз повного еквіваленту глобального потепління.

**Наукова новизна.** У роботі вперше отримані такі наукові результати:

1. Розроблена, обґрунтована та протестована методика аналізу енергоефективності роботи холодильної установки при переробці ПНГ з використанням методів ексергетичного та пінч-аналізу.

2. Показано, що стабілізація узгодженого режиму роботи першої та другої секції турбокомпресору при збільшенні масової витрати холодоагенту пропан/етан через другу секцію пропанового холодильного турбокомпресору призводить до збільшення холодопродуктивності.

3. Запропоновано використовувати потенціал навколишнього середовища в місцях розташування холодильної системи (різко континентальний, північний клімат) для повної конденсації потоку низькокиплячих фракцій холодоагенту та збільшення холодопродуктивності системи.

4. Визначено науково-обґрунтовані варіанти інженерно-апаратного оформлення схеми холодильної установки, її нова структура та значення параметрів, що дозволяє збільшити енергоефективність модифікованої установки у порівнянні з базовою.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень і результатів** підтверджується коректною постановкою науково-прикладних задач, комплексним урахуванням різних факторів, що впливають на ефективність роботи холодильної установки. Достовірність результатів забезпечує коректне використання сучасних методів аналізу і програмних засобів проведення чисельних експериментів для оцінки енерго- і ресурсоефективності і працездатності холодильної установки, а також порівняння результатів дослідження установки з існуючим аналогом.

**Практичні значення отриманих результатів.**

Проведені дослідження джерел втрат в холодильній установці. Ряд виконаних аналізів дозволяють розробити заходи щодо організації процесу утилізації теплоти з використанням вискоефективної о методу інтеграції

теплових процесів, а також методу ексергетичного аналізу холодильної установки. Матеріали досліджень дозволяють здійснити заходи щодо впровадження в промисловість ефективного схемного рішення з використанням суміші R290/R170 в якості холодоагенту. Дослідження режимів роботи холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції дозволять ефективно організувати роботу холодильної системи з урахуванням кліматичних особливостей розташування установки. Комплекс науково-технічних пропозицій, розроблених за участю автора, сприятиме реалізації Україною прийнятих зобов'язань з дотримання Кіотського Протоколу та виконання затвердженої програми відповідно до указу президента та закону України

**Особистий внесок здобувана** полягає в модифікації схемного рішення з поділом холодоагенту на фракції для роботи на незеотропному робочому тілі (R290/R170) завдяки інтеграції теплових процесів. У процесі роботи над дисертацією за безпосередньої участі здобувана була проаналізована схема холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції, яка використовує суміш R290/R170 як робоче тіло, проведено ексергетичний та пінч аналізи схеми з поділом холодоагенту на фракції. Виконано обґрунтований вибір концентрації суміші робочого тіла для схеми холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались автором на: VII Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології", Одеса, 2011 р.; I Міжнародній Науково-технічній конференції, присвяченій 90-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2010 р.; Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Иновационные разработки в области техники и физики низких температур», Москва, 2010 г.; VII Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології", Одеса, 2011 р., The 23<sup>rd</sup> IIR International Congress of Refrigeration. Prague, Czech Republic - 2011; Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Иновационные разработки в области техники и физики низких температур», Москва, 2011 г.; The 8<sup>th</sup> International Conference, "Compressors 2013", September 2013, Casta Papiemicka, Slovakia.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 7 статей, зокрема 5 робіт в періодичних виданнях та збірниках наукових праць, які рекомендовані ДАК України, та 9 робіт у вигляді доповідей та тезисів в збірниках наукових праць регіональних та міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури, що включає 108 найменувань та 5 додатків. Робота містить 185 сторінок тексту, у тому числі 26 таблиць та 126 рисунків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи; представлена узгодженість з науковими програмами, сформульовані мета та завдання досліджень, їх наукова новизна та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проведено систематизацію та аналіз літературних даних та інтернет-джерел, присвячених експериментальним і розрахунковим дослідженням низькотемпературних способів переробки нафтогазової сировини.

Визначено основні критерії ефективності переробки нафтогазової сировини. Розглянуто технологічні системи в існуючих схемах вилучення вуглеводнів з потоку ПНГ, а також можливі варіанти модернізації існуючих схемних рішень. Показано, що для ефективнішої оптимізації технологічних систем великого поширення набули пакети прикладних програм AspenTech Aspen One, PRO-2, що дозволяють скоротити часові витрати на моделювання та оптимізацію системи.

До основних робіт з підвищення енергоефективності установок низькотемпературної переробки нафтогазової сировини можуть бути віднесені монографії Н. Paradowski, А. Le-Gall, М. Мартинюка, Лавренченка Г.К., Лабая В.Й., М. Mehrpooya, J. Foglietta, J.T. Lynch, J.D. Wilkinson, Н.М. Hudson, В. Ghorbani, G. Salehi, J. Chen, патенти OrtlofT Engineers LTD, Bechtel Inc.

Одним з розглянутих методів підвищення енергоефективності технологічної системи, є утилізація теплоти усередині системи. Метод інтеграції теплових процесів, завдяки об'єднанню енергетичних рівнів, дозволяє досягти успіхів в тепловій інтеграції на виробництві.

Якісним показником процесу вилучення вуглеводнів з потоку ПНГ є коефіцієнт вилучення, який досягає значень 88-90%. Під коефіцієнтом вилучення розуміють процентну частку цільових фракцій в потоці готової продукції, які обумовлені регламентом про фракційний склад продукції тієї або іншої марки.

Аналіз даних моніторингу виробництва на предмет відповідності режимних параметрів розрахунковим значенням показує загальну тенденцію,

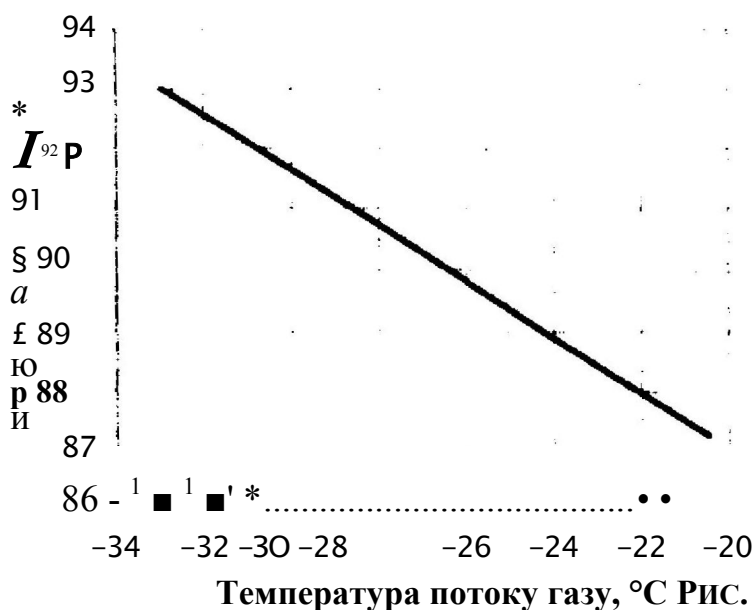


Рис. 1. Залежність ступеня вилучення вуглеводнів від початкової температури потоку попутного нафтового газу

Аналіз даних моніторингу виробництва на предмет відповідності режимних параметрів розрахунковим значенням показує загальну тенденцію,

яка відображає стійку залежність кількості видобуваної продукції від температурного рівня ряду процесів установки НТК вуглеводнів, в якому істотну роль грає початкова температура потоку газу і відповідно кількість одержуваного конденсату (рис. 1). Зниження температури потоку газу дозволяє підвищити ступінь вилучення та збільшити кількість сконденсованих вуглеводнів.

У другому розділі описаний обраний підхід до розрахунку технологічних схем розділення холодоагенту на фракції на прикладі одноступеневої холодильної

установки (рис. 2), що працює на неазеотропному робочому тілі.

Проведено порівняння показників холодильної установки залежно від концентрації низькокиплячого компонента.

У схемі одноступеневої холодильної установки (рис. 2) як робоче тіло використано суміш вуглеводнів пропан/етан (1\*290/11170) з масовим співвідношенням 80/20, 85/15, 90/10, 95/15% (мас.). Особливістю даного

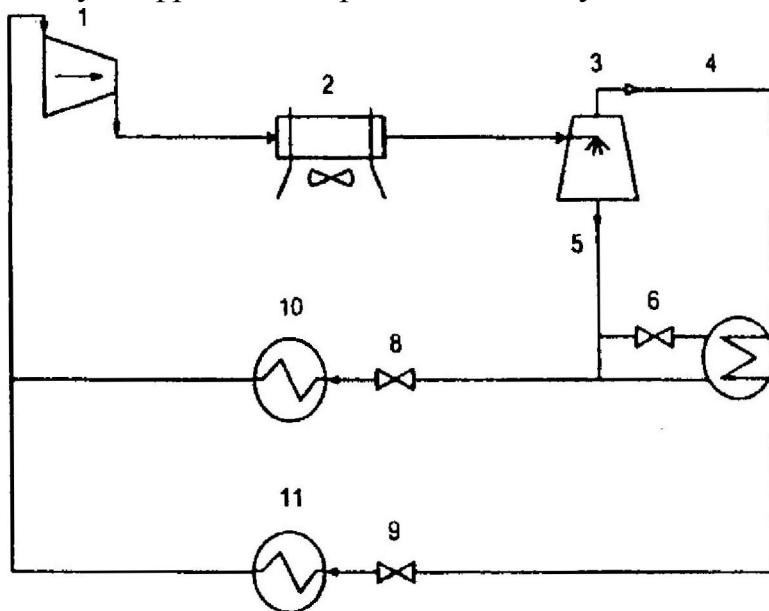


Рис. 2. Схема одноступеневої холодильної установки з розділенням холодоагенту на два потоки:

1 - компресор, 2 - апарат повітряного охолодження (АПО), 3 - сепаратор, 4 - потік низькокиплячої фракції холодоагенту з сепаратора, 5 - потік висококиплячої фракції холодоагенту з сепаратора, 6, 8, 9 - дросельний вентиль, 7 - конденсатор низькокиплячої фракції холодоагенту, 10 - випарник висококиплячої фракції холодоагенту, 11 - випарник низькокиплячої фракції холодоагенту.

схемного рішення є можливість конденсації потоку низькокиплячої фракції холодоагенту завдяки температурі навколишнього середовища або ж завдяки дросельованого до нижчої температури потоку висококиплячої фракції холодоагенту з сепаратору.

Запропоновано сталий та динамічний режими роботи холодильної установки. Для сталого режиму роботи визначальною є максимальна річна температура навколишнього середовища (+23 °С). Концентрація суміші холодоагенту стала. Цей режим позбавляє можливості використовувати значні коливання сезонних значень температур для організації роботи пропанової холодильної установки (ПХУ) з мінімально можливою середньою температурою кипіння суміші за максимально можливою концентрації низькокипля- чого

КОМПОНЕНТУ.

За динамічного режиму роботи установки концентрація холодоагенту змінюється залежно від температури навколишнього середовища і с прийнятою для кожного періоду року. Сталий температурний режим роботи холодильної машини в холодний період року не є оптимальним у разі застосування суміші з мінімальним вмістом низькокиплячого компоненту, оскільки робота установки на ній буде ефективною в самий теплий час. Оскільки першочерговим завданням є досягнення мінімально можливої температури кипіння, то можна зробити висновок, що в холодний період року не використовується значний потенціал температури навколишнього середовища.

В даній схемі та у схемі на рис. 4 та рис. 8 використано для утилізації теплоти рекуперативні теплообмінні апарати, в яких характер руху робочого тіла - протитечійний. Для оцінки втрат в елементах холодильної установки застосовано метод ексергетичного аналізу. Розглянемо особливості ексергетичного балансу та розрахунку втрат ексергії в даних теплообмінних апаратах.

Ексергетичний баланс рекуперативного теплообмінника для утилізації теплоти;

$$E = T_0 \cdot \Delta S = \Gamma_0 [T_1(5\Gamma^x \sim 5\Gamma) + T_x(5\Gamma^{VI} \sim 5\Gamma^{BX})], \text{кДж/кг} \quad (1)$$

де  $T_0$  - температура навколишнього середовища, К;  $\Delta S^*$  - виробництво ентропії у теплообмінному апараті, кДж/кг;  $\Gamma_x$ ,  $\Gamma_1$  - масові витрати холодного і гарячого потоків, кг/с;  $5^{VI}$ ,  $5^{BX}$  - питомі ентропії холодного і гарячого потоків на вході і виході з апарату, кДж/(кг\*К).

Виробництво ентропії в теплообмінному апараті:

$$\Delta S = \Gamma \left[ \frac{c_p^x}{T_1} + \frac{c_p^{VI}}{T_x} \right] \quad (2)$$

Де  $c_p^x$ ,  $c_p^{VI}$  - питомі теплоємності гарячого і холодного потоків, кДж/(кг\*К);  $T_1$ ,  $T_x$  - температури холодного і гарячого потоків на вході і виході з апарату.

Виходячи з ексергетичного балансу можна знайти питому втрату ексергії (кДж/кг):

$$E = \Gamma \left[ \frac{c_p^x}{T_1} + \frac{c_p^{VI}}{T_x} \right] \quad (3)$$

На рис. 3 розглянуто питому ексергетичні втрати в конденсаторі низькокиплячої фракції холодоагенту (рис. 2) для всіх розглянутих концентрацій

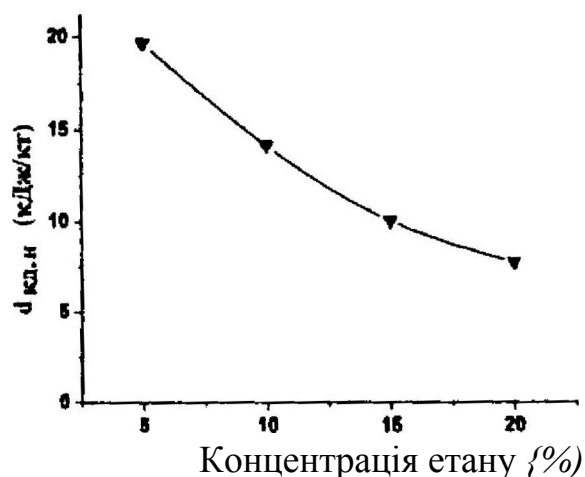


Рис. 3. Питомі ексергетичні втрати в конденсаторі низькокиплячої фракції холодоагенту.



Розглянуто параметри холодильного циклу після заміни холодоагенту пропану на неазеотропну суміш.

З рис. 5 видно, що для одного і того ж тиску кипіння, з підвищенням концентрації етану відбувається зниження середньої температури кипіння суміші.

На рис. 6 показана тенденція зміни холодопродуктивності установки за інших рівних допустимих умов, виходячи з вимоги повної конденсації суміші.

Номінальні значення холодопродуктивності установки відрізняються від наведених в силу іншого обраного температурного інтервалу, однак, з метою порівняння наведені дані є відносними.

На практиці існує граничне значення добавки етану в пропан (18-20%), по досягненню якого відбувається

зниження корисної холодопродуктивності установки в **пропану (%)**

силу того, що суміш володіє

великим питомим об'ємом і дуктивності ПХУ від концентрації пропану при однаковій об'ємній про- за сталої об'ємної витрати на лінії всмокту- дуктивності, масова продук- вання компресору  $7,35 \text{ м}^3/\text{с}$ . тивніс гь знижується.

Проведено ексергетичний аналіз схеми з поділом холодоагенту на фракції для кожного режиму роботи установки. Визначено величини втрат в апаратах холодильної установки залежно від температури навколишнього середовища для кожної прийнятої концентрації суміші холодоагенту та режиму роботи установки.

Проведено аналіз схеми з поділом холодоагенту на фракції з елементами інтеграції теплових процесів для оцінки можливої величини утилізації теплоти.

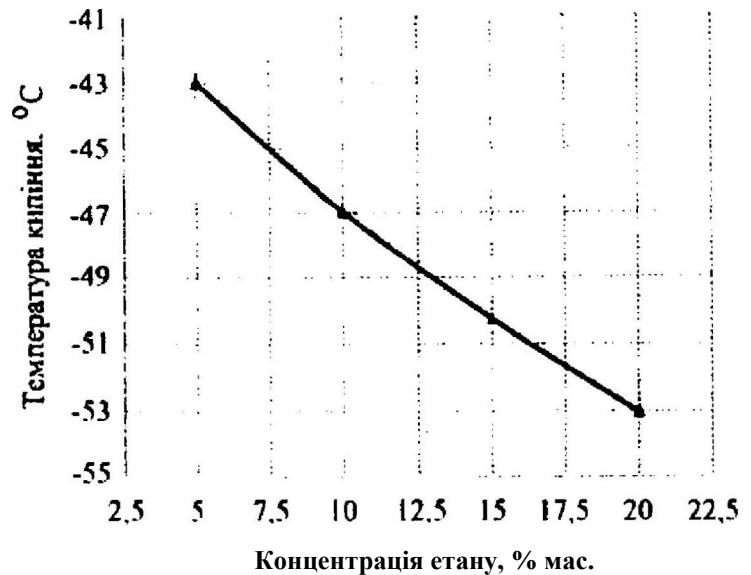


Рис. 5. Динаміка зміни середньої температури кипіння від концентрації етану за тиску 1,2 бар

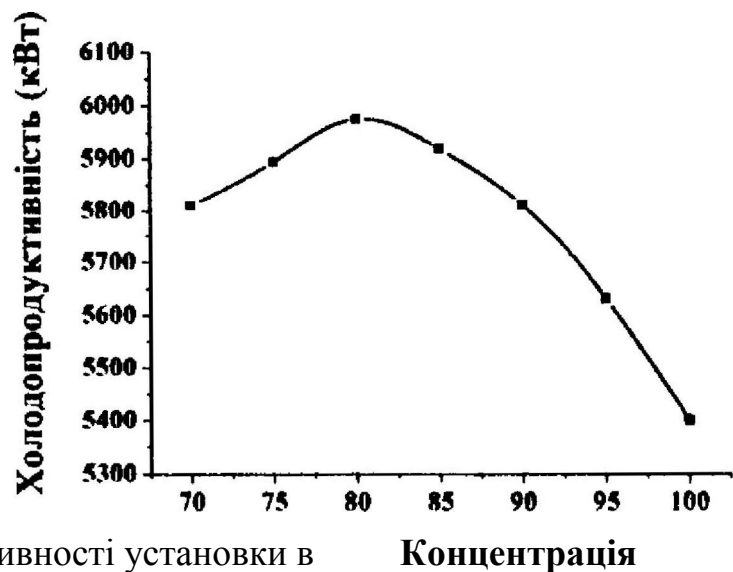


Рис. 6. Залежність корисної холодопродуктивності ПХУ від концентрації пропану при однаковій об'ємній про- за сталої об'ємної витрати на лінії всмокту- дуктивності, масова продук- вання компресору  $7,35 \text{ м}^3/\text{с}$ . тивніс гь знижується.

У розглянутій установці теплообмін відбувається між потоками охолоджуваних і нагрівних фракцій холодоагенту і охолоджуваних потоків ГШГ і

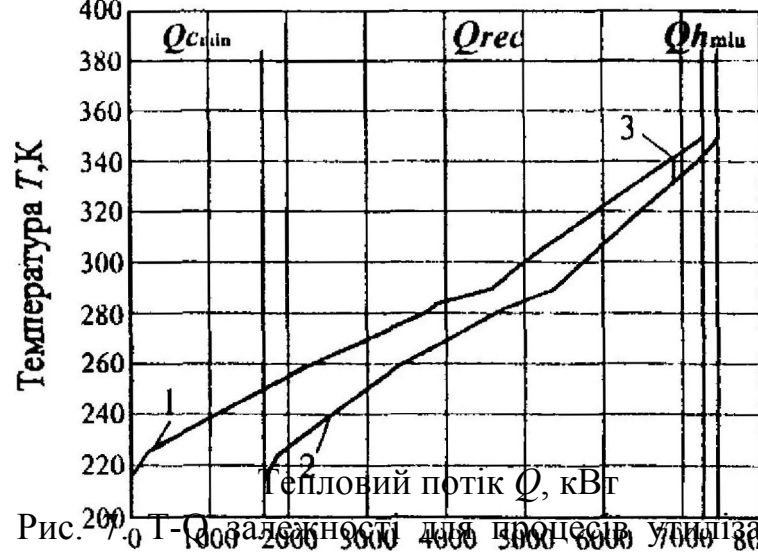


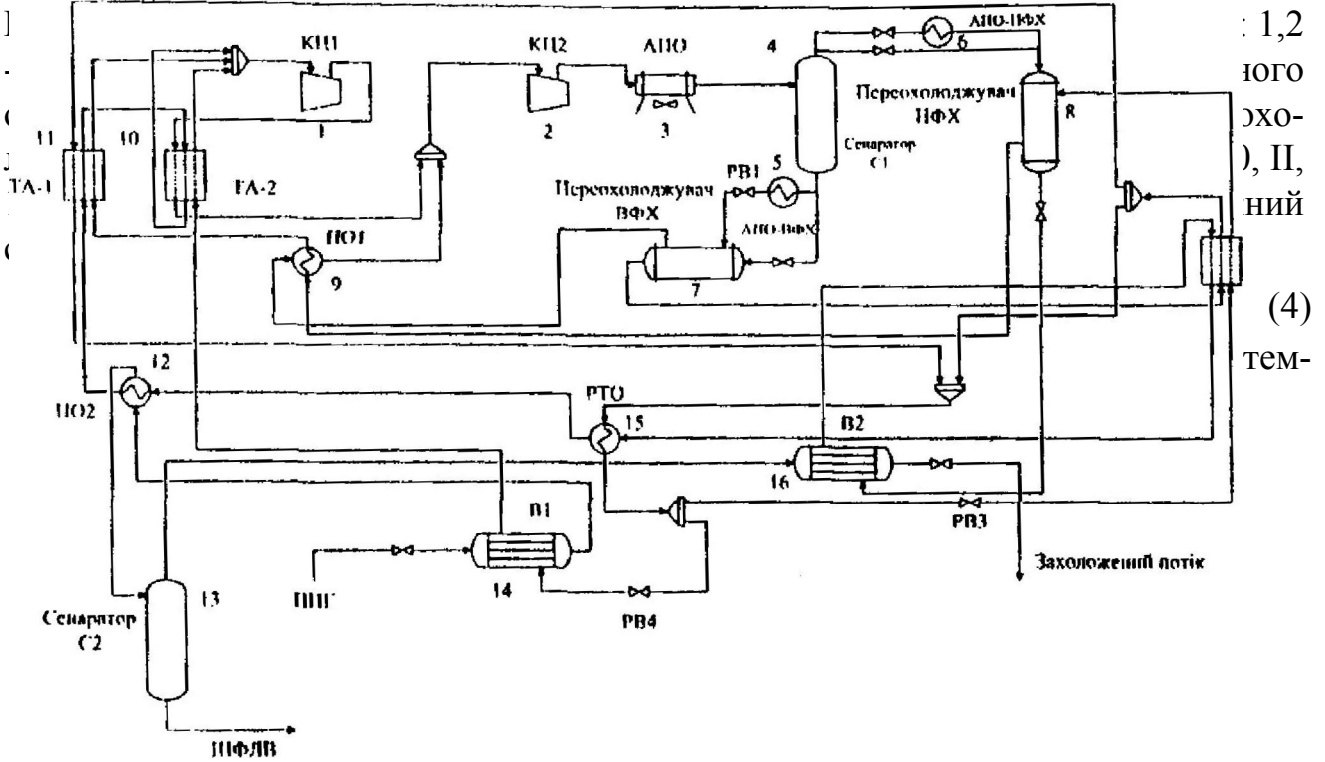
Рис. 7.  $T-Q$  залежності для процесів утилізації теплоти в холодильній установці: 1- гаряча складова крива (hot composite curve); 2 - холодна складова крива (cold composite curve); 3 - ДТ-пінч;  $Q_{cmin}$  - ділянки кривих для холодоносіїв;  $Q_{hmin}$  - ділянки кривих для теплоносіїв;  $Q_{ис}$  - кількість утилізованої теплоти

обміну в контурах дозволило підвищити енергоефективність установки в цілому. широкої фракції легких вуглеводнів (ШФЛВ), використання зовнішніх холодо- теплоносіїв зведено до мінімуму. Як зовнішній енергоносієв використовували повітря в АПО (рис. 3). На рис. 7 вказані величини холодо-  $Q_{cmin}=1687$  кВт, теплопродуктивностей  $\xi_{н/«} = 201,67$  кВт, а також величина максимально можливої утилізації теплоти ( $2ГСС = 5622$  кВт в розглянутій установці за значення мінімальної робочої різниці температур  $\Delta T_{пінч} = 5,2^\circ\text{C}$ , рівній ДТ-пінч (див. рис. 7). Подальший зсув кривих (composite curve) проводити не доцільно, виходячи з того, що за збільшення  $\Delta T_{пінч}$  до  $10^\circ\text{C}$  величина максимально можливої утилізації теплоти знижується до 5150 кВт.

Для детальнішого аналізу схема була розбита на окремі контури. Підвищення ефективності тепло-

У четвертому розділі дисертації розглянута схема холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції з урахуванням внесених змін в результаті застосування пінч-аналізу рис. 8.

Внаслідок застосування методу пінч-аналізу холодильної установки за роботи на неаізотропному робочому тілі (рис. 4), були виявлені резерви підвищення її холодопродуктивності. У схему модифікованої холодильної установки включені додаткові рекуперативні теплообмінні апарати для утилізації теплоти. Проведено комплекс заходів щодо збільшення витрати холодоагенту через другу секцію турбокомпресора з 22,5 до 25 кг/с. Наведено особливості розрахунку трипотоківих теплообмінних апаратів. Визначено капітальні витрати, необхідні для покупки додаткових теплообмінних апаратів.



$$N_e = \frac{Q_0}{\text{ККД}} \quad (6)$$

де  $T_e$  - температура охолоджуваного потоку, К;  $T_x$  - температура кипіння, К;  $K_e$  - споживана потужність, кВт;  $Q_0$  - холодопродуктивність, кВт;  $\eta_e$  - ККД електродвигуна.

Проведено порівняння показників холодильної установки для розглянутих схемних рішень. Визначено величину ексергетичної ефективності та витрати на виробництво холоду.

Ексергетична ефективність холодильної установки:

де  $Q_0$  - холодопродуктивність установки, кВт;  $f_e$  - температурна функція;  $N_e$  - споживана потужність, кВт.

Ексергетична температурна функція визначається за формулою:

$$f_e = 7 - 1, \quad (5)$$

де  $T_a$  - абсолютна середня температура навколишнього середовища, К;  $T_x$  - абсолютна температура кипіння, К.

Споживана потужність за виробництва холоду на кожному температурному рівні розраховувалась так:

За відомим значенням необхідної споживаної потужності для виробництва холоду на кожному температурному рівні визначали вартість електроенергії:

$$C_e = M_e \cdot c_e \cdot I, \text{ дол. США/рік} \quad (7)$$

де  $c_e$  - вартість 1 кВт/год електроенергії дол. США;  $I$  - кількість робочих годин, год.

Таблиця 1.

Порівняння показників холодильної установки для динамічного режиму роботи.

Параметр	Схема пропанової холодильної	Схема с розділенням холодоагенту		Модифікована схема з розділенням холодоагенту на фракції	
		80/20	85/15	80/20	85/15
<b>Концентрація суміші холодоагенту, %</b>					
<b>Споживана потужність, кВт:</b>					
1 -а секція компресора 2-а	1420	1463	1432	1516	1467
	2000	2210	2176	2781	2851
<b>Холодопродуктивність, кВт:</b>					
Co <sub>1</sub>	5400	1597	1406	1614	1250
Co <sub>2</sub>		3748	3705	4605	4306
C <sup>o</sup> <sub>3</sub>				284,5	571,5
<b>Температура кипіння холодоагенту, °C</b>					
Io <sub>1</sub>	-38	-49,75	-47,5	-51	-49
Io <sub>2</sub>		-42	-41,5	-42,5	-41,5
г	-	-	-	-45	-45
Ексергетичний ККД	0,39	0,474	0,45	0,53	0,46
Ступінь вилучення ШФЛВ	85-88%	до 93%		до 95%	
<b>Вартість виробленого холоду, дол. США/рік</b>					
При (o <sub>1</sub>	1066464	404096	330792	414568	295624
При ^2		673624	782040	1107120	970144
при Ц <sub>3</sub>	-	-	-	60368	117824

У таблиці 1 наведено порівняння показників холодильної системи при використанні запропонованих схемних рішень. Застосування неазеотропної суміші холодоагенту 1<sup>^</sup>290/11170 в пропановому холодильному турбокомпресорі призводить до збільшення споживаної потужності і як наслідок вартість виробленого холоду зростає до 48,3% порівняно з базовою схемою. В той самий час додавання етану в пропан дозволяє знизити температуру кипіння холодоагенту до -51 °C, що на 13 градусів нижче ніж для базової пропанової холодильної установки та збільшити холодопродуктивність до 23,2%. Зниження температурного рівня призводить до підвищення ступені вилучення вуглеводнів з 85-88% до 95% у порівнянні з базовою схемою.

На основі підписаного Україною зобов'язання з виконання директиви Європейського Союзу відносно великих установок з негативним впливом від спалювання сировини на навколишнє середовище до 2018 року, екологічна ситуація в промисловості вимагає проведення аналізу для визначення негативного впливу на навколишнє середовище. Впровадження в промисловість схемних рішень енергоємних установок часто обґрунтовують

міркуваннями енергозбереження під час експлуатації, не обумовлюючи при цьому їх вплив на навколишнє середовище. Витрати на створення установки, складні технології виробництва обладнання, а також подальші витрати на його утилізацію тягнуть за собою велике навантаження на навколишнє середовище, що простий гехніко-економічний аналіз не враховує. Проведений екологічний аналіз дозволяє судити про рівні емісії CO<sub>2</sub> для обраного схемного рішення. Модифікація схеми з поділом холодоагенту на фракції призводить до збільшення річної емісії CO<sub>2</sub> до 44%. Однак завдяки модифікації схемного рішення є можливість збільшити коефіцієнт вилучення цільових вуглеводнів з потоку попутного нафтового газу з 88-90 до 93-95%.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано схеми холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції. Завдяки цьому надано можливість розроблення удосконаленого схемного рішення з поділом холодоагенту, за використання якого можливо знизити температуру кипіння з -38 до -51 °C за ефективної організації процесів теплообміну. Збільшення концентрації низькокиплячого компонента дозволить знизити температуру конденсації. Застосування циклу холодильної установки з розділенням потоку холодоагенту на фракції, а також застосування неазеотропного робочого тіла дозволить використати потенціал навколишнього середовища під час роботи установки.

2. За результатами проведеного аналізу було визначено, що підвищення концентрації низькокиплячого компонента (R170) до 15-20% дозволяє досягти зниження сумарних ексергетичних втрат (до 17-22% відносно суміші холодоагенту 95/5% мас.). На підставі ексергетичного аналізу для застосування в модифікованій схемі холодильної установки використовувалась концентрація суміші пропан/етан (80/20% (мас.)), за якої ексергетичні втрати найменші. Робота установки за динамічного режиму дозволяє збалансувати концентрацію холодильного агента так, щоб ексергетичні втрати були найменшими залежно від умов навколишнього середовища.

3. Запропонована модифікація схемного рішення холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції дозволяє підвищити холодопродуктивність установки для висококиплячої фракції холодоагенту на 23,2% порівняно зі схемою з розділенням холодоагенту і знизити температури кипіння з -49,75 до -51 °C для низькокиплячої фракції холодоагенту та з -42 до -42,5°C для висококиплячої фракції холодоагенту. У разі підвищення середньомісячної температури повітря конденсацію потоку низькокиплячого холодоагенту можна здійснювати завдяки дросельованому до проміжного тиску потоку висококиплячої фракції холодоагенту після сепаратору.

4. Розроблено та реалізовано заходи, щодо підвищення витрати холодоагенту через другу секцію турбокомпресора за збереження узгодженого режиму роботи обох секцій компресору. Це дозволило підвищити холодопродуктивність випарника висококиплячої фракції холодоагенту на 543,4 кВт у сталому режимі роботи порівняно зі схемою холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції, однак холодопродуктивність випарника НФХ була знижена на 16 кВт. Завдяки додаванню проміжного охолоджувача з тепловим навантаженням 300 кВт і збільшення теплового навантаження на переохолоджувач ВФХ з 792,5 до 1247,2 кВт можливо зберегти узгоджений режим роботи секцій компресору за одночасного вирішення завдання підвищення ефективності холодильної установки.

5. Установка додаткового рекуперативного теплообмінника для утилізації теплоти дає можливість додатково отримати холодопродуктивність в розмірі 209,5 кВт на температурному рівні  $-45^{\circ}\text{C}$  і охолодити потік ГТНГ, отримавши більше рідкої фази, що відводиться в сепараторі і як наслідок підвищити ефективність роботи детандеру.

6. Результати екологічного аналізу показали, що емісія  $\text{CO}_2$  за використання схеми з поділом холодоагенту на фракції нижче порівняно з пропановою холодильною установкою на 16,1% за сталого режиму роботи, оскільки має місце зниження споживаної потужності за використання суміші пропан/етан як робоче тіло. Модифікація схеми з поділом холодоагенту на фракції призводить до збільшення річної емісії  $\text{CO}_2$  на 2,6% порівняно з пропановою холодильною установкою. За динамічного режиму роботи холодильної установки відбувалось збільшення споживаної потужності і як наслідок значення емісії  $\text{CO}_2$  також зростало: до 3% для схеми з поділом холодоагенту на фракції і до 44% для модифікованого схемного рішення, але використання модифікованого схемного рішення дозволило збільшити коефіцієнт вилучення цільових вуглеводнів з потоку попутного нафтового газу з 88-90 до 93- 95%.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хмельнюк, М.Г. Пути повышения эффективности установок низкотемпературной конденсации природного газа [Текст] / Хмельнюк М.Г., Мартынюк М.О., Остапенко А.В. // Холодильная техника и технология. - Одеса: ОГАХ, 2011. №3 (131). - С. 39-46.

*Особистий внесок: поиск путей повышения эффективности установок низкотемпературной конденсации природного газа.*

2. Хмельнюк, М.Г. Аналіз режимів холодильної установки на сумішах вуглеводнів 11290/11170 із розділення холодоагенту на два потоки [Текст] / Хмельнюк М.Г., Мартынюк М.О., Остапенко А.В. // Тематичний збірник наукових праць “Обладнання та технології харчових виробництв”: Донецьк. ДонНУЕТ, 2012. - Вип. 29. - С.204-212. Том 1.

*Особистий внесок: проведення аналізу режимів роботи холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції.*

3. Хмельнюк, М.Г. Применение эксергетического анализа для оценки потерь в элементах пропановой холодильной установки при применении рабочего тела R290/R170/R600a [Текст] / Хмельнюк М.Г., А.В. Остапенко, О.Ю. Яковлева. //

"Збірник наукових праць ОНАХТ" Одеса., 2013 - Вип. 43. - С.185-190. Томі.

*Особистий внесок: проведення ексергетичного аналізу холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції з холодоагентом R290/R170/R600a.*

4. Остапенко, А.В. Анализ эксергетических потерь холодильной установки комплекса низкотемпературной конденсации природного газа [Текст] / А.В. Остапенко, Хмельнюк М.Г., О.Ю. Яковлева. // Тематичний збірник наукових праць "Обладнання та технології харчових виробництв": Донецьк. ДонНУЕТ, 2013.- Вип. 31. - С.101 -109.

*Особистий внесок: проведення ексергетичного аналізу холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції, з метою визначення ексергетичних втрат.*

5. Остапенко, А.В. Совершенствование холодильной установки комплекса низкотемпературной конденсации природного газа [Текст] / А.В. Остапенко, О.Ю. Яковлева, М.Г. Хмельнюк. // Технические газы - Одесса, 2013. №6, С. 48-54.

*Особистий внесок: модифікація схемного рішення холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції.*

6. Khmelnyuk, M. Propane/ethane as a working fluid in propane refrigeration installation [Text] / Khmelnyuk M., Martuniuk M., Ostapenko A., Cherpumenko V. // Papers 166 The 23rd IIR International Congress of Refrigeration. Prague, Czech Republic - 2011.

*Особистий внесок: дослідження можливості використанні суміші пропан/етан, в якості робочого тіла пропанової холодильної установки.*

7. Khmelnyuk, M. Low-Temperature condensation refrigeration unit Energy efficiency after applying of a Hydrocarbon Mixture as a working fluid in a propane refrigeration Installation [Text] / Khmelnyuk M., Oleksii Ostapenko, Olga Yakovleva. // Proc. Int. Conf. on Compressors and Coolants «Compressors 2013» Papiemicka (Slovak). - 2013.

*Особистий внесок: підвищення енергоефективності холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції.*

8. Хмельнюк М.Г. Применение смеси пропан/этан в установках предварительного охлаждения природного газа [Текст] / Хмельнюк М.Г. Мартынюк М.О., Остапенко О.В. // Сборник тезисов докладов международной конференции «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур». МГУИЭ - Москва, 2010. С. 238-241

*Особистий внесок: розрахунок холодильної установки на суміші вуглеводнів.*

9. Хмельнюк М.Г. Применение смеси пропан/этан в пропановой холодильной установке [Текст] / Хмельнюк М.Г. Мартынюк М.О., Остапенко О.В. // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии». ОНАПТ - Одесса, 2011. С. 13-14

*Особистий внесок характеристика холодильной установки на суміші пропан/етан,*

10. Khmelniuk M. Propane/ethane as a working fluid in propane réfrigération installation [Text] / Khmelniuk M., Martuniuk M., Ostapenko A., Cherpurnenko V. // BOOK OF ABSTRACTS The 23rd IIR International Congress of Réfrigération. - Prague (Czech Republic) - 2011. P.138.

*Особистий внесок: дослідження можливості використанні суміші пропан/етан, в якості робочого тіла пропанової холодильної установки.*

11. Хмельнюк М.Г. Анализ установок предварительного охлаждения природного газа [Текст] / Хмельнюк М.Г. Мартынюк М.О., Остапенко О.В. // Збірник тез доповідей 7-й Міжнародній науково-технічної конф. «Сучасні проблеми холодильної техніки и технології». - Одеса: Видави. ОДАХ. 2011. С.75-76.

*Особистий внесок: проаналізовано схеми попередньої переробки газової сировини.*

12. Хмельнюк М.Г. Анализ схем низкотемпературной конденсации природного газа [Текст] / Хмельнюк М.Г. Мартынюк М.О., Остапенко О.В. // Материали МНК «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». - Миколаїв, вид. НУК. 2011. С. 294-297.

*Особистий внесок: проаналізовано схеми низькотемпературної конденсації попутного нафтового газу.*

13. Хмельнюк М.Г. Применение цикла с разделением в установках предварительного охлаждения природного газа [Текст] / Хмельнюк М.Г. Мартынюк М.О., Остапенко О.В. // Сборник тезисов докладов международной конференции «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур». - Москва: МГУИЭ. 2011. С. 210-211.

*Особистий внесок: розрахунок схеми з розділенням холодоагенту на фракції.*

14. Khmelnyuk M. Low-Temperature condensation refrigeration unit Energy efficiency after applying of a Hydrocarbon Mixture as a working fluid in a propane refrigeration Installation [Text] / Khmelniuk M., Ostapenko A., Yakovleva O. // BOOK OF ABSTRACTS of Int. Conf. on Compressors and Coolants «Compressors 2013» Papiemicka (Slovak). - 2013.

*Особистий внесок: підвищення енергоефективності холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції.*

15. Хмельнюк М.Г. Повышение энергоэффективности холодильной установки комплекса низкотемпературной конденсации природного газа [Текст] / Хмельнюк М.Г., Остапенко О.В., Яковлева О.Ю. // Збірник тез доповідей 9-й Міжнародній науково-технічної конф. «Сучасні проблеми холодильної техніки и технології». - Одеса: Видави. ФОП Грінь Д.С. м.Херсон. 2013. С. 25-28.

1018630  
ОДАХТ

*Особистий внесок: пінч аналь холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції.*

16. Хмельнюк М.Г. Интеграция тепловых процессов холодильной установки комплекса низкотемпературной конденсации природного газа [Текст] / Хмельнюк М.Г., Остапенко О.В., Яковлева О.Ю. // Материали IV МНТК «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». - Миколаїв: вид. НУК. 2013. С. 344-346.

*Особистий внесок: визначення величини рекуперації теплоти холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції.*

## АНОТАЦІЯ

низькотемпературної конденсації попутного нафтового газу. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 - "Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування". ОНАХТ, Одеса, 2014 р.

У роботі наведені результати досліджень, пов'язані з підвищенням ефективності холодильної системи комплексу низькотемпературної конденсації попутного нафтового газу.

Розроблена схема холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції була удосконалена з метою підвищення холодопродуктивності установки, зниження температури кипіння холодоагенту та підвищення коефіцієнту вилучення вуглеводнів з потоку попутного нафтового газу.

Запропоновано два режими роботи холодильної установки: сталий, за якого концентрація суміші робочого тіла не змінюється та динамічний, за якого концентрація суміші холодоагенту змінюється залежно від температури навколишнього середовища.

На основі даних аналізу ексергетичних втрат прийнята концентрація суміші холодоагенту R290/R170 для обох режимів роботи холодильної установки.

На базі проведеного пінч-аналізу розроблена модифікація холодильної установки з розділенням холодоагенту на фракції. У схему з розділенням холодоагенту додано додаткові рекуперативні теплообмінні апарати для утилізації теплоти.

Реалізовані заходи щодо підвищення масової витрати холодоагенту через другу секцію холодильного турбокомпресору з 22,5 до 25 кг/с без порушення узгодженого режиму роботи секцій компресору.

***Ключові слова:** низькотемпературна конденсація, ексергетичний аналіз, R290/R170, турбокомпресор, утилізація теплоти.*

### **АННОТАЦІЯ**

**Остапенко А.В. Совершенствование холодильной системы комплекса низкотемпературной конденсации попутного нефтяного газа. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 - "Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования". ОНАПТ, Одесса, 2014 г.

В работе приведены результаты исследований, связанные с повышением эффективности холодильной системы комплекса низкотемпературной конденсации попутного нефтяного газа.

Разработана схема холодильной установки с разделением хладагента на фракции. Разделение потока хладагента в сепараторе позволяет получить холодопроизводительность на двух температурных уровнях от потока высококипящей фракции хладагента и от потока низкокипящей фракции хладагента. Схема с разделением хладагента на фракции была усовершенствована с целью повышения холодопроизводительности установки, снижения температуры кипения хладагента и повышения коэффициента извлечения углеводородов из потока попутного нефтяного газа.

Предложены два режима работы холодильной установки: постоянный, при котором концентрация смеси рабочего тела не изменяется и динамический, при котором концентрация смеси хладагента изменяется в зависимости от температуры окружающей среды.

Проведен анализ эксергетических потерь холодильной установки. В результате анализа определено, что при увеличении содержания низкокипящего компонента в смеси рабочего тела можно добиться снижения суммарных эксергетических потерь. На основе данных анализа принята концентрация смеси хладагента пропан/этан для обоих режимов работы холодильной установки.

Выполнен пинч-анализ холодильной установки с разделением хладагента на фракции, на базе которого разработана модификация холодильной установки с разделением хладагента на фракции. В схему с разделением хладагента добавлены дополнительные рекуперативные теплообменные аппараты для утилизации теплоты, позволяющие снизить температуру кипения в испарителях высококипящей и низкокипящей фракций хладагента.

Реализованные мероприятия по повышению массового расхода хладагента через вторую секцию холодильного турбокомпрессора с 22,5 до 25 кг/с. Благодаря повышению тепловой нагрузки на переохладитель высококипящей фракции хладагента с 792,5 до 1247,2 кВт, а также добавления дополнительного промежуточного охладителя возможна работа холодильной установки без нарушения согласованного режима работы секций компрессора.

**Ключевые слова:** *низкотемпературная конденсация, низкотемпературная конденсация 11290/11170, турбокомпрессор, утилизация теплоты.*

#### ABSTRACT

Ostapenko A. Improving of associated gas low-temperature condensation complex refrigeration system. - Manuscript.

Dissertation for the candidate degree of technical sciences, specialty 05.05.14 - "Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning." ONAFT, Odessa, 2014.

This thesis presents results of research related to improving the efficiency of the refrigeration system of associated gas low-temperature condensation complex.

The scheme of refrigeration unit with refrigerant separation into fractions was improved in order to increase cooling capacity, lowering the boiling point of coolant and increasing the coefficient of target hydrocarbons extraction from the flow of associated gas.

Two operation modes for refrigeration unit were proposed: permanent, in which the concentration of the refrigerant mixture does not change and dynamic, in which the concentration of refrigerant mixtures depends on the ambient temperature.

Based on the analysis of exergy losses the optimal concentration of refrigerant mixtures propane/ethane for both modes of operation of the refrigeration unit has been determined.

On the basis of the conducted pinch-analysis developed the modification of refrigeration unit with refrigerant separation into fractions. Additional recuperative heat exchangers for utilization heat were added to the scheme.

Implemented measures to increase the mass flow rate of refrigerant through the second section of, the refrigeration centrifugal compressor from 22.5 to 25 kg/s without violating the agreed operational mode of the compressor sections.

**Keywords:** *low-temperature condensation, exergy analysis, R290/R170, centrifugal compressor, heat utilization.*