

Л. І. МОРОЗЮК, Є. В. КОСТЕНКО

АНАЛІЗ РОБОТИ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ В СИСТЕМІ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ РЕКТИФІКАЦІЇ СУМІШІ ПРОПАН-БУТАН

В роботі представлений аналіз роботи теплового насосу в системі низькотемпературної ректифікації суміші пропан-бутан, що можна розглядати як початок теоретичного дослідження одноступеневих компресорних теплових насосів в малих системах низькотемпературної ректифікації суміші вуглеводнів. Пропан високої чистоти отримують з суміші пропан-бутан низькотемпературною ректифікацією. Вирішуючи завдання енергозбереження запропоновано систему «ректифікаційна колона – тепловий насос», який трансформує тепло, відведене при охолодженні «отдувки» у тепло, що поглинається при нагріванні кубового залишку. Аналіз роботи теплового насосу оцінено з позицій термодинаміки – методом енергетичного аналізу циклу з різними робочими речовинами, і техніки – встановлення впливу інженерних факторів на характеристики системи. Встановлено переваги пропану як робочої речовини теплового насосу в системі ректифікації суміші пропан-бутан.

Ключові слова: тепловий насос, ректифікація, суміш пропан-бутан, термодинамічний аналіз, режими роботи.

Вступ. У світі і, зокрема, Європі здійснюється жорсткий моніторинг за тим, щоб фторовмісні холодоагенти з діючих холодильних установок не потрапляли в атмосферу. Відповідальність за дотримання техніки екологічної безпеки при експлуатації холодильного обладнання покладено на споживачів. У такій ситуації багато хто воліє перевести обладнання на природні холодоагенти, безпечні для озонового шару і клімату.

До екологічних природних холодоагентів відносять: R290 – пропан, R600a – бутан і ізобутан, R744 – діоксид вуглецю і R717 – аміак. Одним з найбільш перспективних холодоагентів вважається пропан. Він не впливає на навколишнє середовище, його термодинамічні характеристики забезпечують високу енергетичну ефективність холодильних машин і теплових насосів. Європейці не тільки є найактивнішими в світі покупцями нового обладнання на пропані, а й масово переводять на його використання раніше встановлену холодильну техніку [1].

Постановка задачі в загальному вигляді і її зв'язок термодинамічних принципів створення системи «ректифікаційна колона-тепловий насос» з науковими і практичними завданнями [2]

Суміш пропан-бутан отримують зазвичай двома способами – при переробці природного газу на газопереробних заводах ГПЗ і на нафтопереробних заводах НПЗ, що визначає доступну ціну для споживача. Переважно використовувати зріджений газ, отриманий в процесі переробки нафти, так як він має більш стабільний склад

Технологічний ланцюжок виробництва зріджених газів починається з видобутку «сирої» нафти або «вологого» природного газу і закінчується зберіганням рідкої суміші пропан-бутану, повністю вільної від легких газів, важкої нафти і очищеної від слідів сірчистих сполук і води. Необхідність отримання, очищення і розділення газової суміші на окремі компоненти визначається в першу чергу

виробничими, технологічними або екологічними потребами. Отримання пропану високої чистоти визначається інтенсивним розвитком нового покоління холодильних машин

Одним з широко поширених способів отримання чистих компонентів природного газу – використання низькотемпературної ректифікації [2].

Низькотемпературна ректифікація заснована на охолодженні газової сировини до температури, при якій система переходить в двофазний стан (охолоджений газ і вуглеводневий конденсат) і подальшому розділенні газорідної суміші без попередньої сепарації в тарілчастих або насадкових ректифікаційних колонах. Принципову технологічну схему такої колони зображено на рис.1.

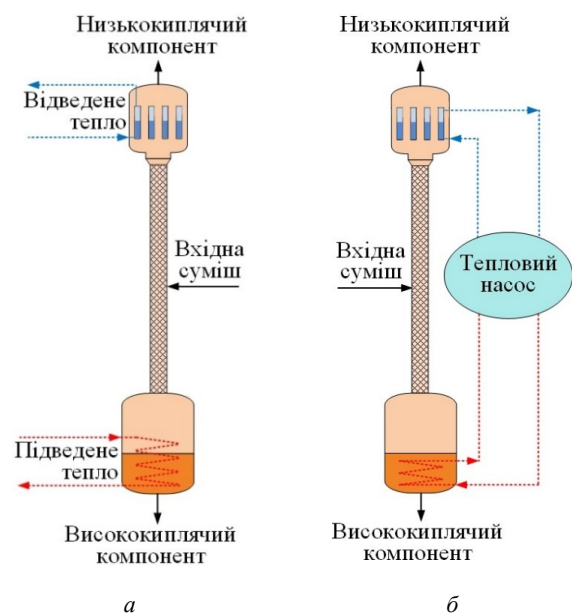


Рис. 1 – Принципова схема ректифікаційної колони для розділення бінарної суміші: а – з різними джерелами тепла, б – з тепловим насосом

© Морозюк Л.І., Костенко Є.В., 2021

Первинна суміш вводиться у середню частину колони. За активного тепломасообміну уздовж всієї колони з рідини, що потрапляє до кубу, витягується майже увесь низькокиплячий компонент. З пари, що підіймається доверху, встигає сконденсуватися висококиплячий компонент.

На практиці для здійснення таких процесів необхідно створити певні умови щодо витрат компонентів та енергоспоживання. Потрібно організувати внутрішню циркуляцію певної кількості рідини і пари шляхом підведення та відведення теплоти до відповідних ділянок та забезпечити достатню поверхню для контакту рідини і пари (рис. 1а).

Вирішуючи завдання енергозбереження, створюється система «ректифікаційна колона – тепловий насос» (рис. 1б). Тепловий насос як самостійна установка трансформує тепло, що виділяється в процесі охолодження «отдувки», в тепло, що поглинається в процесі нагрівання кубового залишку.

Відмінною особливістю системи «ректифікаційна колона – тепловий насос» є використання теплового насоса, робота якого не залежить від процесу ректифікації по робочій речовині, по температурному рівню і тепловому навантаженню нижньої частини колони ректифікації. Використання вказаних систем має цілком конкретні межі, визначені кліматичними умовами навколишнього середовища та термодинамічними характеристиками циклів теплових насосів. В роботі [3] розглянуто сім принципів схем систем «ректифікаційна колона-тепловий насос» для розділення суміші пропілен-пропан як з позицій термодинамічної досконалості, так і економіки. Автори доводять переваги нових пропозицій перед звичайними системами дистиляції та базовими системами. З огляду на існуючі тенденції у розвитку холодильної техніки та отриманні чистих компонентів природного газу, дослідження, що виконується, є актуальним.

Мета. На основі термодинамічних принципів провести аналіз роботи теплового насоса у складі системи ректифікації бінарної суміші пропан-бутан з отриманням пропану високої чистоти.

Методи дослідження. Технічна ідея реалізується на прикладі поділу суміші «пропан-бутан». Достатньо нагадати, що нормальна температура кипіння пропану $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, бутану $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Технологічна схема в загальному вигляді представлена на рис. 2. У теоретичній ректифікаційній колоні тепловий насос здійснює роботу за двома температурними рівнями: температурою конденсації пропану і температурою кипіння бутану. Парокомпресорний тепловий насос містить: компресор КМ, конденсатор КД, дросельний вентиль ТРВ, лінійний ресивер ЛР, оливовідокремлювач ОВ, відділювач рідини ВР, фільтр-осушник ФО та додаткові елементи. Увесь вказаний блок елементів знаходиться поза

ректифікаційною колоною. Випарник теплового насоса В розміщено у верхній частині колони, додатковий конденсатор КДД – у кубі колони.

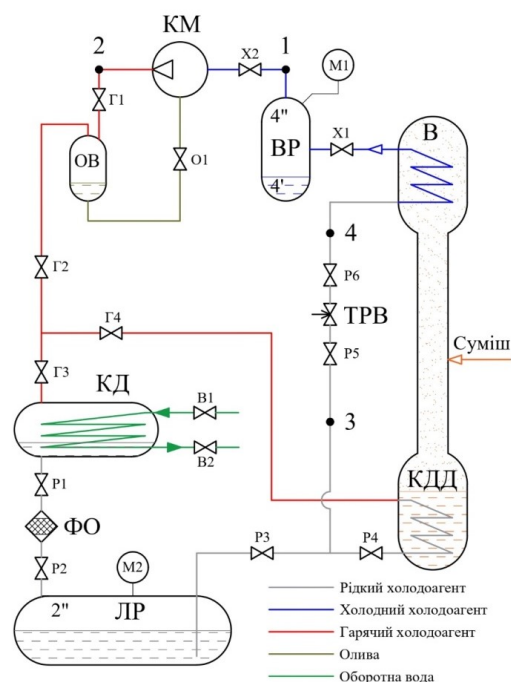


Рис. 2 – Принципова технологічна схема теплового насоса.

Робота теплового насоса здійснюється за циклом одноступеневого стиснення. Пара робочої речовини, що стиснута в компресорі, розділяється на два потоки: один прямує до кубу колони, інший - до конденсатора. Витрати потоків визначено технологічним процесом у колоні. Після конденсації обидва потоки знову об'єднуються. Після дроселювання робоча речовина надходить у верхню частину колони, там кипить і повертається у компресор.

Аналіз роботи теплового насоса здійснено з двох позицій.

Термодинаміка. Термодинамічний аналіз на першій стадії дослідження (аналіз циклу і схеми) робить висновок про доцільність запропонованої схеми і циклу взагалі або для конкретних умов експлуатації. Інструментом для дослідження є енергетичний аналіз циклу теплового насоса у режимі системи ректифікації.

Техніка. Аналіз існуючих технічних обмежень, асоційований з можливістю принципового використання (або безпечного використання) окремих елементів. Природно, технічні обмеження впливають на схему і цикл машини. При цьому складається попереднє (якісне) уявлення про вплив інженерних факторів на термодинамічні характеристики. Такий підхід до реалізації дослідження дозволяє створити розумний компроміс між прагненням до максимальної ефективності циклу і мінімальними витратами на установку.

На першому етапі термодинамічного аналізу визначаються температурні межі роботи ректифікаційної колони і теплового насосу в системі, приймаючи, що цикли здійснюються між джерелами з постійними температурами та без зовнішніх незворотностей. Такий підхід до розглядання явища, що відбувається, спрощує аналіз циклів теплового насосу [4]. Принципова можливість роботи теплового насосу по зворотному термодинамічному циклу з двома джерелами тепла становить:

- тепло $Q_{кНК}$ підводиться при температурі $T_{кНК}$ конденсації низькокиплячого компонента (пропану);
- тепло $Q_{оВК}$ відводиться при температурі $T_{оВК}$ кипіння висококиплячого компонента (бутану).

Загальний енергетичний баланс системи за першим законом термодинаміки можна визначити як:

$$Q_o + Q_k - \Delta Q_k = Q_{кНК} + Q_{оВК} \quad (1)$$

Права частина рівняння характеризує колону, ліва – тепловий насос

Режим тисків визначено в залежності від режиму температур. Температура конденсації

чистого компонента у верхній частині колони становить $T_{кНК}=f(T_{cp})$ за тиском $p_{кНК}=f(T_{cp})$, згідно до цього тиск кипіння компонента у кубі – $p_{кНК}=p_{оВК}$ та температура $T_{оВК}=f(p_{оВК})$. У відповідності до балансу системи суміш повинна мати параметри: температуру $T_{cm}=T_{cp}$, тиск $p_{cm}=p_{кНК}$ та витрату G_{cm}

$$G_{cm} = G_{кНК} + G_{оВК} \quad (2)$$

Другий етап аналізу – введення зовнішньої незворотності в процеси підведення і відведення тепла та визначення реальних умов роботи системи.

Робоча речовина теплового насосу здійснює цикл в інтервалі температур $T_k > T_{оВК}$ та $T_o < T_{кНК}$ відносно до колони. Тоді температурні рівні T_k, T_o є функціями $\Delta T_k = T_k - T_{оВК}$ та $\Delta T_o = T_{кНК} - T_o$. Температурний режим у конденсаторі, що охолоджується навколишнім середовищем, становить $\Delta T_k = T_k - T_{cp}$.

Різниця температур евристично задає проектувальник. Цикл теплового насосу надано на рис.3.

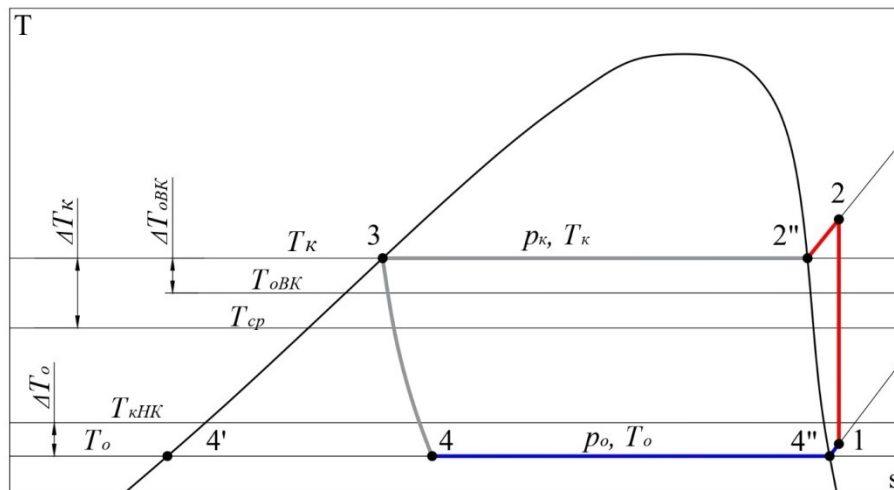


Рис. 3 – Цикл теплового насосу з двома конденсаторами в діаграмі температура–ентропія T-s.

Третій етап аналізу – визначення теплових навантажень на теплообмінні апарати системи та енергетичної ефективності теплового насосу

Питомі характеристики циклу теплового насосу, згідно до рис.3 з залученням рекомендацій роботи [5], мають такі математичні вирази:

масове теплове навантаження на випарник:

$$q_o = h_1 - h_4, \text{ кДж/кг} \quad (3)$$

масове теплове навантаження на конденсатор:

$$q_k = h_2 - h_3, \text{ кДж/кг} \quad (4)$$

адіабатна робота стиснення:

$$w_a = h_2 - h_1, \text{ кДж/кг} \quad (5)$$

індикаторна робота стиснення:

$$w_i = w_a / \eta_i, \text{ кДж/кг}, \quad (6)$$

де: η_i - індикаторний ККД компресора; теоретичний COP циклу:

$$COP_{теор} = q_o / w_i, \quad (7)$$

Повні теплові навантаження на теплообмінні апарати отримають з енергетичного балансу $Q_o = Q_{кНК}$. Теплові навантаження на ректифікаційну колону $Q_{кНК}$ та $Q_{оВК}$ визначають за методиками,

наданими у роботі [4] і в даному дослідженні приймаються заданими величинами.

Повні характеристики теплового насосу:

Масова витрата робочої речовини:

$$M_a = Q_o / q_o, \text{ кг/с} \quad (8)$$

Загальне теплове навантаження на конденсатор:

$$Q_k = M_a \cdot q_k \text{ кВт} \quad (9)$$

Доля теплового навантаження на конденсатор, що відводиться у навколишнє середовище:

$$Q_{кр} = Q_k - Q_{оВК}, \text{ кВт} \quad (10)$$

Ефективна потужність компресора

$$N_e = M_a w_a / \eta_e, \text{ кВт} \quad (11)$$

де η_e - ефективний ККД компресора [5]
Дійсний COP теплового насосу:

$$COP_{дійсн} = Q_o / N_e, \quad (12)$$

COP відповідного циклу Карно

$$COP_{карно} = T_{кНК} / (T_{оВК} - T_{кНК}), \quad (13)$$

Ступінь термодинамічної досконалості циклу

$$\eta_{СТД} = COP_{дійсн} / COP_{карно}, \quad (14)$$

Теоретична об'ємна продуктивність компресора:

$$V_h = Q_o v_{ac} / q_o \lambda, \text{ м}^3/\text{с} \quad (15)$$

де v_{ac} – питомий об'єм робочої речовини на всмоктуванні у компресор,

λ – коефіцієнт подавання[5]

За двома характеристиками (рів. 11 та 15) вибирають компресор.

Розроблена математична модель аналізу роботи теплового насосу як елемента системи «ректифікаційна колона - тепловий насос» є основою для числового моделювання.

Приклад розрахунку теплового насосу для системи ректифікації суміші пропан-бутан з отриманням пропану високої чистоти.

Для розрахунків використано дані робіт [6]. з розділення і очищення газової сировини, що витягується з різних родовищ. Виробництва орієнтовані на переробку вуглеводневих сумішей з різними концентраціями компонентів. Багатоцільові установки дозволяють виробляти у чистому вигляді пропілен, пропан і ізобутан.

Процеси в установках базуються на послідовному відділенні домішок в ректифікаційних колонах. Робота апаратів досягається завдяки автоматизованому парокompресорному тепловому насосу з енергетичним забезпеченням в діапазоні температур - 45 ... +45 ° С. Розроблені прогресивні схеми переробки, в результаті яких досягаються практично безвідходні технології отримання цільових продуктів. В роботі піддано дослідженню перший ступень системи – отримання пропану високої чистоти.

Вихідні дані для розрахунку енергетичних характеристик колони:

якісний склад суміші – пропан-бутан;

масова концентрація компонентів – пропан 60%, бутан 40%;

розрахункова температура навколишнього середовища $T_{cp}=20^\circ\text{C}$;

продуктивність колони – $G_{cm}=2$ т/добу.

Розрахунки енергетичного забезпечення колони здійснено з використанням комп'ютерної програми «Aspen HYSYS». результати наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики ректифікаційної колони у розрахунковому режимі

Параметр	Одиниці виміру	Суміш	«Отдувка»	Куб
Температура	°С	20	-6,3	29,74
Тиск	МПа	0,5	0,49	0,5
Масова витрата	кг/год	83,3	27,83	55,17
Концентрація бутану	%	60	0,01	99,87
Концентрація пропану	%	40	99,99	0,13
Теплове навантаження	кВт	–	відведене 14,29	підведене 9,05

Вихідні дані для розрахунку характеристик теплового насосу:

температура конденсації $T_k = T_{оВК} + \Delta T_k = 40^\circ\text{C}$

температура кипіння $T_o = T_{кНК} + \Delta T_o = -15^\circ\text{C}$

робочі речовини – R134, R290

теплове навантаження на випарник В:

$$Q_o = Q_{кНК} = 14,29 \text{ кВт}$$

теплове навантаження на конденсатор КДД:

$$Q_{крК} = Q_{оВК} = 9,05 \text{ кВт}$$

Розрахунки здійснено з залученням рів. 3–15 та методичних рекомендацій роботи [5], результати наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристики циклів теплового насосу на R134 та R290

Характеристика	Одиниці виміру	R134	R290
q_o	кДж/кг	133,3	251,0
q_k	кДж/кг	171,7	324,6
w_a	кДж/кг	41,67	72,80
w_i	кДж/кг	55,56	97,10
$COP_{теор}$	-	2,40	2,58
M_a	кг/с	0,107	0,0569
Q_k	кВт	18,34	18,43
$Q_{ксп}$	кВтк	9,29	9,36
N_i	кВт	8,86	6,36
$COP_{дійсн}$	-	1,61	2,24
V_h	м ³ /с	0,0185	0,0133
$COP_{карно}$	-	7,44	7,44
$\eta_{стд}$	-	0,21	0,3

Розрахунки показали значну відмінність питомих характеристик термодинамічних циклів, що визначило зміну масової витрати робочої речовини, споживаної потужності компресора за постійного теплового навантаження на випарник та конденсатор. Ступінь термодинамічної досконалості не перевищує значення 0,3.

Аналіз результатів дослідження. Для проведення аналізу характеристики, що порівнюються, надані у графічній формі (рис. 4).

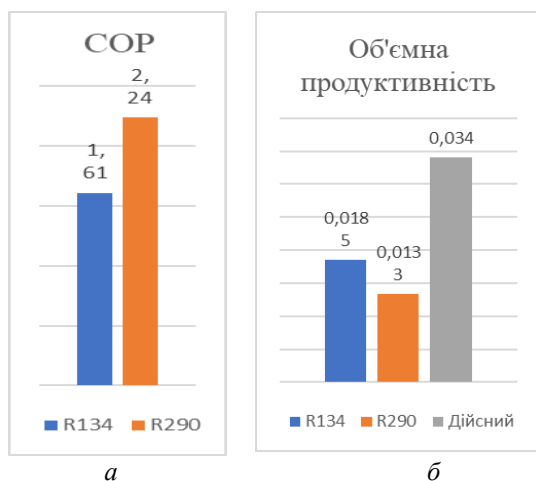


Рис. 4 – Порівняльний термодинамічний аналіз з вибору робочої речовини до теплового насосу:

a – коефіцієнт перетворення COP,

б – теоретична об'ємна продуктивність компресора

Як було сказано вище, аналіз роботи теплового насосу здійснюється з двох позицій: термодинаміки і техніки. Порівняльний енергетичний аналіз циклу одноступеневого теплового насосу з двома робочими речовинами (рис. 4а) показав явну перевагу R290, коефіцієнт перетворення COP(R290) вищий на 40 %. COP(R134), До того ж слід додати, що R290 є

Список літератури

1. Европа: кондиционеры переходят на пропан, АКВАТЕРМ, январь 2013; https://aqua-therm.ru/articles/articles_269.html

продуктом ректифікації, і цей факт, з позицій техніки, спрощує умови експлуатації всієї системи.

Показником для технічного аналізу є габарит циклу (рис. 4б) – масогабаритні характеристики компресора, що асоціює з його теоретичною об'ємною продуктивністю V_h (м³/с). Якщо порівнювати дві робочі речовини, то переваги має знову R290, габарит циклу на 35% менший за інший. Висновок достовірний. такий результат аналізу присутній в роботах [7].

В об'єкті, що є прототипом системи, яка досліджується, встановлено компресор ФУУ25БС (ПБ50) з теоретичною об'ємною продуктивністю $V_h=0,0344$ м³/с. Порівняльний аналіз свідчить, що потрібна продуктивність компресора має бути зменшена у 2–2,5 рази. що забезпечить зменшення маси і габаритів компресора і, як слідство, капітальні вкладення у систему. Низька термодинамічна досконалість пов'язана з зовнішніми незворотностями у випарнику і конденсаторі. Тобто, різні температури на теплопередавання як незалежні вихідні параметри повинні бути переосмислені.

Висновки і перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

1. Проведеними дослідженнями встановлено, що одноступеневий компресорний тепловий насос здатний забезпечити ректифікацію суміші пропан-бутан в режимі літнього часу з отриманням пропану чистотою 99,99%.

2. Термодинамічний аналіз встановив, що цикл теплового насосу з R134 робочою речовиною має низьку енергетичну ефективність (COP=1,61) в режимі ректифікації суміші пропан-бутан в умовах високих температур навколишнього середовища.

3. Термодинамічний аналіз рекомендує виключити R134 з переліку робочих речовин для теплового насосу як не конкурентоздатний за масогабаритними та енергетичними характеристиками компресорів майже на 30% від альтернативних.

4. Для отримання можливості роботи ректифікаційної колони у будь-яких кліматичних умовах провести подальші дослідження для низьких температур навколишнього середовища.

5. Представлені результати можна розглядати початком теоретичного дослідження одноступневих компресорних теплових насосів в малих системах низькотемпературної ректифікації суміші вуглеводнів. 6. Подальший розвиток спрямувати на пошук нових схемно-циклових рішень з метою зменшення зовнішніх незворотностей у процесах теплообміну «продукт ректифікації-робоча речовина теплового насосу».

2. Низькотемпературная ректификация; [pehttps://studfile.net/preview/6217390/page/4/](https://studfile.net/preview/6217390/page/4/)

3. Distillation without hot utilities; development of novel distillation configurations for energy and costs saving for separation of propylene/ propane mixture Abolghasem

- Kazemia, Arjomand Mehrabani-Zeinabada, Masoud Beheshtib, Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. Volume 123, January 2018, pp. 158–167.
- Morosuk L.A new combined «distillation column – heat pump» system. B. Andresen, T. Morosuk, 15-th International Congress of Chemical and Process Engineering: CD-ROOM of full texts, Praha, Czech Republic, 2001. – File 0204.
 - Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов / Т. В. Морозюк. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.
 - Multistage rectification of gaseous hydrocarbons containing sour gases : Patent Number 4,512,782:United States;Date of Patent Apr. 23, 1985.
 - Морозюк Л.І. Принцип створення системи тригенерації з сонячною енергоустановкою, Л. І. Морозюк, А. Є. Денисова, Саад Алдін АлхеміріДдауд Ліла, Хуссейн Джамал Таліб // Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ». 2020, № 5 (1359) doi: 10.20998/2220-4784.2020.05.02
 - Nizkotemperaturnaja rektifikacija; pehttps://studfile net/preview/6217390/page:4/
 - Distillation without hot utilities; development of novel distillation configurations for energy and costs saving for separation of propylene/ propane mixture Abolghasem Kazemia, Arjomand Mehrabani-Zeinabada, Masoud Beheshtib, Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. Volume 123, January 2018, pp. 158–167.
 - Morosuk L.A new combined «distillation column – heat pump» system. B. Andresen, T. Morosuk, 15 International Congress of Chemical and Process Engineering: cd-room of full texts, Praha, Czech Republic, 2001. File 0204.
 - Morozjuk T.V. Teorija holodil'nyh mashin i teplovyh nasosov. – Odessa: Studija «Negociant», 2006. – 712 p.
 - Multistage rectification of gaseous hydrocarbons containing sour gases : Patent Number 4,512,782:United States;Date of Patent Apr. 23, 1985.
 - Morozjuk L.I. Princip stvorennja sistemi trigeneracii z sonjachnoju energoustanovko, L. I. Morozjuk, A. Є. Denisova, Saad Aldin AlhemiriDdaud Lila, Hussejn Dzhamal Talib // Visnik NTU «KhPI». 2020, 5 (1359) doi: 10.20998/2220-4784.2020.05.02

Bibliography (transliterated)

- Европа: кондиционеры переходят на пропан, АКВАТЕРМ, январь 2013; https://aqua-therm.ru/articles/articles_269

Надійшла (received) 19.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Морозюк Лариса Іванівна (Морозюк Лариса Ивановна, Morozjuk Larisa Ivanivna) – доктор технічних наук, доцент, Одеська національна академія харчових технологій, професор, кафедри криогенної техніки, м. Одеса, Україна, вул. Канатна, 112; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4133-1984>; e-mail: Lara.morozjuk@mail.ru
Костенко Євген Володимирович (Костенко Евгений Владимирович, Kostenko Evgeny Vladimirovich) - аспірант кафедри криогенної техніки, Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна, вул. Канатна, 112; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6833-0247>, e-mail: kostenko-zheka@hotmail.com

LARISA MOROZYUK, EVGENY KOSTENKO

ANALYSIS OF THE HEAT PUMP OPERATION IN THE LOW-TEMPERATURE RECTIFICATION SYSTEM OF PROPANE-BUTANE MIXTURE

The article presents the results of the analysis of the operation of a heat pump in the system of low-temperature rectification of a propane-butane mixture. High-purity propane is obtained from a propane-butane mixture. A "rectification column-heat pump" system is proposed, which transforms the heat removed during the cooling of the component in the upper part of the column into heat absorbed during heating of the bottoms. In accordance with the energy balance of the system, it has been established that part of the heat pump condensation is not used in the distillation column, but is removed to the environment. The heat pump flow diagram contains one evaporator and two condensers. The operation of the heat pump is evaluated from the standpoint of thermodynamics – by the method of energy analysis of the cycle with R134 and R290 working substances, It has been established that the low thermodynamic efficiency of the heat pump is determined by external irreversible losses in the condensers and the evaporator The advantages of R290 as a working substance of the heat pump have been proved and the required theoretical volumetric capacity of the compressor has been determined.

Keywords: heat pump, rectification, propane-butane. thermodynamic analysis; operating modes.

Л. И. МОРОЗЮК, Е.В. КОСТЕНКО

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТЕПЛООВОГО НАСОСА В СИСТЕМЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСИ ПРОПАН-БУТАН

Пропан высокой чистоты получают из смеси пропан-бутан низкотемпературной ректификацией. Решая задачу энергосбережения, предложена система «ректификационная колонна-тепловой насос», трансформирующая тепло, отведенное при охлаждении «отдувки» в тепло, поглощаемое при нагревании кубового остатка. Анализ работы теплового насоса оценен с позиций термодинамики - методом энергетического анализа цикла с различными рабочими веществами, и техники – установление влияния инженерных факторов на характеристики системы. Установлены преимущества пропана как рабочего вещества теплового насоса в системе ректификации смеси пропан-бутан.

Ключевые слова: тепловой насос, ректификация, пропан-бутан. термодинамический анализ; режимы работы.