

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 338.45: 662.276

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА В ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ЛЕГКИХ  
УГЛЕВОДОРОДОВ  
HEAT PUMP INTEGRATION FOR LIGHT HYDROCARBONS SEPARATION  
PROCESS

<sup>1</sup>Ульєв Л.М., д-р техн. наук, професор, <sup>2</sup>Зебешев Т.З., директор Департаменту НІР подвійного призначення, <sup>1</sup>Рябова І.Б., канд. техн. наук, доцент, <sup>1</sup>Васильєв М.А., асистент, <sup>1</sup>Маатук А., аспірант  
<sup>1</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
г. Харків

<sup>2</sup>ТОО «Научно-дослідницький інститут «Казахстан інжиніринг»,  
г. Астана, Республіка Казахстан

<sup>1</sup>Ulyev L.M., <sup>2</sup>Zebeshev T.Z., <sup>1</sup>Ryabova I.B., <sup>1</sup>Vasilyev M.A., Maatouk A.

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>LLP "Scientific Research Institute" Kazakhstan Engineering", Astana, Republic of Kazakhstan

Copyright © 2016 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*В даній роботі досліджується потенціал енергозбереження в процесах розділення широкій фракції углеводородів. На основі аналізу технологічної схеми і поточкових даних, з допомогою методу пінч-аналізу, спроектована сітчаста діаграма інтегрованої теплообмінної системи. Побудовані складові криві для раніше визначеного оптимального значення оптимальної різниці температур між теплоносіями на теплообмінному обладнанні. Це дало можливість визначити цільові значення корисної теплової навантаження процесу, кількість теплоти, яку необхідно відвести від процесу, а також цільове значення потужності рекуперації теплової енергії при використанні класических методів пінч-інтеграції. Образ складових кривих говорить про те, що без зміни режиму роботи колонни подальше збільшення енергоефективності неможливо, а це веде за собою зміну технологічного режиму роботи обладнання, що є неприйнятним, так як це призведе до зміни якості отриманого продукту. Інтеграція теплового насоса дозволяє підвищити температурний потенціал потоку, не змінюючи існуючий технологічний процес. Для запропонованого проекту реконструкції розраховані економічні параметри процесу. Проведена оцінка чисельних значень енергопотреблення, рекуперації в існуючому-*

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ющем и предполагаемом проекте. Применения пинч-анализа и интеграция теплового насоса позволили уменьшить потребление горячих утилит на 51,74%, холодных утилит на 46,52%. В статье показаны пути уменьшения потребления внешних энергоносителей в процессе разделения легких углеводородов, а также предложены пути поэтапной модернизации завода.

Energy conservation is one of the most common concerns in gas separation plants. This article contains information about data extraction and heat integration of separation of light hydrocarbons plant. The pinch analysis method was selected to perform a reconstruction project. The Composite curves for the previously defined optimal values of the optimal temperature difference between the heat carriers in the heat exchangers was constructed. This gave the opportunity to determine the target values of the useful heat load of the process, the quantity of heat which must be removed from the process, as well as the target value of the capacity of recuperation thermal energy using classical methods pinch-integration. The Compound curves indicates that the column without changing the operation mode can not further increase the efficiency. This leads to a change of technological modes of operation equipment. Technological streams that are needed for the integration process by using the pinch analysis method were identified. According to principles of pinch analysis, new composite curves are designed. The heat transfer area and number of heat exchangers for a retrofitted heat exchanger network have been identified. Application of the methods of pinch-analysis and integration of heat pumps allows to decrease the external hot utilities usage by 51,74 % and cold utilities usage by 46,52 %, and also offered the way of step-by-step retrofit of the plant.

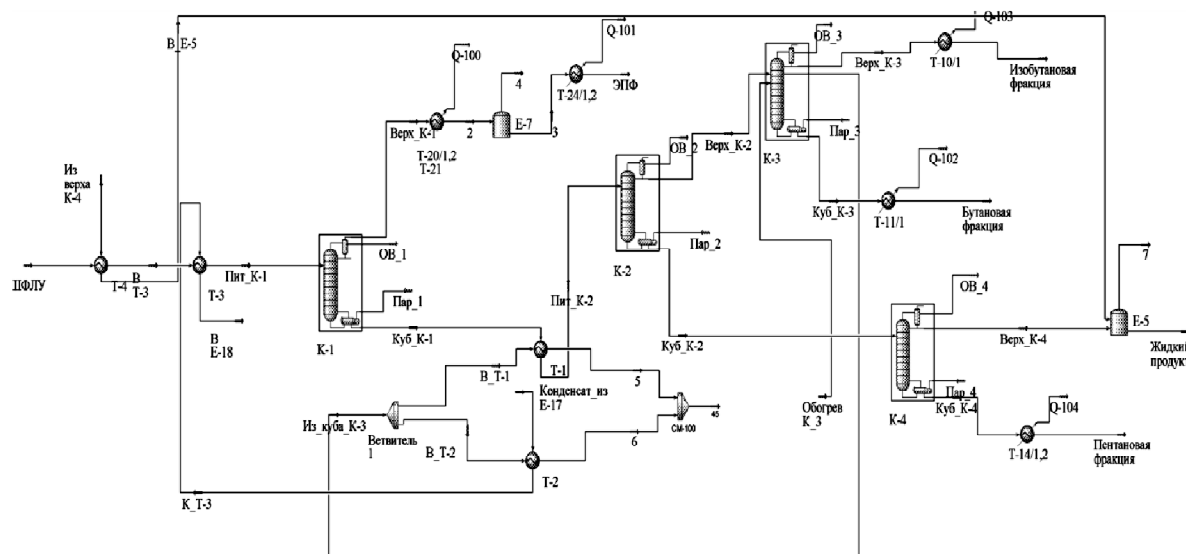
**Ключевые слова:** углеводороды, пинч-анализ, сеточная диаграмма, составные кривые, утилиты, рекуперация, тепловой насос.

**Keywords:** hydrocarbons, Pinch Analysis, Grid Diagram, Composite Curves, utility, recovery, heat pump.

**Введение.** Уровень экономического развития любой страны сегодня определяется не количеством добытых или потребленных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а эффективностью их использования: энергоемкостью ВВП, удельными затратами ТЭР на единицу изготовленной продукции. Масштаб и устройство украинской экономики предопределяют довольно значительное конечное потребление первичных энергоресурсов. Украина относится к энергодефицитным странам. В последние годы за счет собственной добычи потребности в природном газе удовлетворяются - на 24-27 %, нефти – на 10-15 %. Дефицит угля, также является проблемой в последнее время. В топливном балансе Украины доминирующая роль принадлежит природному газу. По потреблению газа Украина занимает шестое место в мире после США, России, Великобритании Германии и Канады [1].

Повышение конкуренции на рынке переработки углеводородов и уменьшение рентабельности производства, вынуждает предприятия газохимической отрасли искать пути повышения энергоэффективности. Эффективное энергосбережение является одной из наиболее распространенных проблем на химических и нефтехимических заводах [2, 3].

**Анализ существующего процесса.** В данной работе с помощью метода пинч-анализа [4] анализируется энергопотребление в процессах разделения широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) (рис 1) на центральной газодиффузионной установке (ЦГДУ).



*E – емкость; K-1-K-4 – колонны; T – теплообменные аппараты.*

**Рис. 1 – Принципиальная энерготехнологическая схема установки ЦГДУ**

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

В настоящее время в технологическом процессе задействованы пять ректификационных колонн. Это

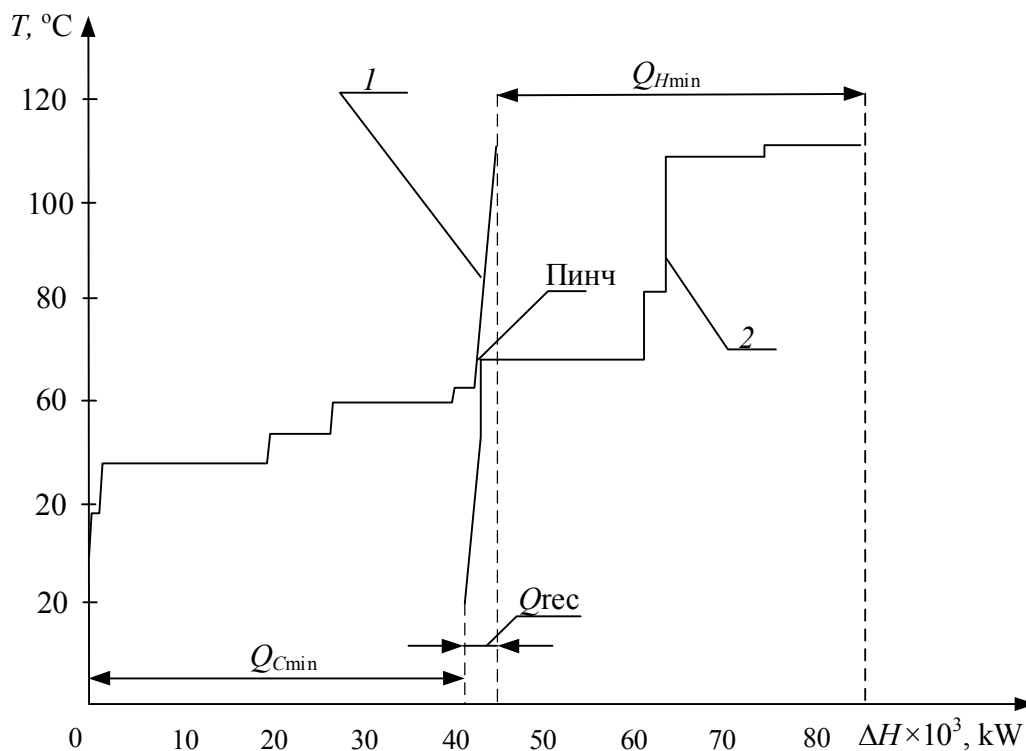
- колонна К-1 – узла выделения этан-пропановой фракции;
- колонна К-2 – узла выделения изобутан-бутановой фракции;
- колонна К3 – узла разделения изобутан-бутановой фракции;
- колона К-4 – узла выделения изопентан-пентановой фракции.

Ранее, в работах [5–7], было начато решение проблемы по энергосбережению разделения ШФЛУ на ЦГФУ. С помощью аппарата стоимостных кривых получено новое значение  $\Delta T_{\min, \text{opt}} = 2^\circ\text{C}$ .

Для нового значения  $\Delta T_{\min, \text{opt}}$  строим составные кривые нового процесса, с помощью которых определим целевые значения потребления горячих и холодных утилит для интегрированного процесса (рис 2).

Пинч локализуется на температуре  $71^\circ\text{C}$  – для горячих потоков, и соответственно, для холодных потоков –  $69^\circ\text{C}$  (рис.2). Составные кривые показывают, что при достижении  $\Delta T_{\min} = 2^\circ\text{C}$ , горячие утилиты составляют  $Q_{H\min} = 40,151$  МВт, что на 4,7% меньше, чем процесс получает от утилитной системы в настоящее время. Холодные утилиты уменьшаются на 4,2% с  $Q_{C\min} = 42,812$  МВт до  $Q_{C\min} = 41,026$  МВт (рис. 2).

Мощность рекуперации тепловой энергии в интегрированной системе с  $\Delta T_{\min} = 2^\circ\text{C}$  достигнет значения  $Q_{\text{Rec}} = \sim 3,7$  МВт, т.е. увеличится более чем в два раза по сравнению с существующей в настоящее время. Таким образом, с помощью углубления теплоэнергетической интеграции процесса разделения на ЦГФУ, можно уменьшить энергопотребление на 1,96 МВт.



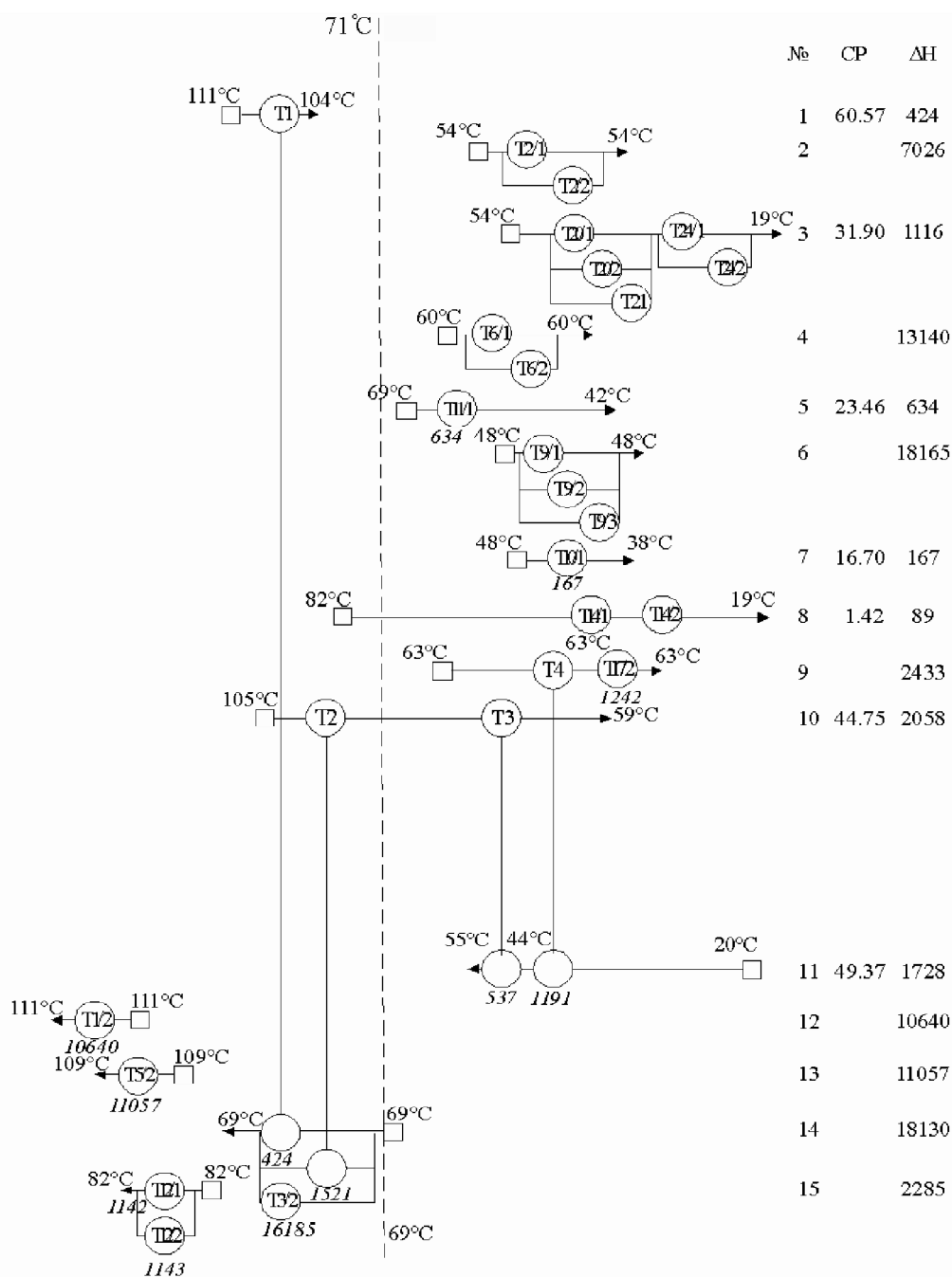
*1, 2 – горячая и холодная составная кривая;  $Q_{H\min}$ ,  $Q_{C\min}$ ,  $Q_{\text{Rec}}$  – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации.  $Q_{H\min} = 54914$  кВт,  $Q_{C\min} = 53658$ ,  $Q_{\text{rec}} = 13560$  кВт*

**Рис. 2 – Составные кривые после реконструкции для найденного значения  $\Delta T_{\text{opt}}$**

В соответствии с принципами пинч-анализа [4], для полученных значений  $\Delta T_{\min, \text{opt}}$ , спроектирована новая сеточная диаграмма и рассчитана мощность теплообменного оборудования (рис. 3).

По составным кривым видно (рис. 2), что даже при значении  $\Delta T_{\min} = 2^\circ\text{C}$  теплообменная система потребляет значительное количество внешних энергоносителей (утилит).

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



*T1–T4 – новые рекуперативные теплообменные аппараты, C – охладитель, H – нагреватель*

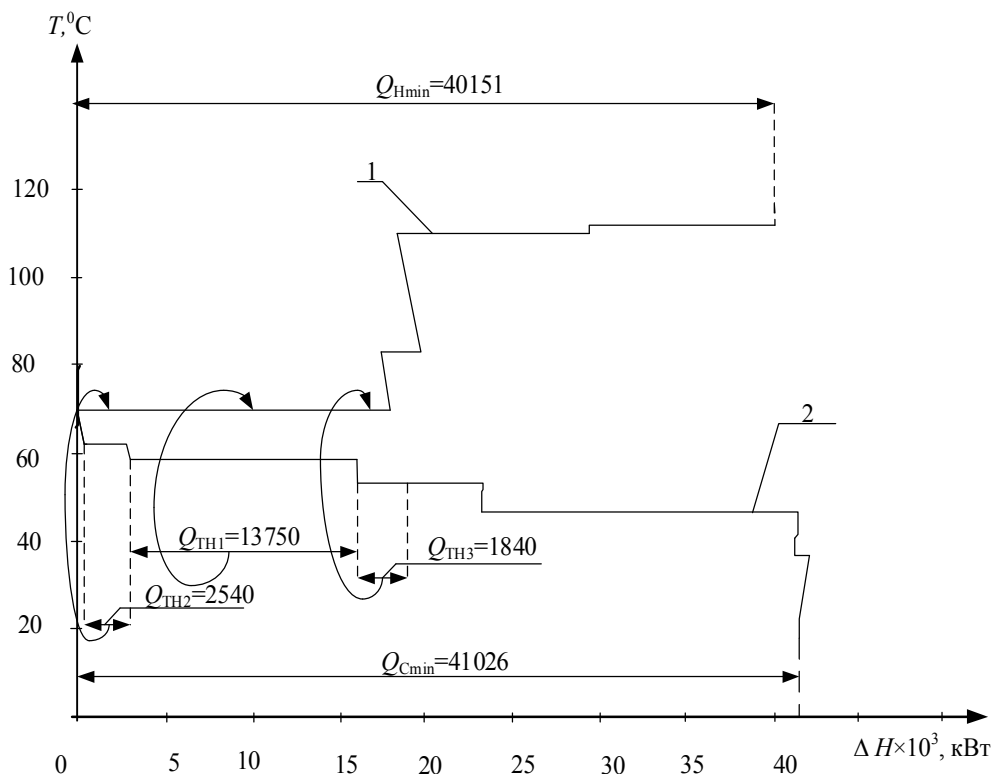
**Рис. 3 – Сеточная диаграмма оптимизированного проекта реконструкции теплообменной сети**

В пинч-анализе наиболее подходящим инструментом понимания взаимодействия утилит с процессом является «большая составная кривая» [4]. Для сеточной диаграммы с оптимальным значением  $\Delta T_{\min}$  (рис. 3), была построена большая составная кривая (БСК) (рис. 4).

На БСК процесса разделения ШФЛУ показана возможность установки теплового насоса (рис. 4). Интеграция теплового насоса с процессом при размещении насоса поперек пинча обеспечивает энергосбережение за счет сокращения потребления внешних энергоносителей [8–10].

Эффективность действия теплового насоса часто оценивают коэффициентом преобразования ( $\epsilon$ ), который определяется как отношение полезной энергии передаваемой процессу к затрачиваемой на это работе (уравнение 1), т. е. с помощью большой составной кривой мы можем определить тепловые нагрузки и необходимые температуры для интеграции тепловых насосов в ХТС.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



1 – показує можливість інтеграції теплового насоса

Рис. 4 – Большая составная кривая

С помощью программы «Aspen Hysys» [11] составлена компьютерная модель и рассчитана суммарная нагрузка на приводы компрессоров (рис 5), которая составила 1249 кВт.

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

где:  $Q_{TH}$  – количество передаваемого тепла = 18130 кВт;  $W$  – мощность в тепловом эквиваленте, затрачиваемая на привод компрессора = 1249 кВт.

Коэффициентом преобразования ( $\varepsilon$ ) равен 15,5.

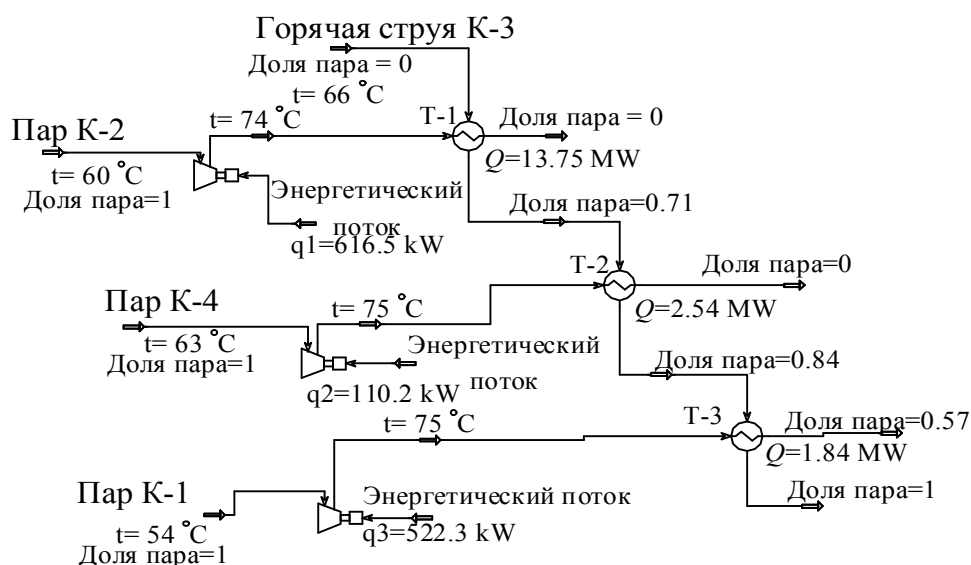
Оценка численных значений энергопотребления, рекуперации в существующем и предполагаемом проекте приведена в таблице 1.

Простой срок окупаемости теплового насоса ( $P$ ) рассчитывается по формуле (2), как отношение капитальных затрат к годовой экономии от сокращения потребления внешних энергоносителей, и составляет 4,5 месяца. Стоимость компрессора – около 900 тыс. долл. США [12].

$$P = \frac{A_{HP} + S_{compressor} + 3 \cdot A_{HE} + B_T \cdot (S_{HE})^c}{Q_{hot} \cdot S_{hot} + Q_{cold} \cdot S_{cold} - W_{compressor} \cdot S_{elec}}, \quad (2)$$

где  $A_{TH}$  – общая стоимость установки теплового насоса = 100 тыс. долл. США;  $A_{HE}$  – стоимость установки теплообменника = 50 тыс. долл. США;  $Q_{hot}$  и  $Q_{cold}$  – разница между нагрузкой на горячие и холодные утилиты до и после установки теплового насоса,  $Q_{hot} = 19379$ ;  $Q_{cold} = 18130$  кВт;  $S_{hot}$  – стоимость годовой энергии для нагрева холодных потоков = 360 долл. США за 1 кВт год;  $S_{cold}$  – стоимость годовой энергии для охлаждения горячих потоков = 30 долл. США за 1 кВт год;  $W$  – мощность в тепловом эквиваленте, затрачиваемая на привод компрессора = 1249 кВт;  $S_{elec}$  – стоимость годовой энергии для работы компрессора = 500 долл. США за 1 кВт год;  $c$  – коэффициент, отражающий нелинейную зависимость стоимости теплообменника от величины его поверхности теплообмена для пластинчатых теплообменников, как правило,  $c = 0.87$  [13];  $B_T$  – стоимость 1 м<sup>2</sup> теплообменной поверхности = 1 тыс. долл. США.

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**



**Рис. 5 – Husys модель підключення теплового насоса**

**Таблиця 1 – Енергопотребление и рекуперация существующей системы теплообмена и системы теплообмена в предлагаемом проекте реконструкции**

Энергетическая характеристика процессов	Существующая система теплообмена	Предлагаемая система теплообмена	% от существующего значения	Предлагаемая система теплообмена с тепловым насосом	% от существующего значения
Мощность гор. утилит, МВт	42,038	40,151	95,3	20,772	48,26432
Мощность хол. утилит, МВт	42,812	41,026	95,8	22,896	53,48033
Мощность рекуперации теплоты, кВт	1,725	3,7	214	23,079	1337,913

**Выводы.** В результате исследования процесса разделения ШФЛУ на ЦГФУ, определены теплообменные связи между технологическими потоками, а также была посчитана мощность рекуперации теплоты, которая составила 1725 кВт для существующего процесса. Спроектированная составная кривая выявила недостатки существующей теплообменной системы, которые приводят к увеличению энергопотребления. Для нового значения  $\Delta T_{\min, \text{opt}} = 2^\circ\text{C}$ , спроектирована сеточная диаграмма и рассчитана площадь поверхности теплообмена. Составные кривые показывают, что при достижении  $\Delta T_{\min} = 2^\circ\text{C}$ , возможно уменьшить горячие утилиты - на 4,7%, холодные утилиты - на 4,2%.

Рассмотрена возможность установки теплового насоса и оценена экономическая эффективность проекта интеграции теплового насоса. Интеграция теплового насоса позволяет сократить потребления горячих и холодных утилит на 51,74 % и на 46,52 % от существующего значения. Капитальные затраты составят 1672,62 тыс долл. США, срок окупаемости – около четырех с половиной месяцев.

Результаты этой работы могут быть использованы в газоразделительной и других отраслях промышленности для увеличения эффективности использования энергии производственными комплексами, смягчения последствий парникового эффекта и улучшения устойчивости промышленных регионов.

Благодарность: Авторы благодарят Министерство образования и науки Республики Казахстан за финансовую поддержку в рамках проекта «Создание интегрированных технологий производственных комплексов Республики Казахстан для обеспечения их энергоресурсоэффективности и экологической безопасности»

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Литература**

1. Ukraine policy review. [электронный ресурс] // International Energy Agency. Режим доступа: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ukraine2006.pdf>, accessed 15.05.2015.
2. Angsutorn N., Saikhaw P., Chuvaree R., Kitipat S. Heat Exchanger Network Synthesis on Gas Separation Plant No.2 (GSP2) in Thailand // *Chemical Engineering Transaction* – 2014 – vol. 39 – P. 1471–1476.
3. Nguyen T. V., Fulop T. G., Breuhaus P., Elmegaard B. Evaluation of the life performance of oil and gas on shore platforms: Site-scale integration and exergy-based assessment // Technical University of Denmark, 2014. – 42p.
4. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л. Л. и др. Основы интеграции тепловых процессов. – Х.: ХГПУ, 2000. – 457 с.
5. Ульєв Л.М., Маатоук А. Экстракция технологических данных процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропиленовой фракции // *Вісник НТУ «ХП»*. – Х. : НТУ «ХП». 2015. – № 7. – С. 22–28.
6. Ульєв Л.М., Маатоук А., Васильєв М.А. Пинч-интеграция процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропиленовой фракции на установках газодифракционирования и компримирования // *Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]*. – 2015. - Вип. 47(1). - С. 10-15.
7. Ульєв Л.М., Поливода Е.В. Теплоэнергетическая интеграция газодифракционирующей установки // *Вісник НТУ «ХП»*. – Х. : НТУ «ХП». 2011. – № 21. – С. 97–104.
8. Ульєв Л.М., Сивак В. Пинч-интеграция тепловых насосов в процесс очистки тетрахлорида титана. // *Интегрированные технологии и энергосбережение*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – № 2.– С. 35–44.
9. Ulyev L.M., Kapustenko P.A., Vasilyev M.A., Boldyryev S.A. Total Site Integration for. Coke Oven Plant // *Chemical Engineering Transaction*. – 2013. – №35 – С.235–240
10. Ul'ev L. M., Vasil'ev M.A. Heat and Power Integration of Processes for the Refinement of Coking Products // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2015 – Vol. 49 –№5– С.676–687
11. Seider W.D., Seader J.D., Lewin D.R. Product and process design principles synthesis, Analysis, and Evaluation // Second Edition. – San Francisco: Wiley. – 2003. – 1122 p.
12. Горшков В.Г. Тепловые насосы. Аналитический Обзор // *Справочник промышленного оборудования*. – 2004. – № 2. – 80 с.
13. Klemeš, J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation, CRC Press. 2015. – 354 с.

**References**

1. Ukraine policy review. International Energy Agency. Available at: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ukraine2006.pdf>. (accessed 15.05.2015)
2. Angsutorn N., Saikhaw P., Chuvaree R., Kitipat, S. (2014), Heat Exchanger Network Synthesis on Gas Separation Plant No.2 (GSP2) in Thailand. *Chemical Engineering Transaction*, vol. 39, pp. 1471–1476.
3. Nguyen, T. V., Fulop, T. G., Breuhaus, P., Elmegaard, B. (2014), Evaluation of the life performance of oil and gas on shore platforms: Site-scale integration and exergy-based assessment. Technical University of Denmark.
4. Smit, R., Klemesh, I., Tovazhnyanskii, L. L. (2000), *Osnovy integratsii teplovykh protsessov* [Bases of heat processes integration], KhGPU, Kharkiv, Ukraine
5. Ul'ev, L.M., Maatouk, A. (2015), “Extraction of technological data of processes of light hydrocarbons wide fraction and propane-propylene fraction separation”, *Visnik NTU «KhPI», Kharkiv*, № 7, pp. 22–28. (In Russian)
6. Ul'ev, L.M., Maatouk, A., Vasil'ev, M.A. (2015), “Pinch integration of processes of light hydrocarbons wide fraction propane-propylene fraction separation in gas fractionation and compression apparatuses”, *Naukovi pratsi [Odes'koї natsional'noї akademii kharchovikh tekhnologii]*, Issue 47(1), pp. 10-15. (In Russian)
7. Ul'ev, L.M., Polivoda, E.V. (2011), “Heat power engineering integration of gas fractionation apparatuses”, *Visnik NTU «KhPI», Kharkiv*, № 21, pp. 97–104. (In Russian)
8. Ul'ev, L.M., Sivak, V. (2013), “Pinch integration of heat pumps in titanium tetrachloride purification process”, *Integririvannyye tekhnologii i energosberezhenie, Khar'kov, NTU «KhPI»*, no. 2, pp. 35–44. (In Russian)
9. Ulyev, L.M., Kapustenko, P.A., Vasilyev, M.A., Boldyryev, S.A. (2013), Total Site Integration for. Coke Oven Plant. *Chemical Engineering Transaction*, no. 35, pp. 235–240
10. Ul'ev, L. M., Vasil'ev, M.A. (2015), Heat and Power Integration of Processes for the Refinement of Coking Products, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, Vol. 49, no. 5, pp. 676–687
11. Seider, W.D., Seader, J.D., Lewin, D.R. (2003), *Product and process design principles synthesis, Analysis, and Evaluation*. Second Edition, San Francisco, Wiley, 1122 p.
12. Gorshkov, V.G. (2004), “Heat pumps”, *Analiticheskii Obzor. Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya*, no.2, 80 p. (In Russian)
13. Klemeš, J., Arsenyeva, O., Kapustenko, P., Tovazhnyanskyy, L., (2015), *Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation*, CRC Press., 354 p.