

**ПИНЧ-ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА В ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ЛЕГКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ**

**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, удовлетворяя в последние годы за счет собственной добычи потребности в природном газе на 24–27 %, в 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 переработке 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, 5] анализируется энергопотребление в процессах стабилизации пропан-пропиленовой фракции (ППФ) и процесс разделения широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) на установке газодифракционирования и компримирования (ГиК).

Ранее, в работе [6], было начато решение проблемы по энергосбережению разделения ШФЛУ и ППФ на ГиК.

На основании обследования технологической схемы [6], была построена сеточная диаграмма [4, 5], были определены теплообменные связи между технологическими потоками (рис. 1).

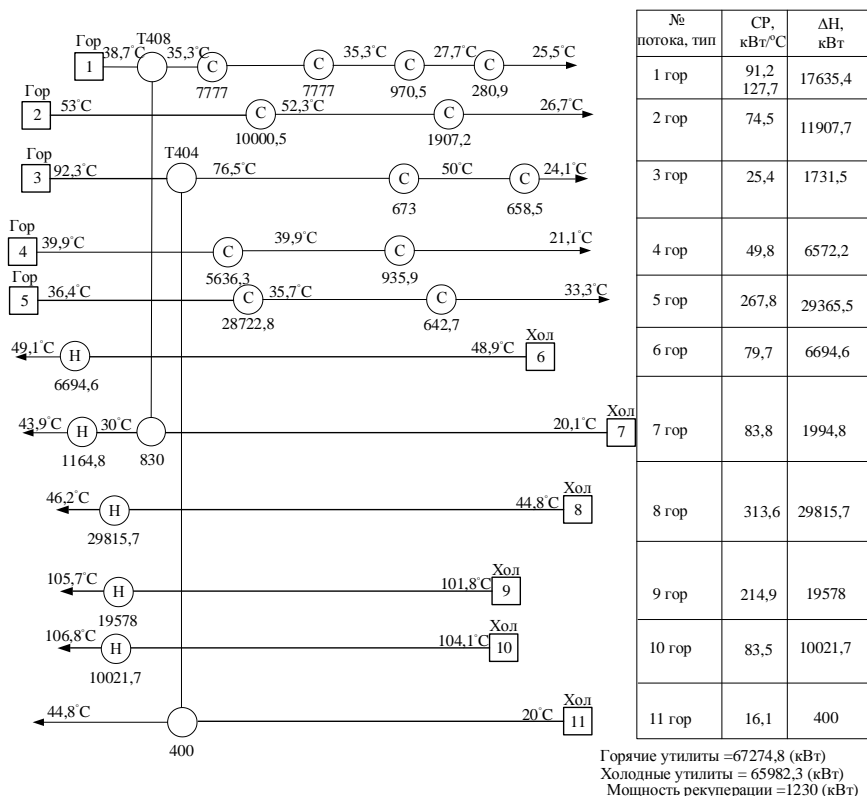


Рисунок 1 – Существующая в настоящее время система теплообмена:  
 T408, T404 – рекуперативные теплообменные аппараты, С – охладитель, Н – нагреватель

Для определения  $\Delta T_{\min}$  существующего проекта в пинч-анализе используется аппарат составных кривых [4, 5]. Составные кривые показывают суммарное энтальпийное изменение в системе потоков (холодных или горячих соотв.) во всех интервалах температуры (рис. 2).

Используя сеточную диаграмму исходной технологической схемы (рис. 1), определяем мощность рекуперации тепловой энергии. В теплообменной схеме процессов разделения легких углеводородов на ГИК два рекуперативных теплообменных аппарата [7], Т408 с нагрузкой 830 кВт и Т404 с нагрузкой 400 (рис. 1), следовательно, мощность рекуперации составит  $\sim 1230$  кВт.

На основе технологических данных, построим на энтальпийно-температурной диаграмме горячую и холодную составные кривые [4, 5] выбранной системы технологических потоков, и далее разместим их таким образом, чтобы интервал перекрытия между ними составил величину в 1230 кВт (рис. 2).

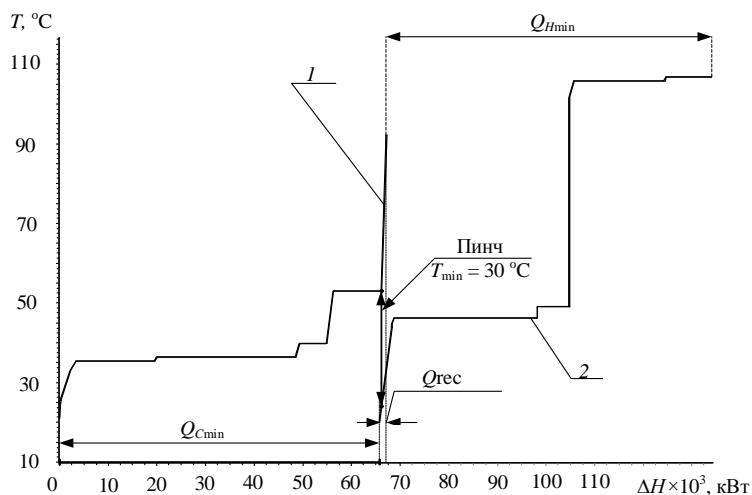


Рисунок 2 – Составные кривые процесса разделения легких углеводородов для существующей теплообменной системы:

1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков;  
 $Q_{Hmin}$ ,  $Q_{Cmin}$ ,  $Q_{rec}$  – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации;  
 $Q_{Hmin} = 67274$  кВт,  $Q_{Cmin} = 65982$ ,  $Q_{rec} = 1230$  кВт

**Потенциал энергосбережения.** Для выполнения проекта выбран метод пинч-анализа, который показал свою эффективность в исследованиях, проводившихся ранее в химической [8, 9] и нефтехимической [10, 11] отраслях промышленности. Преимущество метода состоит в возможности достижения минимальной дисконтированной стоимости проекта, которая определяется экономическими и термодинамическими законами [4].

Выбор оптимального проекта реконструкции осуществляется путем достижения такого значения  $\Delta T_{\min}$ , при котором приведенные затраты будут минимальными. Достигается подобное значение путем компромисса между приведенной стоимостью энергии и приведенными капитальными затратами. Стоимость зависимости приведенных величин от минимальной разности температур, спроектированные при помощи программы «Pinch», разработанной на кафедре интегрированных технологий, процессов и аппаратов НТУ «ХПИ» [12], представлены на (рис. 3). Для того, чтобы экономически оптимально интегрировать рассматриваемый процесс, необходимо определить основные значения капитальных и удельных затрат, которые существенно влияют на приведенную стоимость проекта.

В качестве топлива для нагрева горячих утилит используется природный газ, стоимость которого составляет – 400 долл. США за  $1000 \text{ м}^3$ , теплота сгорания газа составляет  $32 \text{ ГДж}/1000 \text{ м}^3$ , соответственно цена горячих утилит, с учетом того, что в году 8000 рабочих часов, составит – 360 долл. США за 1 кВт год. Цена холодных утилит составит – 30 долл. США за 1 кВт год. Для определения минимальных приведенных затрат примем следующие стоимостные характеристики теплообменного оборудования. Стоимость теплообменных аппаратов определяется выражением (1):

$$\text{Кап. стоимость} = A_r + B_r (S)^c \quad (1)$$

где  $A = 50000$  долл. США;  $B = 500$  долл. США;  $S$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ ; для пластинчатых теплообменников, как правило,  $c = 0,87$  [7].

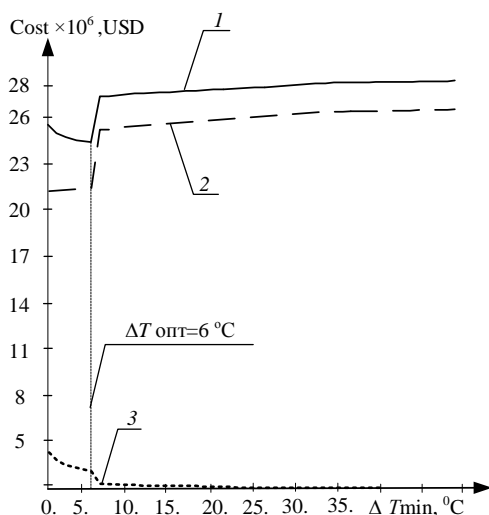


Рисунок 3 – Стоимостные зависимости приведенных величин от минимальной разности температур для системы потоков на рисунке 1:

1 – приведенная общая стоимость, 2 – приведенная стоимость энергии, 3 – приведенные капитальные затраты

Построение стоимостных кривых для рассматриваемого процесса (рис. 3) позволило определить значение  $\Delta T_{\text{min, опт}}$ , которое составило: 6 °C. Построение составных кривых (рис. 4) для системы потоков технологического процесса с учетом найденного значения  $\Delta T_{\text{min, опт}}$  позволяет определить целевые энергетические значения для проекта реконструкции. Потребление горячих утилит процессом составит – 54914 кВт, потребление холодных утилит – 53658 кВт, мощность рекуперации в теплообменной сети 13575 кВт. Снижение потребления горячих и холодных утилит – 18,37 % и 18,67 %.

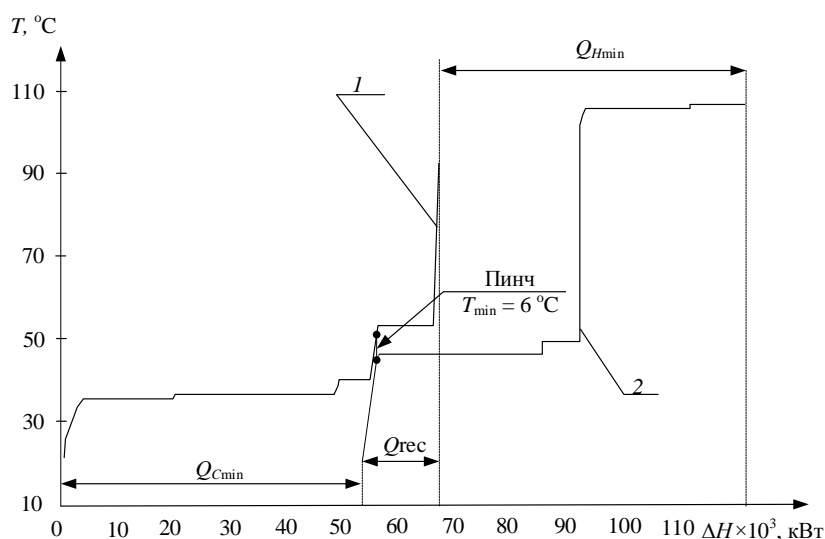


Рисунок 4 – Составные кривые после реконструкции для найденного значения  $\Delta T_{\text{опт}}$ :

1, 2 – горячая и холодная составная кривая;

$Q_{\text{Hmin}}$ ,  $Q_{\text{Cmin}}$ ,  $Q_{\text{Rec}}$  – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации;  
 $Q_{\text{Hmin}} = 54914$  кВт,  $Q_{\text{Cmin}} = 53658$ ,  $Q_{\text{Rec}} = 13575$  кВт

В соответствии с принципами пинч-анализа [4, 5], для полученного значения  $\Delta T_{\text{min, опт}}$ , спроектированы новые сеточные диаграммы и рассчитана мощность теплообменного оборудования (рис. 5).

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

В пинч-анализе наиболее подходящим инструментом понимания взаимодействия утилит с процессом является «большая составная кривая» [4, 5]. Для сеточной диаграммы с оптимальным значением  $\Delta T_{\text{min}}$  (рис. 5), была построена большая составная кривая (БСК) (рис. 6).

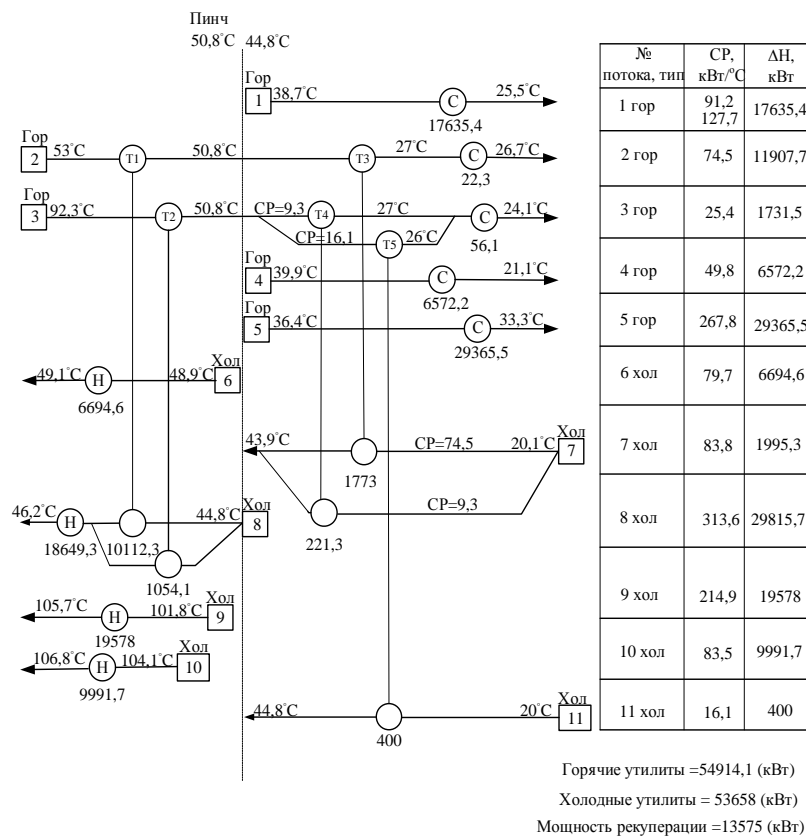


Рисунок 5 – Сеточная диаграмма оптимизированного проекта реконструкции теплообменной сети: Т1–Т5 – новые рекуперативные теплообменные аппараты, С – охладитель, Н – нагреватель

На БСК процесса разделения ШФЛУ и ППФ на ГИК показана возможность установки теплового насоса [4, 9] (рис. 6). Интеграция теплового насоса с процессом при размещении насоса поперек пинча обеспечивает энергосбережение за счет сокращения потребления внешних энергоносителей [4].

Эффективность действия теплового насоса часто оценивают коэффициентом преобразования, который определяется как отношение полезной энергии, передаваемой процессу, к затрачиваемой на это работе (уравнение 2), т. е. с помощью большой составной кривой мы можем определить тепловые нагрузки и необходимые температуры для интеграции тепловых насосов в ХТС.

$$\varepsilon = \frac{Q_{TH} + W}{W}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon=17$ ;  $Q_{TH} - 5636,3$  кВт;  $W - 350$  кВт.

С помощью программы «Aspen Hysys» [13] составлена компьютерная модель и рассчитана мощность теплового насоса (рис. 7), которая составила 350 кВт.

Простой срок окупаемости теплового насоса ( $P$ ) рассчитываемся по формуле (3), как отношение капитальных затрат к годовой экономии от сокращения потребления внешних энергоносителей, и составляет 2,4 месяца. Затраты на оборудование ( $K$ ) состоят из стоимости теплообменника и стоимости компрессора. Оценочная стоимость теплообменника – 189,1 тыс. долл. США, стоимость компрессора – около 200 тыс. долл. США [14].

$$P = \frac{A_{TH} + K}{Q_{hot} \times S_{hot} + Q_{cold} \times S_{cold} - W \times S_{elec}}, \quad (3)$$

где  $A_{TH} - 50000$  долл. США;  $K - 389100$  долл. США;  $Q_{hot} - 5989,3$  кВт;  $S_{hot} - 360$  долл. США за 1 кВт год;  $Q_{cold} - 5639,3$  кВт;  $S_{cold} - 30$  долл. США за 1 кВт год;  $W - 350$  кВт;  $S_{elec} - 500$  долл. США за 1 кВт год.

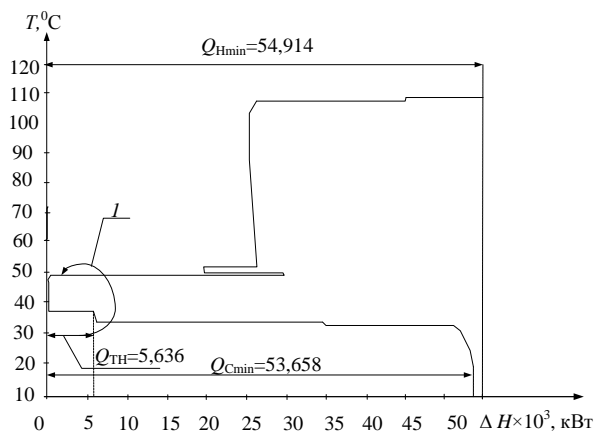


Рисунок 6 – Большая составная кривая:  
I – показывает возможность интеграции теплового насоса

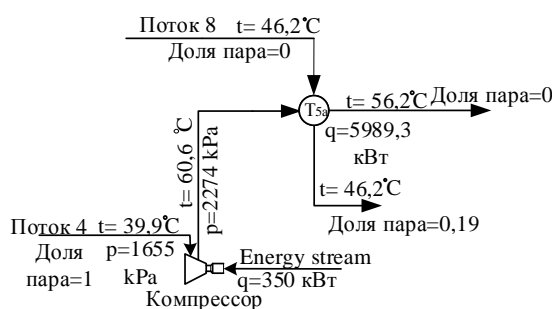


Рисунок 7 – Nysys модель подключения теплового насоса

Таблица 1 – Энергопотребление и рекуперация существующей системы теплообмена и системы теплообмена в предлагаемом проекте реконструкции

Энергетическая характеристика процессов	Мощность горячих утилит, кВт	Мощность холодных утилит, кВт	Мощность рекуперации теплоты, кВт
Существующая система теплообмена	67245,4	65982,3	1230
предлагаемая система теплообмена без теплового насоса	54914	53658	13560
предлагаемая система теплообмена с тепловым насосом	48924,7	48018,7	19549,3
% от существующего значения без тепловых насосов	81,2	80,6	1102,4
% от существующего значения с тепловых насосов	72,7	72,8	1589,4

**Выводы.** В результате исследования процесса стабилизации ППФ, разделения ППФ на ГиК, разделения ШФЛУ на ГиК, составлена таблица потоковых данных, построена сеточная диаграмма, определены теплообменные связи между технологическими потоками, а также была посчитана мощность рекуперации теплоты, которая составила 1230 кВт для существующего процесса. Спроектированная составная кривая выявила недостатки существующей теплообменной системы, которые приводят к увеличению энергопотребления. С помощью инструмента стоимостных кривых получено новое значение  $\Delta T_{\min, \text{opt}} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для нового значения  $\Delta T_{\min, \text{opt}} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$  спроектирована сеточная диаграмма, также рассмотрена возможность установки теплового насоса и оценена экономическая эффективность проекта. Капитальные затраты составят 1760,8 тыс долл. США, срок окупаемости – три месяца.

Благодарность: Авторы благодарят Европейское Сообщество за финансовую поддержку в рамках проекта ЕС "Distributed Knowledge-Based Energy Saving Networks" – DISKNET (FP7-PEOPLE-2011-IRSES-294933).

**Обозначения.**  $A_{TH}$  – общая стоимость установки теплового насоса, долл. США;  $CP$  – потоковая теплоемкость кВт/°С;  $K$  – стоимость теплового насоса, долл. США;  $T$  – температура, °С;  $\Delta H$  – изменение энтальпии потоков, кВт;  $\Delta T_{min}$  – минимальная разность температур, °С;  $\varepsilon$  – коэффициент преобразования теплового насоса;  $Q_{hot}$  – тепловая мощность для нагрева горячих потоков кВт;  $Q_{TH}$  – количество передаваемого тепла, кВт;  $W$  – мощность в тепловом эквиваленте, затрачиваемая на привод компрессора, кВт;  $S_{hot}$  – стоимость годовой энергии для нагрева холодных потоков, долл. США за 1 кВт год;  $Q_{cold}$  – тепловая мощность для нагрева холодных потоков, кВт;  $S_{cold}$  – стоимость годовой энергии для нагрева холодных потоков, долл. США за 1 кВт год;  $S_{elec}$  – стоимость годовой энергии для работы компрессора.

#### Литература

1. Ukraine policy review. [электронный ресурс] // International Energy Agency. Режим доступа: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ukraine2006.pdf>. accessed 28.08.2015.
2. Angsutorn N. Heat Exchanger Network Synthesis on Gas Separation Plant No.2 (GSP2) in Thailand / N Angsutorn, P. Saikhaw, R. Chuvaree, S. Kitipat // Chemical Engineering Transaction. – 2014 – vol. 39 – P. 1471–1476.
3. Nguyen T.V. Evaluation of the life performance of oil and gas o\_shore platforms: Site-scale integration and exergy-based assessment / T.V. Nguyen, T.G. Fulop, P. Brehuhaus, B. Elmegaard // Technical University of Denmark. – 2014. – 42 p.
4. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ и др. – Х.: ХГПУ, 2000. – 457 с.
5. Kemp, Ian C. Pinch analysis and process integration A user guide on process integration for the efficient use of energy (2nd Ed.) / Ian C. Kemp. – Elsevier Ltd, 2007. – 415 p.
6. Ульев Л.М. Экстракция технологических данных процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропиленовой фракции / Л.М. Ульев, А. Маатоук // Вісник НТУ «ХПІ». – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 7. – С. 22–28.
7. Hesselgreaves J.E. Compact heat exchangers. Selection, design and operation. / J.E. Hesselgreaves. – Amsterdam: Elsevier, 2001. – 398 p.
8. Tovazhnyansky L. Process integration of sodium hypophosphite production / L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, S. Boldyryev, O. Arsenyeva // Applied Thermal Engineering. – 2010. – V. 30, Issue 16. – P. 2306–2314.
9. Ульев Л.М. Пинч-интеграция тепловых насосов в процесс очистки тетрахлорида титана / Л.М. Ульев, В.В. Сивак // Интегрированные технологии и энергосбережение. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2013. – № 2. – С. 35–44.
10. Клемеш Й. Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки / Й. Клемеш, Ю.Т. Костенко, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, А.Ю. Перевертайленко, Б.Д. Зулин // Теорет. основы хим. технологии. – 1999. – Т. 33. – №4. – С. 420–431.
11. Ульев Л.М. Пинч-реконструкция секций гидроочистки и каталитического риформинга на установке Л-35-11/600 / Л.М. Ульев, Д.Д. Нечипоренко // Интегрированные технологии и энергосбережение. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2013. – № 2. – С. 95–101.
12. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Применение программного обеспечения PINCH2.02 / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, Э.Р. Нагорный // ІТЕ. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2003. – № 4. – С. 14–19.
13. Seider W.D. Product and process design principles synthesis, Analysis, and Evaluation / W.D. Seider, J.D. Seader, D.R. Lewin. – Second Edition. – San Francisco: Wiley, 2003. – 1122 p.
14. Горшков В.Г. Тепловые насосы. Аналитический Обзор // Справочник промышленного оборудования. – 2004. – № 2. – 80 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Ukraine policy review. [elektronnyiy resurs]. International Energy Agency, France.: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ukraine2006.pdf>. accessed: 28.08.2015.
2. Angsutorn N. Heat Exchanger Network Synthesis on Gas Separation Plant No.2 (GSP2) in Thailand. N Angsutorn, P. Saikhaw, R. Chuvaree, S. Kitipat. Chemical Engineering Transaction. – 2014 – vol. 39 – P. 1471–1476.

3. Nguyen T. V. Evaluation of the life performance of oil and gas o<sub>shore</sub> platforms: Site-scale integration and exergy-based assessment. T.V. Nguyen, T.G. Fulop, P. Breuhaus, B. Elmegaard. Technical University of Denmark. – 2014. – 42 p.
4. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov. [Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulyev L.M.]. – Harkov: NTU «HPI», 2000. – 458 p.
5. Kemp, Ian C. Pinch analysis and process integration a user guide on process integration for the efficient use of energy (2nd Ed.). Ian C. Kemp. – Elsevier Ltd, 2007. – 415 p.
6. Ulyev L.M. Jekstrakcija tehnologicheskikh danyh processov razdelenija shirokoj frakcii legkih uglevododov i propan-propilenovoj frakcii. L.M. Ulyev, A. Maatouk. Vestnik NTU “KhPI”. – 2015. – № 7. – P. 22–28.
7. Hesselgreaves JE. Compact heat exchangers. Selection, design and operation. JE. Hesselgreaves. Amsterdam: Elsevier, 2001. – 398 p.
8. Tovazhnyansky L. Process integration of sodium hypophosphite production. L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, S. Boldyryev, O. Arsenyeva. Applied Thermal Engineering. – 2010. – V. 30, Issue 16. – P. 2306–2314.
9. Ulyev L.M. Pinch-integracija teplovyh nasosov v process ochistki tetrahlorida titana. L.M. Ulyev, V.V. Sivak. Integrated Technologies and Energy Conservation. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2013 – № 2. – P. 35–44.
10. Klemes J. Primenenie metoda pinch-analiza dlja proektirovanija jenergosberegajushhih ustanovok neftepererabotki. J. Klemes, Y.T. Kostenko, L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev, A.Y. Perevertaylenko, B.D. Zulin. Teoret. osnovy him. tehnologii. – 1999. – T. 33. – №4. – P. 420–431.
11. Ulyev L.M. Pinch-rekonstrukcija sekcij gidroochistki i kataliticheskogo riforminga na ustanovke L-35-11/600. L.M. Ulyev, D.D. Nechiporenko. ITE. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2013. – № 2, P. 95–101.
12. Tovazhnyansky L. Primenenie programmnoho obespechenija PINCH2.02. L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, E.R. Nagorni. ITE. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2003. – № 4. – P. 14–19.
13. Seider W.D. Product and process design principles synthesis, Analysis, and Evaluation. W.D. Seider, J.D. Seader, D.R. Lewin. – Second Edition. – San Francisco: Wiley. – 2003. – 1122 p.
14. Gorshkov V. Teplovye nasosy. Analiticheskij Obzor. Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya. – 2004. – № 2. – 80 p.

УДК 338.45: 662.276

Ульєв Л.М., Маатук А., Васильєв М.А.

### **ПИНЧ-ИНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ У ПРОЦЕС РОЗДІЛЕННЯ ЛЕГКИХ ВУГЛЕВОДНІВ**

Потенціал енергозбереження в процесах стабілізації пропан-пропіленової фракції (ППФ), розділення ППФ та розділення широкі фракції вуглеводнів, досліджується в даній роботі. На підставі аналізу технологічної схеми і поточкових даних, за допомогою метода пінч-аналізу спроектована сіткова діаграма теплообмінної системи, побудовані складові криві відповідно до існуючого навантаження теплообмінної системи. Знайдене нове значення  $\Delta T_{\min}$  та побудуванні складові криві згідно цього значення. Розглянута можливість інтеграції теплового насосу та розраховані економічні параметри процесу. У статті показано шляхи зменшення споживання зовнішніх енергоносіїв в процесі розділення легких вуглеводнів, а також запропоновані шляхи покрової модернізації заводу.

Ulyev L.M, Maatouk A., Vasilyev M.A.

### **PINCH-INTEGRATION OF HEAT PUMP FOR LIGHT HYDROCARBONS SEPARATION PROCESS**

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. Technological streams that are needed for the integration process by using the pinch analysis method were identified. Grid diagram was constructed on the basis of these data, heat exchange between process streams was determined. Heat recovery power of existing process was calculated. In addition to that composite curves for the existing process was made. According to principles of pinch analysis, new composite curves are designed. Application of the methods of pinch-analysis and integration of heat pumps allows to decrease the external hot utilities usage by 27 % and cold utilities usage by 27 %, and also offered the way of step-by-step retrofit of the plant.