

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**АББАССА МААТУКА**

УДК 66.045.1; 662.99

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РЕКУПЕРАТИВНИЙ ТЕПЛООБМІН НА УСТАНОВЦІ  
ГАЗОФРАКЦІОНУВАННЯ ТА КОМПРИМУВАННЯ ГАЗОХІМІЧНОГО  
ВИРОБНИЦТВА**

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

16 – Хімічна та біоінженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання чужих ідей, результатів і текстів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Аббасс Маатук

Науковий керівник Ульєв Леонід Михайлович, доктор технічних наук,  
професор

Харків – 2017

## АНОТАЦІЯ

*Маатук А.* Рекуперативний теплообмін на установці газофракціювання та компримування газохімічного виробництва. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» (16 – Хімічна та біоінженерія) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017 р.

Процеси поділу і зокрема процеси ректифікації газових і рідких сумішей є одними з найбільш енергоємних у промисловості. За оцінками експертів, до 5% всієї енергії, яка використовується людством, споживається саме в цих процесах. Тому дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі підвищення потужності рекуперації теплової енергії в процесах ректифікації широкої фракції легких вуглеводнів (ШФЛВ) і супутніх їм процесах.

В результаті аналітичного огляду публікацій виконана класифікація методів збільшення потужності рекуперації теплової енергії в хіміко-технологічних процесах з метою зниження питомого енергоспоживання в промислових процесах. Розглянуто методи внутрішньої теплової інтеграції ректифікаційних колон, як з інтеграцією теплового насоса (ТН) з колоною, так і без інтеграції ТН. Розглянуто роботи, які пов'язані з застосуванням методів Пінч-аналізу для збільшення потужності процесів рекуперації теплоти на установках хімічних виробництв. Зроблено аналіз робіт, які присвячені збільшенню питомої потужності рекуперації теплоти в територіальних виробничих комплексах (*Total Site Integration*). В аналізі публікацій окремо відзначені роботи піонерів в області Інтеграції Процесів: професора Б. Линнхоффа, професора Р. Сміта, професора Ї. Клемеша, а також роботи вітчизняних вчених: професора Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО, професора П.О. КАПУСТЕНКО, професора Л.М. УЛЬЄВА. Аналіз літературних даних дозволив зробити поста-

новку завдань для збільшення питомої потужності процесу рекуперації теплової енергії на установках ректифікації ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової, пропан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракцій та підібрати методи їх вирішення.

Для вирішення даної задачі був обстежений процес рекуперації теплової енергії у цеху газофракціонування нафтопереробного заводу, що складається з двох ліній ректифікації ШФЛВ. Одна з них – отриманням пропан-пентанової, бутанової фракцій, інша – отриманням пентан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракцій. Також в територіальний промисловий комплекс входить установка легкого гідрокрекінгу.

За допомогою програмного забезпечення *UniSim Design* побудовані імітаційні моделі процесів поділу ШФЛУ.

Аналіз технологічних процесів, їх регламентів, даних імітаційних моделей дозволив записати потокову таблицю процесів, що досліджуються, ця таблиця є цифровим чинником технологічних потоків, що беруть участь в системі теплообміну установки. Також побудована сіткова діаграма існуючої енерготехнологічної системи установки ректифікації ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракцій і визначена потужність процесів рекуперативного теплообміну на установці  $Q_{rec} = 1230$  кВт. Дані, які отримані у результаті, аналізу, дозволили побудувати складові криві процесу ректифікації для існуючої теплообмінної рекуперативної системи і визначити потужність гарячих  $Q_{Hmin} = 67274$  кВт та холодних утиліт  $Q_{Cmin} = 65982$  кВт, що процес ректифікації споживає в даний час. Аналіз складових кривих дав можливість визначити мінімальну різницю температур між теплоносіями в теплообмінному обладнанні установки  $\Delta T_{min} = 30^\circ\text{C}$ . Ця величина є параметром, який показує можливість збільшення потужності рекуперації теплової енергії в процесі.

На основі теоретичного аналізу системи технологічних потоків процесу ректифікації ШФЛВ, з застосуванням методів пінч-аналізу, визначено оптимальне значення мінімальної різниці температур між теплоносіями  $\Delta T_{optmin} = 6^\circ\text{C}$ , і для цього значення побудована сіткова діаграма та технологічна схема проекту рекон-

струкції системи рекуперативного теплообміну і визначено основні параметри нових теплообмінників.

В результаті проекту реконструкції, що було запропоновано, потужність рекуперації теплової енергії стане рівною  $Q_{rec} = 13575$  кВт, тобто збільшиться на 1102 %, потужності гарячих і холодних утиліт будуть рівні  $Q_{Hmin} = 54914$  кВт,  $Q_{Cmin} = 53658$  кВт, тобто знизяться на 18,37 % і 18,67% відповідно. Теоретичний аналіз системи теплообміну з допомогою апарату складових кривих дозволив визначити обмежувальний фактор для подальшого збільшення потужності рекуперації теплової енергії.

Аналіз інтегрованої системи теплообміну процесу ректифікації ШФЛВ з допомогою Великою складовою кривою (ВСК) дозволив усунути обмежувальний фактор з допомогою створення методу оптимальної інтеграції рекомпресійного теплового насоса (ТН) у вже інтегрований процес ректифікації.

Побудовані імітаційні *UniSim Design* моделі інтеграції ТН в обидва процеси ректифікації, які підтвердили збільшення потужності рекуперації теплової енергії в процесі ректифікації ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракції, у порівнянні до існуючого процесу, на 1590 %, а потужність гарячих і холодних утиліт знижується на 72% і 73% відповідно. При інтеграції теплового насоса в процес ректифікації ШФЛВ з отриманням пентан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракцій потужність рекуперації збільшиться від значення 1725 кВт до 21270 кВт, тобто на 1233 %, а споживання гарячих утиліт знизиться від значення 41112 кВт до 22490 кВт, тобто на 53%, холодних утиліт знизиться від значення 42812 кВт до значення 23260 кВт, тобто на 54%.

Для подальшого збільшення потужності процесів рекуперації теплової енергії виконано аналіз усього територіального комплексу установок ректифікації ШФЛВ (*Total Site* інтеграція). За допомогою ВСК процесів ректифікації вперше побудовано тепловий профіль комплексу різних установок ректифікації ШФЛВ, аналіз якого дозволив визначити технологічні потоки, на яких можливо встановити додаткові рекуперативні теплообмінні апарати, що дало можливість збільшити потужність рекуперації теплової енергії на 23,4 МВт. В результаті інтеграції ком-

плексу установок загальна потужність рекуперації теплової енергії збільшилася на 1986 %, а потужність гарячих і холодних утиліт зменшилася на 51% порівняно з утилітами процесів у теперішній час. В дисертації для кожного з запропонованих проектів збільшення потужності рекуперації теплової енергії виконано економічний аналіз.

В дисертації також вирішена задача збільшення потужності рекуперації теплоти в існуючій двох-потоківій теплообмінній системі з наявністю утилітних шляхів. Визначено залежності температур теплоносіїв і теплових навантажень на теплообмінному обладнанні від додаткової площі поверхні теплообміну і інтенсивності теплопередачі. Визначено найбільш прийнятне розміщення нової поверхні теплообміну і знайдені значення площі поверхні теплообміну для мінімальної приведеної вартості проекту реконструкції та мінімального терміну окупності. Створено метод, алгоритм і програма розрахунку додаткової площі поверхні теплообміну для двох-потоківих систем рекуперації теплової енергії.

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

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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

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

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

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

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

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

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

8. Маатук А. Пинч-интеграция процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропеленовой фракции на установках газодифракционирования и компремирования/ Л.М. Ульев, А. Маатук, М.А. Васильев // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології» (ПАЕМ). Одеса: ОНАХ, Т2015. – С. 185–190.

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

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

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

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

## ABSTRACT

*Maatouk Abbass.* Regenerative heat exchange in the fractionation and compression of gas in the chemical production. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences (PhD degree) in specialty 05.17.08 «Processes and equipment of chemical technology» (16 – Chemical and bioengineering) – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The processes of separation and especially rectification of gas and liquid mixtures are one of the most energy consuming in the industry. Under the experts estimation, up to 5% of all energy that is used by the humanity is consumed in these processes. That is why the dissertation work is devoted to the solution of actual research-and—applied tasks of increase of capacity of recuperation of heat energy during the processes of rectification of wide fraction of light hydrocarbons (WFLH) and related processes.

As a result of the analytical review of the publication, the classification of the methods of increase of capacity of recuperation of heat energy in chemical technological processes with the purpose of decreasing of specific energy consumption intensity in production processes was carried out. The methods of internal heat integration of rectification columns as with integration of the heat pump (*HP*) from the column and without integration of *HP* were considered. The works, which were concerned with the application of Pinch Analysis methods to increase the capacity of recuperation of heat energy on the plants of chemical production, were examined. The analysis of works, which were related to the increase of specific energy consumption of heat in the territorial production complexes (Total Site Integration), was carried out. In the analysis of publications, the works of pioneers in the field of Integration Processes such as Professor B. Linnhoff, Professor R. Smith, Professor J. Klemes, and the works of scientists of our country such as Professor L. L. Tovazhnyansky, Professor P. A. Kapustenko, Professor L. M. Uliev, are mentioned in particular. The analysis of published works allowed putting to the tasks of increasing the specific energy consumption of the process of heat recuperation on the rectification plants WFLH with the production of propane-pentanoic, propane-hexane, butane and isobutene fractions and finding the methods of their solution.

To solve the given task, the process of heat energy recuperation in the gas-fractionation shop of the oil refinery, which consisted of two lines of rectification WFLH was studied. One of the tasks is to get propane-pentanoic, butane fractions; the other is to get pentane-hexane, butane and isobutene fractions. In addition, the installation of primary creaking enters into the territorial production complex.

The simulation models of the separation of WFLH were designed with the help of the software UniSim Design.

The analysis of technological processes, their regulations, and data of simulation models permitted to record the production line table of the process under the research. Such table is the numeral factor of the technological flows that take part in the system of heat exchange of the plant. And also, the net diagram of the existing capacity technological system of the rectification plant WFLH with obtaining of propane-

pentanoic and butane fractions was established. Moreover, the capacity of the processes of the recuperative heat exchange on the plant  $Q_{rec}=1230$  kW was determined. The data, which were obtained as the result of the analysis, allowed to construct composite curves for the rectification process for the existing heat ex-change recuperative system and determined the capacity of hot  $Q_{Hmin} =67274$  kW and cold utilities  $Q_{Cmin}= 65982$  kW, which the process of rectification consumed at that moment. The analysis of the composite curves gave the opportunity to determine the minimum temperature difference between the heat transfer agents in the heat exchanging equipment of the plant  $\Delta T_{min} = 30$  °C. This value is the parameter, which shows the ability to increase the capacity of recuperation of the heat energy in the process.

On the basis of the theoretical analysis of the system of technological flows of the process of recuperation WFLH, with the use of Pinch Analysis methods, the optimal value of the minimum temperature difference between heat-transfer agents  $\Delta T_{optmin} = 6$  °C was determined, and for this value a net diagram and technological scheme of the project of reconstruction of the system of recuperative heat exchange were constructed. The main parameters of new heat exchangers were defined.

As the result of the project of reconstruction, which was proposed, the capacity of the recuperation of heat energy would be  $Q_{rec} = 13575$  kW that is, it would increase by 1102%, the capacity of hot and cold utilities would be  $Q_{Hmin} =54914$  kW, that is they would decrease by 18.37% and 18.67% accordingly. The theoretical analysis of the heat exchange system with the help of composite curves device allowed establishing limit factor for the further increase of the capacity of heat energy recuperation.

The analysis of the integrated heat exchange system of the process of rectification of WFLH with the help of the big composite curve (BCC) made it possible to eliminate the limit factor with the help of creation of the method of optimum integration of recompression heat pump (HP) into having been integrated process of rectification.

The constructed simulation UniSim Design models of HP integration in both processes of rectification, which proved the increase of the capacity of recuperation of the heat energy in the process of rectification WFLH with obtaining of propane-

pentanoic and butane fractions comparing to the existing process, by 1590 %, and the capacity of hot and cold utilities decrease by 72 % and 73 % accordingly were created. During the integration of the heat pump in the process of rectification WFLH with obtaining of pentane-hexane, butane and isobutene fractions, the capacity of recuperation increases from the value 1725 kW to 21270 kW that is, by 1233 %, and the consumption of hot utilities will decrease from the value 41112 kW to 22490 kW, that is by 53 %, cold utilities will decrease from the value 42812 kW to the value 23260 kW, that is by 54%.

For the further increase of the capacity of the processes of heat, energy recuperation the analysis of the whole territorial complex of rectification plants WFLH (Total Site Integration) was conducted. Using BCC of rectification processes, for the first time the heat profile of the complex of different rectification plants WFLH was constructed, the analysis of them made it possible to determine technological flows, on which it was possible to install additional recuperative heat exchangers that helped to increase the capacity of recuperation of heat energy by 23,4 MW. In the result of integration of the plants complex the total capacity of the recuperation of the heat energy increased by 1986 %, but the capacity of hot and cold utilities increased by 51 % comparing with the utilities of processes currently. In the dissertation work, the economic analysis for each of the proposed project of the increase of capacity of recuperation of heat energy was carried out.

In the dissertation work, the task of increasing the capacity of recuperation of heat in the existing two-flow heat exchange systems in the presence of utility paths was solved. The dependence of heat carries temperature and thermal loading on heat exchange equipment on additional area of heat exchange surface and intensity of heat transfer were determined. The most suitable placement of the new heat exchange surface was determined and the value of the area of the surface of heat exchange for the minimum present value of the project reconstruction and minimum payback term were found. The method, algorithm and program of the calculation of the additional area of the surface of the heat exchange for two-flow systems of the recuperation of heat energy were created.

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

## REFERENCES

1. Maatouk A. Ekstraktsiya tehnologicheskikh dannykh protsessov razdeleniya shirokoy fraktsii legkih uglevodorodov i propan-propelenovoy fraktsii/ L.M. Ulev, A. Maatouk // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – № 7 (1116). – S. 22–28.
2. Maatouk A. Pinch-integratsiya protsessov razdeleniya shirokoy fraktsii legkih uglevodorodov i propan-propelenovoy fraktsii na ustanovkakh gazo-fraktsionirovaniya i kompremirovaniya / L.M. Ulev, A. Maatouk, M.A. Va-sylev // Naukovi pratsi ONAKhT, 2015, vypusk 47, tom 1. – S. 10–15.
3. Maatouk A. Pinch-integratsiya teplovogo nasosa v protsess razdeleniya legkih uglevodorodov / L.M. Ulev, A. Maatouk, M.A. Vasylev // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. – Kharkiv, 2015. – № 3. – S. 8–14.
4. Maatouk A. Integratsiya teplovogo nasosa v protsess razdeleniya legkih uglevodorodov/ L.M. Ulev, T.Z. Zebeshev, I.B. Ryabova, M.A. Vasilev, A. Maatouk // Naukovi pratsi ONAKhT. – Odesa: ONAKhT, 2016. – T. 80. – Vypusk 1. – S. 8 – 13.
5. Maatouk Abbass. Total Site Integration of Light Hydrocarbons Separation Process/ Leonid Ulyev, Mihail Vasilyev, Abbass Maatouk, Neven Duic, Alisher Khusanov. // Chemical Engineering Transaction. – 2016. – Vol. 52. –P. 1–6.
6. Maatouk A. Energoeffektivnaya rekonstruktsiya dvuhpotokovykh teploobmennykh sistem / L.M. Ulev, A. Maatouk // Naukovi pratsi ONAKhT. – Odesa: ONAKhT, 2017. – T. 81. – Vypusk 1. – S. 33 – 38.
7. Maatouk A. Heat Energy Integration of Light Hydrocarbons Separation Process / Alisher E. Khusanov, Leonid M. Ulyev, Vasilyev M. Vasilyevich, Botagor M. Kaldybaeva, Abbass Maatouk // International Conference of Industrial Technology and Engineering (ICITE 2015). Shymkent, Kazakhstan, 2015. – P. 149–155.

8. Maatouk A. Pinch-integratsiya protsessov rozdeleniya shirokoy fraktsii legkih uglevodorodov i propan-propelenovoy fraktsii na ustanovkakh gazofraktsionirovaniya i kompremirovaniya / L.M. Ulev, A. Maatouk, M.A. Vasilev // Materialy V Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Innova-tsiini enerhotekhnolohii» (PAEM). Odesa: ONAKh, T2015. – S. 185–190.

9. Maatouk A. Ekstraktsiya dannyih protsessov stabilizatsii propan-propelenovoy fraktsii i rozdeleniya shirokoy fraktsii legkih uglevodorodov dlya pinch-analiza/ L.M. Ulev, A. Maatouk // Tezy dopovidei XXIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia». – Kharkiv: TOV «Planeta-Prynt». – 2015.–Ch. II. – S. 309.

10. Maatouk A. Integratsiya teplovogo nasosa v protsess rozdeleniya legkih uglevodorodov / L.M. Ulev, T.Z. Zebeshev, I.B. Ryabova, M.A. Vasilev, A. Maatouk // Materialy XVI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Udoskonalennia protsesiv i obladnannia kharchovykh ta khimichnykh vyrobnytstv», Odesa: ONAKhT, 2016. – S. 266–271.

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

12. Maatouk A. Rekonstruktsiya teploobmennyih sistem s utilityimi putyami / L.M. Ulev, A. Maatouk // Збірник праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні Енерготехнології». Оdesa: ОНАХТ, 2017. – С. 106–111.

## ЗМІСТ

Скорочення .....	4
Умовні позначення.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ГАЗОПЕРЕРОБЦІ.....	13
1.1. Загальні положення .....	13
1.2. Сучасні методи підвищення енергоефективності процесів ректифікації 14	
1.3. Інтеграція теплових насосів з ректифікаційними колонами.....	15
1.4. Внутрішня теплова інтеграція ректифікаційних колон.....	19
1.5. Методи теплоенергетичної інтеграції процесів (Пінч Аналіз).....	21
Висновки за розділом 1 .....	31
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ, ЙОГО ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	32
2.1. Обслідування установок, які входять у територіальний комплекс розділення легких вуглеводнів.....	32
2.1.1. Аналіз процесу розділення ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракцій (процес 1).....	33
2.1.2. Аналіз процесу розділення легких вуглеводнів з отриманням пентан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракції (процес 2).....	40
2.1.3. Аналіз процесу легкого гідрокрекінгу (процес 3).....	49
2.2. Моделювання процесу розділення ШФЛВ.....	53
3. Проведений аналіз існуючого процесу легкого гідрокрекінгу. Визначено технологічні потоки установки, які беруть участь у процесах рекуперативного теплообміну. ....	62
4. Представлений метод, який використовується при створенні імітаційних моделей процесів ректифікації ШФЛВ. ....	62
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ПРОЦЕСУ.....	63
3.1. Аналіз першого процесу розділення ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової і бутанової фракцій .....	63
3.2. Аналіз другого процесу розділення ШФЛВ з отриманням пентан-гексанової, бутанової і ізобутанової фракції. ....	69
Висновки за розділом 3 .....	71

РОЗДІЛ 4 РОЗДІЛЬНА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ ШФЛВ.....	72
4.1. Підвищення потужності процесу рекуперації теплоти на установці розділення ШФЛВ з отриманням пропан-пентанової та бутанової фракцій ..	72
4.2. Підвищення потужності процесу рекуперативного теплообміну другого процесу розділення ШФЛВ з отриманням пентан-гексанової, бутанової та ізобутанової фракцій .....	81
Висновки за розділом 4 .....	86
РОЗДІЛ 5 TOTAL SITE ІНТЕГРАЦІЯ.....	88
5.1. Температурні профілі загального промислового комплексу .....	88
5.2. Розрахунок економічної ефективності заходів, що пропонуються .....	90
5.3. Оцінка економічної ефективності проекту .....	92
Висновки за розділом 5 .....	96
РОЗДІЛ 6 АНАЛІЗ І ЗБІЛЬШЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ДВОХПОТОКОВІЙ СИСТЕМІ ТЕПЛООБМІНУ.....	98
6.1. Теоретичний аналіз.....	99
6.3. Дослідження цільових функцій у залежності від прибутку та енергопостачання.....	114
6.4. Установка додаткового теплообмінного апарату на гарячому боці системи.....	115
Висновки за розділом 6 .....	126
ВИСНОВКИ.....	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	130
ДОДАТКИ.....	160

### Скорочення

ХТС – хіміко-технологічна система;  
 ШФЛВ – широка фракція легких вуглеводнів;  
 СПБТ – суміш пропану та бутану технічних;  
 ППФ – пропан-пропіленова фракція;  
 ЦГФУ – центральна газофракціювальна установка;  
 ЦЗЛ – центральна заводська лабораторія;  
 БТ - бутан технічний;  
 ЕПФ – етан-пропанова фракція;  
 PFD - Process Flow Diagram (принципова схема технологічного процесу);  
 PR – рівняння стану Пенга - Робінсона.

### Умовні позначення

$C$  – питома теплоємність, кДж/кг·К;  
 $CP$  – потокова теплоємність, кВт/К;  
 $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/м<sup>2</sup>·К;  
 $K$  – коефіцієнт теплопередачі, кВт/(м<sup>2</sup>·°С)  
 $\Delta H$  – кількість тепла, кВт;  
 $r$  – питома теплота пароутворення, кДж/кг;  
 $Q_{Hmin}$  – цільове значення гарячих утиліт, кВт;  
 $Q_{Cmin}$  – цільове значення холодних утиліт, кВт;  
 $S$  – площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;  
 $T$  – температура, °С;  
 $\Delta T_{min}$  – мінімальна різниця температур теплоносіїв при їх теплообміні у теплообмінному обладнанні, °С;  
 $T_H, T_S$  – початкова температура технологічного потоку, °С;  
 $T_K, T_T$  – кінцева температура технологічного потоку, °С;  
 $R$  – універсальна газова стала;  
 $\lambda_{mix}$  – теплопровідність рідкої суміші;

$\lambda_i$  – теплопровідність рідини  $i$ ;

$x_i$  – мольна частка компонента  $i$

$\mu_{eff}$  – удавана в'язкість;

$\mu_{oil}$  – в'язкість вуглеводневої фази;

$v_{oil}$  – об'ємна частка вуглеводневої фази;

$H$  – ентальпія;

$S$  – ентропія при модюванні;

де  $x_i$  – мольна частка  $i$ -го компонента;

$V_i$  – мольний об'єм  $i$ -го компонента;

$\sigma$  – поверхневий натяг (дин/см<sup>2</sup>).

Індекси:

ID – ідеальний газ;

<sup>0</sup> – еталонний стан.