

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Юзбашьян Анна Петрівна

УДК 66.045.126

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В
ТЕХНОЛОГІЯХ ПЕРЕРОБКИ ВУГЛЕВОДНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
НЕРОЗБІРНИХ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ**

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

_____ А.П. Юзбашьян

Науковий керівник Арсеньева Ольга Петрівна, доктор технічних наук, доцент

Харків – 2017

АНОТАЦІЯ

Юзбашьян А.П. Інтенсифікація теплообмінних процесів в технологіях переробки вуглеводнів з використанням нерозбірних пластинчастих теплообмінників. – 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.

Дисертація подана до захисту у спеціалізованій вченої раді Д 64.050.05 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі підвищення інтенсифікації процесу теплопередачі в пластинчастих теплообмінних апаратах спеціальної нерозбірної конструкції, які можуть використовуватися для рекуперації тепла нафтохімічних підприємств.

Проведено аналітичний огляд науково-технічної інформації щодо особливостей використання та конструкцій теплообмінного обладнання в технологіях переробки вуглеводнів. Проаналізовано роботи з методами розрахунку пластинчастих теплообмінних апаратів на основі дослідження теплопередачі та гідравлічного опору в каналах апаратів.

На базі аналізу теоретичних основ процесу показано, що можливості інтенсифікації теплообмінних процесів далеко не вичерпані та потребують розвинення підходів щодо прогнозування шару забруднень у часі з можливістю визначення термічного опору забруднень в будь-який період експлуатації. Це дозволить забезпечити стабільну роботу теплообмінних апаратів та уникнути зупинки виробництва внаслідок блокування забрудненнями теплообмінних каналів.

Подальшого розвитку, на основі трьохшарової аналогії переносу тепла та імпульсу, отримав підхід щодо прогнозування теплових і гідравлічних процесів у пластинчастих теплообмінних апаратах нерозбірної конструкції зі спеціально гофрованими квадратними та заокругленими пластинами. Отримано напівемпіричну залежність для визначення тепловіддачі в канал пластинчастих теплообмінних апаратів з урахуванням впливу числа Прандтля в діапазоні від 0,7 до 1000.

Запропоновано фізико-математичні моделі тепловіддачі та гідравлічного опору в зварних пластинчастих теплообмінних апаратах, які дозволяють проектувати одноходові нерозбірні пластинчасті теплообмінні апарати з заокругленими пластинами та багатоходові пластинчасті теплообмінні апарати з квадратними пластинами та визначати оптимальні геометричні параметри пластин, які забезпечать мінімальну поверхню теплопередачі в апараті.

На основі теорії асимптотичного характеру забруднень в каналах пластинчастого теплообмінного апарату, набув подальшого розвитку метод, який дозволяє встановити термічний опір забруднень на поверхні теплопередачі в залежності від часу для різних швидкостей потоку і температури поверхні стінки. Для визначення інтенсивності осадження відкладень запропоноване співвідношення через дотичне напруження, що базується на моделі граничних забруднень, яка представлена Янгом М. та Крітенденом Б. для відкладень утворених на поверхні теплопередачі при нагріванні сирої нафти. Дана модель може використовуватися для розрахунку розбірних і зварних пластинчастих теплообмінних апаратів з поліпшеною тепловіддачею, а також для прямих гладких каналів без інтенсифікації.

В роботі проведено аналіз ефективності використання енергії на одному з нафтопереробних заводів корпорації IPLOM. Основна увага приділялась блоку первинного підігріву сирої нафти, який представляє

собою складну розгалужену схему потоків, що проходить через двадцять три кожухотрубчасті теплообмінні апарати.

Нафтопереробний завод може працювати з чотирма типами сирової нафти. У дисертаційній роботі представлено розрахунок тільки для одного типу сирової нафти, з метою отримання чіткого уявлення щодо порівняння двох типів нерозбірних пластинчастих теплообмінних апаратів в різних технологічних умовах.

Умови процесу показали значну різницю витрат теплоносіїв для холодних і гарячих потоків, яка на деяких позиціях досягала чотирьох разів. Температура теплоносіїв варіюється від 20 до 346 °С. Це дозволило розглянути можливість застосування і виконати порівняльний аналіз пластинчастих теплообмінних апаратів типу Компаблок і кожухопластинчастих в широкому діапазоні робочих умов.

Для можливості використання кожухопластинчастих теплообмінних апаратів з одноходовим розташуванням потоків проведено дослідження впливу кута нахилу гофрування на величину площі поверхні теплообміну та загальну площу пластини. Встановлено, що зі збільшенням кута нахилу гофрування інтенсивність теплообміну поліпшується та для забезпечення передачі тепла потрібна менша загальна поверхня теплообміну.

За рахунок використання пластин з різною висотою гофрування по холодній та гарячій стороні в кожухопластинчастих теплообмінних апаратах досягнуто ефекту вирівнювання швидкостей в каналах, що призводить до істотного зменшення площі поверхні теплопередачі апарату і, як наслідок, зниження його вартості.

З отриманих результатів розрахунків пластинчастих теплообмінних апаратів типу Компаблок і кожухопластинчастих з однаковою та різною висотою гофрування зроблено висновок про те, що використання кожухопластинчастих апаратів з різною висотою гофрування мало в чому поступається використанню Компаблоків. Значна розбіжність

спостерігається тільки на двох позиціях. Це обумовлено великою різницею у витратах по гарячій та холодній стороні. В таких умовах використання багатходових теплообмінних апаратів дозволяє істотно збільшити швидкість по стороні малої витрати, що дає можливість скоротити загальну площу поверхні теплопередачі

Значення величини дотичного напруження на стінці, як величини, що відповідає за появу забруднень на поверхні теплопередачі, також приблизно збігаються, а при використанні кожухо-пластинчастих теплообмінних апаратів з різною висотою гофрування по гарячій та холодній стороні в цілому вище ніж у Компаблоках.

Проведена перевірка моделі поведінки забруднень в часі з прогнозами по забрудненню в пластинчастих теплообмінних апаратах типу Компаблок із роботи Тамаклоє та ін. Визначено, що розбіжність з даними роботи Тамаклоє становить 2 °C через два роки експлуатації.

На основі концепції «граничного забруднення» отримана крива граничних умов відкладення забруднень для температури поверхні та дотичного напруження, що дозволила визначити позиції теплообмінників, які можуть працювати без процесу відкладення забруднення протягом усього часу експлуатації. Для позицій, які схильні до забруднення поверхні теплопередачі, проведена оцінка погіршення продуктивності в часі.

Розрахунки двох типів нерозбірних пластинчастих теплообмінних апаратів та динаміка змінення температури на виході з теплообмінників при урахуванні впливу відкладення забруднень свідчать про перевагу використання кожухо-пластинчастих теплообмінників в блоках попереднього підігріву сирої нафти, де вони можуть конкурувати з багатходовими Компаблоками.

Застосовано метод розрахунку зварних пластинчастих теплообмінних апаратів для розрахунку нових теплообмінних апаратів, які потрібні для теплообмінної мережі заводу згідно енергозберігаючої реконструкції та

прогнозування його працездатності на кожній конкретній позиції з урахуванням забруднення поверхні теплопередачі.

Завод працює при змінних умовах, спричинених різними температурами навколишнього середовища та можливістю застосування двох типів нафти з різним вмістом сульфідів (усього чотири ймовірні сценарії).

З метою раціонального використання тепла і мінімізації поверхні теплопередачі запропоновано дві схеми приєднання водяних теплообмінних апаратів – паралельна та послідовна. У кожному сценарії теплоносії мають свою вхідну і вихідну температуру та теплове навантаження. Спроба підібрати єдиний апарат, який би задовольнив усім чотирьом сценаріям водночас призвела до того, що обирається апарат для потоку з великим тепловим навантаженням та великою поверхнею теплопередачі, а це в свою чергу призводить до зменшення швидкості теплоносіїв в каналах, істотному зниженню коефіцієнта теплопередачі і дотичного напруження для інших потоків.

Наведено можливість використання зайвого тепла нафтопереробного заводу для опалення та гарячого водопостачання приміщень прилеглого до заводу міста. При реконструкції системи тепlopостачання, для зниження навантажень на теплові мережі, експлуатаційні витрати на ремонт комунікацій і забезпечення ефективного регулювання відпуску тепла, застосовано двадцять компактних індивідуальних теплових пунктів з використанням нерозбірних пластинчатих теплообмінних апаратів. Наведено оцінку витрат на їх придбання та монтаж.

Ключові слова: пластинчастий теплообмінний апарат, кожухопластинчастий теплообмінний апарат, заокруглена пластина, вуглеводень, теплопередача, гідравлічний опір, дотичне напруження, забруднення поверхні теплопередачі, нафтопереробний завод.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Юзбашьян А.П. Сравнительный анализ применения пластинчатого и кожухотрубчатого теплообменного оборудования для первичного подогрева нефти / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, О.П. АРСЕНЬЕВА, А.П. ЮЗБАШЬЯН // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – №39. С. 31–39.
2. Yuzbashyan A. Mitigation of fouling in plate heat exchangers for process industries / P. Kapustenko, L. Tovazhynsky, O. Arsenyeva, A. Yuzbashyan // Chemical Engineering Transactions. – 2012. – V. 29. – P. 1441-1446.
3. Юзбашьян А.П. Интенсивность загрязнения теплообменников при подогреве нефти с учетом изменения теплофизических свойств / П.А. Капустенко, О.П. Арсеньева, А.П. Юзбашьян // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса : ОНАХТ, 2013. – Вип. 43. – Т.1. – С. 40-44.
4. Юзбашьян А.П. Обоснование выбора и прогноз работоспособности теплообменников подогрева отопительной воды на нефтеперерабатывающем заводе / О.П. Арсеньева, Петар Варбанов, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, Лидия Чучек, А.П. Юзбашьян, И.А. Бочарников // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 3. – С. 67-72.
5. Yuzbashyan A. Shell-and-Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery under the Industrial Application / O. Arsenyeva, L. Tovazhynsky, P. Kapustenko, G. Havin, A. Yuzbashyan // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – V. 45. – P. 1231-1236.
6. Yuzbashyan A. Two Types of Welded Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Industry / O. Arsenyeva, L. Tovazhynsky, P. Kapustenko, A. Yuzbashyan, P. Arsenyev // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 105. – P. 763-773.
7. Юзбашьян А.П. Проектирование теплообменной сети для снижения загрязнений при подогреве нефти / П.А. Капустенко, О.П. Арсеньева,

А.П. Юзбашьян // Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – Ч. III – С. 19.

8. Yuzbashyan A. Computer Aided Identification of Industrial Plate Heat Exchangers Thermal and Hydraulic Performance / O. Arsenyeva, L. Tovazhnyanskyu, O. Demirskiy, A. Yuzbashyan // Computer Aided Process Engineering. Graz University of Technology, 2013. – P. 45.

9. Yuzbashyan A. Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Crude Oil Preheat Trains / O. Arsenyeva, L. Tovazhnyanskyu, P. Kapustenko, G. Khavin, A. Yuzbashyan // Computer Aided Process Engineering. University of Paderborn, 2015. – P. 149.

ABSTRACT

Yuzbashyan A.P. Heat transfer intensification in welded plate heat exchangers used for hydrocarbon processing flowsheets – Qualification scientific work as a manuscript.

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

The thesis is presented for protection in a specialized Academic Council Д64.050.05 in National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute».

The work is focused on solving the actual scientific and applied problem of the heat transfer intensification in plate heat exchangers of welded design for special applications, namely the heat recovery of flowsheets in refineries and chemical plants.

The work suggests the new approaches towards estimation of heat and hydraulic behavior inside channels of plate heat exchangers with welded sealing. The proposed approach is based on the heat and momentum transfer analogy, and is applicable for corrugated plates of square and round shape. The semi-empirical correlation determining the heat transfer in the channel of plate heat exchangers, which enables to take into account the influence of the Prandtl number, is developed.

An analytical review of scientific and technical information on the features and designs of heat exchange equipment in the processing of hydrocarbons. Analyzed work methods calculation of plate heat exchangers based on the study of heat transfer and hydraulic resistance in channels of the devices.

Based on the analysis of the theoretical foundations of the process it is shown that the possibilities of intensifying heat exchange processes far from exhausted, and necessitate the development of approaches to forecasting of the

contamination layer in time with the ability to determine the thermal resistance of the contaminants in any period of operation. This will allow to ensure the stable operation of heat exchangers and to avoid stopping production due to blocking by impurities of the heat exchange channels.

Further development on the basis of three-layer analogy of heat transfer and momentum, got the approach on the prediction of thermal and hydraulic processes in plate heat exchangers collapsible design with specially corrugated square and rounded plates. Received semi-empirical correlation determining the heat transfer in the channel of plate heat exchangers considering the effect of the Prandtl number in the range from 0.7 to 1000.

The proposed physical-mathematical model of heat transfer and hydraulic resistance in welded plate heat exchangers that allow you to design single-pass sealed plate heat exchangers with rounded plates and multi-pass plate heat exchangers with square plates and to determine the optimal geometric parameters of the plates that provides the minimum surface heat transfer in the apparatus.

Based on the theory of the asymptotic nature of contamination in the channels of the plate heat exchanger, entered the further development of the method, which allows you to set the thermal resistance of the pollution on the heat transfer surface in dependence on time for different flow rates and the surface temperature of the wall. To determine the deposition rate of sediments proposed using the ratio of the shear stress, is based on the model of maximum pollution, which is represented by M. Yang and B. Kritenden, for deposits formed on the heat transfer surface by heating the crude oil. This model can be used to calculate demountable and welded plate heat exchangers with improved heat transfer and to direct smooth channels without intensification.

In work the analysis of the efficiency of energy use at one of the refineries of the IPLOM Corporation. The main focus was on crude oil pre-heat train, which is a complex branched flow passes through twenty-three shell-and-tube heat exchangers.

The refinery can work with four types of crude oil. In this dissertation presents the calculation for only one type of crude oil, with the aim of obtaining a clear idea about comparison of two types of sealed plate heat exchangers in various process conditions.

The process conditions showed a significant difference of the coolant flow rate for hot and cold flows, which for some items had reached four times. The temperature of the coolant varies from 20 to 346 °C. This allowed us to consider and to perform a comparative analysis of plate heat exchangers of the Compabloc and shell-and-plate in a wide range of operating conditions.

To use shell-and-plate heat exchangers with single-pass flows the influence of the angle of inclination of the corrugation of the surface area of the heat transfer and the total area of the plate was studied. It is established that with increase of the angle of inclination of the corrugation of the heat transfer rate is improved and to ensure heat transfer requires less total heat transfer surface.

Through the use of plates with different corrugation height on the cold and hot side in shell-and-plate heat exchangers achieved the effect of alignment of velocities in the channels, which leads to a significant decrease in the surface area of the heat transfer apparatus and, as a consequence, cost reduction.

From the obtained results of calculations of plate heat exchangers of the Compabloc and shell-and-plate with the same and different height of the corrugation concluded that the use of shell-and-plate apparatus with different height of the corrugation is not enough in what concedes to the use of Compabloc. A significant difference is observed only at two positions. This is due to the large difference in expenditure on hot and cold side. In such circumstances, the use of multi-pass heat exchangers can significantly increase the speed on the side of small flow rate, which gives the opportunity to reduce the overall surface area of heat transfer

The value of wall shear stress as the value that responsible for the appearance of contaminants on the surface of the heat transfer, also about the same,

and the use of shell-and-plate heat exchangers with different height of the corrugation at the hot and the cold side is generally higher than in Compabloc.

Conducted to validate the model behavior of contaminants in-time forecasts of pollution in plate heat exchangers of the Compabloc work Tamakloe etc. It is determined that the discrepancy with the data of work Tamakloe is about 2 °C after two years of operation.

Based on the «threshold» fouling model concept of the curve of boundary conditions of sediment contaminants to surface temperature and shear stresses, which allowed to determine the positions of the heat exchangers, which can operate without the process of fouling mitigation throughout the entire time of operation. For items, which are prone to surface contamination of heat transfer, evaluated the deterioration of performance in time.

Calculations of two types of sealed plate heat exchangers and the dynamics of change in the temperature at the outlet of the heat exchangers while considering the influence of fouling deposition indicate the advantage of using a shell-and-plate heat exchangers in blocks of preheating of crude oil, where they can compete with multi-pass Compablocs.

Applied calculation method of welded plate heat exchangers for the calculation of the new heat exchangers necessary for the heat exchanger network of a plant according to the energy saving reconstruction and prediction of its performance in each position taking into account contamination of the heat transfer surface.

The plant operates under variable conditions caused by different ambient temperatures and the ability to use two types of oil with different sulfide content (a total of four possible scenarios).

For the purpose of rational use of heat and minimize the heat transfer surface, the proposed two schemes of connection of water heat exchangers – parallel and serial. In each scenario, the coolants have their input and output temperature and heat load. Attempt to pick the only device that would satisfy all four scenarios simultaneously has led to the fact that the device is selected for a

flow with large thermal loads and a large heat transfer surface, and this in turn leads to a reduction in the rate of heat transfer in channels, significant reduction in heat transfer coefficient and shear stresses in the other threads.

Given the possibility of using excess heat refinery for heating and hot water supply of premises adjacent to the plant of the city. During the reconstruction of the heating system, to reduce the load on a heating system, operating costs for the repair of communications and ensure the efficient regulation of heat applied twenty compact individual heating units with the use of sealed plate heat exchangers. The assessment of the cost of their purchase and installation.

Key words: plate heat exchanger, shell-and-plate heat exchanger, round plate, hydrocarbon, heat transfer intensification, hydraulic resistance, wall shear stress, fouling mitigation.

REFERENCES

1. Yuzbashyan A.P. Sravnitelniy analiz primeneniya plastinchatogo i kozhuhotrubchatogo teploobmennogo oborudovaniya dlya pervichnogo podogreva nefti / L.L. Tovazhnyanskyy, P.A. Kapustenko, O.P. Arsenyeva, A.P. Yuzbashyan // Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2012. – № 39. – S. 31–39.
2. Yuzbashyan A. Mitigation of fouling in plate heat exchangers for process industries / P. Kapustenko, L. Tovazhnynsky, O. Arsenyeva, A. Yuzbashyan // Chemical Engineering Transactions. – 2012. – V. 29. – P. 1441-1446.
3. Yuzbashyan A.P. Intensivnost zagryazneniya teploobmennikov pri podogreve nefti s uchetom izmeneniya teplofizicheskikh svoystv / P.A. Kapustenko, O.P. Arsenyeva, A.P. Yuzbashyan // Naukovi pratsi ONAHT. – Odessa : ONAHT, 2013. – Vip. 43. – T. 1. – S. 40–44.
4. Yuzbashyan A.P. Obosnovanie vibora i prognoz rabotosposobnosti teploobmennikov podogreva otopitelnoy vodi na neftepererabativayushem zavode / O.P. Arsenyeva, Petar Varbanov, P.A. Kapustenko, G.L. Havin, Lidiya Chuchek,

A.P. Yuzbashyan, I.A. Bocharnikov // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. – № 3. – S. 67–72.

5. Yuzbashyan A. Shell-and-Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery under the Industrial Application / O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, G. Havin, A. Yuzbashyan // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – V. 45. – P. 1231-1236.

6. Yuzbashyan A. Two Types of Welded Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Industry / O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, A. Yuzbashyan, P. Arsenyev // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 105. – P. 763-773.

7. Yuzbashyan A.P. Proektirovanie teploobmennoy seti dlya snizheniya zagryazneniyi pri podogreve nefi / P.A. Kapustenko, O.P. Arsenyeva, A.P. Yuzbashyan // Tezi dopovidey XXI Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi «Informatsiyini tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorovya». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2013. – № 3. – S. 19.

8. Yuzbashyan A. Computer Aided Identification of Industrial Plate Heat Exchangers Thermal and Hydraulic Performance / O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, O. Demirskiy, A. Yuzbashyan // Computer Aided Process Engineering. Graz University of Technology, 2013. – P. 45.

9. Yuzbashyan A. Plate Heat Exchangers for Efficient Heat Recovery in Crude Oil Preheat Trains / O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, G. Havin, A. Yuzbashyan // Computer Aided Process Engineering. University of Paderborn, 2015. – P. 149.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ВУГЛЕВОДНІВ..	13
1.1. Особливості експлуатації теплообмінного обладнання при переробці вуглеводнів.....	13
1.2. Види теплообмінного обладнання, яке використовується у процесах переробки вуглеводнів.....	14
1.2.1. Кожухотрубчасті теплообмінні апарати.....	15
1.2.2. Пластинчасті теплообмінні апарати	17
1.3. Методика розрахунку пластинчастих теплообмінних апаратів.....	24
1.3.1. Гідравлічний опір в каналах ПТА.....	26
1.3.2. Теплопередача в каналах ПТА.....	30
1.3.3. Забруднення поверхні теплопередачі в ПТА.....	34
Висновки за розділом 1.....	41
РОЗДІЛ 2 ТЕРМОГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПТА.....	43
2.1. Розрахунок теплопередачі і перепаду тиску в каналах зварного ПТА.....	44
2.1.1. Перепад тиску в зварних ПТА.....	44
2.1.2. Теплопередача в зварних ПТА.....	45
2.1.2.1. Аналогія переносу тепла та імпульсу в каналах зварних ПТА.....	45
2.1.2.2. Порівняння даних моделювання з результатами експериментів і уточнення емпіричних коефіцієнтів.....	53
2.2. Розрахунок зварних ПТА типу Компаблок.....	60
2.3. Розрахунок зварних ПТА з заокругленою пластиною.....	64
2.4. Забруднення зварних ПТА.....	67
Висновки за розділом 2.....	74

РОЗДІЛ 3 ВИКОРИСТАННЯ ЗВАРНИХ ПТА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ПЕРЕРОБКИ ВУГЛЕВОДНІВ.....	75
3.1. Опис технологічного процесу.....	75
3.2. Розрахунок зварного пластинчастого теплообмінного апарату типу Компаблок.....	80
3.3. Особливості проектування кожухо-пластинчастих теплообмінних апаратів.....	81
3.3.1. Вплив геометричних параметрів гофрування на площу поверхні теплообміну апарату.....	85
3.3.2. Розрахунок площі поверхні теплопередачі теплообмінника з різною площею поперечного перетину каналів.....	88
3.3.3. Визначення висоти гофрування, що відповідає мінімальній площі теплообміну.....	94
3.4. Порівняльний аналіз теплообмінників типу Компаблок і кожухо-пластинчастого для застосування в блоці підігріву сирої нафти.....	95
3.5. Прогнозування забруднення поверхні теплообміну зварних ПТА для блоку підігріву сирої нафти.....	97
Висновки за розділом 3.....	107
РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ НЕРОЗБІРНИХ ПТА ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОГО ТЕПЛА НАФТОПЕРЕРОБНОГО ЗАВОДУ.....	109
4.1. Енергоефективна реконструкція системи теплообміну в технологічному процесі переробки	109
4.2. Паяні ПТА для використання тепла в системі тепlopостачання.....	120
Висновки за розділом 4.....	124
ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128
ДОДАТКИ.....	142