

АНОТАЦІЯ

Арсеньєв П.Ю. Дослідження процесів теплопередачі у зварних багатоходових пластинчатих теплообмінних апаратах для хімічної промисловості. 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, 2020 р.

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

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі підвищення енергетичної ефективності підприємств за рахунок підвищення ефективності процесу рекуперації тепла газів промислових процесів з використанням зварних багатоходових пластинчатих теплообмінних апаратів.

Проведено аналітичний огляд науково-технічної інформації щодо підвищення енергетичної ефективності підприємств хімічної промисловості за рахунок рекуперації тепла в технологічних процесах. Показано, що підвищити ефект інтеграції теплових процесів за рахунок збільшення рівня рекуперації тепла дозволяє використання компактних теплообмінників з інтенсифікованою тепловіддачею, таких як пластинчасті теплообмінники. Проаналізовано можливості удосконалення процесу виробництва аміаку за рахунок рекуперації теплової енергії в колонах синтезу. Сформульовано основні вимоги до теплообмінного обладнання для роботи в умовах високого тиску та температур агрегатів синтезу аміаку. Проаналізовано роботи з методами розрахунку пластинчастих теплообмінних апаратів з інтенсифікованим процесом теплопередачі.

На базі аналізу теоретичних основ процесу показано, що можливості інтенсифікації теплообмінних процесів в каналах пластинчастих теплообмінників далеко не вичерпані та потребують розвинення підходів щодо прогнозування роботи цих апаратів в умовах рекуперації тепла газових потоків та розробки надійних та точних методів оптимального розрахунку на основі експериментальних та теоретичних досліджень з використанням методів математичного моделювання.

Виконано аналіз турбулентного переносу тепла в каналах складної геометричної форми пластинчатих теплообмінних апаратів з перехресним рухом газових теплоносіїв в каналах. Аналіз виконано з залученням аналогії переносу тепла та імпульсу. З використанням трьох шарової моделі турбулентного потоку отримане рівняння для розрахунку тепловіддачі по даним про гідравлічний опір гофрованого поля каналів пластинчатого теплообмінника. Доведено що показник ступеня при числі Прандтля в якості множника в кореляційних рівняннях для розрахунку тепловіддачі в газових потоках в каналах пластинчатих теплообмінниках повинен бути більшим чим для потоків рідин. Для діапазону чисел Прандтля від 0,5 до 7 рекомендовано значення цього ступеня $s = 0,5$.

Наведено опис експериментального стенду та моделі зварного пластинчатого теплообмінника для дослідження процесу теплопередачі та втрат тиску при перехресному русі теплоносіїв в каналах сітчасто-потокового типу утворених круглими гофрованими пластинами. Стенд та його устаткування контрольними та вимірювальними пристроями дозволяє проводити дослідження в достатньому діапазоні зміни основних параметрів процесу та вимірювання розходів, температур та тиску теплоносіїв з достатньою точністю. Експериментальне дослідження теплообміну і падіння тиску в моделі зварного пластинчатого теплообмінника підтвердило для випадку поперечного руху теплоносіїв в апараті справедливність виразів, запропонованих для каналів пластинчатих теплообмінників сітчасто - потокового типу різної геометрії. Також оцінено залежність ефективності теплопередачі (ϵ) від числа одиниць переносу тепла (NTU) в одному ході пластинчатого теплообмінника з перехресним рухом теплоносіїв. Запропоноване рівняння може використовуватися при розрахунку пластинчатих теплообмінників із загальним зустрічним та перехресним рухом теплоносіїв усередині окремих ходів. Запропоновано рівняння для розрахунку втрат тиску в каналі зварного пластинчатого теплообмінника з урахуванням втрат тиску на основному гофрованому полі та локального гідравлічного опору на вході та виході каналу. Підтверджено адекватність запропонованих рівнянь для розрахунку ефективності теплопередачі та втрат тиску в каналах зварного пластинчатого теплообмінника з круглими пластинами та можливість їх використання в інженерних розрахунках пластинчатих теплообмінників.

Розроблено узагальнену математичну модель процесу теплопередачі між однофазними теплоносіями в багатоходовому зварному пластинчатому теплообмінному апараті з перехресно-протитоковим рухом теплоносіїв.

Запропонована методика розрахунку дозволяє варіювати тепло-гідравлічні характеристики пакетів пластин з рівнем дискретності, рівним одній пластині в пакеті. Вона реалізована у вигляді програмного забезпечення для розрахунку зварних пластинчатих теплообмінників з перехресно-поточною схемою руху теплоносіїв на персональному комп'ютері. Розроблено спеціалізовану математичну модель процесу теплопередачі між однофазними теплоносіями в багатоходовому зварному пластинчатому теплообмінному апарату з перехресно-протитоківим рухом теплоносіїв з круглими пластинами для колони синтезу аміаку. Модель дійсна для багатоходових теплообмінників з несиметричним числом ходів в модельованому теплообміннику з відношенням чисел ходів кратнім двом. Модель корисна для розрахунку процесу теплопередачі в експериментальному зразку зварного пластинчатого теплообмінника виготовленого для випробувань в промисловій колоні синтезу аміаку. Розроблено спеціалізовану придатну для виконання оптимізаційних розрахунків модель роботи багатоходового апарату з симетричним розташуванням ходів теплоносіїв. Математична модель описує процес теплопередачі між однофазними теплоносіями в зварному пластинчатому теплообмінному апарату з перехресно-протитоківим рухом теплоносіїв з круглими пластинами для колони синтезу аміаку. Одержано рівняння розрахунку найкращої швидкості течії теплоносіїв, яка забезпечує повне використання заданого падіння тиску гарячого теплоносія при виконанні заданого теплового навантаження теплообмінника.

Виконано аналіз результатів випробувань зразка зварного пластинчатого теплообмінника встановленого в промисловій колоні синтезу аміаку на заводі з виробництва аміаку. Наведено опис колони і експериментального зразка теплообмінника. 2. Результати промислових випробувань підтвердили придатність зварного пластинчатого теплообмінника для роботи в умовах тиску до 32 МПа и температур до 520 °С колони синтезу аміаку. В промислових умовах підтверджено адекватність розробленої математичної моделі та одержаних в лабораторних іспитах рівнянь покладених в основу розробки її розробки. Показано збільшення на 15 % продуктивності колони по аміаку за рахунок збільшення завантаження каталізатора в колоні та підтверджено переваги використання пластинчатого теплообмінника порівняно з кожух-трубним при роботі в однакових умовах. При дослідженні апарату після двох років його роботи, на протяз часу повного пробігу колони, ніяких залишків старіння каталізатору на поверхні пластин не було виявлено. Це вказує на можливість використання теплообмінників з симетричною

схемою ходів теплоносіїв, оскільки несиметрична схема, розроблена для подолання цього явища дає значне зменшення середнього температурного напору і ефективності теплопередачі.

Результати випробувань дозволяють рекомендувати поширення використання зварних пластинчатих теплообмінників розробленої конструкції для колон синтезу аміаку.

Розроблено алгоритм оптимізації на базі математичної моделі процесу теплообміну в каналах зварних пластинчатих теплообмінників колон синтезу аміаку з рівною кількістю ходів для обох теплоносіїв. Це дозволяє оцінити оптимальні параметри конструкції теплообмінника для заданих умов експлуатації, орієнтуючись на мінімальну площу теплопередачі в якості критерію оптимізації. Була отримана оптимальна конструкція зварного пластинчатого теплообмінника для роботи в колоні синтезу аміаку. Найдешевша конструкція з розглянутою формою гофрування пластин має площу поверхні теплопередачі рівну 68,78 м² при відстані між пластинами 3,3 мм, з трьома ходами для руху холодного та гарячого теплоносіїв і протитечією руху потоків. Однак найменший теплообмінник, зібраний з існуючих пластин з фіксованою висотою гофри 4 мм, повинен мати чотири проходи і площу теплопередачі 85,12 м², що на 25% більше, але з запасом 3,1% для теплового навантаження. Розроблена математична модель і алгоритм оптимізації можуть бути використані для оптимального розрахунку геометрії пластин зварних пластинчатих теплообмінників для колон синтезу аміаку різних діаметрів та з різним навантаженням по синтез газу і різними температурами в зоні хімічної реакції синтезу. Математична модель і алгоритм оптимізації можуть також бути використані для оптимального розрахунку теплообмінників із існуючих пластин круглої форми з різним розміщенням гофрів на полі пластини.

Ключові слова: пластинчастий теплообмінний апарат, теплопередача, кругла гофрована пластина, гідравлічний опір, дотичне напруження, математична модель, оптимальний розрахунок

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Tovazhnyanskyy, L., Arsenyeva, O., Perevertaylenko, O., Kusakov, S., Vasilenko, A., Arsenyev, P. and Yuzbashyan, A., 2019. Дослідження

тепловіддачі та гідравлічного опору у стрічково-поточних каналах панельних пластинчастих теплообмінників. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, (21), pp.10-14.

2. Арсеньев П., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО А. Ю., КАПУСТЕНКО П. А., Арсеньева О. Математическая модель сварного пластинчатого теплообменного аппарата для колонны синтеза аммиака // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2019 – 1 – С. 23- 32.

3. Tovazhnyansky L. L., Kapustenko P., Perevertaylenko O. Y., Khavin G., Arsenyeva O., Arsenyev P. Y., Khusanov A. E. Heat transfer and pressure drop in cross-flow welded plate heat exchanger for ammonia synthesis column // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Т. 52. – С. 553-558.

4. Arsenyeva, O. P., Tovazhnyansky, L. L., Kapustenko, P. O., Khavin, G. L., Yuzbashyan, A. P., & Arsenyev, P. Y. , 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. Applied Thermal Engineering, 105, 763-773.

5. Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O., Vasilenko, O.A., Kusakov, S.K., Arsenyeva, O.P. and Arsenyev, P.Y., 2018. Mathematical model of a plate heat exchanger for condensation of steam in the presence of non-condensing gas. Bulgarian Chemical Communications, 50, pp.76-82.

6. Tovazhnyansky, L., Klemeš, J.J., Kapustenko, P., Arsenyeva, O., Perevertaylenko, O. and Arsenyev, P., 2020. Optimal Design of Welded Plate Heat Exchanger for Ammonia Synthesis Column: An Experimental Study with Mathematical Optimisation. Energies, 13(11), p.2847.

7. Арсеньев, П.Ю., 2017. Теплопередача при перекрестном движении теплоносителей в каналах пластинчатого теплообменника. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2017 – 4 – С. 11- 14

8. Арсеньев, П.Ю., ТОВАЖНЯНСКИЙ, Л.Л., ПЕРЦЕВ, Л.П., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО, О.Ю., КАПУСТЕНКО, П.О. and Арсеньева, О.П., 2019. Оптимальный расчет сварного пластинчатого теплообменника колонны синтеза аммиака. Інтегровані технології та енергозбереження 2019, 3, С. 3 – 15.

9. Арсеньев, П.Ю., ТОВАЖНЯНСКИЙ, Л.Л. and Арсеньева, О.П., 2019. Критерии для сравнения модифицированных каналов в теплообменных аппаратах при использовании пассивных методов интенсификации теплопередачи. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2019 – 4 – С. 3- 13

10. Kapustenko, P.O., Klemeš, J.J., Matsegora, O.I., Arsenyev, P.Y. and Arsenyeva, O.P., 2019. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in Plate Heat Exchanger. *Energy*, 174, pp.1049-1059.
11. Arsenyev P.Y., Tovazhnyansky L., Klemes J.J., Arsenyeva O.P., Perevertaylenko O.Y., Kapustenko P.O., 2019, The Optimal Design of Welded Plate Heat Exchanger with Intensified Heat Transfer for Ammonia Synthesis Column, *Chemical Engineering Transactions*, 76, 61-66 DOI:10.3303/CET1976011
12. Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Perevertaylenko O.Y., Arsenyeva O.P., Arsenyev P.Y., Khusanov A.E., 2017, Mathematical model of heavy duty welded plate heat exchanger and its validation in industry, *Chemical Engineering Transactions*, 61 1483-1488 DOI:10.3303/CET1761245

ABSTRACT

Arsenyev P.Yu. Investigation of heat transfer processes in welded multi pass plate heat exchangers for chemical industry. – 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, 2020.

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

The dissertation is dedicated to the important scientific and practical problem of the improvement of the energy efficiency of production facilities by the enhancement of the efficiency of the industrial processes of gases heat recuperation by the use of the multi pass welded plate heat exchangers.

An analytical survey of the scientific and technical information was carried out on the improvement of the energy efficiency of the chemical industry by the heat recovery in the technological processes. It is shown that the improvement of the effect of integration of thermal processes by the improvement of the level of heat recovery is possible with the use of compact heat exchangers with intensive heat transfer, such as plate heat exchanger. Analysed are the possibilities for improving the process of the ammonia production by the recovery of heat energy in the columns for synthesis. The main requirements are formulated for heat exchange equipment operating at the high pressure and temperature conditions of the units for the ammonia synthesis. Works with methods of calculation of plate heat exchangers with the intensified process of heat transfer are analysed.

Based on the analysis of the theoretical foundations of the process it is shown that the possibilities of intensification of heat exchange processes in the channels of plate heat exchangers are far from exhausted and require the development of approaches to predict the operation of these devices in heat recovery of gas flows and development of reliable and accurate methods using methods of mathematical modelling.

The analysis of turbulent heat transfer in the channels of complex geometric shape of plate heat exchangers with cross movement of gaseous heat carriers in the channels is performed. The analysis was performed using the analogy of heat

transfer and momentum. Using a three-layer model of turbulent flow, the equation for calculating heat transfer based on the data on the hydraulic resistance of the corrugated field of the channels of the plate heat exchanger is obtained. It is proved that the exponent at the Prandtl number as a multiplier in the correlation equations for the calculation of heat transfer in gas flows in the channels of plate heat exchangers must be greater than that for liquid flows. For the range of Prandtl numbers from 0,5 to 7, the recommended value of this exponent is $c = 0.5$.

The description of the experimental stand and model of the welded plate heat exchanger for research of process of heat transfer and pressure losses at cross movement of heat carriers in channels of mesh-flow type formed by round corrugated plates is presented. The stand and its equipment with control and measuring devices allows to carry out researches in a sufficient range of change of the basic parameters of process and measurement of flow rates, temperatures and pressure of heat carriers with sufficient accuracy. Experimental study of heat transfer and pressure drop in the model of a welded plate heat exchanger confirmed for the case of transverse motion of heat carriers in the apparatus the validity of the expressions proposed for the channels of plate heat exchangers mesh-flow type of different geometry. The dependence of heat transfer efficiency (ε) on the number of heat transfer units (NTU) in one pass of a plate heat exchanger with cross movement of heat carriers is also estimated. The proposed equation can be used in the calculation of plate heat exchangers with total counter and cross motion of coolants within individual courses. An equation for calculating the pressure loss in the channel of a welded plate heat exchanger taking into account the pressure loss in the main corrugated field and the local hydraulic resistance at the inlet and outlet of the channel is proposed. The adequacy of the proposed equations for the calculation of heat transfer efficiency and pressure losses in the channels of a welded plate heat exchanger with round plates and the possibility of their use in engineering calculations of plate heat exchangers are confirmed.

A generalized mathematical model of the heat transfer process between single-phase heat carriers in a multi-pass welded plate heat exchanger with cross-counter current motion of heat carriers has been developed. The proposed calculation method allows to vary the thermal and hydraulic characteristics of the packages of plates with a level of discreteness equal to one plate in the package. It is implemented in the form of software for the calculation of welded plate heat exchangers with cross-flow scheme of coolant movement on a personal computer. A specialized mathematical model of the heat transfer process between single-phase heat carriers in a multi-pass welded plate heat exchanger with cross-counter current motion of heat carriers with round plates for an ammonia synthesis column

has been developed. The model is valid for multi-pass heat exchangers with an asymmetric number of passes in a simulated heat exchanger with a ratio of the number of passes multiples of two. The model is useful for calculating the heat transfer process in an experimental sample of a welded plate heat exchanger made for testing in an industrial ammonia synthesis column. A specialized model of operation of a multi-pass apparatus with a symmetrical arrangement of heat carriers passes suitable for optimization calculations has been developed. The mathematical model describes the process of heat transfer between single-phase heat carriers in a welded plate heat exchanger of round plates with cross-counter current motion of heat carriers for the ammonia synthesis column. The equation is proposed for calculating the best flow rate of heat carriers, which provides full use of a given pressure drop of hot coolant when performing a given heat load of the heat exchanger.

The analysis of test results of a sample of a welded plate heat exchanger installed in an industrial ammonia synthesis column at an ammonia production plant is performed. The description of the column and the experimental sample of the heat exchanger is given. The results of industrial tests confirmed the suitability of the welded plate heat exchanger for operation at pressures up to 32 MPa and temperatures up to 520 ° C of the ammonia synthesis column. In industrial conditions, the adequacy of the developed mathematical model and the equations obtained in laboratory exams, which are the basis for the model development are confirmed. A 15% increase in the productivity of the ammonia column due to the increase of the catalyst load in the column is shown and the advantages of using a plate heat exchanger in comparison with a tubular heat exchanger when operating under the same conditions are confirmed. In the study of the apparatus after two years of its operation, during the time of full run of the column, no remnants of aging of the catalyst on the surface of the plates were detected. This indicates the possibility of using heat exchangers with a symmetrical scheme of coolant flows, because the asymmetrical scheme designed to overcome this phenomenon gives a significant reduction in average temperature pressure and heat transfer efficiency. The test results allow to recommend the use of welded plate heat exchangers of the developed design for ammonia synthesis columns.

An algorithm for optimization based on a mathematical model of the heat exchange process in the channels of welded plate heat exchangers of ammonia synthesis columns with an equal number of passes for both heat carriers is developed. This allows to estimate the optimal design parameters of the heat exchanger for the given operating conditions, focusing on the minimum heat transfer area as an optimization criterion. The optimal design of the welded plate

heat exchanger for operation in the ammonia synthesis column was obtained. The cheapest design with the considered form of corrugation of plates has the area of a surface of heat transfer equal 68,78 m² at distance between plates of 3,3 mm, with three passes for movement of cold and hot heat carriers and counter current of movement of streams. However, the smallest heat exchanger assembled from existing plates with a fixed corrugation height of 4 mm must have four passages and a heat transfer area of 85.12 m², which is 25% more, but with a margin of 3.1% for heat load. The developed mathematical model and optimization algorithm can be used for optimal calculation of plate geometry of welded plate heat exchangers for ammonia synthesis columns of different diameters and with different load on gas synthesis and different temperatures in the zone of chemical reaction of synthesis. The mathematical model and optimization algorithm can also be used for optimal calculation of heat exchangers from existing round plates with different placement of corrugations on the plate field.

Keywords: plate heat exchanger, heat transfer, round corrugated plate, hydraulic resistance, tangential stress, mathematical model, optimal calculation

LIST OF CANDIDATE PUBLICATIONS

1. Tovazhnyansky, L., Arsenyeva, O., Perevertaylenko, O., Kusakov, S., Vasilenko, A., Arsenyev, P. and Yuzbashyan, A., 2019. Дослідження тепловіддачі та гідравлічного опору у стрічково-поточних каналах панельних пластинчастих теплообмінників. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, (21), pp.10-14.
2. Арсеньев П., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л. Л., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО А. Ю., КАПУСТЕНКО П. А., Арсеньева О. Математическая модель сварного пластинчатого теплообменного аппарата для колонны синтеза аммиака // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2019 – 1 – С. 23- 32.
3. Tovazhnyansky L. L., Kapustenko P., Perevertaylenko O. Y., Khavin G., Arsenyeva O., Arsenyev P. Y., Khusanov A. E. Heat transfer and pressure drop in cross-flow welded plate heat exchanger for ammonia synthesis column // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Т. 52. – С. 553-558.
4. Arsenyeva, O. P., Tovazhnyansky, L. L., Kapustenko, P. O., Khavin, G. L., Yuzbashyan, A. P., & Arsenyev, P. Y. , 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. Applied Thermal Engineering, 105, 763-773.
5. Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O., Vasilenko, O.A., Kusakov, S.K., Arsenyeva, O.P. and Arsenyev, P.Y., 2018. Mathematical model of a plate heat exchanger for condensation of steam in the presence of non-condensing gas. Bulgarian Chemical Communications, 50, pp.76-82.
6. Tovazhnyansky, L., Klemeš, J.J., Kapustenko, P., Arsenyeva, O., Perevertaylenko, O. and Arsenyev, P., 2020. Optimal Design of Welded Plate Heat Exchanger for Ammonia Synthesis Column: An Experimental Study with Mathematical Optimisation. Energies, 13(11), p.2847.

7. Арсеньєв, П.Ю., 2017. Теплопередача при перекрестном движении теплоносителей в каналах пластинчатого теплообменника. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2017 – 4 – С. 11- 14
8. Арсеньєв, П.Ю., Товажнянський, Л.Л., Перцев, Л.П., Перевертайленко, О.Ю., Капустенко, П.О. and Арсеньєва, О.П., 2019. Оптимальний розрахунок зварного пластинчастого теплообмінника колони синтезу аміаку. Інтегровані технології та енергозбереження 2019, 3, С. 3 – 15.
9. Арсеньєв, П.Ю., Товажнянський, Л.Л. and Арсеньєва, О.П., 2019. Критерії для порівняння модифікованих каналів в теплообмінних апаратах при використанні пасивних методів інтенсифікації теплопередачі. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2019 – 4 – С. 3- 13
10. Kapustenko, P.O., Klemeš, J.J., Matsegora, O.I., Arsenyev, P.Y. and Arsenyeva, O.P., 2019. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in Plate Heat Exchanger. Energy, 174, pp.1049-1059.
11. Tovazhnyansky L. L., Kapustenko P. O., Perevertaylenko O. Y., Khavin G. L., Arsenyeva O. P., Arsenyev P. Y., 2016, Heat transfer and pressure drop in cross-flow welded plate heat exchanger for ammonia synthesis column, Chemical Engineering Transactions, 52, 553-558 DOI:10.3303/CET1652093
12. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Perevertaylenko O.Y., Arsenyeva O.P., Arsenyev P.Y., Khusanov A.E., 2017, Mathematical model of heavy duty welded plate heat exchanger and its validation in industry, Chemical Engineering Transactions, 61 1483-1488 DOI:10.3303/CET1761245

