

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кусаков Сергій Костянтинович

УДК 66.048.914

ДИСЕРТАЦІЯ

**Дослідження теплових і масообмінних процесів при утилізації тепла
викидних газів промисловості в пластинчатих теплообмінних апаратах**

161 – Хімічні технології та інженерія.

16 – Хімічна та біоінженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 Кусаков С.К.

Науковий керівник: Капустенко Петро Олексійович,

кандидат технічних наук, професор

*Заявляючість за змістом Харків – 2020
з афідавом проміжним
дисертації засвідчую
вчений секретар
Проф. Заковеробий О.
08.04.2021*



АНОТАЦІЯ

Кусаков С.К. Дослідження теплових і масообмінних процесів при утилізації тепла викидних газів промисловості в пластинчатих теплообмінних апаратах. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. - (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 раді ДФ 64.050.046. в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі підвищення енергетичної ефективності підприємств за рахунок процесу утилізації тепла низького температурного потенціалу викидних газів промислових процесів з використанням пластинчастих теплообмінних апаратів розбірної конструкції.

Проведено аналітичний огляд науково-технічної інформації щодо промислових та поновлюваних природних джерел тепла низького потенціалу та особливостей їх використання. Сформульовано основні вимоги до теплообмінного обладнання для використання тепла низького потенціалу і доведено переваги пластинчатих теплообмінних апаратів при реалізації цих процесів. Проаналізовано роботи з методами розрахунку пластинчастих теплообмінних апаратів для утилізації тепла газових потоків на основі дослідження тепло - та масовіддачі у паро - газовій фазі, тепловіддачі у плівці конденсату, тепловіддачі у однофазному потоці охолоджуючої субстанції, гідравлічного опору однофазному та двофазному потоку в каналах апаратів.

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

Наведено опис експериментального стенду для дослідження процесу конденсації водяної пари із суміші з повітрям у моделях гофрованого поля каналів між пластинами пластинчастого теплообмінника. Стенд дозволяє проведення експериментів в достатньому для вивчення процесів утилізації скидного тепла діапазоні зміни параметрів паро - повітряної суміші та охолоджуючої води: температура охолоджуючої води 20–95 °С; абсолютний тиск суміші водяної пари з повітрям 0,101–0,42 МПа; швидкість охолоджуючої води в каналах 0,11–1,1 м/с; масова швидкість суміші пари та повітря 4–85 г/(м²с); об'ємна частка повітря у суміші на вході до каналу 0,03–0,85. Вимірюються температури потоків а також тиск на вході та виході з каналів, розходи потоків, локальні температури потоків у шести точках вздовж каналів. Експерименти проведені на трьох зразках моделей каналів з однаковим кутом нахилу гофрів до напрямку течії 60° та різним шагом геометрично подібних гофрів: 5; 7,5 та 10 мм. Це дозволило дослідити вплив масштабного фактору на розрахункові рівняння в умовах течії конденсаційного двофазного потоку у каналах складної геометричної форми пластинчастих теплообмінників.

Розроблено математичну модель процесу конденсації пари із суміші з повітрям на гофрованому полі каналів пластинчастих теплообмінників та в експериментальних моделях гофрованого поля каналів використаних в роботі. Математична модель складається із системи одномірних

диференціальних рівнянь відповідно до локальних балансів тепла та маси на малих ділянках каналів вздовж поверхні теплопередачі. Система доповнена кореляційними співвідношеннями для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та тертя у однофазному потоці в каналах пластинчастих теплообмінників дослідженої геометричної форми гофрування. Кореляційні співвідношення для тепло – та масообміну, так само як для втрат тиску двофазного потоку, базуються на кореляціях однофазного потоку з використанням різних теоретичних положень по впливу поперечного потоку маси до передаючої тепло поверхні та структури двофазного потоку в каналі. Замикають систему рівнянь алгебраїчні співвідношення для розрахунку температури та тиску насичення пари за умов рівноваги газової та рідинної фаз, розрахунку теплофізичних властивостей компонентів та сумішей приймаючих участь в процесі. Рішення математичної моделі реалізоване у вигляді програмного забезпечення для персонального комп'ютера з використанням чисельного методу кінцевих різниць. Рішення моделі дозволяє отримати основні параметри процесу на гофрованому полі в каналах пластинчастих теплообмінних апаратів та простежити розвиток процесу вздовж каналів.

Розроблено методику ідентифікації параметрів рівнянь для розрахунку локальних коефіцієнтів масовіддачі, тепловіддачі та втрат тиску в двофазному потоці на базі статистичного порівняння результатів математичного моделювання інтегральних характеристик процесу та їх значень отриманих в експериментальних дослідженнях. На основі цієї методики отримано формулу розрахунку впливу поперечного потоку маси на локальні коефіцієнти масовіддачі враховуючу теоретичну модель застійного шару та вплив зміни щільності поперек потоку згідно теорії турбулентного прикордонного шару з відсмоктуванням. Також рекомендовано формулу розрахунку локальних коефіцієнтів конвекційної тепловіддачі в умовах впливу поперечного потоку маси. Показана достатня

для розрахунків конденсації пари в присутності неконденсованого газу точність рівняння запропонованого на базі дисперсної кільцевої моделі течії для термічного опору плівки конденсату в каналах пластинчастих теплообмінників.

Одержано рівняння для розрахунку втрат тиску у двофазному потоці з конденсацією парової компоненти парогазової суміші з урахуванням зміни структури двофазного потоку вздовж каналу. На початкових ділянках каналу структура потоку відповідає моделі роздільної течії фаз запропонованої Локхартом та Мартінееллі. Зі зростанням розходу сконденсованої рідкої фази структура потоку стає більш близькою до дисперсної кільцевої моделі течії. Встановлено границю переходу між цими режимами і запропоновані рівняння для розрахунку локальних втрат тиску у кожному з таких режимів. Одержане рівняння для дисперсної кільцевої моделі течії враховує також вплив поверхневого натягу рідини у двофазному потоці на втрати тиску за рахунок введення залежності від критерія Вебера. Це дозволяє використовувати це рівняння для каналів з однаковою формою гофрування пластин але з різним масштабним фактором гофрування.

Розроблено математичну модель промислового пластинчастого теплообмінника для утилізації тепла конденсаційних газових потоків на базі пластин серійного виробництва. Модель базується на розгляді каналів утворених між пластинами як складених із зон розподілу потоків теплоносіїв на вході та виході та основного гофрованого поля. Зроблено припущення що основні процеси теплопередачі та конденсації пари протікають на цьому гофрованому полі а вплив зон розподілу потоків може бути враховано як зони локального гідравлічного опору. У випадку двофазного потоку на виході з теплообмінника необхідно введення поправки розрахованої по методу розробленому для основного гофрованого поля каналів. На базі математичної моделі розроблено метод розрахунку пластинчастих

теплообмінників утилізації тепла викидних газових потоків. Метод дозволяє вести розрахунок апаратів з промислово виготовлених пластин по даним про їх геометричні розміри та характеристики гофрування на їх поверхні.

Розроблено методику оптимального використання тепла, утилізованого від конденсаційних газових потоків, з залученням методів інтеграції теплових процесів заснованих на теорії пінч аналізу. Гаряча складова крива процесу в конденсаційному газовому потоці будується враховуючи умови рівноваги пари як реального газу та утвореного конденсату. Інтеграція процесу охолодження конденсаційної газової суміші з потоками які використовують утилізоване тепло виконується з встановленням оптимальної структури системи теплообмінників. Показано доцільність розподілу потоку конденсаційної газової суміші на газову та рідку частини після досягнення певного рівня температури. Запропонований і розроблений метод оптимального визначення поверхні теплопередачі системи встановлених пластинчастих теплообмінників за критерієм приведених витрат, який дозволяє реалізувати найбільшу техніко-економічну ефективність роботи системи. Метод проілюстровано на конкретному прикладі утилізації тепла газів які надходять після процесу сушіння.

Розроблено схему установки для утилізації тепла викидних газів після процесу сушки тютюну на тютюновій фабриці. Визначено основні потоки на підприємстві які можна використати для прийому вилученого тепла. Це потоки системи опалювання та гарячого водопостачання підприємства. Розраховані оптимальні теплообмінні пластинчасті апарати та виконано підбір апаратури для регулювання процесу та його реалізації в умовах працюючого виробництва. Установку виготовлено і змонтовано на діючій тютюновій фабриці. Проведено випробування пілотного пластинчастого теплообмінника утилізації тепла викидних газів процесу сушіння тютюну.

Одержані результати підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та точність розробленого методу розрахунку достатню для інженерного користування. Використання розробленої утилізаційної установки з пластинчатим теплообмінником дозволило залучити на потреби опалення підприємства більше 600 кВт теплової енергії, яка до того просто викидалася у навколишнє середовище. Це призвело до скорочення об'ємів спалюваного природного газу використаного для опалення приміщень.

Ключові слова: пластинчастий теплообмінний апарат, конденсація пари, неконденсований газ, масовіддача, тепловіддача, втрата тиску, двофазний потік, приведені витрати, розрахунок системи теплообмінників, енергозбереження.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Кусаков С.К. Разработка системы утилизации тепла вторичного пара отделения сушки табака с использованием энергоэффективного пластинчатого теплообменного оборудования / Гарев А.О., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.А., Арсеньева О.П., Клемеш Й, Кусаков С.К., Анохин П., Чучек Л. // Інтегровані технології та енергозбереження– Харків: НТУ «ХП», 2014. - №4. – С. 20-25

2. Sergey K.Kusakov The Development of Heat Substation for Drying Waste Heat Utilization / Andrii O. Gariev, Jiří J. Klemeš, Sergey.K.Kusakov, Leonid L. Tovazhnyansky, Petr Anokhind, Petro O. Kapustenko, Olga P. Arsenyeva, Lidija Čuček // Chemical Engineering Transactions 2014. – V. 39. – P. 1405-1410.

3. Sergey K.Kusakov The Mathematical Modelling of Fouling Formation Along PHE Heat Transfer Surface / Petro O. Kapustenko, Olga P. Arsenyeva, Olexandr I. Matsegora, Sergey K. Kusakov, Vladimir I. Tovazhnianskyi // Chemical Engineering Transactions 2017. – V. 61. – P. 247-252.

4. Sergey K.Kusakov Mathematical Model of Plate Heat Exchanger for Utilisation of Waste Heat from Condensable Gaseous Streams / Petro O. Kapustenko, Oleksiy V. Demirskiy, Leonid L. Tovazhnyanskyy, Jiří J. Klemeš, Oleksandr A. Vasilenko, Sergiy K. Kusakov, Olga P. Arsenyeva, Alisher E. Khusanov // Chemical Engineering Transactions 2018. – V. 70. – P. 2059-2054.

5. Кусаков С.К. Математическая модель пластинчатого теплообменника для утилизации тепла конденсируемых газовых потоков / А. А. Василенко, С. К. Кусаков, И. А. Бочарников, В. В. Зоренко, О. П. Арсеньева // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №18 (1294). – С. 29–35.

6. Кусаков С.К. Экспериментальный стенд для исследования процесса конденсации пара из смеси с воздухом в каналах пластинчатого теплообменника / А. А. Василенко, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, С.К. Кусаков // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №40 (1316). – С. 3–9.

7. Sergey K.Kusakov The Effect of Plate Corrugations Geometry on Performance of Plate Heat Exchangers Subjected to Fouling / Oleksandr Ivanovich Matsegora, Jiří Jaromír Klemeš, Olga Petrovna Arsenyeva, Petro Oleksiyovych Kapustenko, Sergey Konstantinovich Kusakov, Victor Vladimirovich Zorenko // Chemical Engineering Transactions 2019. – V. 76. – P. 277-282.

8. Sergey K.Kusakov The influence of plate corrugations geometry scale factor on performance of plate heat exchanger as condenser of vapour from its mixture with noncondensing gas / Petro O. Kapustenko , Jiri Jaromir Klemes ,

Olga P. Arsenyeva , Sergey K. Kusakov, Leonid L. Tovazhnyanskyu // Energy 201 (2020) 117661– P. 1-11.

9. Sergey K.Kusakov Mathematical model of a plate heat exchanger for condensation of steam in the presence of non-condensing gas / L. L.

Tovazhnyanskyu, P. O. Kapustenko, O. A. Vasilenko, S. K. Kusakov, O. P.

Arsenyeva, P. Y. Arsenyev // Bulgarian Chemical Communications 2018 – V. 50.

– P. 77-83.

10. Кусаков С.К. Джерела тепла низького потенціалу і вимоги до теплообмінного обладнання для енергетично ефективної утилізації такого тепла/ Кусаков С.К. // Інтегровані технології та енергозбереження– Харків: НТУ «ХП», 2019. - №4. – С. 79-90

11. Кусаков С.К. Утилизация тепла газов, отходящих после процесса сушки/ Кусаков С.К. // Інтегровані технології та енергозбереження– Харків: НТУ «ХП», 2017 - №4. – С. 28-31.

ABSTRACT

Kusakov S.K. Investigation of heat and mass transfer processes during heat utilization from industrial exhaust gases in plate heat exchangers. Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 161 - Chemical technology and engineering - (16 - Chemical and Bioengineering) - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020 p.

The dissertation was submitted for defense in the specialized scientific council DF 64.050.046. at the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific and practical problem of increase of energy efficiency of the enterprises at the expense of process of utilization of heat of low temperature potential of exhaust gases of industrial processes with use of plate heat exchangers of plate-and-frame type.

An analytical review of scientific and technical information on industrial and renewable heat sources of low potential and the peculiarities of their use. The basic requirements for heat exchange equipment for the use of low potential heat are formulated and the advantages of plate heat exchangers in the implementation of these processes are proved. Works with methods of calculation of plate heat exchangers for heat utilization of gas flows on the basis of research of heat and mass transfer in vapor - gas phase, heat transfer in condensate film, heat transfer in single - phase flow of cooling substance, hydraulic resistance in single - phase and two - phase flows in apparatuses are analyzed.

Based on the analysis of the theoretical foundations of the process it is shown that the possibilities of intensification of heat and mass exchange processes in the channels of plate heat exchangers are far from exhausted and require the development of approaches to predicting performance of these devices in cooling condensing gas flows and developing reliable and accurate methods of optimal calculation based on experimental and theoretical research using mathematical modeling methods.

A description of an experimental stand for the study of the process of condensation of water vapor from a mixture with air in models of the corrugated field of the channels between the plates of the plate heat exchanger is provided. The stand allows conducting experiments in a sufficient range of changes in the parameters of steam - air mixture and cooling water to study the processes of waste heat utilization: cooling water temperature 20–95 ° C; absolute pressure of a mixture of water vapor with air 0,101–0,42 MPa; the velocity of cooling water in the channels 0.11-1.1 m / s; mass velocity of the mixture of steam and air 4–85 g / (m²s); the volume fraction of air in the mixture at the inlet to the channel 0.02-0.85. Flow temperatures are measured, as well as the pressure at the inlet and outlet of the channels, flow rates, local flow temperatures at six points along the channels. The experiments were performed on three samples of channel models with the same angle of inclination of the corrugations to the direction of flow 60° and different steps of geometrically similar corrugations: 5; 7.5 and 10 mm. This allowed to investigate the influence of the scale factor on the correlating equations in the conditions of the condensation in two-phase flow in the channels of complex geometric shape of plate heat exchangers.

A mathematical model of the process of steam condensation from a mixture with air on the corrugated field of the channels of plate heat exchangers and in experimental models of the corrugated field of the channels used in the work is developed. The mathematical model consists of a system of one-dimensional

differential equations according to local heat and mass balances in small sections of channels along the heat transfer surface. The system is supplemented by correlation relations for the calculation of heat transfer and friction coefficients in a single-phase flow in the channels of plate heat exchangers of the investigated geometric form of corrugation. Correlation ratios for heat and mass transfer, as well as for two-phase flow pressure losses are based on single-phase flow correlations using different theoretical positions on the influence of transverse mass flux to the heat transfer surface and the structure of two-phase flow in the channel. The system of equations is closed by algebraic relations for the calculation of temperature and vapor saturation pressure under the conditions of equilibrium of gas and liquid phases, calculation of thermos-physical properties of components and mixtures participating in the process. The solution of the mathematical model is implemented in the form of software for a personal computer using the numerical method of finite differences. The solution of the model allows to obtain the main parameters of the process on the corrugated field in the channels of plate heat exchangers and to trace the development of the process along the channels.

A method for identifying the parameters of equations for calculating local coefficients of mass transfer, heat transfer and pressure losses in a two-phase flow based on statistical comparison of the results of mathematical modeling of integral process characteristics and their values obtained in experimental studies. Based on this technique, a formula is obtained for calculating the effect of transverse mass flow on local mass transfer coefficients taking into account the theoretical model of the stagnant layer and the effect of density change across the flow according to the theory of turbulent boundary layer with suction. The formula for calculating local convection heat transfer coefficients under the influence of transverse mass flow is also recommended. The accuracy of the equation proposed on the basis of the dispersed annular flow model for the thermal resistance of the condensate film

in the channels of plate heat exchangers is shown for calculations of steam condensation in the presence of non-condensed gas.

An equation for calculating the pressure loss in a two-phase flow with condensation of the vapor component of the vapor-gas mixture taking into account the change in the structure of the two-phase flow along the channel is obtained. In the initial sections of the channel, the flow structure corresponds to the model of phase separation proposed by Lockhart and Martinelli. As the flow rate of the condensed liquid phase increases, the flow structure becomes closer to the dispersed annular flow model. The boundary of transition between these modes is established and the equations for calculation of local losses of pressure in each of such modes are offered. The obtained equation for the dispersed annular flow model also takes into account the influence of the surface tension of the fluid in the two-phase flow on the pressure loss due to the introduction of the dependence on the Weber criterion. This allows the use of this equation for channels with the same form of corrugation of plates but with different scale factor of corrugation.

A mathematical model of an industrial plate heat exchanger for heat utilization of condensing gas streams on the basis of series-produced plates has been developed. The model is based on the consideration of the channels formed between the plates as composed of zones of distribution of flows at the inlet and outlet and the main corrugated field. It is assumed that the main processes of heat transfer and vapor condensation take place in this corrugated field and the influence of flow distribution zones can be considered as zones of local hydraulic resistance. In the case of a two-phase flow at the outlet of the heat exchanger, it is necessary to introduce a correction calculated by the method developed for the main corrugated field of the channels. On the basis of the mathematical model the method of calculation of plate heat exchangers of utilization of heat from exhaust gas streams is developed. The method allows calculate the devices from

industrially manufactured plates according to their geometric dimensions and characteristics of corrugation on their surface.

A method of optimal use of heat utilized from condensing gas streams with the involvement of methods of integration of thermal processes based on the theory of pinch analysis has been developed. The hot composite curve of the process in the condensing gas stream is constructed taking into account the conditions of equilibrium of steam as a real gas and the formed condensate. The integration of the cooling process of the condensing steam-gas mixture with the flows that use the utilized heat is performed with the establishment of the optimal structure of the heat exchanger system. The expediency of dividing the flow of condensing gas mixture into gas and liquid parts after reaching a certain temperature level is shown. A method of optimal determination of the heat transfer surface of the system of installed plate heat exchangers by the criterion of reduced costs is proposed and developed, which allows to realize the optimal technical and economic efficiency of the system. The method is illustrated by a specific example of heat recovery of gases coming after the drying process.

The scheme of installation for utilization of heat of exhaust gases after process of drying of tobacco at tobacco factory is developed. The main flows at the enterprise which can be used for reception of the extracted heat are defined. These are the flows of the space heating and hot water supply system of the enterprise. The optimal plate heat exchange devices are calculated and the selection of equipment for process control and its implementation in the conditions of working production is performed. The heat utilization unit is manufactured and installed at the existing tobacco factory. The pilot plate heat exchanger of heat utilization of exhaust gases of the tobacco drying process was tested. The obtained results confirmed the adequacy of the developed mathematical model and the accuracy of the developed calculation method sufficient for engineering use. The use of the developed utilization unit with a plate heat exchanger allowed to save more than

600 kW of thermal energy for the heating needs of the enterprise, which before that was simply released into the environment. This has reduced the amount of combustible natural gas used for space heating and hot water preparation.

Keywords: plate heat exchanger, steam condensation, non-condensed gas, mass transfer, heat transfer, pressure loss, two-phase flow, reduced costs, calculation of heat exchanger system, energy saving.

PUBLICATIONS

1. Kusakov S.K. Development of a system for heat recovery from secondary steam in the tobacco drying section using energy-efficient plate heat-exchange equipment / Garev A.O., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Arsenyeva O.P., Klemesh Y, Kusakov S.K., Anokhin P., Chuchek L. // Integrated technologies and energy conservation - Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. - №4. - S. 20-25

2. Sergey K.Kusakov The Development of Heat Substation for Drying Waste Heat Utilization / Andrii O. Gariev, Jiří J. Klemeš, Sergey.K.Kusakov, Leonid L. Tovazhnyansky, Petr Anokhind, Petro O. Kapustenko, Olga P. Arsenyeva, Lidija Čuček // Chemical Engineering Transactions 2014. – V. 39. – P. 1405-1410.

3. Sergey K.Kusakov The Mathematical Modelling of Fouling Formation Along PHE Heat Transfer Surface / Petro O. Kapustenko, Olga P. Arsenyeva, Olexandr I. Matsegora, Sergey K. Kusakov, Vladimir I. Tovazhnianskyi // Chemical Engineering Transactions 2017. – V. 61. – P. 247-252.

4. Sergey K.Kusakov Mathematical Model of Plate Heat Exchanger for Utilisation of Waste Heat from Condensable Gaseous Streams / Petro O. Kapustenko, Oleksiy V. Demirskiy, Leonid L. Tovazhnyanskyy, Jiří J. Klemeš, Oleksandr A. Vasilenko, Sergiy K. Kusakov, Olga P. Arsenyeva, Alisher E. Khusanov // Chemical Engineering Transactions 2018. – V. 70. – P. 2059-2054.

5. Kusakov S.K. Vasilenko A., Kusakov S. K., Bocharnikov I. A., Zorenko V. V., Arsenyeva O. P. Mathematical model of a plate heat exchanger for heat recovery from condensed gas streams // Bulletin of NTU "KhPI". - Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. - No. 18 (1294). - S. 29–35.

6. Kusakov S.K. Experimental stand for investigating the process of steam condensation from a mixture with air in the channels of a plate heat exchanger / A. A. Vasilenko, L. L. Tovazhnyansky, S.K. Kusakov // Bulletin of NTU "KhPI". - Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. - No. 40 (1316). - S. 3-9.

7. Sergey K.Kusakov The Effect of Plate Corrugations Geometry on Performance of Plate Heat Exchangers Subjected to Fouling / Oleksandr Ivanovich Matsegora, Jiří Jaromír Klemeš, Olga Petrovna Arsenyeva, Petro Oleksiyovych Kapustenko, Sergey Konstantinovich Kusakov, Victor Vladimirovich Zorenko // Chemical Engineering Transactions 2019. – V. 76. – P. 277-282.

8. Sergey K.Kusakov The influence of plate corrugations geometry scale factor on performance of plate heat exchanger as condenser of vapour from its mixture with noncondensing gas / Petro O. Kapustenko , Jiri Jaromir Klemes , Olga P. Arsenyeva , Sergey K. Kusakov, Leonid L. Tovazhnyanskyy // Energy 201 (2020) 117661– P. 1-11.

9. Sergey K.Kusakov Mathematical model of a plate heat exchanger for condensation of steam in the presence of non-condensing gas / L. L. Tovazhnyanskyy, P. O. Kapustenko, O. A. Vasilenko, S. K. Kusakov, O. P.

Arsenyeva, P. Y. Arsenyev // Bulgarian Chemical Communications 2018 – V. 50.
– P. 77-83.

10. Kusakov S.K. Low potential heat sources and requirements for heat exchange equipment for energy efficient utilization of such heat/ Kusakov S.K. // Integrated technologies and energy conservation - Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. - №4. - S. 79-90.

11. Kusakov S.K. Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process/ Kusakov S.K. // Integrated technologies and energy conservation - Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. - №4. - S. 28-31.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА НИЗЬКОГО ПОТЕНЦІАЛУ І СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЙОГО УТИЛІЗАЦІЇ З ВИКИДНИХ ПОТОКІВ ГАЗІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ	17
1.1. Джерела тепла низького потенціалу	17
1.1.1 Скидне тепло промислових підприємств	17
1.1.2. Втрати тепла в будинках	20
1.1.3. Отримання енергії при утилізації побутових і промислових відходів..	22
1.1.4. Поновлювані джерела тепла	23
1.1.5. Вимоги до теплообмінників утилізації низько потенційного тепла.....	25
1.2. Методи та обладнання для використання вторинного тепла	29
1.2.1. Методи утилізації вторинного тепла у промисловості	29
1.2.2. Пластинчасті теплообмінники як ефективне обладнання утилізації вторинного тепла.....	33
1.3. Процеси при охолодженні конденсаційних газових потоків в ПТА	35
1.3.1. Однофазний потік	38
1.3.2. Плівка конденсату	39
1.3.3. Тепло- та масо перенос в газовій фазі.....	41
1.3.4. Падіння тиску двофазного потоку.....	42
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1	44
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТ НА МОДЕЛЯХ ГОФРОВАНОГО ПОЛЯ КАНАЛІВ ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА.....	46
2.1. Опис експериментальної установки.....	46
2.2 Опис експериментальних зразків	49
2.3 Методика обробки результатів експериментів	53
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2	56

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ КОНДЕНСАЦІЙНОГО ПАРОГАЗОВОГО ПОТОКУ В ПЛАСТИНЧАСТОМУ ТЕПЛООБМІННИКУ	57
3.1 Математична модель процесу в експериментальних зразках гофрованого поля каналу ПТА	57
3.2 Ідентифікація параметрів розрахункових рівнянь математичної моделі ..	66
3.2.1 Тепло-масо-переніс в потоці парогазової суміші	67
3.2.2 Падіння тиску в двофазному потоці.....	71
3.3 Перевірка адекватності моделі	76
3.4. Результати вивчення процесу у зразках каналів та їх аналіз.....	81
3.5 Моделювання ПТО що складаються з пластин, що випускаються в промисловості.....	84
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3	87
РОЗДІЛ 4. УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛА ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ.....	90
4.1. Методологія інтеграції утилізованого тепла.....	90
4.2 Приклад практичної реалізації методики	96
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4	105
РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ ПТА ДЛЯ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ГАЗІВ ПІСЛЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ.....	107
5.1 Опис пілотної установки утилізації тепла.....	107
5.2 Результати промислового експерименту	111
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 5	112
ВИСНОВКИ.....	113
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	115
ДОДАТКИ.....	130