

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мацегора Олександр Іванович

УДК 66.021.4


ДИСЕРТАЦІЯ
ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПЛИВУ
ЗАБРУДНЕНЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ НА
ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ В ПЛАСТИНЧАТИХ ТЕПЛООБМІННИКАХ

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

 Мацегора О.І.

Наукові керівники:

Товажнянський Леонід Леонідович, доктор технічних наук, професор

Арсеньєва Ольга Петрівна, доктор технічних наук, професор

*Здано в друкарню за збіркою
з першим примірником
дисертації згідно
вченої секретар
Проф. Заковеробий О.Ю
08.04.2021*



АНОТАЦІЯ

Мацегора О.І. Дослідження локальних особливостей впливу забруднень теплопередаючої поверхні на теплопередачу в пластинчатих теплообмінниках. – 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, 2020 р.

Дисертація подана до захисту у спеціалізовану вчену раду ДФ 64.050.045 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі підвищення ефективності рекуперації тепла на промислових підприємствах хімічної промисловості з використанням пластинчастих теплообмінних апаратів розбірної конструкції за рахунок інтенсифікації тепла в цих апаратах, зменшення рівня забруднень на теплообмінній поверхні та прогнозування їх сталої роботи.

В дисертації розглянуті питання інтенсифікації процесів теплопередачі та розробки методів прогнозування забруднень теплообмінної поверхні, проектування пластинчастих теплообмінних апаратів та теплообмінних систем з урахуванням локальних особливостей впливу забруднення поверхні теплопередачі на теплопередачу під час експлуатації ПТА.

За результатами аналізу існуючих конструкцій теплообмінних апаратів було виявлено, що пластинчасті теплообмінні апарати мають значні переваги над кожухотрубними та мають багато перспектив використання в промисловості. Рух теплоносіїв в каналах складної геометрії, що утворені пластинами з гофруванням, має підвищену турбулізацію, і як наслідок, більший рівень тепловіддачі та меншу схильність до утворення забруднень

на поверхні внаслідок більших дотичних напружень на стінці. При аналізі існуючих підходів до оцінки забруднень та фізичних процесів утворення забруднень, було виявлено основні чинники які спричиняють забруднення в пластинчастих теплообмінних апаратах, встановлено механізм їх утворення, вивчено існуючі моделі та підходи до прогнозування процесу утворення забруднень у часі на теплообмінній поверхні. Аналіз літературних джерел показав, що основним чинником, який спричиняє забруднення на теплообмінній поверхні ПТА є осадження звішених часток та утворення накипу. Для прогнозування термічного опору забруднень у часі, застосування порогової моделі, запропонованої Ебертом та Панчаятом, дозволяє знайти той критичний рівень забруднень, після якого забруднення не збільшуються, і дозволить створити графіки експлуатації ПТА з прогнозуванням періоду роботи між очищенням (міжсервісні інтервали).

Зазначені існуючі фізико-математичні моделі утворення забруднень на теплообмінній поверхні були розроблені для кожухотрубчастих апаратів з каналами круглої форми, тому створення математичних моделей теплових та гідравлічних процесів забруднень у каналах ПТА складної форми з урахуванням геометричних параметрів теплообмінних пластин і природи забруднень є актуальною задачею, рішення якої дозволить прогнозувати динаміку сталої роботи ПТА. Для цього необхідно провести експериментальні дослідження з аналізом стану шару забруднень у часі для різних теплоносіїв та розробити математичну модель утворення забруднень уздовж теплообмінної поверхні.

На основі порогової моделі утворення забруднень у часі було розроблено математичну модель пластинчастого теплообмінного апарату, схильного до забруднення, яка представлена системою звичайних диференціальних рівнянь. Представлена математична модель дозволяє аналізувати продуктивність ПТА в умовах забруднення поверхні теплопередачі і визначати параметри процесу в часі з урахуванням впливу геометрії гофрування пластин, що дозволяє використовувати цей підхід для

збільшення рекуперації тепла у теплообмінному апараті. Намагання досягнути бажаного результату простим додаванням пластин з однаковим кутом нахилу гофр β до основного напрямку потоку, в певних умовах, не приводить до бажаного ефекту, так як в той же час збільшується тепловий опір відкладення і після деякого часу роботи він може стати набагато більш значним, ніж в ПТА з меншим числом пластин. Однак такий захід на деякий проміжок часу може зменшити падіння тиску в ПТА. Використання пластин з більш високим кутом β може бути кращим в умовах забруднення водою, оскільки навіть при більш високому падінні тиску в чистому ПТА, його (падіння тиску) збільшення може бути менше, ніж при більш низькому куті β з розвитком відкладення, що призводить до того ж падіння тиску після деякого часу роботи ПТА. У той же час кількість рекуперованого тепла буде набагато вище при застосуванні розробленої моделі ніж при звичайному додаванні пластин.

В роботі розроблено фізико-математичну модель, яка враховує розподіл параметрів процесу теплопередачі вздовж каналу ПТА, що дозволяє прогнозувати розвиток забруднення в часі в різних місцях уздовж довжини каналу. Розвиток шару відкладень враховується моделлю забруднення, яка представлена рівнянням в безрозмірній формі. Відносний вплив різних чинників враховується емпіричними коефіцієнтами, які можуть бути ідентифіковані за даними моніторингу теплових і гідравлічних характеристик ПТА. Модель також дозволяє передбачити зміну втрат тиску в ПТА з розвитком шару відкладення і відповідним зменшенням площі поперечного перерізу каналів.

На основі розглянутої математичної моделі проведені випробування продуктивності ПТА з урахуванням виникнення забруднення в умовах діючої випарної установки цукрового заводу і проаналізовані дані випробувань.

Досліджуваний ПТА було встановлено на 5-ти ступінчастій випарній станції в процесі виробництва бурякового цукру. Для зменшення витрати

первинної пари на заводі використовувалася серія підігрівачів сировини для нагріву рідкого соку з початковою температурою 98 °С. Щоб мати надійні дані про забруднення, виконується моніторинг ефективності теплопередачі ПТА в період між процедурами очищення теплообмінника M15M з площею теплообміну 93 м². Витрата рідкого соку, перепади тиску і температури теплообмінних потоків контролювалися з початку роботи та були зібрані для тестованого ПТА протягом 15 днів з початку виробничих робіт в рамках сезонної кампанії. Витрата рідкого соку за цей час змінювалася з 71,5 кг/с до 76,5 кг/с. Стабільний режим роботи спостерігався через 96 годин з початку експлуатації. Витрати і температури потоків в різний час з моменту запуску дозволили встановити безрозмірні параметри математичної моделі. ПТА був розібраний для механічного очищення через 15 днів роботи, і були досліджені відкладення забруднення. Було зазначено, що з боку пари-конденсату теплообмінна пластина виявилась практично чистою. На стороні соку спостерігались значні відкладення забруднення, в основному у вигляді накипу. Також були присутні тверді частинки і волокна сировини. Оскільки забруднення і його термічний опір з боку теплоносія були практично відсутні, то для побудови моделі враховувався лише термічний опір забруднення зі сторони соку.

Параметри запропонованої математичної моделі утворення забруднень були визначені на основі даних промислових випробувань. Розбіжності між отриманими даними випробувань і оціненими по моделі значеннями коливаються в межах $\pm 8\%$. Модель оцінює ріст шару відкладень в процесі нагрівання очищеного рідкого соку в пластинчастому теплообміннику. Для застосування моделі в різних умовах необхідні дані моніторингу виникнення забруднення та визначення його параметрів. Як показав приклад, застосування даної моделі може значно збільшити періоди між очищеннями ПТА більш ніж в два рази, а саме до часу проведення планових ремонтів всього підприємства між сезонами роботи. Така реконструкція дозволяє

істотно підвищити ефективність теплопередачі і рівень рекуперації тепла на заводі за рахунок простої модифікації існуючого ПТА.

Було проведено розрахунки для застосування ПТА для гарячого водопостачання (ГВП). На основі експериментальних даних із літератури для котельної системи централізованого теплопостачання, яка побудована за «відкритою» схемою, де гаряча вода для потреб ГВП береться з контуру радіаторного опалення. Така система вимагає нагрівати великі обсяги прісної води до температури 60-70 °С або навіть вище. При застосуванні розглянутої схеми характерне швидке забруднення теплообмінної поверхні, що цінне для вивчення явищ росту забруднення у часі. Експериментальні дослідження проводилися з ПТА типу M10B виробництва Альфа Лаваль. Температура холодної води на вході варіювалася від 7,9 до 9,5 °С, і її нагрівали до 59 ÷ 61,5 °С за допомогою теплоносія у вигляді гарячої води, при цьому температура теплоносія поступово підвищувалася від 74 до 98 °С, щоб підтримувати необхідну температуру ГВП, по мірі зростання шару забруднення. У розробленій моделі геометричні параметри пластини M10B були отримані шляхом заміру геометрії серійної пластини: $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 0,56$, висота каналу – 2,93 мм. Емпіричні параметри запропонованої моделі утворення забруднення були визначені методом найменших квадратів за експериментальними даними для різних швидкостей потоку. Порівняння даних для всіх експериментів з загальними коефіцієнтами теплопередачі, розрахованими за моделлю показали розбіжність розрахункових і експериментальних результатів $\pm 7\%$. Це підтверджує достовірність моделі та її здатність прогнозувати поведінку забруднення ПТА в досліджуваному діапазоні швидкостей потоку і температур.

При застосуванні ПТА у промисловості найважливішим завданням при проектуванні є забезпечення можливості швидких різноманітних розрахунків теплообмінних апаратів для різних умов використання (за перепадом тиску в апаратах та фізичних властивостях теплоносіїв) з визначенням вартості капітальних вкладень і подальших експлуатаційних витрат. Остання

обставина дозволяє, ще на стадії проектування, вибрати оптимальний варіант із співвідношення капітальні/експлуатаційні витрати.

В дисертаційній роботі представлено розрахунки експериментальної установки на базі ПТА при застосуванні в комунальному господарстві для підігріву водопровідної води для системи ГВП плавального басейну, яку було встановлено на об'єкті. Була розроблена та впроваджена теплообмінна система на базі сучасних ПТА для підігріву річкової води для потреб ХВО ТЕЦ промислового підприємства. Створена математична модель яка використовується для оптимального проектування індивідуальних теплових пунктів для ГВП в пакеті прикладних програм для автоматизації процесу проектування. Підбір ПТА для систем опалення і ГВП здійснюється по паралельній, двоступеневій змішаній і послідовній схемах та враховує утворення забруднень у часі.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи для хімічної галузі та комунального господарства полягає в обґрунтованому виборі конструкції та конфігурації пластинчастих теплообмінних апаратів з урахуванням забруднень теплообмінної поверхні. Методика розрахунку термічного опору забруднень в теплообмінному апараті вздовж пластини дозволить врахувати цей чинник на етапі проектування теплообмінного обладнання та вдосконалити систему експлуатації діючого устаткування.

Ключові слова: пластинчастий теплообмінний апарат, теплопередача, гідравлічний опір, забруднення теплообмінної поверхні, математична модель, динаміка росту забруднень.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Matsegora O.I. Utilization of waste heat from exhaust gases of drying process / Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyanskyu L.L., Kapustenko P.O.,

Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I., 2016 // *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 10(1):131-138.

2. Olexandr I. Matsegora. Investigation of Fouling in Plate Heat Exchangers at Sugar Factory / Olexiy V. Demirskyu, Petro O. Kapustenko, Gennadii L. Khavin, Olga P. Arsenyeva, Olexandr I. Matsegora, Sergey K. Kusakov, Igor O. Bocharnikov, Vladimir I. Tovazhnianskyi, 2016 // *Chemical Engineering Transactions*, 52, 583-588.

3. Мацегора А.И. Автоматизация проектирования тепловых пунктов системы централизованного теплоснабжения / Хавин Г.Л., Арсеньева О.П., Мацегора А.И., Кусаков С.К., Бочарников И.А., Василенко А.А. // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 4. – С. 23–29.

4. Olexandr I. Matsegora. 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. Tovazhniansky, 2017 // *Chemical Engineering Transactions*, 61, 247-252

5. Мацегора О. І. Комп'ютерне моделювання процесу утворення забруднень на поверхні теплопередачі пластинчатого теплообмінника / Арсеньєва О. П., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л., КАПУСТЕНКО П. О., МАЦЕГОРА О. І. // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 4. – С. 110–112.

6. Matsegora O.I. Prediction of fouling tendency in PHE by data of on-site monitoring. Case study at sugar factory / Demirskiy O.V., Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Matsegora O.I., Pugach Y.A., 2018 // *Applied Thermal Engineering*, 128: 1074–1081.

7. Oleksandr I. Matsegora. Mathematical Modelling of the Thermal and Hydraulic Behaviour of Plate Heat Exchanger in the Fouling Conditions / Petro O. Kapustenko, Oleksiy V. Demirskiy, Vladimir I. Tovazhnyanskyi, Jiřn J. Klemeř, Oleksandr I. Matsegora, Pavlo Y. Arsenyev, Olga P. Arsenyeva, 2018 // *Chemical Engineering Transactions*, 70, 109-114.

8. Matsegora O. Accounting for local features of fouling formation on PHE heat transfer surface. / Kapustenko P., Klemeš J., Arsenyeva O., Matsegora O., Vasilenko O., 2018 // *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 12(4): 619–629.

9. Мацегора А.И. Обобщенная модель формирования загрязнений на поверхности теплопередачи в безразмерной форме и ее применение для расчета пластинчатого теплообменника. / Мацегора А.И., Арсеньева О.П., Капустенко П.А., Розенко В.В., Соловей Л.В., // *Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2018, № 40 (1316).

10. Matsegora O. Incorporating fouling model in plate heat exchanger modelling and design. / Demirskyu O., Kapustenko P., Arsenyeva O., Matsegora O., Arsenyev P., Tovazhnyanskyi V., Khusanov A., 2018 // *Computer Aided Chemical Engineering*, 43, 289-290.

11. Matsegora O. I. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in Plate Heat Exchanger. / Kapustenko P.O., Klemeš J. J., Matsegora O. I., Arsenyev P. Y., Arsenyeva O. P., 2019, *Energy*. 174, 1049-1059

12. Oleksandr Ivanovich Matsegora. The effect of plate corrugations geometry on performance of Plate Heat Exchangers subjected to fouling. / Oleksandr Ivanovich Matsegora, Jiřn Jaromir Klemeš, Olga Petrovna Arsenyeva, Petro Oleksiyovych Kapustenko, Sergey Konstantinovich Kusakov, Victor Vladimirovich Zorenko., 2019, *Chemical Engineering Transactions*, 76, 277-282.

13. Мацегора О.І. Характеристики пластинчастих теплообмінників з пластинами різної форми гофрування в умовах забруднення теплопередаючої поверхні / Мацегора О.І., Арсеньєва О.П., Кусаков С.К., Зоренко В.В., Демірський О.В. // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – № 3. – С. 24–33.

14. Мацегора О.І. Моделі утворення забруднення на поверхнях нагріву та їх застосування для пластинчатих теплообмінників / Мацегора О.І.,

Арсеньєва О.П., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.О. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – № 4. – С. 22–31.

ABSTRACT

Matsegora O.I. Investigation of local features of the influence of heat transfer surface contaminants on heat transfer in plate heat exchangers. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for the Degree of Candidate of Technical sciences (PhD degree) in specialty 161 – Chemical Technology and Engineering (16 – Chemical and bioengineering) – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» of Ministry of Education and Science of Ukraine, 2020.

The dissertation is devoted to the decision of an actual scientific and practical problem of increase of efficiency of heat recovery at the industrial enterprises of the chemical industry with use of plate heat exchangers of a collapsible design due to intensification of heat in these devices, reduction of pollution on a heat exchange surface and forecasting their steady work.

The dissertation considers the issues of intensification of heat transfer processes and development of methods for forecasting heat exchange surface contamination, design of plate heat exchangers and heat exchange systems taking into account local features of heat transfer surface contamination effect on heat transfer during PHE operation.

According to the results of the analysis of existing designs of heat exchangers, it was found that plate heat exchangers have advantages over shell and tube and have many prospects for use in industry. The movement of heat carriers in the channels of complex geometry formed by corrugated plates has increased turbulence, and as a consequence, a higher level of heat transfer and less tendency to the formation of contaminants on the surface due to greater tangential stresses on the wall. When analyzing the existing approaches to the assessment of pollution and physical processes of pollution, the main factors causing pollution in plate heat exchangers were identified, the mechanism of their formation was established, existing models and approaches to forecasting the process of pollution on the heat exchange surface were studied. Analysis of the literature has shown that the main

factor that causes contamination on the heat exchange surface of PHE is the deposition of suspended particles and the formation of scale. To predict the thermal resistance of contaminants during the application of the threshold model proposed by Ebert and Panchayat, it is possible to find some critical level of pollution, after which the pollution does not increase, and will create PHE operation schedules with forecasting the period between cleaning.

These existing physical and mathematical models of contamination on the heat exchange surface were developed for shell-and-tube devices and channels of circular geometry, so the creation of mathematical models of thermal and hydraulic processes taking into account contaminants in PHE channels of complex shape, which will predict the dynamics of their work. For this purpose it is necessary to carry out experimental researches with the analysis of a condition of a layer of pollution in time for various heat carriers and to develop mathematical model of formation of pollution along a heat exchange surface.

Based on the threshold model of pollution formation over time, a mathematical model of a plate heat exchanger prone to pollution was developed, which is represented by a system of ordinary differential equations. The presented mathematical model allows to analyze the performance of PHE in terms of contamination on the heat transfer surface and to determine the process parameters over time taking into account the influence of the geometry of corrugation plates, which allows using this approach to increase heat recovery in the heat exchanger. If this is done by simply adding plates with the same angle of corrugation β to the main direction of flow under certain conditions, it does not lead to the desired effect, as at the same time increases the thermal resistance of the deposit and after some time can become much more significant than in PHE with fewer plates. However, such a measure can reduce the pressure drop in the PHE. The use of plates with a higher β may be better in conditions of water contamination, because even with a higher pressure drop in pure PHE, its increase may be less than at a lower angle β with the development of deposits, which leads to the same pressure

drop after some working time of PHE. At the same time, the amount of recovered heat can be much higher when using the developed model.

The paper develops a physical and mathematical model that takes into account the distribution of heat transfer process parameters along the PHE channel, which allows predicting the development of pollution over time in different places along the length of the channel. The development of sediments is taken into account by the pollution model represented by the equation in dimensionless form. The relative influence of various factors is taken into account by empirical coefficients that can be identified from the monitoring of thermal and hydraulic characteristics of PHE. The model also allows predicting the change in pressure drop in the PHE with the development of the deposition layer and the corresponding decrease in the cross-sectional area of the channels.

On the basis of the considered mathematical model tests of productivity of PHE taking into account occurrence of pollution in the conditions of the operating evaporating installation of sugar factory are carried out and test data are analyzed. The studied PHE was installed at a 5-stage evaporator station in the process of beet sugar production. To reduce the consumption of primary steam at the plant, a series of raw material heaters was used to heat liquid juice with an initial temperature of 98 °C. In order to have reliable data on pollution, the efficiency of heat transfer of PHE is monitored in the period between cleaning procedures for the heat exchanger M15M with a heat transfer area of 93 m². Liquid juice consumption, pressure drops and heat exchange temperature were monitored from the beginning of the work and were collected for the test PHE within 15 days from the beginning of the factory work as part of the seasonal campaign. The consumption of liquid juice during this time varied from 71.5 kg/s to 76.5 kg/s. Stabilized working conditions were observed 96 hours after the start of operation. Flow rates and flow temperatures at different times since launch have made it possible to establish dimensionless parameters of the mathematical model. PHE was disassembled for mechanical cleaning after 15 days of operation, and contamination deposits were investigated. It was noted that the condensate plate is almost clean. On the juice

side there are significant deposits of contamination, mainly in the form of scale. Solid particles and fibers are also present. Since there is almost no clogging on the condensate side, the thermal resistance of the contamination on the juice side was used to form the model.

The parameters of the proposed mathematical model of pollution formation were determined on the basis of industrial test data. The differences between the obtained test data and the values estimated by the model are within $\pm 8\%$. The model estimates the growth of deposits during the heating of purified liquid juice in a plate heat exchanger. To apply the direct model in different conditions, pollution monitoring data are needed to determine its parameters. As the example showed, the application of this model can significantly increase the periods between cleanings of PHE, more than twice, until the time of scheduled repairs of the entire plant between seasons. Such reconstruction allows to significantly increasing the efficiency of heat transfer and the level of heat recovery at the plant due to a simple modification of the existing PHE.

Calculations were made for the use of PHE for hot water supply. Based on experimental data from the literature for the boiler system of district heating (DH), which is built on an "open" scheme, where hot water from the tap is taken from the radiator circuit. Such a system requires heating large volumes of fresh water to a temperature of 60-70 °C or even higher. When applying the considered scheme, rapid contamination of the heat exchange surface is characteristic, this is valuable for studying the phenomena of pollution contamination over time. Experimental studies were performed with PHE type M10B manufactured by Alfa Laval. The temperature of the cold water at the inlet varied from 7.9 to 9.5 °C, and it was heated to 59 ÷ 61.5 °C with hot water, while the temperature was gradually raised from 74 to 98 °C to maintain the required temperature of the cold coolant as growth of the pollution layer. In the developed model, the geometric parameters of the plate M10B were obtained by measuring the industrial plate: $\beta = 60^\circ$, $\gamma = 0.56$, the height of the channel - 2.93 mm. The empirical parameters of the proposed model of pollution formation were determined by the method of least squares

according to experimental data for different flow rates. Comparison of data for all experiments with the total heat transfer coefficients calculated by the model showed a discrepancy between the calculated and experimental results $\pm 7\%$. This confirms the reliability of the model and its ability to predict the behavior of PHE contamination in the studied range of flow velocities and temperatures.

When using PHE in industry, the most important task in the design is to ensure the possibility of rapid various calculations of heat exchangers for different conditions of use (conditions before the pressure drop in the devices and physical properties of coolants) to determine the cost of capital investment and subsequent operating costs. The latter circumstance allows at the design stage to choose the best option from the ratio of capital costs - operating costs.

The dissertation presents calculations of the use of PHE in public utilities for heating tap water for the hot water supply system (HWS) of the swimming pool, which was installed on site. A heat exchange system for heating river water for the needs of chemical water treatment at a thermal power plant was developed and implemented in industry. The mathematical model is used for optimal design of individual heating points for HWS and for automation of the design process. Selection of heat exchangers for heating and HWS is carried out in parallel, two-stage mixed and sequential schemes and takes into account the formation of contaminants over time.

The practical significance of the obtained results of the dissertation work for the chemical industry and public utilities is a reasonable choice of the design of plate heat exchangers taking into account the contamination of the heat exchange surface. The method of calculating the thermal resistance of contaminants in the heat exchanger along the plate will take into account this factor at the design stage of heat exchange equipment and improve the system of operation of existing equipment.

Keywords: plate heat exchanger, heat transfer, hydraulic resistance, contamination of heat exchange surface, mathematical model, dynamics of pollution growth.

REFERENCES

1. Matsegora O.I. Utilization of waste heat from exhaust gases of drying process / Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I., 2016 // *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 10(1):131-138.
2. Olexandr I. Matsegora. Investigation of Fouling in Plate Heat Exchangers at Sugar Factory / Olexiy V. Demirskyy, Petro O. Kapustenko, Gennadii L. Khavin, Olga P. Arsenyeva, Olexandr I. Matsegora, Sergey K. Kusakov, Igor O. Bocharnikov, Vladimir I. Tovazhnianskyi, 2016 // *Chemical Engineering Transactions*, 52, 583-588.
3. Matsegora O. I. Avtomatizacziya proektirovaniya teplovykh punktov sistemy czentralizovannogo teplosnabzheniya / Khavin G.L., Arseneva O.P., Matsegora A.I., Kusakov S.K., Bocharnikov I.A., Vasilenko A.A. // *Integrovani texnologiyi ta energozberezheniya*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – № 4. – P. 23–29.
4. Olexandr I. Matsegora. 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. Tovazhniansky, 2017 // *Chemical Engineering Transactions*, 61, 247-252.
5. Matsegora O. I. Komp'yuterne modelyuvannya procesu utvorenniya zabrudnen` na poverxni teploperedachi plastynchatogo teploobminnyka / Arsenyeva O. P., Tovazhnyanskyj L. L., Kapustenko P. O., Macegora O. I. // *Integrovani texnologiyi ta energozberezheniya*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – № 4. – C. 110–112.

6. Matsegora O.I. Prediction of fouling tendency in PHE by data of on-site monitoring. Case study at sugar factory / Demirskiy O.V., Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Matsegora O.I., Pugach Y.A., 2018 // Applied Thermal Engineering, 128: 1074–1081.
7. Oleksandr I. Matsegora. Mathematical Modelling of the thermal and hydraulic behaviour of Plate Heat Exchanger in the fouling conditions / Petro O. Kapustenko, Oleksiy V. Demirskiy, Vladimir I. Tovazhnyanskyi, Jiřn J. Klemeř, Oleksandr I. Matsegora, Pavlo Y. Arsenyev, Olga P. Arsenyeva, 2018 // Chemical Engineering Transactions, 70, 109-114.
8. Matsegora O. Accounting for local features of fouling formation on PHE heat transfer surface. / Kapustenko P., Klemeř J., Arsenyeva O., Matsegora O., Vasilenko O., 2018 // Frontiers of Chemical Science and Engineering, 12(4): 619–629.
9. Matsegora O. I. Obobshhennaya model` formirovaniya zagryaznenij na poverkhnosti teploperedachi v bezrazmernoj forme i ee primenenie dlya rascheta plastinchatogo teploobmennika. / Matsegora O.I., Arsen`eva O.P., Kapustenko P.A., Rozenko V.V., Solovej L.V., // Visnyk Nacional`nogo Texnichnogo Universytetu «KhPI». Seriya: Innovacijni doslidzhennya u naukovyx robotax studentiv, 2018, № 40 (1316).
10. Matsegora O. Incorporating fouling model in plate heat exchanger modelling and design. / Demirskyy O., Kapustenko P., Arsenyeva O., Matsegora O., Arsenyev P., Tovazhnyanskyi V., Khusanov A., 2018 // Computer Aided Chemical Engineering, 43, 289-290.
11. Matsegora O. I. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in Plate Heat Exchanger. // Kapustenko P.O., Klemeř J. J., Matsegora O. I., Arsenyev P. Y., Arsenyeva O. P., 2019, Energy. 174, 1049-1059.
12. Oleksandr Ivanovich Matsegora. The effect of plate corrugations geometry on performance of Plate Heat Exchangers subjected to fouling. / Oleksandr Ivanovich Matsegora, Jiřn Jaromıř Klemeř, Olga Petrovna Arsenyeva,

Petro Oleksiyovych Kapustenko, Sergey Konstantinovich Kusakov, Victor Vladimirovich Zorenko., 2019, Chemical Engineering Transactions, 76, 277-282.

13. Matsegora O. I. Xarakterystyky plastynchastyx teploobminnykiv z plastynamy riznoyi formy gofruvannya v umovax zabrudnennya teploperedayuchoyi poverxni / Macegora O.I., Arsen`yeva O.P., Kusakov S.K., Zorenko V.V., Demirs`ky`j O.V. // Integrovani texnologiyi ta energozberezhennya. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. – № 3. – P. 24–33.

14. Matsegora O. I. Modeli utvorennya zabrudnennya na poverxnyax nagrivu ta yix zastosuvannya dlya plasty`nchaty`x teploobminny`kiv / Macegora O.I., Arsen`yeva O.P., Tovazhnyansky`j L.L., Kapustenko P.O. // Integrovani texnologiyi ta energozberezhennya. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. – № 4. – P. 22–31.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕНЬ В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ	13
1.1 Пластинчасті теплообмінні апарати (ПТА)	13
1.2 Форми забруднення поверхні та їх вплив на теплогідравлічні параметри апарату.....	25
1.2.1 Форми забруднень	28
1.2.2 Механізми відкладення забруднень.....	30
1.2.3 Моделі утворення забруднень	33
1.2.4 Втрата тиску, пов'язана із забрудненням	36
1.2.5 Забруднення на інтенсифікованих теплообмінних поверхнях .	36
1.2.6 Моделювання процесу забруднення поверхні ПТА.....	39
1.3 Підходи до оцінки формування забруднень у часі.....	40
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 1	49
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАБРУДНЕНЬ ТЕПЛООБМІННОЇ ПОВЕРХНІ ПТА	51
2.1 Модель формування забруднень.....	51
2.2 Безрозмірна модель утворення забруднень.....	59
2.3 Вплив гофрування на формування забруднень	64
2.4 Модель утворення забруднень уздовж теплообмінної поверхні .	70
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 2	77
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ.....	78

3.1 Експериментальне дослідження роботи ПТА на цукровому заводі	78
3.1.1 Опис процесу.....	82
3.1.2 Дані моніторингу теплових характеристик ПТА	84
3.1.3 Ідентифікація параметрів моделі забруднення.....	88
3.1.4 Використання моделі забруднення для підвищення продуктивності.....	92
3.2 Вплив геометрії гофрування на виникнення забруднень	95
3.3 Експериментальне дослідження роботи ПТА на комунальному підприємстві	101
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 3	104
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ПТА З УРАХУВАННЯМ ЗАБРУДНЕНЬ	106
4.1 Розрахунок ПТА для системи ГВП плавального басейну	106
4.2 Розрахунок ПТА для потреб ТЕЦ	111
4.3 Автоматизація теплових пунктів та математичне забезпечення	117
ВИСНОВКИ ЗА РОЗДІЛОМ 4	127
ВИСНОВКИ.....	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	131
ДОДАТКИ.....	143