

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Демірський Олексій Вячеславович

УДК 66.048.28.001

ДИСЕРТАЦІЯ
ПРОЦЕСИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ПРИ ФОРМУВАННІ ВІДКЛАДЕНЬ
НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ РОЗБІРНИХ ПЛАСТИНЧАСТИХ
ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

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
_____ О.В. Демірський

Науковий керівник ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Леонід Леонідович, доктор технічних наук, професор

Харків – 2017

АНОТАЦІЯ

Демірський О.В. Процеси теплопередачі при формуванні відкладень на робочих поверхнях розбірних пластинчастих теплообмінних апаратів. – 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, 2017 р.

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

В дисертації розглянуті питання інтенсифікації теплопередачі та розробки методів оптимального проектування розбірних пластинчастих теплообмінників і їх систем з урахуванням забруднення поверхні теплопередачі в процесі експлуатації.

З аналізу стану питання було зроблено висновок, що методи моделювання, оптимізації та проектування пластинчастих теплообмінників з урахуванням появи відкладень в процесі експлуатації слабо відпрацьовані і вимагають поглиблених досліджень з урахуванням геометричних параметрів гофрованих пластин і природи забруднень. Для забезпечення достовірності використаних математичних моделей потрібна їх експериментальна перевірка.

Для задач хімічної технології, де основними забруднювачами є солі, характерним є відкладення зважених часток і випадання кристалічних утворень. Тому у роботі запропоновано прийняти гіпотезу, що забруднення в каналах пластинчастих теплообмінних апаратів мають асимптотичний характер в часі. При незмінних умовах протікання процесу утворення забруднень, асимптотичні значення термічного опору забруднень обернено пропорційні дотичному напруженню на стінці. Ця особливість для каналів пластинчастих розбірних

теплообмінників однакова за своєю природою і може бути описана тими ж співвідношеннями, як і для прямих каналів і труб.

Проаналізовані експериментальні та теоретичні дані дозволили зробити висновок про те, що для однакових умов роботи можна вивести єдину залежність між початковим рівнем відкладень в розчинах солей кальцію і дотичним напруженням на поверхні теплопередачі, незалежно від геометрії розглянутої поверхні. Для визначення термічного опору забруднень тільки за даними про чистоту теплоносія і його хімічний склад, необхідні подальші експериментальні і теоретичні дослідження в цьому напрямку.

Вперше розроблено метод оптимального проектування пластинчастого теплообмінника і системи пластинчастих теплообмінників на основі критерію приведених витрат. Запропоновано математичну модель, що дозволяє враховувати появу відкладень на поверхні теплообміну в процесі роботи, яка використовується для оптимального розрахунку пластинчастих розбірних теплообмінників за критерієм приведених витрат.

Постановка завдання оптимізації по мінімуму сумарної площі або вартості включає в себе тільки капітальні витрати, ігноруючи при цьому експлуатаційні витрати в процесі роботи підігрівачів. Нині, коли вартість експлуатаційних витрат різко зросла, не урахування їх може привести до значних перевитрат коштів в процесі роботи теплообмінників. Таким чином, завдання розрахунку двох і більше апаратів, встановлених послідовно крім забезпечення мінімуму капітальних витрат повинне включати в себе і мінімізацію експлуатаційних витрат. Це вимагає реалізації підходу багатоцільового програмування, що вмикає в себе розвиток теоретичних і практичних підходів щодо обґрунтування вибору критеріїв і показників економічної ефективності модернізації теплообмінних систем. До того ж необхідно розробити методику призначення коефіцієнтів ваги і математичних методів вирішення техніко-економічних завдань в рамках багатоцільового програмування і впровадження достовірних практичних показників економічної ефективності реалізації проектів.

Проектування або модернізація системи підігрівачів або охолоджувачів є рішенням задачі оптимізації з використанням економіко-математичної моделі. У таких моделях проектування і управління вирішальне значення має вибір критерію оптимальності, що дозволяє визначити оптимальне технічне рішення. Ця сформульована задача значно ускладнюється при появі забруднень поверхні теплообміну у часі. Рішення такої задачі потребує наявність закону передбачення величини забруднень. Головною особливістю передбачення забруднень, є те, що дотичне напруження стінки обчислюється на основі формул для коефіцієнта тертя на основному гофрованому полі каналу пластинчастого теплообмінника. Для використання цього виразу інженеру необхідно знати тільки геометричні параметри основного гофрованого поля пластини – кут нахилу гофри до поздовжньої осі пластини β і співвідношення геометричних розмірів гофрування γ , які можна виміряти на реальних пластинах. Представлена у роботі математична модель дозволяє визначити вплив геометричних параметрів пластини на робочі характеристики пластинчастого теплообмінника.

Отримано нові експериментальні результати по забрудненню поверхні теплопередачі при нагріванні сольових розчинів води. Показано, що присутність турбулізуючих елементів на поверхні значно знижує інтенсивність утворення відкладень. На працюючому цукровому заводі, протягом двох сезонів цукроваріння, був проведений моніторинг роботи 4-х послідовно встановлених розбірних пластинчастих теплообмінників. З аналізу одержаних даних було зроблено висновок, що одним з найбільш важливих факторів, що впливають на інтенсивність забруднень, є концентрація забруднюючих речовин в розчині. Значення опору відкладень відносно швидко переходить до асимптотичного значення. Процес утворення відкладень протікає інтенсивніше при більш високій температурі поверхні. Розподіл температури поверхні патрубків, що нагрівається в експериментальній установці вище посередині і знижується з наближенням до країв.

Формування шару відкладень в пластинчастих підігрівачах відбувається в умовах інтенсивного гідродинамічного впливу потоку. Основна частина відкладень утворюється в початковий період (після деякого часу роботи обладнання). Основу відкладень на поверхні нагрівання підігрівачів сатураційного соку і підігрівачів перед випарною станцією складають кристалічні утворення карбонату кальцію, гіпс, кремнезем і органічні речовини. Специфіка утворення кристалічних відкладень на поверхні теплопередачі пластинчастих теплообмінників полягає в тому, що складний характер потоку, що забезпечує високу ступінь турбулізації, призводить до існування зон з високою і низькою швидкістю. Зони зниженої швидкості мають місце у точок контакту суміжних пластин або у країв пластини, і є центрами кристалізації.

На поверхні теплопередачі відкладення формуються у вигляді пористого «коржа», що має форму каналів. Якісний склад відкладень досить близький до класичного складу, описаного в літературі. На поверхні пластин і розподільної ділянки присутність жорсткого накипу не помічено. Всі відкладення при розкритті теплообмінників легко видаляються механічно і змиваються водою. Забруднення по стороні пари відсутні. З моніторингу роботи апаратів можна зробити висновки, що зупинка теплообмінників на чищення проводиться по досягненню втрат тиску в апараті критичної позначки. Крім того, найбільш забруднюється перший по ходу нагріву соку апарат (3 рази за 130 днів роботи), далі 2-й – одна чистка; підігрівачі 3-го і 4-го ступеня протягом усього періоду експлуатації не чистилися. Забруднення, головним чином, утворюються на розподільній частині пластин і в колекторах, і складаються із залишків продуктів переробки і частково солей, мають пухку структуру, легко видаляються при чищенні з розбиранням апарату.

В роботі розроблена та запропонована науково обґрунтована методика реконструкції систем підігрівачів шляхом заміни кожухотрубних апаратів на пластинчасті. Модернізація включає в себе оцінку енергоефективності використання енергії методом пінч-аналізу випарної станції в цілому і відділення попереднього нагріву соку, де встановлені пластинчасті підігрівачі.

Проектування або реконструкції систем пластинчастих теплообмінних апаратів повинні включати не тільки розрахунок теплообмінних апаратів, що входять в систему, але й оцінку загальної енергоефективності системи і коректну оцінку гідравлічного опору з урахуванням забруднень в процесі експлуатації. Оцінку енергоефективності виробничого об'єкта в цілому рекомендується проводити з використанням методу пінч-аналізу, після чого здійснюється оптимальне проектування системи пластинчастих теплообмінних апаратів за критерієм приведених витрат. Перевірку проектних розрахунків теплообмінників необхідно проводитися з урахуванням забруднення теплообмінних поверхонь у часі, прогнозування працездатності по заданому критерію оптимальності, визначення термінів планових зупинок на чистку апаратів. При необхідності проводиться модернізація насосного і допоміжного обладнання на основі прогнозних розрахунків по забрудненню.

В рамках запропонованої математичної моделі отримав подальший розвиток підхід до оцінки асимптотичного характеру появи відкладень. Представлена його фізико-математична модель, яка була реалізована в процесі проектування системи підігрівачів працюючого цукрового заводу. На основі представлених моделей і методів оптимального проектування розбірних пластинчастих теплообмінних апаратів створено математичне забезпечення для вибору типу і розрахунку поверхні теплопередачі теплообмінників за критерієм приведених витрат з урахуванням появи відкладень в процесі експлуатації.

Проведені розрахунки показали працездатність встановленого пластинчастого обладнання протягом декількох сезонів експлуатації, що підтверджено актами впровадження представленої теорії на стадії проектування. Результатами натурних спостережень і розрахунків показано, що забруднення в каналах пластинчастих теплообмінників мають асимптотичний характер в часі. При незмінних умовах протікання процесу утворення забруднень, асимптотичні значення термічного опору забруднень обернено пропорційні дотичному напруженню на стінці. Представлена математична модель дає можливість прогнозувати термічний опір забруднень для механізмів формування накипу і

осадження зважених часток при різних швидкостях потоку і температурах поверхні стінки.

Ключові слова: пластинчастий теплообмінний апарат, забруднення поверхні теплопередачі, приведені витрати, розрахунок системи теплообмінників, енергозбереження.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Демирский А.В. Реконструкция тепловой схемы сахарного завода с использованием пластинчатых теплообменных аппаратов / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.В. Демирский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: ХДПУ, 2003. – № 2. – С. 3–9.

2. Демирский А.В. Применение пластинчатых теплообменных аппаратов для модернизации спиртового производства / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.В. Демирский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: ХДПУ, 2004. – № 1. – С. 5–9.

3. Demirskyy O.V. Modernization of distillery plant with using of plate heat exchangers / L.L. Tovazhnynsky, O.V. Demirskyy, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin // CHISA'2004: 16th International conf. «Chemical and Process Engineering», 22-26 august 2004, Prague, – P. 237–243.

4. Демирский А.В. Энергосберегающее теплообменное оборудование в сахарной промышленности / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.В. Демирский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин // Пищевая промышленность, 2004. – № 10. – С. 50–54.

5. Демирский А.В. Применение пластинчатых теплообменных аппаратов в брагоректификационных установках / А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2005.– № 2. – С. 115–121.

6. Демирский А.В. Энергосберегающая модернизация ректификационных установок с использованием пластинчатого теплообменного оборудования /

Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, А.В. ДЕМИРСКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, Г.Л. ХАВИН // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – № 2. – С. 3–6.

7. Демирский А.В. Применение пластинчатых и спиральных теплообменников на стадии разваривания и осахаривания в спиртовом производстве / А.В. Демирский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – № 2. – С. 84–88.

8. Демирский А.В. Реконструкция отделения очистки сахарного сока с применением пластинчатых теплообменников / А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2008. – № 2. – С. 98–102.

9. Демирский А.В. Один подход к расчету оптимального пластинчатого теплообменника / О.П. Арсеньева, А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Проблемы машиностроения, 2011. – Т. 14, № 1. – С. 23–31.

10. Демирский А.В. Выбор оптимальных параметров двухступенчатых пластинчатых подогревателей / О.П. Арсеньева, А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – № 1. – С. 95–102.

11. Демирский А.В. Модернизация системы последовательно установленных подогревателей сахарного сока / О.П. Арсеньева, Т.Г. Бабак, А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: 2011. – Вип. 39. – Т. 2. – С. 151–155.

12. Демирский А.В. Проектирование пластинчатого теплообменника при ограничениях на его стоимость / О.П. Арсеньева, Т.Г. Бабак, А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – № 3. – С. 8–11.

13. Демирский А.В. Практическая реконструкция системы подогревателей сахарного сока перед выпариванием / Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, О.П. Арсеньева, А.В. Демирский, Г.Л. Хавин // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2012. – № 2. – С. 99–103.

14. Demirskyy O. Accounting for Thermal Resistance of Cooling Water Fouling in Plate Heat Exchangers / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynskyy, P. Kapustenko, O. Demirskyy // Chemical Engineering Transactions, 2012. – V.29 – P. 1327–332.

15. Demirskyy O. Heat Transfer and Friction Factor in Criss Cross Flow Channels of Plate and Frame Heat Exchangers / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynskyy, P. Kapustenko, O. Demirskyy // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2012. № 46(6). – P. 634–641.

16. Demirskyy O. The modified analogy of heat and momentum transfers for turbulent flows in channels of plate heat exchangers / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynskyy, P. Kapustenko, O. Demirskyy // Chemical Engineering Transactions. 2013. – V. 35. – P. 487-492.

17. Demirskyy O. Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynskyy, P. Kapustenko, O. Demirskyy // Applied Thermal Engineering. 2014. – V. 70. – P. 1208 – 1215.

18. Демирский А.В. Мониторинг динамики работы пластинчатых подогревателей сахарного сока в рабочих условиях / А.В. Демирский, М.С. Георгиадис, Л.Л. Товажнянский, О.П. Арсеньева и др. // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2015. – № 3. – С. 72–77.

19. Демирский А.В. Модернизация выпарной установки концентрирования сахарного сока / Т.Г. Бабак, А.В. Демирский, И.Б. Рябова, А.Н. Оробей // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2015. – № 7 (1116). – С. 95–102.

20. Демірський О.В. Розрахунок взаємозв'язаних теплообмінних систем / О.В. Демірський // Тези доповідей XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків: НТУ «ХП», 2010. – Ч. II. – С. 158.

21. Demirskyy O. The influence of fouling on PHE performance in sugar industry / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynskyy, P. Kapustenko, O. Demirskyy, G. Khavin // Computer Aided Process Engineering University of Paderborn, 2015. – P. 139.

ABSTRACT

Demirskyy O.V. Heat transfer processes when deposits forming on the working surfaces of gasketed plate heat exchangers – Qualifying scientific work as a manuscript

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

The thesis is presented for protection in a specialized Academic Council Д 64.050.05 in National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute».

The thesis is dedicated the problems of heat transfer intensification and development of optimal design methods of gasketed plate heat exchangers and their systems with take into consideration the heat surface foiling during operation.

From the analysis of the state of the question it was concluded that the methods of modeling, optimization and design of plate heat exchangers, taking into account the appearance of deposits during the operation, are poorly worked out and require in-depth studies taking into account the geometric parameters of the corrugated plates and the nature of the contaminants. To ensure the reliability of the used mathematical models, their experimental verification is required.

For problems of chemical technology, where the main pollutants are salts, it is characteristic of the deposition of suspended particles and the loss of crystalline formations. Therefore, the thesis proposes to accept the hypothesis when the contamination in the channels of plate heat exchangers has asymptotic character in time. Under the unchanging conditions of the course pollution formation, the asymptotic values of the thermal resistance of contaminants are inversely proportional to the tangential stress on the wall. This feature for the channels of plate gasketed heat exchangers is the same in nature and can be described by the same relations as for straight channels and pipes.

The experimental and theoretical data was analyzed and it have made possible to conclude that for the same conditions of work one can derive a single dependence between the initial level of deposits in solutions of calcium salts and the tangential stress on the heat transfer surface, and it's regardless of the geometry of the considered surface. To determine the thermal resistance of foulings only according to the purity of the coolant and its chemical composition, further experimental and theoretical studies in this direction are needed.

For the first time a method of optimal design of a plate heat exchanger and a plate heat exchanger system has been developed on the basis of the adjusted cost criterion. A mathematical model is proposed, which allows taking into account the appearance of deposits on the heat transfer surface during the work, which is used for optimal calculation of gasketed heat exchangers on the criterion of adjusted costs.

Setting the optimizing problem as a minimum of total space or cost includes only capital costs, and it's ignoring the operating costs during the work of heaters. Nowadays, when the cost of operating costs has dramatically increase, not taking into account them can lead to significant over-utilization of the costs in the process operation of heat exchangers. Thus, the task of calculating two or more units installed in serious in addition to ensuring a minimum of capital costs should include and minimize operating costs. This requires implementation of the multi-purpose programming approach, which includes the development of theoretical and practical approaches to substantiate the choice of criteria and indicators of economic efficiency of modernization of heat exchange systems. In addition, it is necessary to develop a methodology for assigning weight coefficients and mathematical methods for solving technical and economic problems within the framework of multi-purpose programming and the introduction of reliable practical indicators of the economic efficiency of project implementation.

Designing or upgrading of the system of heaters or coolers is the solution to the optimization problem using the economic-mathematical model. In such models of design and management, the choice of the optimality criterion is crucial, which allows us to determine the optimal technical solution. This formulated problem is much more

complicated when the surface heat transfer fouling in time. The decision of such a task requires the existence of a law predicting the magnitude of pollution. The main feature of prediction of pollution is that the shearing stress on the wall is calculated on the basis of the formulas for the coefficient of friction on the main corrugated field channel of the plate heat exchanger. To use this expression, an engineer needs to know only the geometric parameters of the main corrugated plate field – the angle of inclination of the corrugation to the longitudinal axis of the plate and the ratio of geometric sizes of corrugation, which can be measured on real plates. The mathematical model presented in this work allows one to determine the influence of the geometric parameters of the plate on the performance characteristics of the plate heat exchanger.

New experimental results for the heat transfer surface fouling in during heating of saline water solutions have been obtained. It is shown that the presence of turbulent elements on the surface greatly reduces the intensity of formation of deposits. At the working sugar factory, during two seasons of sugar refining, the monitoring of the work of 4 in serious installed gasketed plate heat exchangers was monitored. From the analysis of the obtained data it was concluded that one of the most important factors influencing the intensity of fouling is the concentration of pollutants in the solution. The value of the resistance of the deposits relatively quickly goes to the asymptotic value. The process of formation of sediments proceeds more intensively at a higher temperature of the surface. The temperature distributions on the surface of the pipe, which is heated in the experimental installation, increase in the middle of the pipe, and decreases to the edges.

Formation of a layer of deposits in plate heaters occurs in conditions of intense hydrodynamic effect of the flow. The bulk of the deposits are formed in the initial period (after some time of equipment operation). The basis of the deposits on the surface of the heating of the heaters of the carbonation juice and heaters in front of the evaporation station are the crystalline formations of calcium carbonate, gypsum, silica and organic matter. The specificity of the formation of crystalline deposits on the surface of the heat transfer of plate heat exchangers lies in the fact that the complex

nature of the flow, which provides a high degree of turbulence, leads to the existence of zones with high and low velocity. The zones of reduced velocity take place at the contact points of adjacent plates or at the edges of the plate, and are centers of crystallization.

On the surface of the heat transfer deposits are formed in the form of porous "cake", which has the form of channels. The qualitative composition of deposits is quite close to the classical composition described in the literature. On the surface of the plates and the distributive part, the presence of hard scale was not observed. All deposits at the opening of heat exchangers are easily removed mechanically and washed off with water. Fouling on the steam side is absent. From the monitoring of the operation of the units it can be concluded that the stopping of heat exchangers for cleaning is carried out in order to achieve pressure drops in the units of the critical value. In addition, the most contaminated by the first juice heating unit (3 times for 130 days of work), then the 2nd – one cleaning; heaters of the 3rd and 4th degrees during the whole period of operation have not been cleaned. Fouling are mainly formed on the distribution part of the plates and in the collectors, and consist of residues of products of processing and partially salts, have a loose structure, are easily removed when cleaning with the disassembly of the apparatus.

In the work, the scientifically grounded method of reconstruction of heaters systems, by replacing the shell and tubular heat exchangers with PHE ones was developed and proposed. Modernization includes the assessment of the energy efficiency of energy use by the method of pinch analysis of the evaporation station in general and the pre-heating section of the juice, where the plate heaters are installed.

Design and reconstruction of plate heat exchangers should include not only the calculation of heat exchangers included in the system, but also assessment of the overall system efficiency and correct assessment of hydraulic resistance based pollution during the operation. Estimated energy production facility generally recommended with the use of pinch analysis, after which the optimal system design of plate heat exchangers criteria for adjusted costs. Checking design calculations necessary heat made taking into account fouling of heat transfer surfaces in time

forecasting performance for a given optimality criterion, the timing of planned stops for cleaning heat exchangers. If necessary, modernization of pumping and auxiliary equipment is carried out on the basis of the forecast calculations for fouling.

In the framework of the proposed mathematical model, a further development approach was obtained to evaluate the asymptotic nature of the appearance of deposits. His physical and mathematical model was presented, which was realized in the process of designing a system of heaters operating at a sugar factory. Based on presented models and methods of optimal design of gasketed plate heat exchangers, the software was provided for selecting the type and calculation of the heat transfer surface of heat exchangers based on the criterion of adjusted cost taking into account the appearance of deposits in the process of operation.

The performed calculations showed the performance of the installed plate equipment during several seasons of operation, which is confirmed by the acts of implementation of the presented theory at the design stage. The results of field observations and calculations show that the contamination in the channels of plate heat exchangers has asymptotic character in time. Under the unchanging conditions of the course of the formation of fouling, the asymptotic values of the thermal resistance of deposits are inversely proportional to the tangential stress on the wall. The presented mathematical model gives an opportunity to predict the thermal resistance of fouling for the mechanisms of formation of scale and deposition of suspended particles at different flow velocities and temperatures of the surface of the wall.

Keywords: plate heat exchanger, foiling on heat transfer surface, adjusted cost, calculation of heat exchangers system, energy saving.

REFERENCES

1. Demirskiy A.V. Rekonstruktsiya teplovoy shemyi saharnogo zavoda s ispolzovaniem plastinchatyih teploobmennyih apparatov / L.L. Tovazhnyanskiy, A.V. Demirskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin // Integrovani tehnologiyi ta energoberezhennya. – Harkiv: HDPU, 2003. – № 2. – P. 3–9.

2. Demirskiy A.V. Primenenie plastinchatyih teploobmennyih apparatov dlya modernizatsii spirtovogo proizvodstva / L.L. Tovazhnyanskiy, A.V. Demirskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: HDPU, 2004. – № 1. – P. 5–9.

3. Demirskyy O.V. Modernization of distillery plant with using of plate heat exchangers / L.L. Tovazhnynsky, O.V. Demirskyy, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin // CHISA'2004: 16th International conf. «Chemical and Process Engineering», 22-26 august 2004, Prague, – P. 237–243.

4. Demirskiy A.V. Energoberegayuschee teploobmennoe oborudovanie v saharnoy promyishlennosti / L.L. Tovazhnyanskiy, A.V. Demirskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin // Pischevaya promyishlennost, 2004. – № 10. – P. 50–54.

5. Demirskiy A.V. Primenenie plastinchatyih teploobmennyih apparatov v bragorektifikatsionnyih ustanovkah / A.V. Demirskiy, G.L. Havin // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «KhPI», 2005. – № 2. – P. 115–121.

6. Demirskiy A.V. Energoberegayuschaya modernizatsiya rektifikatsionnyih ustanovok s ispolzovaniem plastinchatogo teploobmennogo oborudovaniya / L.L. Tovazhnyanskiy, A.V. Demirskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «KhPI», 2006. – № 2. – P. 3–6.

7. Demirskiy A.V. Primenenie plastinchatyih i spiralnyih teploobmennikov na stadii razvarivaniya i osaharivaniya v spirtovom proizvodstve / A.V. Demirskiy, P.A. Kapustenko, G.L. Havin // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «KhPI», 2007. – № 2. – P. 84–88.

8. Demirskiy A.V. Rekonstruktsiya otdeleniya ochistki saharного soka s primeneniem plastinchatyih teploobmennikov / A.V. Demirskiy, G.L. Havin // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «KhPI», 2008. – № 2. – P. 98–102.

9. Demirskiy A.V. Odin podhod k raschetu optimalnogo plastinchatogo teploobmennika/ O.P. Arseneva, A.V. Demirskiy, G.L. Havin // Problemyi mashinostroeniya, 2011. – T. 14, № 1. – P. 23–31.

10. Demirskiy A.V. Vyibor optimalnyih parametrov dvuhstupenchatyih plastinchatyih podogrevateley / O.P. Arseneva, A.V. Demirskiy, G.L. Havin //

Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «KhPI», 2011. – № 1. – P. 95–102.

11. Demirskiy A.V. Modernizatsiya sistemyi posledovatelno ustanovlenniyh podogrevateley sahnogo soka / O.P. Arseneva, T.G. Babak, A.V. Demirskiy, G.L. Havin // Naukovi pratsi ONAKhT. – Odesa: 2011. – Vyp. 39. – T. 2. – P. 151–155.

12. Demirskiy A.V. Proektirovanie plastinchatogo teploobmennika pri ogranicheniyah na ego stoimost / O.P. Arseneva, T.G. Babak, A.V. Demirskiy, G.L. Havin // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «KhPI», 2011. – № 3. – P. 8–11.

13. Demirskiy A.V. Prakticheskaya rekonstruktsiya sistemyi podogrevateley sahnogo soka pered vyiparivaniem / L.L. Tovazhnyanskiy, O.P. Arseneva, A.V. Demirskiy, G.L. Havin// Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «KhPI», 2012. – № 2. – P. 99–103.

14. Demirskyy O. Accounting for Thermal Resistance of Cooling Water Fouling in Plate Heat Exchangers / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynsky, P. Kapustenko, O. Demirskyy // Chemical Engineering Transactions, 2012. – V.29 – P. 1327–332.

15. Demirskyy O. Heat Transfer and Friction Factor in Criss Cross Flow Channels of Plate and Frame Heat Exchangers / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynsky, P. Kapustenko, O. Demirskyy // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2012. № 46(6). – P. 634–641.

16. Demirskyy O. The modified analogy of heat and momentum transfers for turbulent flows in channels of plate heat exchangers / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynsky, P. Kapustenko, O. Demirskyy // Chemical Engineering Transactions. 2013. – V. 35. – P. 487-492.

17. Demirskyy O. Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynsky, P. Kapustenko, O. Demirskyy // Applied Thermal Engineering. 2014. – V. 70. – P. 1208 – 1215.

18. Demirskiy A.V. Monitoring dinamiki raboty plastinchatyih podogrevateley sahnogo soka v rabochih usloviyah / A.V. Demirskiy, M.S. Georgiadis, L.L. Tovazhnyanskiy, O.P. Arseneva i dr.// Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv: NTU «KhPI», 2015. – № 3. – P. 72–77.

19. Demirskiy A.V. Modernizatsiya vyiparnoy ustanovki kontsentri-rovaniya saharnogo soka / T.G. Babak, A.V. Demirskiy, I.B. Ryabova, A.N. Orobey // Visnyk NTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – № 7 (1116). – P. 95–102.

20. Demirskiy O.V. Rozrakhunok vzaiemozv'iazanykh teploobminnykh system / O.V. Demyrskiy // Tezy dopovidei XVIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. – Ch. II. – P. 158.

21. Demirskyy O. The influence of fouling on PHE performance in sugar industry / O. Arsenyeva, L. Tovazhnynskyy, P. Kapustenko, O. Demirskyy, G. Khavin // Computer Aided Process Engineering University of Paderborn, 2015. – P. 139.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 Аналіз процесів формування забруднень і сучасний стан проблеми прогнозування їх впливу на працездатність пластинчастих теплообмінників	16
1.1. Формування відкладень на поверхні теплопередачі і його вплив на працездатність теплообмінників	17
1.1.1. Механізм осадження продуктів забруднення	20
1.1.2. Видалення і винесення частинок відкладень	22
1.2. Аналіз сучасного стану теоретичних і експериментальних досліджень моделювання роботи пластинчастих теплообмінників з урахуванням забруднення поверхні теплопередачі.....	24
1.3. Досягнення в математичному моделюванні параметрів теплопередачі і величини втрат тиску в пластинчастих теплообмінниках з урахуванням забруднення	31
1.3.1. Аналіз теоретичних моделей та експериментальних даних величини гідравлічного опору каналів пластинчастих теплообмінників	31
1.3.2. Порівняння моделей теплопередачі в пластинчастих апаратах з урахуванням відкладень на поверхні теплопередачі	36
1.4. Мета і основні завдання дослідження по моделюванню роботи в умовах забруднення	37
Висновки за розділом 1	39
РОЗДІЛ 2 Теоретичні основи оптимального проектування пластинчастих теплообмінників з урахуванням забруднення теплообмінної поверхні.....	40
2.1. Проектування пластинчастого теплообмінного обладнання на основі критерію приведених витрат.....	41
2.1.1. Розрахунок оптимального пластинчастого теплообмінника за критерієм приведених витрат	41
2.1.2. Вибір оптимальних параметрів двоступеневих пластинчастих підігрівачів	51

2.1.3. Оптимальне проектування системи послідовно встановлених пластинчастих підігрівачів.....	57
2.1.4. Загальне математичне формулювання завдання оптимального проектування систем пластинчастих теплообмінників	61
2.2. Математичне моделювання процесу врахування кристалічних відкладень на поверхні пластинчастих підігрівачів.....	67
2.2.1. Теоретичні моделі забруднення, які використовуються при розрахунку теплообмінних апаратів.....	67
2.2.2. Термічний опір забруднень і зміна коефіцієнта теплопередачі.....	73
2.2.3. Методика урахування динаміки розвитку відкладень	75
2.3. Математична модель прогнозування втрат тиску при забрудненні поверхні пластинчастих теплообмінників.....	80
Висновки за розділом 2	83
РОЗДІЛ 3 Експериментальні та натурні дослідження процесів формування відкладень на поверхні пластинчастих теплообмінних апаратів.....	107
3.1. Експериментальне дослідження кристалічного забруднення поверхні теплопередачі при швидкісному нагріванні води	85
3.1.1. Опис експериментальної установки для проведення досліджень	85
3.1.2. Постановка і проведення експерименту	87
3.1.3. Результати експериментів і аналіз впливу різних чинників процесу на інтенсивність утворення відкладень	90
3.2. Натурні дослідження динаміки забруднень пластинчастих підігрівачів, встановлених послідовно	95
3.2.1. Технічна реалізація обстеження роботи системи підігрівачів в робочих умовах і аналіз вхідних даних	96
3.2.2. Аналіз результатів натурних спостережень і вимірювань роботи пластинчастих підігрівачів.....	100
3.2.3. Моніторинг динаміки роботи системи послідовно встановлених підігрівачів в процесі експлуатації.....	104
3.3. Аналіз емпіричних коефіцієнтів математичних моделей прогнозування забруднення, отриманих експериментально	105
Висновки за розділом 3	108

РОЗДІЛ 4 Загальна методика проектування та модернізації системи встановлених пластинчастих теплообмінних апаратів на основі енергозбереження з урахуванням забруднення теплообмінної поверхні	110
4.1. Наукові основи практичної реконструкції та модернізації системи послідовно встановлених підігрівачів	111
4.2. Аналіз енергоефективності схем модернізації з використанням методів пинч-аналізу.....	113
4.3. Тепловий і гідравлічний аналіз роботи пластинчастого підігрівача з урахуванням появи відкладень на поверхні теплопередачі	122
Висновки за розділом 4	132
РОЗДІЛ 5 Практична реконструкція і проектування нових систем теплообмінників на виробництві.....	134
5.1. Оптимальний розрахунок підігрівача цукрового соку за критерієм приведених витрат	134
5.2. Практична реалізація завдання модернізації системи пластинчастих теплообмінників на основі рішення задачі мінімізації приведених витрат.....	142
5.3. Тепловий і гідравлічний аналіз роботи пластинчастого підігрівача системи з урахуванням появи відкладень на поверхні теплопередачі	145
5.4. Впровадження методики проектування за критерієм приведених витрат з урахуванням появи відкладень для розрахунку пластинчастих дефлегматорів у виробництві спирту.....	149
5.5. Математичне забезпечення для автоматизованого проектування та оптимального розрахунку системи теплообмінників, розрахунок економічних показників якості роботи і прогнозування працездатності	154
Висновки за розділом 5	158
ВИСНОВКИ.....	159
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	160
ДОДАТКИ.....	174