

УДК 66.021.4

Мацегора О.І., аспірант, Арсеньєва О.П., д.техн.н., професор, Кусаков С.К., аспірант,  
Зоренко В.В., аспірант, Демірський О.В., к.техн.н., інженер

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ  
З ПЛАСТИНАМИ РІЗНОЇ ФОРМИ ГОФРУВАННЯ В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ  
ТЕПЛОПЕРЕДАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ**

*АТ "Снівдружність-Т", Харків, Україна*

**Ключові слова:** математична модель, пластинчатий теплообмінник, поверхня теплопередачі, забруднення поверхні теплопередачі, геометрія гофрування пластин

**Вступ**

Сталий розвиток сучасного суспільства вимагає ефективного використання енергії. В даний час велика його частина генерується спалюванням викопного палива. Це призводить не тільки до виснаження обмежених природних ресурсів, а й до викиду шкідливих речовин, в тому числі парникових газів і вуглекислого газу [1]. Обмежити споживання енергії, одержуваної з первинних джерел, можливо шляхом ефективної рекуперації тепла з використанням ефективного теплообмінного обладнання, такого як компактні теплообмінники [2].

Пластинчасті теплообмінники є одним з найбільш широко використовуваних в промисловості типів компактних теплообмінників. Принципи побудови і роботи ПТО добре описані в літературі, наприклад, книга [3]. Вони набагато менші за габаритами і внутрішнім об'ємом, ніж класичні кожухотрубні теплообмінники, використовують набагато менше матеріалу для поверхні теплообміну і мають менші екологічні наслідки. Серед переваг ПТО – менша вартість з використанням дорогих матеріалів [4] і температурне наближення до 1 К, що дуже важливо для ефективності рекуперації тепла. Це зумовило ефективне використання ПТО в різних галузях застосування: в хімічній промисловості [5], на нафтопереробних заводах [6], харчовій промисловості [7] і т.і. Для розширення впровадження ПТО розроблено різні види спеціальних конструкцій, таких як зварні [6] та з каналами перемінного профілю для конденсаційних процесів [8]. Розрахунок таких теплообмінників ведеться на базі математичного моделювання [9] з використанням емпіричних кореляційних рівнянь [10], напівемпіричних [11] та теоретичних [12] співвідношень. Це дозволило розробити методи розрахунку складних конденсаційних процесів [13] та враховувати вплив забруднень поверхні теплопередачі [14].

Підвищення енергоефективності промислових процесів потребує використання нових підходів, які повинні використовувати сучасні принципи інтеграції теплових процесів [15], які добре зарекомендували себе у підвищенні енергетичної ефективності багатьох промислових процесів, як показано в роботі [16] на прикладі виробництва фосфорних добрив та в роботі [17] при оптимізації енергоспоживання на промисловому майданчику з різними споживачами теплової енергії.

Поверхня теплопередачі ПТО утворена гофрованими пластинами, зібраними в пакет з точками контакту між сусідніми пластинами. Це створює жорстку конструкцію, яка здатна витримувати більшу різницю тисків теплообмінних потоків. Канали між пластинами мають складну геометрію, яка сприяє інтенсивній турбулентності, що обумовлює збільшення теплообміну. Це також призводить до більш високого рівня напруженості зсуву на стінці каналу, що створює ефект зменшення забруднення, як було показано експериментально [18] для моделі виникнення відкладення на поверхні каналу ПТО.

Більш низька тенденція до забруднення в ПТО, в порівнянні з кожухотрубними теплообмінниками, добре відома і це ілюструється рекомендованими термічними опорами забруднення для різних середовищ [2]. Ці приблизні значення для конструкції ПТО в десятки разів менше, ніж в стандартах Асоціації виробників трубчастих теплообмінників [19]. Однак, такі приблизні усереднені значення теплового опору відкладення можуть привести до значної помилки у визначенні характеристик ПТО в умовах забруднення, так як загальний коефіцієнт теплопередачі в ПТО може бути в два і більше разів вище, ніж в трубчастих теплообмінниках. Для правильного прогнозування забруднення для води в ПТО, з гофрованих пластин які виробляються серійно, була запропонована модель заснована на локальних параметрах теплового процесу [20]. Дана модель отримала подальший розвиток з введенням рівняння для швидкості забруднення в безрозмірній формі в роботі [21]. Геометрична форма гофрування пластин значно впливає на продуктивність ПТО. Метою цієї роботи є вивчення впливу геометрії гофрування пластин на теплові та гідравлічні характеристики ПТО в умовах забруднення. Розглянуто приклад роботи ПТО в промисловості.

### **Математична модель**

Термогідравлічна математична модель розвитку відкладення на поверхні теплообміну ПТО розроблена на основі наступних припущень:

- I. Процес відбувається в одноходовому ПТО з протитечією.
- II. Умови процесу у всіх каналах для одного потоку однакові.
- III. Втрати тепла в навколишнє середовище не враховуються.
- IV. Параметри процесу рівномірно розподілені по каналу і враховуються їх зміни по довжині каналу.
- V. Забруднення по стороні гарячого потоку не розглядається.
- VI. Можливо розглядати канал ПТО, що складається з основного гофрованого поля – 4, розподільних ділянок 2 і 5, і входу-виходу потоку – 1. Рис. 1.
- VII. Домінуючий процес теплопередачі відбувається на основному гофрованому полі пластини, і для всієї пластини може бути розрахований за кореляціями, представленими в статті [22].
- VIII. Втрати тиску в зонах входу/виходу потоку і розподільних ділянках враховуються як місцеві гідравлічні опори.

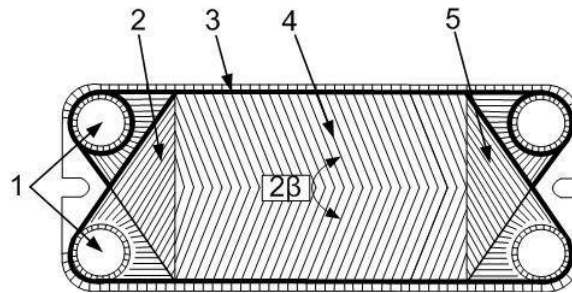


Рисунок 1 – Схематичне зображення пластини ПТО: 1 – отвір, який утворює колектори на вході і виході потоків; 2,5 – зони розподілу потоку; 3 – ущільнююча прокладка; 4 – основна площа поверхні теплопередачі

Математична модель базується на системі диференціальних рівнянь, представлених в роботі [20]. Для оцінки інтенсивності утворення відкладення використовується модель забруднення, заснована на механізмі реакція-транспорт, як представлено в статті [21] в наступній безрозмірній формі:

$$\Phi_f = \frac{\partial \delta_f}{\partial \theta} \frac{d_e \cdot \rho_2}{\mu_2} = \frac{1}{c_D \cdot \frac{K_D^{2/3} \cdot Pr_2^{1/3}}{Nu_2} + c_R \cdot K_R \cdot \exp\left(\frac{E}{R \cdot T_s}\right)} - c_{rm} \cdot Re^* \cdot Pr_2 \frac{\delta_f}{d_e}, \quad (1)$$

$$\text{де } Re^* = \frac{\sqrt{\tau_w \cdot \rho_2 \cdot d_e}}{\mu_2}; \quad K_D = \frac{\mu_2^2 \cdot r_m}{(T_s \cdot \rho_2 \cdot k_B)}; \quad K_R = \frac{\tau_w}{(\rho_2 \cdot d_e \cdot g)}.$$

тут  $Nu_2 = h_2 \cdot d_e / \lambda_2$  теплове число Нуссельта для тепловіддачі при русі рідини в розглянутому каналі;  $Pr_2 = c_{p2} \cdot \mu_2 / \lambda_2$  - число Прандтля;  $\rho_2$  – щільність рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\lambda_2$  – теплопровідність рідини,  $\text{Дж/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $c_{p2}$  – питома теплоємність рідини,  $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $d_e$  – еквівалентний діаметр каналу, м;  $k_B = 1.38048 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постійна Больцмана;  $T_s$  – температура поверхні осадження, К;  $\mu_2$  – динамічна в'язкість, Па·с;  $r_m = 1.36 \cdot 10^{-10}$  – радіус молекули Ван-дер-Ваальса, м;  $\delta_f$  – товщина шару відкладення, м;  $\theta$  – час, с;  $R$  – універсальна газова постійна, Дж/(моль·К);  $E$  – енергія активації, Дж/моль;  $c_D$ ,  $c_R$ ,  $c_{rm}$  – безрозмірні параметри моделі, визначаються за експериментальними даними для конкретних забруднюючих середовищ.

Для оцінки коефіцієнта тертя в каналі на основному гофрованому полі ПТО використовується рівняння (2). Воно було запропоновано в роботі [10] для каналу утвореного пластинами ПТО з різною формою гофри, і використовується з урахуванням шорсткості поверхні за аналогією з рівнянням, запропонованим в тій же формі в роботі [23] для потоку всередині труб.

$$\zeta = 8 \left\{ \left( \frac{12 + p2}{Re} \right)^{12} + \left[ A + \left( \frac{37,530 p1}{Re} \right)^{16} \right]^{-\frac{3}{2}} \right\}^{\frac{1}{12}}. \quad (2)$$

де

$$A = \left[ p4 \cdot \ln \left( p5 \cdot \left( \left( \frac{7 \cdot p3}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \cdot \frac{\varepsilon}{d_e} \right)^{-1} \right) \right]^{16}. \quad (3)$$

Параметри в цих рівняннях розраховуються в залежності від геометричної форми гофри, яка визначається кутом нахилу гофрів до основного напрямку потоку  $\beta$ , градуси і ставленням еквівалентного діаметра до кроку гофрів  $\gamma = d_e/S$ :

$$p1 = \exp(-0.157 \cdot \beta); \quad p2 = \frac{\pi \cdot \beta \cdot \gamma^2}{3}; \quad p3 = \exp\left(-\pi \cdot \frac{\beta}{180} \cdot \frac{1}{\gamma^2}\right); \quad p5 = 1 + \frac{\beta}{10}; \quad (4)$$

$$p4 = \left( 0.061 + \left( 0.69 + \operatorname{tg}\left(\beta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right)^{-2.63} \right) \cdot \left( 1 + (1 - \gamma) \cdot 0.9 \cdot \beta^{0.01} \right).$$

Для розрахунку коефіцієнта тертя для технічно гладкої поверхні пластин ПТО з нержавіючої сталі параметр  $\varepsilon$  в рівнянні (3), що враховує шорсткість, приймається як  $\varepsilon/d_e = 1 \cdot 10^{-5}$ . Для забрудненого каналу ПТО він приймається як  $\varepsilon = \delta_f$ . Для розрахунку тепlopередачі використовується рівняння (5), отримане на основі аналогії перенесення тепла і імпульсу в каналах ПТО, в роботі [24].

$$Nu = \frac{h \cdot d_e}{\lambda} = 0.065 \cdot Re^{6/7} \cdot \left( \frac{\psi \cdot \zeta}{F_x} \right)^{3/7} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14}. \quad (5)$$

Тут  $F_x$  – коефіцієнт збільшення площі через гофрування;  $\psi$  – частка втрат на тертя в загальних втратах тиску в каналі ПТО, що визначається як:

$$\psi = \left( \frac{Re}{A} \right)^{-0.15 \cdot \sin(\beta)} \quad \text{для } Re > A; \quad \psi = 1 \quad \text{при } Re \leq A, \quad \text{де } A = 380 / [\operatorname{tg}(\beta)]^{1.75}. \quad (6)$$

Напруга зсуву на поверхні каналу розраховується з урахуванням збільшення швидкості потоку при зменшенні площі поперечного перерізу каналу внаслідок забруднення:

$$\tau_w = \zeta \cdot \psi \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{8}. \quad (7)$$

Сумарна втрата тиску середовища, що нагрівається в ПТО, розраховується як сума втрат тиску на гофрованому полі, втрат тиску у вхідний і вихідний зонах розподілу з локальними коефіцієнтами гідравлічних опорів  $\zeta_{DZin} = \zeta_{DZout} = 38$  і втрат тиску в портах і колекторах:

$$\Delta P_2 = \int_0^{L_p} \zeta_2 \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_2^2}{2 \cdot d_e} dx + \zeta_{DZin} \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_{2in}^2}{2} + \zeta_{DZout} \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_{2out}^2}{2} + 1.3 \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_{2p}^2}{2}. \quad (8)$$

Використання наведених вище рівнянь спільно з диференціальними рівняннями зі статті [21], з кореляціями для теплофізичних властивостей речовин, які беруть участь у процесі, дає систему рівнянь в приватних похідних, яка описує процес теплообміну з утворенням відкладення в ПТО та враховує вплив геометрії гофрування пластин. Системне рішення методом кінцевих різниць реалізовано з використанням MathCAD. Результати моделювання дозволяють оцінити вплив геометрії пластин на продуктивність ПТО в конкретних умовах процесу, як показано в наступному розділі.

### **Результати моделювання та їх обговорення**

Вплив геометрії гофрування пластин на продуктивність ПТО, в умовах забруднення розглянемо на прикладі, який представлено в статті [25].

ПТО виробництва Альфа Лаваль, тип M15M, встановлений для нагріву слабкого соку перед випарною станцією на цукровому заводі. Моделювання проводиться для температури соку на вході, що дорівнює 102 °С. Він нагрівається паровим конденсатом з температурою 124 °С, який утворюється при першому випаровуванні. Витрата соку становить 290 м<sup>3</sup>/год, а витрата конденсату, який його нагріває, 65 м<sup>3</sup>/год. Встановлений ПТО – одноходовий, 151 пластина.

Для застосованих пластин кут нахилу гофри до основного напрямку потоку  $\beta=35^\circ$ , а відношення еквівалентного діаметра до кроку гофри  $\gamma=0.58$ . Після початкової модернізації станції випарювання з метою зменшення швидкості потоку і втрат тиску в портах і колекторах ПТО був підключений до трубопроводу слабкого соку як з нерухомою, так і з рухомою сторін рами. Безрозмірні параметри в моделі відкладення, представлені рівнянням (1), взяті рівними значенням, визначеним даними моніторингу ПТО на місці, і представлені в роботі [21]:  $c_D=2.291 \cdot 10^6$ ,  $c_R=0.1259$ ,  $c_{rm}=0.451 \cdot 10^{-15}$ , енергія активації  $E=52,100$  Дж/моль. Змодельовані результати динамічної поведінки в часі теплового опору відкладення  $R_f$  і зміни теплового навантаження  $Q$  представлені на рисунку 2 відповідними кривими. Опір теплового забруднення зростає до 0.0003 Вт/(м<sup>2</sup>К), а теплове навантаження падає з 1500 кВт для чистого ПТО до 1300 кВт. Також представлені результати моделювання для ПТО, що складаються з пластин, що утворюють середні канали з середнім кутом  $\beta_m=50^\circ$ , і з пластин з  $\beta_h=65^\circ$ . Для ПТО з пластинами з великим кутом  $\beta$  тепловий опір відкладення набагато менше, а теплове навантаження набагато значніше, ніж для ПТО з  $\beta_f=35^\circ$ . Однак це тягне за собою велику втрату тиску.

Розраховані втрати тиску для ПТО з різними гофрованими пластинами (рис. 2b) виявляють значні відмінності, які з часом змінюються з розвитком відкладення. Втрата тиску в чистому ПТО з  $\beta_f=35^\circ$  становить 23 кПа, але зростає до 62 кПа по асимптоті. Виміряні втрати тиску в цьому ПТО представлені точками (рис. 2b). Для чистого ПТО з  $\beta_m=50^\circ$  втрата тиску становить 37 кПа, що на 60% більше, але на асимптотичній стадії вона дорівнює 69 кПа, що більше тільки на 11%. Однак теплове навантаження на асимптотичній стадії становить 1520 кВт, що вище, ніж значення для чистого ПТО, встановленого в даний час, але, в порівнянні з його асимптотичною стадією, це економить 220

кВт теплової енергії. ПТО з  $\beta_h=65^\circ$  може дати навіть додаткові 70 кВт, але втрата тиску для чистих умов становить 94 кПа і зростає до 130 кПа або на 38%. Така висока втрата тиску неприйнятна, але тенденція її відносно невеликого зростання при забрудненні може бути врахована при аналізі інших варіантів. Щоб зменшити втрату тиску в ПТО і збільшити рекуперацію тепла, розглядається можливість додавання пластин. Результати моделювання теплової поведінки ПТО з 225 різними пластинами представлені на рис. 3. Однак очікуване збільшення рекуперації тепла не спостерігається через різке підвищення теплового опору відкладення. Теплове навантаження для всіх ПТО на асимптотичній стадії навіть дещо знизилося, приблизно на 1%. Це тільки частково компенсується збільшенням площі теплопередачі. У той же час втрата тиску в ПТО стала більш прийнятною для його роботи. Втрата тиску в чистому ПТО з  $\beta_l=35^\circ$  становить 12 кПа і зростає до 46 кПа на асимптотичній стадії процесу. Для чистого ПТО з  $\beta_m=50^\circ$  втрата тиску становить 19 кПа або на 60 % більше, або такою, як для ПТО з 151 пластинами. Однак на асимптотичній стадії вона становить 47 кПа, або практично такою як для ПТО з  $\beta_l=35^\circ$ . З огляду на збільшення рекуперації тепла на 220 кВт, варіант ПТО з  $\beta_m=50^\circ$  набагато краще. З точки зору підвищення рекуперації тепла, вибір ПТО з пластинами з великим кутом гофри  $\beta_h=65^\circ$  виглядає вигідно, так як збільшує теплове навантаження приблизно на 80 кВт. Однак втрата тиску для ПТО з 225 пластинами становить 79 кПа, що є занадто високою. Щоб втрата тиску склала близько 50 кПа, кількість пластин повинна бути збільшена до 340. Для цього потрібно набагато більший і дорогий теплообмінник або навіть два, які встановлені паралельно. Для ПТО з малим і середнім кутами  $\beta_l=35^\circ$  і  $\beta_m=50^\circ$  таке збільшення площі теплопередачі практично не впливає на рекуперацію тепла при зменшенні втрати тиску тільки до 35 кПа. Це не робить такий варіант краще, ніж ПТО з 225 пластинами, з огляду на додаткові витрати.

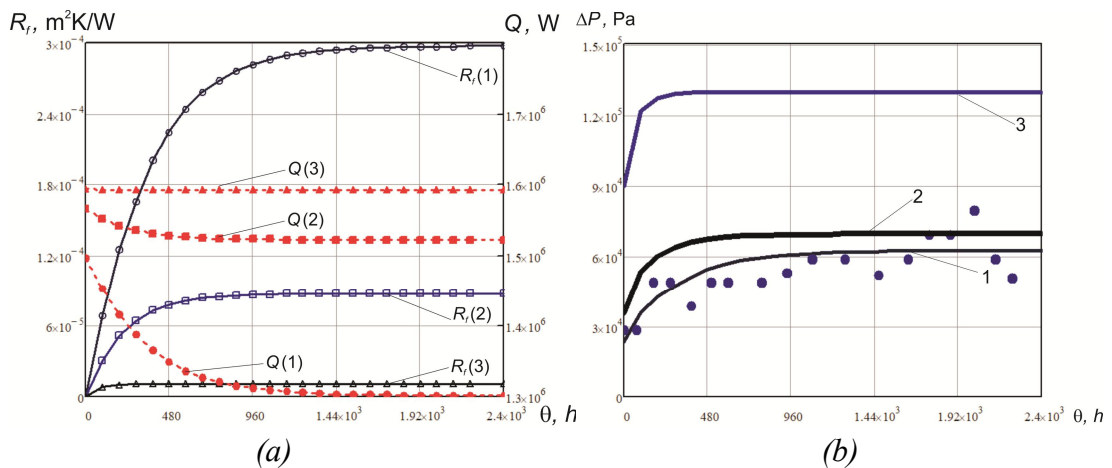


Рисунок 2 – Розвиток в часі для ПТО з 151 пластиною. (а) термічний опір відкладення ( $R_f$ ) і теплові навантаження  $Q$ :  $R_f(1)$ -  $\beta_l=35^\circ$ ;  $R_f(2)$  -  $\beta_m=50^\circ$ ;  $R_f(3)$  -  $\beta_h=65^\circ$ ;  $Q(1)$ -  $\beta_l=35^\circ$ ;  $Q(2)$  -  $\beta_m=50^\circ$ ;  $Q(3)$  -  $\beta_h=65^\circ$ . (б) витрати тиску: 1 -  $\beta_l=35^\circ$ ; 2 -  $\beta_m=50^\circ$ ; 3 -  $\beta_h=65^\circ$

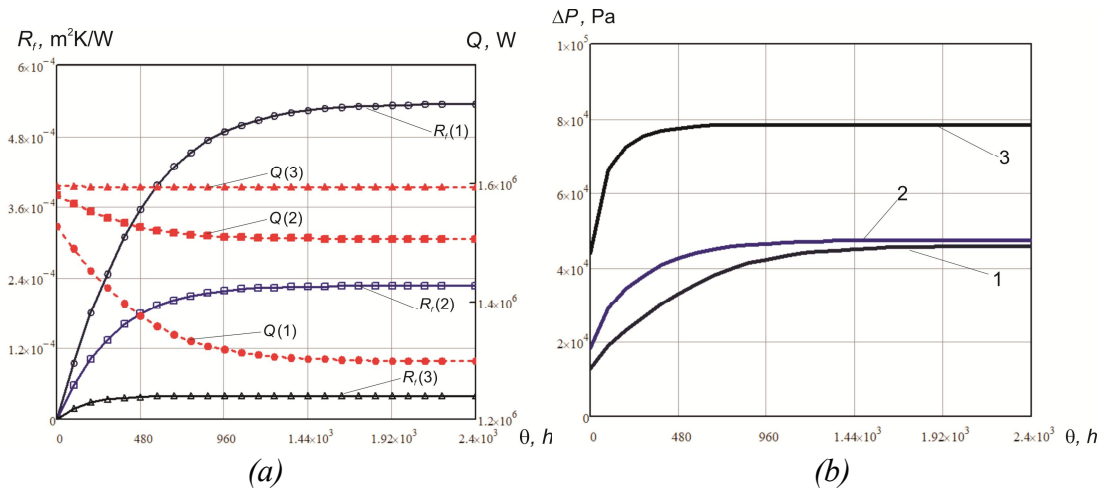


Рисунок 3 – Розвиток в часі для ПТО з 225 пластинами. (а) термічний опір відкладення ( $R_f$ ) і теплові навантаження  $Q$ :  $R_f(1)$  -  $\beta_f=35^\circ$ ;  $R_f(2)$  -  $\beta_m=50^\circ$ ;  $R_f(3)$  -  $\beta_h=65^\circ$ ;  $Q(1)$   $\beta_f=35^\circ$ ;  $Q(2)$  -  $\beta_m=50^\circ$ ;  $Q(3)$  -  $\beta_h=65^\circ$ . (б) втрати тиску: 1 -  $\beta_f=35^\circ$ ; 2 -  $\beta_m=50^\circ$ ; 3 -  $\beta_h=65^\circ$

Щоб оцінити різні варіанти модернізації ПТО, необхідно враховувати економічні міркування. Використання ПТО, що складається з 225 пластин із середнім кутом гофри  $\beta_m=50^\circ$ , дозволяє заощадити 220 кВт теплової енергії в порівнянні з базовим випадком з ПТО з 151 пластин і  $\beta_f=35^\circ$ . Для цукрової кампанії тривалістю 120 днів вона дає 633 600 кВтгод або 2 281 000 МДж. Це дозволяє використовувати менше пари, яка генерується на заводі при спалюванні природного газу. З урахуванням ККД 0.7 для вироблення пари і питомої теплоти згоряння природного газу 39 МДж/м<sup>3</sup>, це дозволить заощадити близько 84 000 м<sup>3</sup> природного газу. Ціна на природний газ для заводу становить 0.31 євро/м<sup>3</sup>, а економія на 120 днів кампанії по буряковому цукру становить 26 000 євро. Ціна однієї пластини M15M з NBR ущільненням в якості запасної частини становить близько 98 євро. Вартість додаткових 112 пластин для модернізації ПТО становить 10 976 євро. Це потребує повторного монтажу пластин на тій же рамі, яку можна легко виконати за 2000 євро, включаючи додаткові витрати. Це означає, що загальна вартість такої модернізації становить близько 13 000 євро з окупністю протягом двох місяців. Інші варіанти, пов'язані з купівлею нового ПТО, менш економічні, так як такий ПТО з 225 пластинами може коштувати близько 25 000 євро, а термін окупності може становити до 5 місяців. Вартість ПТО з 340 пластинами ще більше, і додаткова економія теплової енергії в розмірі 80 кВт не може повністю її компенсувати.

### Висновки

Представлена математична модель дозволяє аналізувати продуктивність ПТО в умовах забруднення на його поверхні теплопередачі і виробити параметри процесу в часі з урахуванням впливу геометрії гофрування пластин. Це повинно бути враховано для правильного вибору ПТО в умовах забруднення. Збільшення рекуперації тепла простим додаванням пластин з однаковим низьким кутом нахилу гофри  $\beta$  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 цей опір може стати набагато більш значним, ніж в меншому ПТО. Однак такий захід може зменшити

втрату тиску в ПТО. Використання пластин з більш високим кутом  $\beta$  може бути кращим в умовах забруднення водою, оскільки навіть при більш високій втраті тиску в чистому ПТО її збільшення може бути меншим, ніж при більш низькому куті  $\beta$  з розвитком відкладення, що призведе до тієї ж втрати тиску після деякого часу роботи ПТО. У той же час кількість рекуперованого тепла може бути набагато вище. Проте, остаточне рішення має бути прийнято на основі правильного моделювання процесу з урахуванням економічних чинників.

### Література

1. Klemeš J.J., Varbanov P.S., & Kapustenko P. (2013). New developments in Heat Integration and intensification, including Total Site, waste-to-energy, supply chains and fundamental concepts. *Applied Thermal Engineering*, 1(61), 1–6.
2. Klemeš J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., 2015. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
3. Товажнянський Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. (2004). Пластинчатые теплообменники в промышленности. Харьков: НТУ «ХПИ».
4. Hajabdollahi H., Naderi M., Adimi S., 2016, A comparative study on the shell and tube and gasket-plate heat exchangers: the economic viewpoint, *Appl. Therm. Eng.* 92: 271–282.
5. Kapustenko P., Boldyryev S., Arsenyeva O., Khavin G., 2009, The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. *Journal of Cleaner Production*. 17(10): 951–958.
6. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y., 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. *Applied Thermal Engineering*. 105: 763–773.
7. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I., 2016b, Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 10(1):131–138.
8. Arsenyeva, O., Tovazhnyansky, L., Kapustenko, P., Perevertaylenko, O., Khavin, G. (2011). Investigation of the new corrugation pattern for low pressure plate condensers. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), 2146–2152.
9. O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, G. Khavin, Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chem. Eng. Trans.* 18 (2009) 791–796.
10. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.
11. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.



12. Arsenyeva, O.P., Tovazhnyanskyy, L.L., Kapustenko, P.O., Demirskiy, O.V. (2014). Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
13. Tovazhnyanskyy, L.L., Kapustenko, P.O., Nagorna, O.G., Perevertaylenko, O.Y. (2004). The simulation of multicomponent mixtures condensation in plate condensers. *Heat transfer engineering*, 25(5), 16–22.
14. A.L. Gogenko, O.B. Anipko, O.P. Arsenyeva, P.O. Kapustenko, Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chem. Eng. Trans.* 12 (2007) 207–212.
15. Клемеш Й., Костенко Ю.Т., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М., Перевертайленко А.Ю., Зулин, Б.Д. (1999). Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки. *Теорет. основы хим. технологии*, 33(4), 420–431.
16. Tovazhnyanskyy L., Kapustenko P., Ulyev L., Boldyryev S., Arsenyeva O. (2010). Process integration of sodium hypophosphite production. *Applied thermal engineering*, 30(16), 2306–2314.
17. Nemet A, Varbanov PS, Kapustenko P, Boldyryev S, Klemeš JJ. Capital cost targeting of total site heat recovery. *Chem Eng Trans* 2012;29:1447–52.
18. Crittenden B.D., Yang M., Dong L., Hanson R., Jones J., Kundu K., Harris J., Klochok O., Arsenyeva O., Kapustenko P., 2015, Crystallization fouling with enhanced heat transfer surfaces. *Heat Transfer Engineering*. 36(7-8): 741–749.
19. TEMA, Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 9ed, TEMA Inc., New York, USA, 2007, 1028–1033
20. Kapustenko P., Klemeš J., Arsenyeva O., Matsegora O., Vasilenko O., 2018, Accounting for local features of fouling formation on PHE heat transfer surface. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 12(4): 619–629.
21. Kapustenko P.O., Klemeš J.J., Matsegora O.I., Arsenyev P.Y., Arsenyeva O.P., 2019, Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in Plate Heat Exchanger. *Energy*. 174, 1049–1059.
22. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy, O.V., 2012. Heat transfer and friction factor in criss-cross flow channels of plate-and-frame heat exchangers. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(6), 634–641.
23. Churchill S.W., Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chemical Engineering*, 1977, 84 (24): 91–92.
24. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.
25. Demirskiy O.V., Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Matsegora O.I., Pugach Y.A., 2018, Prediction of fouling tendency in PHE by data of on-site monitoring. Case study at sugar factory. *Applied Thermal Engineering*, 128: 1074–1081.

Bibliography (transliterated)

1. Klemeš J.J., Varbanov P.S., & Kapustenko P. (2013). New developments in Heat Integration and intensification, including Total Site, waste-to-energy, supply chains and fundamental concepts. *Applied Thermal Engineering*, 1(61), 1–6.

2. Klemeš J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., 2015. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
3. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arseneva O.P. (2004). *Plastinchatyie teploobmenniki v promyshlennosti*. Harkov: NTU «HPI».
4. Hajabdollahi H., Naderi M., Adimi S., 2016, A comparative study on the shell and tube and gasket-plate heat exchangers: the economic viewpoint, *Appl. Therm. Eng.* 92: 271–282.
5. Kapustenko P., Boldyryev S., Arsenyeva O., Khavin G., 2009, The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. *Journal of Cleaner Production*. 17(10): 951–958.
6. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y., 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. *Applied Thermal Engineering*. 105: 763–773.
7. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I., 2016b, Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 10(1):131–138.
8. Arsenyeva, O., Tovazhnyansky, L., Kapustenko, P., Perevertaylenko, O., Khavin, G. (2011). Investigation of the new corrugation pattern for low pressure plate condensers. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), 2146–2152.
9. O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, G. Khavin, Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chem. Eng. Trans.* 18 (2009) 791–796.
10. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.
11. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.
12. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. (2014). Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
13. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Nagorna O.G., Perevertaylenko O.Y. (2004). The simulation of multicomponent mixtures condensation in plate condensers. *Heat transfer engineering*, 25(5), 16–22.
14. A.L. Gogenko, O.B. Anipko, O.P. Arsenyeva, P.O. Kapustenko, Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chem. Eng. Trans.* 12 (2007) 207–212.
15. Klemesh Y., Kostenko Yu.T., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M., Perevertaylenko A.Yu., Zulin, B.D. (1999). *Primenenie metoda pinch-analiza dlya proektirovaniya energosberegayuschih ustanovok neftepererabotki*. *Teoret. osnovyi him. tehnologii*, 33(4), 420–431.
16. Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Ulyev L., Boldyryev S., Arsenyeva O. (2010). Process integration of sodium hypophosphite production. *Applied thermal engineering*, 30(16), 2306–2314.

17. Nemet A, Varbanov PS, Kapustenko P, Boldyryev S, Klemes JJ. Capital cost targeting of total site heat recovery. *Chem Eng Trans* 2012;29:1447–52.
18. Crittenden B.D., Yang M., Dong L., Hanson R., Jones J., Kundu K., Harris J., Klochok O., Arsenyeva O., Kapustenko P., 2015, Crystallization fouling with enhanced heat transfer surfaces. *Heat Transfer Engineering*. 36(7-8): 741–749.
19. TEMA, Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 9ed, TEMA Inc., New York, USA, 2007, 1028–1033
20. Kapustenko P., Klemes J., Arsenyeva O., Matsegora O., Vasilenko O., 2018, Accounting for local features of fouling formation on PHE heat transfer surface. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 12(4): 619–629.
21. Kapustenko P.O., Klemes J.J., Matsegora O.I., Arsenyev P.Y., Arsenyeva O.P., 2019, Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in Plate Heat Exchanger. *Energy*. 174, 1049–1059.
22. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy, O.V., 2012. Heat transfer and friction factor in criss-cross flow channels of plate-and-frame heat exchangers. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(6), 634–641.
23. Churchill S.W., Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chemical Engineering*, 1977, 84 (24): 91–92.
24. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.
25. Demirskiy O.V., Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Matsegora O.I., Pugach Y.A., 2018, Prediction of fouling tendency in PHE by data of on-site monitoring. Case study at sugar factory. *Applied Thermal Engineering*, 128: 1074–1081.

УДК 66.021.4

Мацегора О.І., Арсеньєва О.П., Кусаков С.К., Зоренко В.В., Демірський О.В.

### **ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ З ПЛАСТИНАМИ РІЗНОЇ ФОРМИ ГОФРУВАННЯ В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ**

Представлено математичну модель пластинчастого теплообмінника (ПТО) з пластинами, які випускаються серійно. Модель описує процес теплообміну в каналі між двома сусідніми пластинами. Для обліку забруднення на поверхні теплопередачі використовується модель забруднення реакційно-транспортного типу. Вплив геометрії гофрування пластин на продуктивність ПТО обговорюється на результатах моделювання ПТО, встановленого для нагріву слабкого сиропу, який надходить на випарну станцію цукрового заводу. Проаналізовано вплив геометрії гофрування пластин на ефективність ПТО в умовах забруднення. Обговорюються заходи щодо зменшення забруднення в ПТО шляхом оптимального вибору геометрії гофрування пластин.

**Ключові слова:** математична модель, пластинчатий теплообмінник, поверхня теплопередачі, забруднення поверхні теплопередачі, геометрія гофрування пластин.

Мацегора А.И., Арсеньева О.П., Кусаков С.К., Зоренко В.В., Демирский А.В.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ  
С ПЛАСТИНАМИ РАЗНОЙ ФОРМЫ ГОФРИРОВАНИЯ  
В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Представлена математическая модель пластинчатого теплообменника (ПТО) с серийно выпускаемыми пластинами. Модель описывает процесс теплообмена в канале между двумя соседними пластинами. Для учета загрязнения на поверхности теплопередачи используется модель загрязнения реакционно-транспортного типа. Влияние геометрии гофрировки пластин на производительность ПТО обсуждается на результатах моделирования ПТО, установленного для нагрева слабого сиропа, который поступает на выпарную станцию сахарного завода. Проанализировано влияние геометрии гофрировки пластин на эффективность ПТО в условиях загрязнения. Обсуждаются меры по уменьшению загрязнения в ПТО путем оптимального выбора геометрии гофрировки пластин.

**Ключевые слова:** математическая модель, пластинчатый теплообменник, поверхность теплопередачи, загрязнение поверхности теплопередачи, геометрия гофрировки пластин.

Matsegora O.I., Arsenyeva O.P., Kusakov S.K., Zorenko V.V., Demirskiy O.V.

**CHARACTERISTICS OF PLATE HEAT EXCHANGERS WITH PLATES OF  
DIFFERENT FORM OF CORRUGATION IN CONDITIONS OF HEAT TRANSFER  
SURFACE FOULING**

The mathematical model of the plate heat exchanger (PHE) with commercially produced plates is presented. The model describes the heat transfer process in the channel between two adjacent plates. To account for fouling on the heat transfer surface, the fouling model of reaction and transport type is employed. The influence of plate corrugations geometry on PHE performance is discussed on results of PHE modelling installed for thin juice heating, which comes to evaporation station of the sugar factory. The influence of plate corrugations geometry on PHE performance in fouling conditions is analysed. The measures to mitigate fouling in PHE by optimal selection of plate corrugation geometry are discussed.

**Keywords:** mathematical model, plate heat exchanger, heat transfer, fouling on the heat transfer surface, plate corrugation geometry.