

Мацегора О.І., аспірант, Арсеньева О.П., д.техн.н., професор, Товажнянський Л.Л., д.техн.н., професор, Капустенко П.О. к.техн.н., професор

МОДЕЛІ УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ НА ПОВЕРХНЯХ НАГРІВУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПЛАСТИНЧАТИХ ТЕПЛОБМІННИКІВ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна*

Ключові слова: поверхня теплопередачі, забруднення поверхні теплопередачі, інтенсифікована поверхня теплопередачі, математична модель, пластинчатий теплообмінник.

Вступ

У багатьох промислових застосуваннях теплообмінного обладнання поверхні, що омиваються потоками які беруть участь в процесі теплообміну, схильні до забруднення відкладенням або іншими речовинами, що призводять до зміни поверхні теплопередачі і погіршення інтенсивності теплопередачі по цій поверхні. Це явище може значно погіршити інтенсивність процесу теплообміну і продуктивність теплообмінника, створюючи додатковий термічний опір шару відкладення. Більш того, зменшення площі поперечного перерізу каналів, частково заблокованого відкладенням, може привести до значного збільшення падіння тиску в теплообміннику і, в кінцевому підсумку, до засмічення каналів. Згідно з аналізом різних публікацій, представлених в статті [1], консервативна оцінка забруднення теплообмінника призводить до висновку, що додаткові витрати на забруднення в промислово розвинених країнах становлять близько 0,25 % від валового внутрішнього продукту (ВВП). Забруднення також є причиною близько 2,5 % від загального еквівалентного антропогенного викиду вуглекислого газу. Економічна і екологічна важливість забруднення може бути класифікована за чотирма основними категоріями: (а) капітальні витрати, (б) витрати на електроенергію і вплив на навколишнє середовище, (в) втрати виробництва під час зупинок через забруднення і (г) витрати на технічне обслуговування.

В даний час «практичні рекомендації» для трубчастих теплообмінників, запропоновані ТЕМА [2], вимагають використання табличних значень опорів забруднення для різних технологічних рідин і води різної якості (див. таб. 1). Про фактори забруднення в компактних теплообмінниках з інтенсифікованою теплопередачею інформація більш бідна. Наприклад, деякі доступні дані для пластинчастих теплообмінників (ПТО) (див. таб. 1) представлені в книзі [3]. Всі значення опору відкладень для ПТО в таб. 1 приблизно в десять разів менше, ніж для кожухотрубних теплообмінників, і це підтверджено на практиці. Але точний прогноз забруднення в компактних теплообмінниках вимагає більш детального розуміння процесу забруднення і процедур обліку і зменшення різних типів забруднень.

1. Форми забруднень

Для обладнання, що передає тепло, на даний час визнано шість різних категорій механізмів забруднення в теплообмінниках, у т.ч. і компактних теплообмінниках (КТО):

1. Корозія;
2. Біологічне забруднення;
3. Хімічна реакція;
4. Заморожування;
5. Тверді частинки;
6. Утворення накипу (або кристалізація).

З цих 6-ти категорій Асоціацією виробників трубчастих теплообмінників ТЕМА [2] – п'ять визнаються основними механізмами забруднення, виключаючи заморожування. Короткий опис і основні особливості зменшення забруднення в КТО узагальнені нижче.

Таблиця 1 – Орієнтовні дані по термічному опорі відкладень

Рідина	Термічний опір в кожухотрубному теплообміннику, $m^2 K/W$	Термічний опір в ПТО, $m^2 K/W$
Вода:		
Демінералізована	0.00009	0.000009
Міська (м'яка)	0.00018	0.000017
Міська (жорстка)	0.00053	0.000043
Градирня (оброблена)	0.00018 - 0.00035	0.000034
Морська (прибережна)	0.00035	0.000043
Морська (океанічна)	0.00048	0.000026
Річна	0.00018 - 0.0007	0.000043
Рубашка охолодження	0.00035	0.000052
Олія мастильна	0.00018–0.00035	0.000017–0.000043
Олія рослинна	0.00053	0.000017–0.000052
Розчинник органічний	0.00018–0.00035	0.000009–0.000026
Пара	0.00009	0.000009
Технологічні рідини	0.00018–0.00088	0.000009–0.000052

Корозійне забруднення утворюється, коли матеріал поверхні теплопередачі може хімічно реагувати з компонентами рідини, що його омиває, утворюючи менш теплопровідний шар з продуктів корозії. Рідина також може переносити продукти корозії від інших частин системи далі по потоку, які осідають на поверхні теплопередачі.

Біологічне забруднення викликане відкладенням організмів, зважених в потоці рідини, на теплих поверхнях теплопередачі, де вони прикріплюються, ростуть і розмножуються. Широке дослідження біологічного забруднення були зроблені для харчової промисловості, особливо для молочної. Детальний огляд робіт з дослідження забруднення молока в теплообмінниках опубліковано в статті [4]. ПТО є кращим типом теплообмінників в таких умовах. Вони мають менше забруднення у порівнянні з трубчастими теплообмінниками, оскільки мають порівняно нижчу температуру поверхні і вище турбулентність потоку.

Забруднення в результаті хімічної реакції рідиною, в якій відбувається хімічна реакція між її компонентами, створюючи шар продуктів реакції на поверхні теплопередачі. Сам матеріал поверхні не бере участі в реакції. Ця форма забруднення зазви-

чай пов'язана з реакціями полімеризації, такими як, наприклад, коксування. Коли відкладення перетворюється з смоли в твердий кокс, його видалення дуже важке. Різні хімічні реакції можуть викликати забруднення в органічних розчинах. Вони включають автоокислення, полімеризацію і термічний розклад. Механізм забруднення сировою нафтою пов'язаний з хімічними реакціями, але він також поєднується з осадженням асфальтенів із залученням до процесу неорганічних компонентів.

Заморожування або затвердіння відкладення відбувається при охолодженні рідини нижче точки замерзання цієї рідини або деяких її компонентів на поверхні теплопередачі, що викликає затвердіння з осадженням твердої фази на поверхні. Щоб зменшити цю форму забруднення, потрібен чіткий контроль температури, при якому будь-який такий осад можна розплавити, якщо він навіть почав формуватися.

Осадження зважених в потоці частинок – це осадження на поверхні теплообміну частинок, утримуваних в суспензії в потоці рідини. Дрібні частинки зазвичай важче видалити, ніж більші, так як сили, що утримують їх разом і на поверхні, можуть бути більше. Цей тип відкладень легко видаляється механічно або за допомогою зворотного потоку. Встановлено, що утворення відкладень обумовлено конкуренцією між взаємодіями частинка-рідина, частинка-поверхня і частинка-частинка.

Утворення накипу відбувається, коли потік рідини містить деяку кількість розчиненої речовини, яка зі зміною умов осідає, утворюючи кристали, або безпосередньо на поверхні теплопередачі, або в обсязі рідини з подальшим осадженням на поверхні. У випадку води, що містить солі кальцію або магнію зі зворотною розчинністю, ці солі осідають з підвищенням температури на поверхнях нагріву. Найчастіше кристалізаційному забрудненню можна запобігти попередньою обробкою потоку рідини перед теплообмінником або додаванням хімікатів, які зменшують утворення відкладень.

2. Механізми відкладення забруднень

Більшість ситуацій забруднень в теплообмінниках пов'язані з різними формами забруднення, які можуть взаємодіяти і доповнювати одна одну. Наприклад, корозійне забруднення може ініціювати місця зародження для осадження забруднення частинками. Це створює труднощі в прогнозуванні та моделюванні процесу забруднення. Загальний процес відкладення включає в себе перенесення маси між об'ємною рідиною і поверхнею зі складними реакціями. Вплив напруги зсуву рідини на відкладення також впливає на загальну швидкість забруднення, якщо воно призводить до конвективного або дифузійного видалення відкладень. Забруднення в результаті хімічної реакції зазвичай включає наступний багатоетапний процес:



На всі процеси, які беруть участь у забрудненні, впливає структура потоку в каналах поблизу поверхні теплопередачі з відповідними значеннями турбулентності потоку і напруги зсуву. Можливі деталі механізму забруднення сировою нафтою на деякій інтенсифікованій поверхні теплопередачі наведені на рис. 1. Тут представлений конкретний механізм забруднення на прикладі переважно осадження або забруднення твердими частинками, деякі компоненти відсутні або ними можна знехтувати.

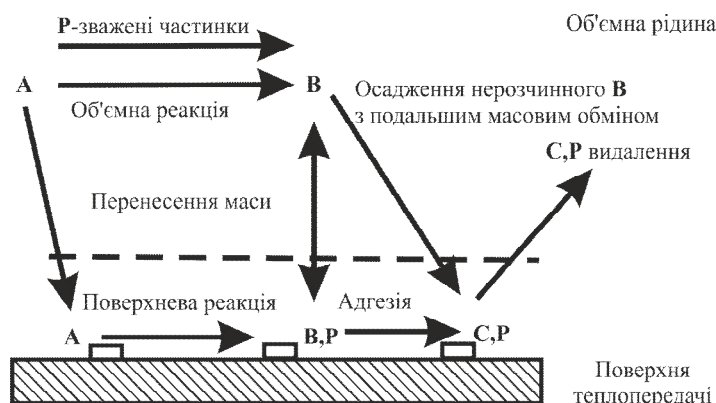


Рисунок 1 – Багатокомпонентний механізм забруднення

Відкладення – це динамічний процес, що розвивається в часі, і в залежності від конкретного випадку забруднення і природи залучених речовин його залежність від часу може значно відрізнитися. На рис. 2 представлені типові криві зміни в часі товщини відкладень забруднення (це може бути маса відкладень або тепловий опір забруднення, які залежать від часу аналогічним чином). На практиці гладкий вид кривих не реалізується, і вони виглядають аналогічно кривій D через стохастичний характер реального процесу забруднення.

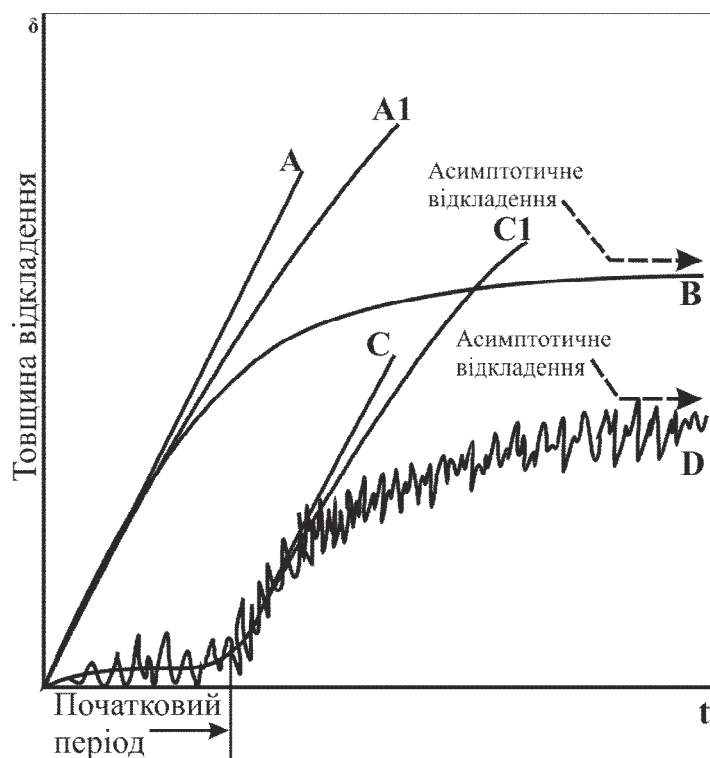


Рисунок 2 – Основні форми кривих відкладень

Крива A на рис. 2 відповідає постійній швидкості росту забруднення, коли товщина відкладення і його термічний опір лінійно збільшується з часом. Такі швидкості забруднення зустрічаються на практиці дуже рідко, і в основному спостерігаються в лабораторних дослідженнях для експериментів, недостатньо тривалих, щоб свідчити

про зниження швидкості забруднення у міру зростання відкладень. Крива **В** показує асимптотичну поведінку відкладення, при якому швидкість утворення відкладень зменшується з часом, і стає рівним нулю, коли досягається асимптота. Така поведінка безпосередньо впливає з теоретичного підходу Керна і Сітона [5], в якому процес забруднення представлений як одночасна дія процесів осадження та видалення забруднень. Асимптотичне значення опору відкладення досягається коли швидкості осадження і видалення відкладення рівні. Поступове збільшення товщини осаду призводить до зміни температури на його кордоні з рідиною, яка омиває його, а також до зміни міцності матеріалу осаду. Це може привести як до зменшення швидкості осадження, так і до збільшення швидкості видалення при кінцевій їх рівності при досягненні асимптотичних умов забруднення.

Існують чотири основні процеси, які контролюють утворення і накопичення забруднення, а саме: (1) перенесення маси, (2) осадження, (3) видалення і (4) старіння.

Перенесення маси відповідає за доставку до поверхні теплопередачі прекурсорів забруднення, які зважені або розчинені в об'ємі рідини. Це може бути реалізовано шляхом дифузійного або конвективного масопереносу.

Осадження забруднення відбувається, коли прекурсори забруднень потрапляють на поверхню теплопередачі і утримуються на ній або реагують на її поверхні, утворюючи речовини, які прилипають до поверхні. Деяка частина прекурсорів або продуктів їхньої реакції може покинути поверхню.

Видалення деякого осадженого матеріалу забруднення з зовнішньої межі шару відкладення викликано дією напруги зсуву рідини і масопереносу. Інтенсивність видалення відкладень з зовнішньої поверхні залежить від міцності нанесеного шару, напруги зсуву і величини масопереносу.

Старіння осадженого матеріалу забруднення відбувається після досить тривалого часу його формування, особливо при тривалому впливі високої температури. Під час старіння міцність відкладень може збільшуватися при полімеризації, перекристалізації або інших процесах.

Основними факторами, що впливають на забруднення, є: температура поверхні; температура об'єму рідини; швидкість потоку (через напругу зсуву на поверхні шару забруднень) і склад рідини. Для обліку цих чинників були розроблені різні моделі виникнення забруднень, які в основному застосовні до конкретних типів забруднень і переважним механізмам відкладення забруднень.

3. Моделі утворення забруднень

Розроблено чотири основні категорії моделей, засновані на різних особливостях процесу відкладення: реакція і перенесення, початковий період, старіння і порогові моделі.

3.1 Моделі реакції і перенесення

Для багатьох механізмів відкладень в літературі опубліковані різні моделі реакції і перенесення. На тлі розроблених моделей і отриманих рівнянь вони демонструють значні відмінності, проте, всі моделі перевірені з деяким набором експериментальних даних, що показують досить гарне узгодження з результатами моделювання. Важливість ефектів масопереносу в швидкості осадження пояснюється об'єднанням compone-

нта масопереносу з виразом Арреніуса для швидкості хімічної реакції в рівнянні швидкості осадження. Такі моделі включають в термін осадження компонент транспортування, виражений, наприклад, в моделі запропонованої Епштейном [6].

3.2 Моделі початкового періоду

Більшість моделей забруднення орієнтовані на швидкість осадження, коли збільшується термічний опір відкладення, не враховуючи початок процесу осадження, якій може початися з деякою затримкою. Згідно Мюллеру-Штейнхагену [7], ця затримка дуже рідкісна для механізму осадження зважених часток, але в багатьох випадках для інших типів забруднення відкладенню передують ініціація (або початковий період), в якій відкладення тільки починає розвиватися, і немає значної зміни термічного опору, який можливо спостерігати з плином часу. Емпірична оцінка часу ініціювання відкладення з розчинів сульфату кальцію під час теплопередачі при кипінні була запропонована в роботі [8], в рамках феноменологічної моделі для прогнозування термічного опору відкладення. Підхід до включення періоду ініціації в загальну феноменологічну модель кристалізаційного забруднення з урахуванням інших періодів зростання забруднення також був запропонований в роботі [9]. Аналізуючи період ініціації, дослідники прийшли до висновку, що існує область, в якій термічний опір відкладення дорівнює нулю для чистої поверхні, а потім стає навіть негативним, коли прекурсори починають формуватися на теплообмінній поверхні випадковим чином. Поверхня стала шорсткою, що призвело до збільшення конвективного теплообміну в деякій частині початкового періоду виникнення відкладення і деякого невеликого збільшення загального коефіцієнта теплопередачі, що виглядає як деяке зниження теплового опору відкладення. У міру зростання наступних областей відкладення і їх асимптотичної поведінки крива відкладення набуває S-подібну форму, як крива D на рис. 2.

3.3 Моделі старіння

Багато з відкладень забруднень піддаються старінню протягом значних періодів часу. Це може збільшити міцність осаду за рахунок полімеризації, перекристалізації, зневоднення і т.і. Для обліку явищ, при яких відкладення зазнає подальші зміни в своєму складі і властивостях при тривалому впливі високих температур поверхні, Кріттенден і Колачковський [10] представили двошарову модель відкладення. Один шар може являти собою свіже забруднення, а інший – відкладене. Пізніше ця двошарова концепція отримала подальший розвиток в роботі [11].

3.4 Моделі порогового забруднення

Широкі експериментальні дослідження на дослідних установках і в лабораторіях по вивченню забруднень в теплообмінниках, що використовуються для попереднього нагріву сирої нафти в установках дистиляції сирої нафти, встановили, що при деяких умовах теплообмінники можуть не забруднюватися. Це особливо цікаво, оскільки, якщо знайти і підтримувати такі сприятливі умови в теплообміннику, проблема забруднення в кінцевому підсумку вирішується. Розбираючись з цим явищем, Еберт і Панчяят [12] спочатку представили концепцію моделей «порогового забруднення» для забруднення сировою нафтою всередині трубок кожухотрубних теплообмінників. Порогові моделі забруднення вимагають оцінки включених емпіричних параметрів відповідно до наявних наборів даних про забруднення сировою нафтою. Для складної геометрії каналу в роботі [13] запропонували використовувати модель Еберта-Панчяята з виразом осадження через коефіцієнт тепловіддачі. Щоб поширити модель забруднення на труби з

вставками та іншими каналами складної геометрії, Ян і Кріттенден [14] запропонували інший підхід. Для вираження осадження було введено поняття «еквівалентної швидкості», яке означає швидкість в круглій трубі без покриття того ж еквівалентного діаметра і з такою ж напругою зсуву стінки, як середня напруга зсуву стінки в розглянутому каналі складної геометрії. Ця концепція була успішно використана для прогнозування швидкості забруднення в трубах з дротяними вставками HiTRAN.

4. Втрата тиску, пов'язана із забрудненням

Крім погіршення тепловіддачі забруднення є причиною збільшення втрат тиску в теплообмінниках. Зростаючі відкладення призводять до часткового зменшення поперечного перерізу каналу і формування певної форми шорсткості на поверхні відкладень. Однак, з огляду на невизначеність (в самих моделях забруднення, значеннях коефіцієнта теплопровідності, шорсткості поверхні і т. і.), метод не гарантує високу точність. У будь-якому випадку результати повинні бути скориговані на основі порівняння з наявними вимірами перепаду тиску на місці.

5. Забруднення на інтенсифікованих теплообмінних поверхнях

Аналіз різних методів інтенсифікації теплообміну показав, що всі ці методи засновані на значних змінах в структурі потоку, що призводять до збільшення інтенсивності передачі тепла, маси і імпульсу. Підвищення коефіцієнтів тепловіддачі супроводжується збільшенням конвективної дифузії між поверхнею теплопередачі і обсягом рідини, збільшенням і перерозподілом уздовж поверхні напруги зсуву. Ці явища грають важливу роль в описаних вище механізмах і моделях відкладень, які можуть привести до значної різниці в швидкостях осадження відкладень на різних поліпшених поверхнях і в гладких трубах.

5.1 Забруднення в трубах зі штучною шорсткістю

Ряд авторів досліджували забруднення в інтенсифікованих трубах з різними формами штучної шорсткості. Результати цих досліджень і судження про інтенсивність осадження забруднень, в порівнянні з гладкими трубами, досить різні. Аналізуючи опубліковані в літературі експериментальні дані, Панчайт і Кнудсен [15] відзначили, що для деяких форм штучної шорсткості (наприклад, спірально-реберних труб) зниження продуктивності протягом одного року склало близько 10 % в порівнянні з 15–25 % для гладких труб. За іншими даними, асимптотичний опір забруднення для труб з поздовжніми ребрами був на 15–30 % більше, ніж для гладких труб, але для спірально-реберних труб воно було на 25–50 % нижче. Незважаючи на те, що термічний опір забруднення і швидкість забруднення в деяких інтенсифікованих трубах навіть більше, ніж в гладких, інші з них виявляють великий потенціал для зниження забруднення. Це вимагає обережного підходу для розширеного застосування таких труб для середовищ, що мають великі тенденції до забруднення, з оцінкою можливого впливу забруднення на загальну продуктивність теплообмінника з такими трубами.

5.2 Забруднення в трубах зі вставками

Вдосконалені труби зі штучною шорсткістю показали різні тенденції забруднення в порівнянні з гладкими трубами в різних середовищах, від збільшення забруднення до значного зменшення, в залежності від геометрії штучної шорсткості. Річі та Дроге-мюллер в роботі [16] пропонують детальний огляд областей застосування і переваг трубних вставок в теплообмінниках. Вставка може вплинути як на температуру, так і на

напругу зсуву на стінці труби і тому успішно застосовується при забрудненнях в нафтовій промисловості. За допомогою цього елемента можна збільшити коефіцієнт теплопередачі плівки з боку труби до 4 разів.

5.3 Забруднення в каналах ПТО

Починаючи з публікації про забруднення в ПТО [17], з прикладами рекомендованих термічних опорів забруднення, представлених в таб. 1, значне зниження швидкості осадження забруднення на стінках каналів ПТО можна розглядати як встановлений факт. Оцінка асимптотичної величини термічного опору забруднення була запропонована Товажнянським і Капустенко [18] на основі аналогії Рейнольдса для передачі тепла і імпульсу. Відповідно напруга зсуву на стінці пов'язано з коефіцієнтом теплопередачі плівки. Досвід проектування і експлуатації ПТО показує, що коефіцієнти теплопередачі плівки в ПТО зазвичай в два, три і більше разів вище, ніж в кожухотрубних теплообмінниках, і навіть при менших еквівалентних діаметрах вони мають значно менший термічний опір забруднень. Про значне зменшення забруднення в зварному ПТО СОМРАБЛОК, що працює для нагріву сирої нафти в лінії попереднього нагріву повідомлялося в статті [19]. Був запропонований метод для моделювання та інтеграції поведінки забруднення в цих теплообмінниках. Було показано, що це хороший інструмент для їх подальшого проектування, оскільки напруги зсуву, створювані рідинами в цих теплообмінниках, можуть бути досить високими, щоб мінімізувати забруднення.

Забруднення холодною водою в ПТО було комплексно досліджено при засміченні твердими частинками з води каналів ПТО [20]. Експерименти проводилися для каналів ПТО, сформованими комерційно виробленими пластинами з кутом нахилу гофри 60° і 30°. Згодом спостерігалася асимптотична поведінка термічного опору забруднення, а також сильний вплив швидкості потоку. Процес забруднення сульфатом кальцію був досліджений в роботі [21] для ПТО з комерційно вироблених пластин. Кут нахилу гофри становив 60°.

Значне зменшення забруднень у ПТО порівняно з трубчатими теплообмінниками було відмічене в роботі [22] де відзначений значний вплив на термічний опір забруднень швидкості руху теплоносія та напруги зсуву на стінці пластин.

6. Моделювання процесу забруднення поверхні ПТО

Автори роботи [14] запропонували розширення застосування своєї моделі, розробленої для гладких труб, до забруднень в трубах з вставками поліпшуючими теплообмін. Ця модель була розширена на канали ПТО в роботі [23] шляхом введення залежності від напруги зсуву і перевірена в умовах промисловості. Подібність впливу напруги зсуву у каналах ПТО та трубах з поліпшенням тепловіддачі до такого впливу у гладких трубах було доведено експериментально в роботі [24]. Це дозволяє розробку моделей формування забруднень у ПТО шляхом модифікації моделей забруднень розроблених для поверхонь іншої геометричної форми. Для цього можуть бути використані кореляційні рівняння для гідравлічного опору в каналах ПТО наведені в роботі [25] та методики розрахунку тепловіддачі робіт [26] та [27]. Як це доведено в роботі [28], підвищити точність розрахунку термічного опору забруднень в ПТО можливо на базі математичного моделювання процесу з урахуванням зміни його локальних параметрів. Подальша розробка цих методів потрібна для доробки методики розрахунку ПТО [29] з урахуванням впливу забруднень на інтенсивність процесу теплопередачі.

Висновки

Забруднення поверхні теплопередачі негативно впливає на роботу теплообмінного обладнання. Для апаратів з поліпшеною тепловіддачею, таких як ПТО, точне врахування такого впливу має підвищену важливість. Термічний опір забруднень в ПТО набагато менший за такий у трубчатих теплообмінниках. Для правильного його урахування потрібно уточнення методики розрахунку ПТО шляхом модифікації існуючих моделей росту забруднень в трубах. Для цього можливо використати результати досліджень гідравлічного опору та тепло переносу в чистих каналах ПТО та отримані кореляційні рівняння. Підвищення точності методик розрахунку ПТО з урахуванням забруднень можливо з урахуванням зміни локальних параметрів процесу в їх каналах.

Література

1. Crittenden B., Yang M. 2011: Technical review of fouling and its impact on heat transfer. Report on project FP7-SME-2010-1 262205/ INTHEAT. <http://intheat.dcs.unipannon.hu/wp-content/uploads/2011/11/D1.2.pdf> (Accessed 10.10.2014).
2. TEMA. 2007. Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 9th edn., TEMA Inc., New York.
3. Klemes 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.
4. Bansal B., Chen X.D. 2006. A critical review of milk fouling in heat exchangers. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 5: 27–33.
5. Kern D.Q., Seaton R.E. 1959. A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling. *British Chem. Engr.* 4: 258–262.
6. Epstein N. 1983. Fouling of heat exchangers. In *Heat Exchangers: Theory and Practice* (J. Taborek, G. F. Hewitt and N. Afgan, eds.), 795-815. Hemisphere, Washington DC, USA.
7. Muller-Steinhagen H. M. 1999. Cooling water fouling in heat exchangers. *Advances in heat transfer* 33: 415–495.
8. Malayeri, M. R. and Muller-Steinhagen, H., 2007. Initiation of CaSO_4 scale formation on heat transfer surface under pool boiling conditions, *Heat Transfer Engineering* 28: 240–247.
9. Mwaba M.G., Golriz M.R., Gu J. 2006. A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces. *Applied Thermal Engineering* 26: 440–447.
10. Crittenden B.D. and Kolaczowski S. T. 1979b. Energy savings through the accurate prediction of heat transfer fouling resistances. In *Energy for Industry*, P. W. O'Callaghan (Ed.), Pergamon, Oxford, 1979; 257–266.
11. Ishiyama E.M., Paterson W.R., Wilson D.I. 2011. Optimum cleaning cycles for heat transfer equipment undergoing fouling and ageing. *Chemical Engineering Science* 66 (4): 604–612.
12. Ebert W.A., Panchal C.B. 1997. Analysis of Exxon crude slip stream coking data, in: C.B. Panchal, et al. (Eds.), *Fouling Mitigation of Industrial Heat-Exchange Equipment*, Begell House. New York. USA. 451–460.

13. Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L., Pugh S.J. 2002. Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery preheat trains. *Applied Thermal Engineering* 22: 777–788.
14. Yang M., Crittenden B. 2012. Fouling thresholds in bare tubes and tubes fitted with inserts. *Applied Energy* 89: 67–73.
15. Panchal C.B., Knudsen J.G. 1998. Mitigation of Water Fouling: Technology Status and Challenges. *Advances in Heat Transfer* 31: 431–474.
16. Ritchie J.M., Droegemueller P. 2008. Application of tube inserts in heat exchangers: benefits of tube inserts. In: Hewitt G.F., editor. *Heat exchanger design Handbook*. Begell House, Redding, CT; [Section 3.21.2].
17. Marriott J. 1971. Where and how to use plate heat exchangers. *Chemical Engineering* 78 (8): 127–134
18. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A. 1984. Intensification of heat and mass transfer in channels of plate condensers. *Chemical Engineering Communications* 31 (6): 351–366.
19. 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.
20. Karabelas A.J., Yiantsios S.G., Thonon B., and Grillot J.M. 1997. Liquid side fouling of Heat Exchangers. An Integrated R&D Approach for Conventional and Novel Designs. *Applied Thermal Engineering* 7 (8-10): 727–737.
21. Bansal B., Muller-Steinhagen H., Chen X.D. 2000. Performance of plate heat exchangers during calcium sulphate fouling — investigation with an in-line filter. *Chemical Engineering and Processing* 39: 507–519.
22. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., 2007, Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chemical Engineering Transactions*, 12, 207–212.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2009. Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*. 18, 791–796.

УДК 66.021.4

Мацегора О.І., Арсеньева О.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.О.

МОДЕЛІ УТВОРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ НА ПОВЕРХНЯХ НАГРІВУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПЛАСТИНЧАТИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ

Представлені основні чинники забруднення на теплопередаючих поверхнях. Розглянуті моделі, що контролюють процес утворення і накопичення забруднення, яке провокує розвиток термічного опору шару забруднення і втрату тиску за рахунок зменшення поперечного розрізу каналу. Проаналізовано моделі розвитку забруднення в часі на інтенсифікованих теплообмінних поверхнях та їх використання для математичного моделювання процесу забруднення в ПТО, з урахуванням зміни локальних параметрів, що підвищить точність розрахунків впливу забруднень на інтенсивність процесу теплопередачі.

Ключові слова: поверхня теплопередачі, забруднення поверхні теплопередачі, інтенсифікована поверхня теплопередачі, математична модель, пластинчатий теплообмінник.

Мацегора А.И., Арсеньева О.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А.

МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Представлены основные факторы загрязнения на теплопередающих поверхностях. Рассмотрены модели, контролирующие процесс образования и накопления загрязнения, которое провоцирует развитие термического сопротивления слоя загрязнения и потери давления за счет уменьшения поперечного сечения канала. Проанализированы модели развития загрязнения во времени на интенсифицированных теплообменных поверхностях и их использование для математического моделирования процесса загрязнения в ПТО, с учетом изменения локальных параметров, что повысит точность расчетов влияния загрязнений на интенсивность процесса теплопередачи.

Ключевые слова: поверхность теплопередачи, загрязнение поверхности теплопередачи, интенсифицированная поверхность теплопередачи, математическая модель, пластинчатый теплообменник.

Matsegora O.I., Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy, L.L., Kapustenko, P.O.

MODELS OF FOULING'S FORMATION ON THE HEATING SURFACES AND THEIR APPLICATION FOR PLATE HEAT EXCHANGERS

The main fouling factors on heat transfer surfaces are presented. Models are tested that control the process of formation and accumulation of pollution, which provokes the development of thermal resistance of the pollution layer and pressure loss by reducing the cross section of the channel. The models of the development of pollution over time on intensified heat-exchange surfaces and their use for mathematical modeling of the pollution process in PHE are analyzed, taking into account changes in local parameters, which will increase the accuracy of calculating the effect of pollution on the intensity of the heat transfer process.

Keywords: heat transfer surface, fouling of heat transfer surface, intensified heat transfer surface, mathematical model, plate heat exchanger.