

АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 161 – Хімічні технології та біоінженерія. - (16 - Хімічна та біоінженерія) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020 р.

Дисертація подана до захисту у спеціалізованій вченій раді ДФ 64.050.046. в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

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

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

На базі аналізу теоретичних основ процесу показано, що можливості інтенсифікації тепло -та масо обмінних процесів в каналах пластинчастих

теплообмінників далеко не вичерпані та потребують розвинення підходів щодо прогнозування роботи цих апаратів в умовах охолодження конденсаційних газових потоків та розробки надійних та точних методів оптимального розрахунку на основі експериментальних та теоретичних досліджень з використанням методів математичного моделювання.

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

Розроблено математичну модель процесу конденсації пари із суміші з повітрям на гофрованому полі каналів пластинчастих теплообмінників та в експериментальних моделях гофрованого поля каналів використаних в роботі. Математична модель складається із системи одномірних диференційних рівнянь відповідно до локальних балансів тепла та маси на малих ділянках каналів вздовж поверхні теплопередачі. Система доповнена кореляційними співвідношеннями для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та тертя у однофазному потоці в каналах пластинчастих теплообмінників

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

Розроблено методику ідентифікації параметрів рівнянь для розрахунку локальних коефіцієнтів масовіддачі, тепловіддачі та втрат тиску в двофазному потоці на базі статистичного порівняння результатів математичного моделювання інтегральних характеристик процесу та їх значень отриманих в експериментальних дослідженнях. На основі цієї методики отримано формулу розрахунку впливу поперечного потоку маси на локальні коефіцієнти масовіддачі враховуючу теоретичну модель застійного шару та вплив зміни щільності поперек потоку згідно теорії турбулентного прикордонного шару з відсмоктуванням. Також рекомендовано формулу розрахунку локальних коефіцієнтів конвекційної тепловіддачі в умовах впливу поперечного потоку маси. Показана достатня для розрахунків конденсації пари в присутності неконденсованого газу точність рівняння запропонованого на базі дисперсної кільцевої моделі течії для термічного опору плівки конденсату в каналах пластинчастих теплообмінників.

Одержано рівняння для розрахунку втрат тиску у двофазному потоці з конденсацією парової компоненти парогазової суміші з урахуванням зміни

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

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

Розроблено методику оптимального використання тепла, утилізованого від конденсаційних газових потоків, з залученням методів інтеграції теплових процесів заснованих на теорії пінч аналізу. Гаряча складова крива процесу в конденсаційному газовому потоці будується враховуючи умови рівноваги пари як реального газу та утвореного конденсату. Інтеграція

процесу охолодження конденсаційної газової суміші з потоками які використовують утилізоване тепло виконується з встановленням оптимальної структури системи теплообмінників. Показано доцільність розподілу потоку конденсаційної газової суміші на газову та рідку частини після досягнення певного рівня температури. Запропонований і розроблений метод оптимального визначення поверхні теплопередачі системи встановлених пластинчастих теплообмінників за критерієм приведених витрат, який дозволяє реалізувати найбільшу техніко-економічну ефективність роботи системи. Метод проілюстровано на конкретному прикладі утилізації тепла газів які надходять після процесу сушіння.

Розроблено схему установки для утилізації тепла викидних газів після процесу сушки тютюну на тютюновій фабриці. Визначено основні потоки на підприємстві які можна використати для прийому вилученого тепла. Це потоки системи опалювання та гарячого водопостачання підприємства. Розраховані оптимальні теплообмінні пластинчасті апарати та виконано підбір апаратури для регулювання процесу та його реалізації в умовах працюючого виробництва. Установку виготовлено і змонтовано на діючій тютюновій фабриці. Проведено випробування пілотного пластинчастого теплообмінника утилізації тепла викидних газів процесу сушіння тютюну. Одержані результати підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та точність розробленого методу розрахунку достатню для інженерного користування. Використання розробленої утилізаційної установки з пластинчастим теплообмінником дозволило залучити на потреби опалення підприємства більше 600 кВт теплової енергії, яка до того просто викидалася у навколишнє середовище. Це призвело до скорочення об'ємів спалюваного природного газу використаного для опалення приміщень.

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

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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

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

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

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

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

6. Кусаков С.К. Экспериментальный стенд для исследования процесса конденсации пара из смеси с воздухом в каналах пластинчатого

теплообменника / А. А. Василенко, Л.Л. Товажнянский, С.К. Кусаков // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – №40 (1316). – С. 3–9.

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

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

9. Sergey K.Kusakov Mathematical model of a plate heat exchanger for condensation of steam in the presence of non-condensing gas / L. L. Tovazhnyansky, P. O. Kapustenko, O. A. Vasilenko, S. K. Kusakov, O. P. Arsenyeva, P. Y. Arsenyev // Bulgarian Chemical Communications 2018 – V. 50. – P. 77-83.

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

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