

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису

ГАВРИШ АНДРІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 536.423.4

ТЕПЛООБМІН ПРИ КРАПЛИННІЙ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ,
СТИМУЛЬОВАНОЇ ФТОРОМІСТКИМ ДИСУЛЬФІДОМ В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ТРУБІ

Спеціальність 05.14.05 - Теоретична теплотехніка

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ - 1996

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00739550 (T)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису

ГАВРИШ АНДРІЯ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 536.423.4

ТЕПЛОБІМІН ПРИ КРАПЛИННІЙ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ,
СТИМУЛЬОВАНОЇ ШТОРОМІСТКИМ ДИСУЛЬФІДОМ В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ТРУБІ

Спеціальність 05.14.05 - Теоретична теплотехніка

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ - 1996

AB.34.584

Робота виконана на кафедрі теоретичної та промислової тепло-техніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Науковий керівник: доктор технічних наук Ріферт В. Г.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Смірнов Г. Ф.

кандидат технічних наук, Чаплинський С. І.

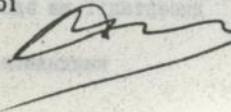
Ведуча організація: Інститут технічної теплофізики НАН України

Захист дисертації відбудеться "13" травня 1996 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої Вченої Ради Д. 01.02.13 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою 252056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 406.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий " " 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої Вченої Ради

 В. Н. Рожалін

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

АНОТАЦІЯ

У дисертаційній роботі виконано експериментальне дослідження теплообміну при краплинній конденсації водяної пари у присутності органічного гідрофобізатора - фторомісткого дисульфідру.

Дослідження проведено з метою встановлення впливу на теплообмін основних режимних параметрів потоку, виявлення особливостей механізму краплинної конденсації, а також вдосконалення методики розрахунку.

Для досягнення поставленої мети:

- створена експериментальна установка, що дозволила досліджувати краплинну конденсацію на внутрішній поверхні горизонтальної труби, моделювати процес на плоскій міні поверхні та використовувати фото- і відеозйомку через оптичну систему із збільшенням зображення до 262 разів;
- розроблена методика експериментів, яка дозволяє змінювати режимні параметри потоку з одночасним контролем строку служби гідрофобного покриття та корозійної стійкості поверхні теплообміну;
- запропонована методика розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі із врахуванням особливостей механізму процесу краплинної конденсації водяної пари.

Автор захищає такі загальні положення:

результати впливу на тепловіддачу при краплинній конденсації водяної пари у присутності фторомісткого дисульфідру: основних режимних параметрів - щільності теплового потоку, тиску пари, швидкості потоку, концентрації неконденсованих газів, натікання конденсату; засобу гідрофобізації, матеріалу поверхні конденсації, концентрації стимулятора, строку дії гідрофобного покриття; методику узагальнення коефіцієнтів тепловіддачі із врахуванням особливостей механізму процесу.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Зміна режиму конденсації з плівкового на краплинний у теплообмінних апаратах дозволяє знизити їх масогабаритні характеристики і підвищити економічність. Практично всі відомі засоби створення діофобних поверхонь не дозволяють тривалий час підтримувати стійкий режим краплинної конденсації навіть в лабораторних умовах. Для водяної пари перспективним виявляється використання органічного стимулятора - фторомісткого дисульфідру. З точки зору особливостей застосування краплинної

конденсації необхідне вивчення впливу режимних параметрів та різних супутніх факторів на значення коефіцієнтів тепловіддачі. Відсутні дослідження краплинної конденсації водяної пари усередині горизонтальних труб, які використовують:я в опріснюючому устаткуванні. Тому дослідження засобів створення і підтримання краплинної конденсації із застосуванням фторовмісткого дисульфїду, а також вивчення закономірностей теплообміну при конденсації усередині горизонтальних труб являє собою актуальну науково-прикладну задачу.

Методика дослідження. Експериментальні середні по поверхні та квазілокальні коефіцієнти тепловіддачі при краплинній конденсації усередині горизонтальної труби визначені із застосуванням рівнянь тепловіддачі і теплового балансу, на плоскій поверхні - методом товстої стінки. Теоретичний розрахунок тепловіддачі виконаний із використанням моделі теплопровідності через краплину і функції розподілу краплин за розмірами.

Наукова новизна. Вперше експериментально визначені коефіцієнти тепловіддачі при краплинній конденсації водяної пари усередині горизонтальної труби. Дослідження виконані із використанням органічного гідрофобізатора - фторовмісткого дисульфїду. Вивчений вплив на інтенсивність теплообміну щільності теплового потоку, швидкості потоку пари, кількості натікаючого конденсату, теплопровідності матеріалу поверхні конденсації, наявності або відсутності в парі неконденсованих газів, концентрації стимулятора. Досліджені особливості механізму процесу з урахуванням частотно-часових параметрів умовного циклу краплинної конденсації. Запропонована методика розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі. Визначено, які краплини вносять вирішальний внесок у середню тепловіддачу процесу в цілому.

Практична цінність роботи полягає у визначенні оптимальних режимних параметрів процесу і оптимальної концентрації стимулятора, які дозволяють із використанням фторовмісткого дисульфїду створювати і максимально довго підтримувати краплинну конденсацію із високим значенням коефіцієнтів тепловіддачі. Визначені строк дії гідрофобізатора на робочій поверхні та її корозійна витривалість. Вироблені рекомендації для застосування краплинної конденсації в теплообмінних апаратах.

Реалізація роботи. Результати виконаних досліджень, рекомендації, що з них випливають, застосовуються при проектуванні та створенні конденсаторів на сучасних електричних станціях (Рефтинська ДРЕС), а також горизонтальнотрубних термоопріснюючих апа-

ратів.

Апробація роботи. Загальні результати та положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: Восьмій всеукраїнській конференції "Двофазний потік в енергетичних машинах і апаратах" (Ленінград, 1990); Восьмій науково-практичній конференції "Досвід експлуатації та шляхи вдосконалення теплообмінного обладнання" (Севастополь, 1992); Виставці-семінарі "Досягнення та проблеми теплоенергетики" (Київ, 1992); Міжнародній школі-семінарі "Теплові труби: теорія та практика" (Мінськ, 1990); Шостій міжнародній школі "Моделювання тепло- і масообмінних процесів хімічних та біохімічних реакторів" (Болгарія, Варна, 1989); науковому семінарі та науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Київського політехнічного інституту. Доповідь за матеріалами дисертації включена до III Міжнародного форуму "Тепломасообмін-ММО-96" (Білорусь, Мінськ, 1996) та II Європейського термонаукового і 14 Італійського форуму по теплообміну (Італія, Рим, 1996).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано сім друкованих робіт.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури з 144 найменувань і додатку. Робота викладена на 182 сторінках машинописного тексту, має 10 таблиць, 74 малюнки.

У вступі сформульована мета та обґрунтована актуальність теми дисертації.

У першому розділі виконаний огляд результатів досліджень краплинної конденсації на різних теплообмінних поверхнях. Виконаний аналіз дозволив сформулювати задачі дослідження краплинної конденсації водяної пари із застосуванням фторовмісного дисульфиду.

У другому розділі дається опис: експериментальної установки і конструкції робочих дільниць; методик дослідження теплообміну, механізму процесу, корозійної витривалості теплообмінної поверхні; виміривальної апаратури; обробки експериментальних даних; засобу створення гідروفобної теплообмінної поверхні та отримання краплинної конденсації.

У третьому розділі розглянуті особливості механізму краплинної конденсації водяної пари в присутності фторовмісного дисульфиду. Наведені результати по розподілу краплин за розмірами, куту контакту краплин із теплообмінною поверхнею, відривним діаметром краплин, щільності центрів виникнення краплин. Визначена частка теплообмінної поверхні, зайнята краплинами різних типо-

розмірів.

У четвертому розділі містяться результати експериментальних досліджень впливу режимних параметрів парового потоку на закономірності теплообміну при краплинній конденсації усередині горизонтальної труби. Відмічено неоднозначне змінення коефіцієнтів тепловіддачі в залежності від щільності теплового потоку, переохолодження потоку, концентрації неконденсованих газів. Наведена методика узагальнення експериментальних даних і розрахунку тепловіддачі при краплинній конденсації.

У п'ятому розділі розглянуті засоби створення і визначені особливості процесу отримання гідрофобного покриття, а також вивчений вплив концентрації стимулятора на інтенсивність теплообміну і строк дії гідрофобної поверхні. Досліджений вплив теплопровідності матеріалу конденсаційної поверхні на тепловіддачу.

У висновках підсумовуються результати досліджень і подано рекомендації з практичного використання краплинної конденсації в теплообмінному обладнанні.

У додатку наведений аналіз похибок експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

На підставі виконаного огляду літератури по краплинній конденсації встановлено, що для органічних гідрофобізаторів типу дисульфідів відсутня комплексна інформація про вплив на теплообмін та механізм процесу режимних параметрів потоку пари, дози стимулятора, строку його дії, корозійної витривалості конденсаційної поверхні та якості отриманого гідрофобного покриття. Відсутні також дослідження краплинної конденсації водяної пари усередині горизонтальних труб. Тому актуальним виявляється дослідження механізму процесу і закономірностей теплообміну при краплинній конденсації водяної пари із використанням нового гідрофобізатора - фторовмісткого дисульфиду.

Із цією метою був сконструйований дослідницький стенд, що складався із двох контурів по водяній парі, кожен із яких мав систему примусового охолодження та візуального спостереження. Основу першого контуру складав горизонтальний теплообмінник типу труба в трубі. Водяна пара конденсувалася на внутрішній поверхні труби, а охолоджуюча вода рухалася у кільцевому зазорі. Базовим елементом другого допоміжного контуру була плоска експериментальна міні дільниця, яка дозволяла використовувати змінні теплообмінні поверхні та вести дослідження через оптичну систему із

збільшенням зображення до 262 крат.

Для отримання краплинної конденсації застосований фторовмісткий дисульфід, який має велику гідрофобну властивість, високу стабільність, гарну адгезію до металу, малу токсичність - нульову токсичність для питної води, невелику розчинність у воді.

Фторовмісткий дисульфід після попереднього введення у воду парогенератора потім із парової фази наносився на поверхню теплообміну. За такого способу менш ніж за добу на мідних, латунних, мідно-нікелевих та мельхіорових поверхнях отримувалась якісна краплинна конденсація із коефіцієнтами тепловіддачі у 4-12 разів вищими ніж при плівковій конденсації.

Дослідження механізму краплинної конденсації водяної пари у присутності фторовмісткого дисульфиду із застосуванням фото- та відеозйомки підтвердило загальні положення теорії Ісаченко-Солодова, Танасави-Умура. Розвиток краплин від найменших, що можна побачити, до відривних характеризується умовним циклом краплинної конденсації, який складається із періоду зростання і розвитку краплин та періоду їх видалення із теплообмінної поверхні.

На підставі мікроскопічного дослідження знайдена кількість найменших краплин діаметрами 1-3 мкм, що можна побачити, і які знаходяться на теплообмінній поверхні. Вона складає від $9 \cdot 10^9$ до $3 \cdot 10^{10}$ $1/m^2$ в залежності від умов конденсації. Первинні краплини рівновеликі і їх розташування гранично відповідає трикутній рівнобічній ґратеті. Кількість центрів конденсації M_n на одиничній площі може бути знайдена за допомогою математичного ряду:

$$M_n = 1/2 (2n^2 - n + 1); \quad (1)$$

де n - кількість центрів конденсації в непарних рядах ґратети.

Відзначається кількісне погодження отриманих результатів із оцінкою щільності центрів виникнення краплин за даними Роуза, Цурути і Танака.

Краплини, що знаходяться на поверхні, гідрофобізованій фторовмістким дисульфідом, мають форму сферичного сегменту. Змірявши за лібом мікроскопа, а також на збільшених фотознімках діаметр D_k і висоту H_k краплин, був знайдений їх контактний кут θ із поверхнею теплообміну:

$$\theta = \pi/2 + \arcsin(2H_k/D_k - 1). \quad (2)$$

Він склав $108 \pm 3^\circ$, що співпадає із відомими результатами Круа для

гідрофобних сполук типу дисульфідів.

Експериментальним шляхом знайдені діаметри відривних краплин $D_{в\Delta} = 3,0 \dots 4,2$ мкм для нерухокої водяної пари. Проведено порівняння експериментальних величин $D_{в\Delta}$ для внутрішньої поверхні горизонтальної труби, а також нахиленої плоскої поверхні, із розрахунком за методикою Ісаченко для нахилених поверхонь. Відмічено добре співвідношення отриманих результатів.

Фізичні уявлення про механізм краплинної конденсації знайшли своє відображення у функції розподілу краплин за розмірами

$$\Psi(R) = \lim_{\Delta R \rightarrow 0} (\Delta n / \Delta R) \cdot 1/\text{м}^3, \quad (3)$$

де Δn - кількість краплин відносно одиниці площі теплообмінної поверхні, що мають розміри в інтервалі ΔR .

Графік функції розподілу краплин за розмірами для фторовмісткого дисульфиду якісно співпадає із результатами Ханнемана, Ісаченко, Мерте, Роуза, Танака для інших гідрофобних поверхонь (мал. 1).

Якщо для всього спектру розмірів краплин від зародкового критичного $R_{кр}$ до відривного $R_{в\Delta}$ виділити ряд класів із інтервалами ΔR_i , то знаючи функцію розподілу $\Psi(R)$, можна знайти долю поверхні теплообміну, яку займають краплини різних типорозмірів. Вона визначиться як $(S_n \cdot \Delta n)$, де $S_n, \text{м}^2$ - площа поверхні під краплиною.

Експериментально досліджено, що спектр розмірів краплин від 10^{-6} м до 10^{-3} м розповсюджений більш ніж на 90% поверхні теплообміну. Для нерухокої водяної пари десятимікронні краплини, які досить ефективні з точки зору тепловіддачі, займають до 25% поверхні, що відповідає результатам Грехема і Гріффіца (23%). Краплини відривного розміру розповсюджені на 37% поверхні теплообміну, що підтверджується дослідженнями Танака (40%).

Залежність коефіцієнтів тепловіддачі α при краплинній конденсації водяної пари в присутності фторовмісткого дисульфиду від щільності теплового потоку q чи температурного натиску пар-стінка ΔT має максимум (мал. 2). Наприклад, для атмосферного тиску і латунної теплообмінної поверхні при швидкостях парового потоку до 2 м/с максимальні коефіцієнти тепловіддачі 100...115 кВт/м²К спостерігались для $\Delta T = 0,8 \dots 1,2$ К та $q = 80 \dots 130$ кВт/м². Відмічається аналогія кривих краплинної конденсації $\alpha = f(\Delta T)$ і $\alpha = f(q)$ із результатами Ісаченко. Наявність максимуму кривих пояснюється співвідношенням швидкості утворення і швидкості видалення з поверхні теплообміну конденсатної фази, коли миттєва кількість конденсату, що знаходиться на поверхні, виявляється

мінімальною.

При зниженні тиску пари від 0,1 МПа до 0,02 МПа спостерігалось дворазове зменшення коефіцієнтів тепловіддачі. Максимальна тепловіддача $\alpha = 45-55 \text{ кВт/м}^2\text{К}$ для $T_{\text{нас}} = 333 \text{ К}$ спостерігалась при $\Delta T = 1,9 \dots 2,2 \text{ К}$ та $q = 80 \dots 120 \text{ кВт/м}^2$. Експериментальні дані по впливу тиску пари на тепловіддачу в залежності від модифікованого числа Рейнольдса для краплинної конденсації $Re_{\text{кк}} = \lambda \cdot \Delta T / \tau \cdot \mu$ узагальнені такими співвідношеннями:

$$\text{при } Re_{\text{кк}} = 5 \cdot 10^{-4} \dots 1,1 \cdot 10^{-3} \quad \alpha = 66 \cdot \Delta T^{0,36} \cdot P_{\text{нас}}^{0,65} \quad (4)$$

$$\text{при } Re_{\text{кк}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \dots 8,6 \cdot 10^{-3} \quad \alpha = 843 \cdot \Delta T^{-0,31} \cdot P_{\text{нас}}^{0,43} \quad (5)$$

Суттєво на тепловіддачу при краплинній конденсації водяної пари атмосферного тиску може вплинути натікання конденсату і швидкість парового потоку. Для практично нерухомої пари при значеннях плівкового числа Рейнольдса $Re_{\text{пл}} = q \cdot L / r \cdot \mu$ від мінімально-го 2 до 200 коефіцієнти тепловіддачі зменшуються вдвічі (мал. 3).

Погіршення тепловіддачі при зростанні $Re_{\text{пл}}$ пояснюється тим, що збільшується частина поверхні теплообміну, яка зайнята тимчасовою плівкою, і тим самим фактично виключається із активного теплообміну.

Зростання швидкості парового потоку до 20-26 м/с сприяє 2-3 разовому збільшенню коефіцієнтів тепловіддачі. Інтенсифікація теплообміну досягається як при наявності натікання, так і при його відсутності, за рахунок більш активного видалення конденсату.

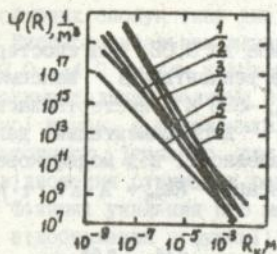
В залежності від модифікованого числа Фруда для краплинної конденсації $Fz_{\text{кк}} = W_n^2 \cdot \rho_n / (q \cdot \nu)^{2/3} \cdot \rho$ експериментальні дані узагальнюються формулами:

$$Fz_{\text{кк}} < 50 \quad \frac{\alpha_{Re_{\text{пл}}}}{\alpha_{Re_{\text{пл}}\text{min}}} = 1,6 \cdot Re_{\text{пл}}^{-0,35} \quad (6)$$

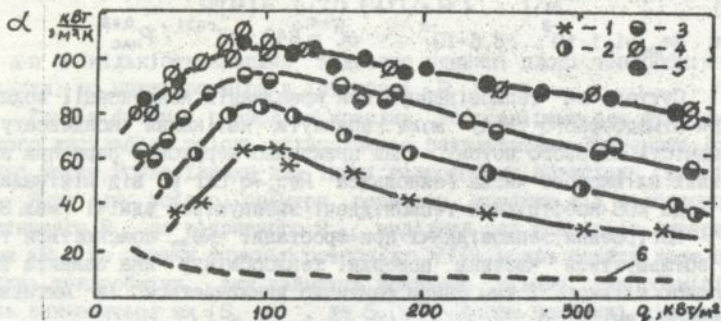
$$Fz_{\text{кк}} = 50 \dots 310 \quad \frac{\alpha_{Re_{\text{пл}}}}{\alpha_{Re_{\text{пл}}\text{min}}} = 0,53 \cdot Re_{\text{пл}}^{-0,41} \cdot Fz_{\text{кк}}^{0,46} \quad (7)$$

Зростання швидкості потоку пари інтенсифікує теплообмін для різних q (мал. 4). Максимальні коефіцієнти тепловіддачі відповідають піку кривих $\alpha = f(q)$. Відхилення щільності теплового потоку в менший або більший бік викликає зниження α , але загальний вигляд залежності $\alpha = c \cdot W^a$ зберігається.

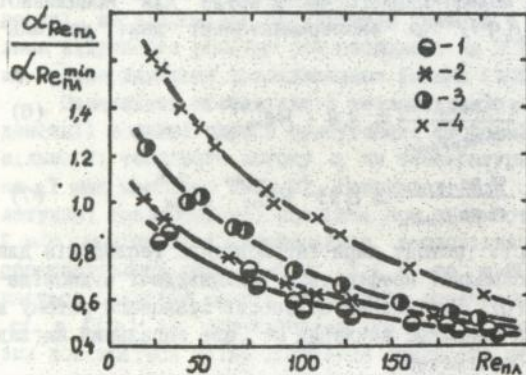
Злам на графіках $\alpha = f(W_n)$ визначається механізмом краплинної конденсації і залежить від критичного та відривного радіусів



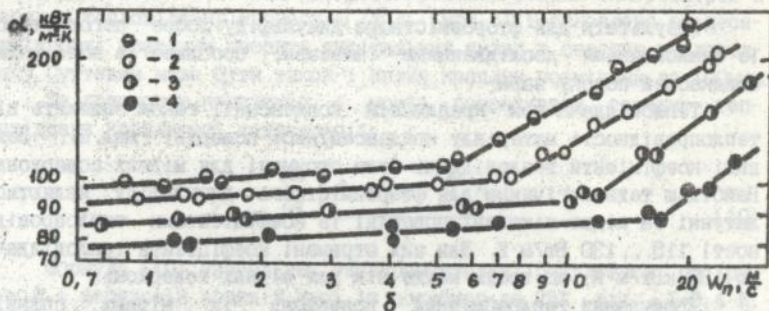
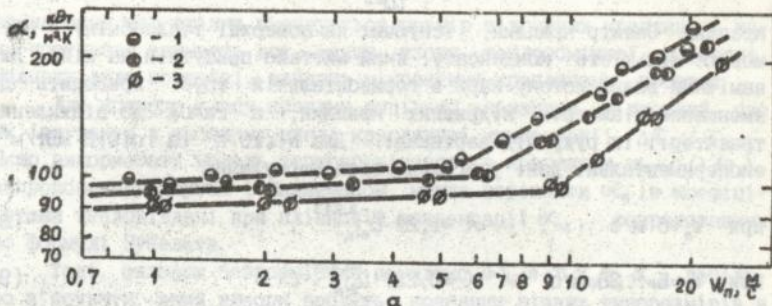
Мал. 1. Функції розподілу краплин за розмірами, отримані різними авторами: 1 - Ханнеман; 2 - Ісаченко; 3 - Мерте; 4 - Танака; 5 - Роуз; 6 - дослідження автора.



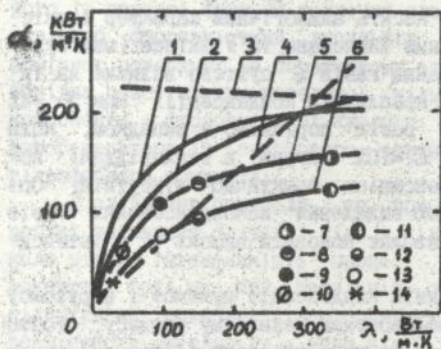
Мал. 2. Динаміка змінення тепловіддачі протягом створення гідрофобного покриття на латунній теплообмінній поверхні: 1-3 години; 2-5 годин; 3-7 годин; 4-10 годин; 5- більше 12 годин; 6-плівкова конденсація.



Мал. 3. Вплив натікання конденсату на теплообмін: 1 - $W_n < 2$ м/с; 2 - $W_n = 5$ м/с; 3 - $W_n = 7$ м/с; 4 - $W_n = 10$ м/с.



Мал. 4. Залежність коефіцієнтів тепловіддачі від швидкості потоку пари: а) 1- $q=105$ кВт/м²; 2- $q=80$ кВт/м²; 3- $q=60$ кВт/м²; б) 1- $q=105$ кВт/м²; 2- $q=147$ кВт/м²; 3- $q=210$ кВт/м²; 4- $q=300$ кВт/м².



Мал. 5. Вплив теплопровідності матеріалу теплообмінної поверхні на тепловіддачу:

- 1 - Ханнеман; 2 - Уїлкінс;
- 3 - Роуз; 4 - Таннер;
- дослідження автора:
- 7 - мідь; 8 - МНЖ;
- 9 - латунь; 10 - мельхіор;
- хромовані поверхні:
- 11 - мідь; 12 - МНЖ;
- 13 - латунь; 14 - нержавіюча сталь.

краплин. Спектр краплин, існуючих на поверхні теплообміну, обумовлює кількість конденсату, який миттєво присутній на ній. Динамічний вплив потоку пари в горизонтальній трубі приводить до зменшення діаметрів відривних краплин, а також до відхилення траєкторії їх руху від вертикалі. Для $\Delta T \leq 10 \text{ K}$ та $q \leq 0,3 \text{ МВт/м}^2$ експериментальні дані узагальнюються формулами:

$$\text{при } W_n < 5 \text{ м/с} \quad \alpha = 1,29 \cdot D_{\text{вiд}}^{-2,923}, \quad (8)$$

$$\text{при } W_n = 5 \dots 26 \text{ м/с} \quad \alpha = 0,237 \cdot D_{\text{вiд}}^{-0,578}. \quad (9)$$

Результати для фторовмісткого дисульфїду добре погоджуються із аналогічними дослідженнями Танасави, особливо в зоні малих швидкостей потоку пари.

Тепловіддача при краплинній конденсації також залежить від теплопровідності матеріалу конденсаційної поверхні (мал. 5). Найвищі коефіцієнти тепловіддачі були отримані для мідних поверхонь. Найбільш технологічними для фторовмісткого дисульфїду являються латунні та мідно-нікелеві поверхні із коефіцієнтами теплопровідності 115...130 Вт/м·К. Для них отримані коефіцієнти тепловіддачі до 130 кВт/м²К, що трохи менше ніж для мідних поверхонь.

Хромування теплообмінних поверхонь із мідних сплавів уповільнювало строк створення на них гідрофобного покриття і до 20% знижувало коефіцієнти тепловіддачі. Хромування сталейних поверхонь у поєднанні із застосуванням фторовмісткого дисульфїду дозволило отримати краплинний режим, але виграш у коефіцієнтах тепловіддачі порівняно із плівковою конденсацією був незначним.

Загальний вигляд залежності $\alpha = f(\lambda_{\text{ст}})$ для поверхонь як із хромуванням, так і без нього, носить аналогічний характер і якісно погоджується із дослідженнями Ханнемана та Уїлкінса (мал. 5).

Концентрація неконденсованих газів ε суттєво впливає на інтенсивність теплообміну при краплинній конденсації. При $\varepsilon = 4\%$ тепловіддача знижується у 5 разів порівняно з випадком, коли $\varepsilon = 0,05\%$. А для концентрації $\varepsilon = 10\%$ виграш в тепловіддачі порівняно із плівковою конденсацією практично відсутній. Організація продувки пари з метою видалення неконденсованих газів від теплообмінної поверхні дозволяє поновити високі α і інтенсифікувати теплообмін.

Тепловіддача при краплинній конденсації рухомої і нерухомої водяної пари визначається особливостями механізму процесу, тобто розвитком краплин у просторі та часі стосовно відносного циклу конденсації. При зростанні швидкості потоку пари та температурно-

го натиску пар-стінка зменшується розмір відривних краплин, і вони поступово займають все меншу площу теплообмінної поверхні. Навпаки доля поверхні, зайнята мікронними краплинами, зростає.

Для кожного класу краплин доцільно визначити відносний час їх існування в умовному циклі краплинної конденсації $\Delta T_i / T_u$. Якщо використати модель теплопровідності в краплинах $\alpha_k = c \cdot (\lambda / R_k)$, запропоновану Роузом і Ханнеманом, можна порівняти α_k із коефіцієнтами тепловіддачі при плівковій конденсації $\alpha_{пк}$, розрахованими по формулі Нусельта.

Тоді, склавши безрозмірний комплекс $A = S_k \cdot \Delta T \cdot \alpha_k / T_u \cdot \alpha_{пк}$, доцільно з'ясувати який внесок роблять краплини різних типорозмірів в середню тепловіддачу процесу $A_i / \sum_{i=1}^n A_i$ (мал. 6). Встановлено, що десятимікронні краплини вносять вирішальний вклад в середню тепловіддачу. Суттєвим може бути також і вплив краплин розмірами до 100 мкм.

За допомогою комплексу А можна розрахувати середню тепловіддачу краплинної конденсації:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n [A_i \cdot \alpha_{ki} / \sum_{i=1}^n A_i]}{n_i} \quad (10)$$

Формула (10) узагальнює експериментальні результати по рухомій і нерухомій водяній парі із похибкою до 25% для $\Delta T = 0,4$ К, а для $\Delta T = 1 \dots 4$ К ця похибка не перевищує 15%. Враховуючи подібність відомих функцій розподілу краплин за розмірами, запропонована методика може бути застосована і для інших випадків краплинної конденсації.

Із використанням фторовмісткого дисульфиду найбільш оптимальним є засіб створення краплинної конденсації шляхом нанесення його із парової фази на технічно гладкі поверхні із мідних сплавів. Щоб фторовмісткий дисульфід якісно взаємодіяв із теплообмінною поверхнею на початковому етапі нанесення покриття необхідна присутність невеликої кількості іншого недовгоживучого компонента - фторовмісткої кислоти. Введення дисульфиду в воду парогенератора із спиртового розчину прискорює процес створення гідрофобного покриття.

Дослідження показали, що при різній чистоті підготовки поверхні додавання однієї і тієї ж кількості гідрофобізатора викликало різну інтенсивність процесу незалежно від часу нанесення покриття. Тоді як при ретельній обробці та при попередньому підготованні поверхні теплообміну невелика кількість фторовмісткого дисульфиду - менш ніж 0,1% від об'єму теплоносія у рідкій фазі, призводить до збільшення коефіцієнтів тепловіддачі у

4...12 разів порівняно із плівковою конденсацією.

Згідно із отриманими даними, визначаючий вплив на ступінь інтенсифікації процесу справляє масова концентрація дисульфіду, віднесена до одиниці теплообмінної поверхні. При цьому об'ємна концентрація може бути різною для дрібно- та крупномасштабних теплообмінних пристроїв.

Досліджений діапазон концентрації склав: масової $C_m=0,4...12$ г/м³, об'ємної $C_v=2\cdot 10^{-3}...6,2\cdot 10^{-2}$ %. Існує оптимальна кількість стимулятора, що дозволяє максимально інтенсифікувати процес (мал. 7). Якщо концентрація нижче або вище ніж оптимальна, то інтенсивність тепловіддачі, а також строк дії покриття, зменшуються.

При оптимальній концентрації якісна краплинна конденсація із високими α підтримувалась 4200 годин. Після чого зарахунок поступового окислення тепलोобмінної поверхні протягом наступних 2400 годин тепловіддача знижується, а режим конденсації змінюється на плівковий. Видалення окисних плівок із наступною змінною робочого розчину дозволяє швидко поновити краплинну конденсацію у повному обсязі.

Перерви у роботі теплообмінного стенду в любий проміжок часу на протязі всього строку дії гідрофобного покриття, а також функціонування обладнання по замкненому або розімкненому контурах, не впливали на якість краплинної конденсації та рівень коефіцієнтів тепловіддачі.

Враховуючи характер кривих краплинної конденсації, їх можна описати за допомогою емпіричної формули:

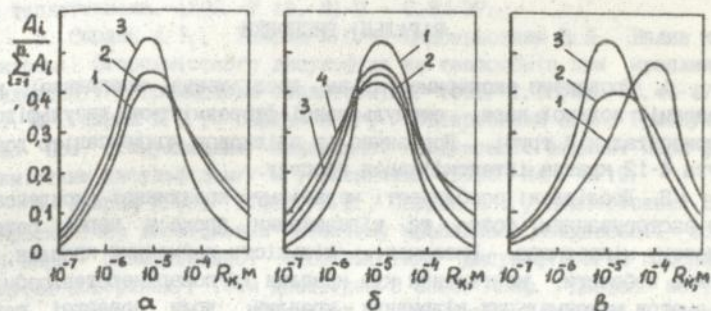
$$\alpha = C_1 / \Delta T \left(e^{C_2 / \sqrt{\Delta T}} - 1 \right). \quad (11)$$

Константи C_1 і C_2 можна розглядати як поправочні множники, що враховують особливості конкретного процесу краплинної конденсації. Наприклад, вплив на теплообмін масової концентрації стимулятора.

Формула (11) має таку ж саму тенденцію в узагальненні експериментальних даних, як і формула (10). Між собою ці дві залежності дають розбіжність не більше 3% при температурних натисках $\Delta T \geq 1$ К.

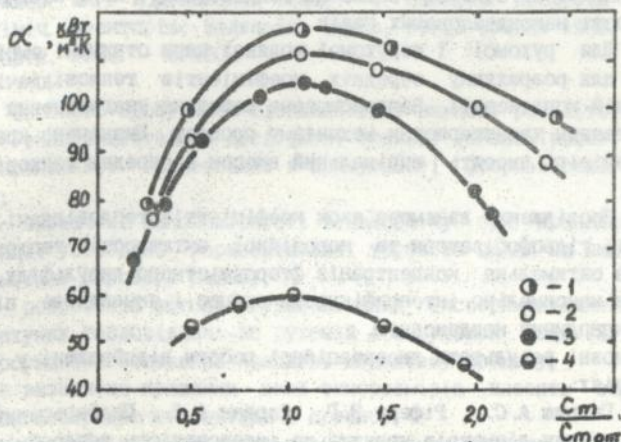
Фторовмісткий дисульфід, який створює гідрофобне покриття на поверхні конденсації, може служити інгібітором корозії. При цьому швидкість корозії поверхні конденсації зменшується у 1,5-2 рази порівняно із корозією тієї ж поверхні у дистилаті при однакових умовах. Пошкодження гідрофобного покриття супроводжується прискоренням корозійних процесів та поступовою зміною режимів конденсації і зниженням коефіцієнтів тепловіддачі.

Застосування фторовмісткого дисульфіду дозволяє знизити



Мал. 6. До розрахунку внеску краплин різних розмірів в середню тепловіддачу процесу краплинної конденсації:

- а) $\Delta T = 0,4$ К: 1- $W_n = 1$ м/с; 2- $W_n = 3$ м/с; 3- $W_n = 14$ м/с;
 б) $\Delta T = 1$ К: 1- $W_n = 1,4$ м/с; 2- $W_n = 10$ м/с; 3- $W_n = 21$ м/с; 4- $W_n = 26$ м/с;
 в) $\Delta T = 4$ К: 1- $W_n = 1,3$ м/с; 2- $W_n = 20$ м/с; 3- $W_n = 25$ м/с.



Мал. 7. Вплив концентрації фторовмісного дисульфіду на тепловіддачу при краплинній конденсації водяної пари на різних теплообмінних поверхнях: 1 - мідь; 2 - МНЖ; 3 - латунь; 4 - мельхіор.

швидкість корозії до $4,4 \cdot 10^{-3} \dots 12,4 \cdot 10^{-3}$ мм/рік, що значно нижче ніж припустимий показник 0,29 мм/рік для сучасних ТЕЦ.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено експериментальне дослідження краплинної конденсації водяної пари, стимульованої фторовмістким дисульфідом в горизонтальній трубі. Порівняно із плівковою конденсацією досягнута 4-12 кратна інтенсифікація процесу.

2. Досліджені особливості механізму краплинної конденсації із застосуванням фото- та відеозйомки процесу через оптичну систему мікроскопа. Визначені: кількість найменших краплин, що можна побачити; контактний кут краплин із поверхнею теплообміну; діаметри максимальних відривних краплин; доля поверхні теплообміну, яку займають краплини різних типорозмірів.

3. Встановлено, що криві краплинної конденсації мають максимум по коефіцієнтам тепловіддачі в залежності від температурного натиску (щільності теплового потоку). Визначені параметри, які відповідають максимальній інтенсивності теплообміну.

4. Показано, що зростання швидкості потоку пари сприяє інтенсивному видаленню конденсату із теплообмінної поверхні та дозволяє знизити негативний вплив на тепловіддачу його натікання і присутності неконденсованих газів.

5. Для рухомої і нерухомої водяної пари отримані емпіричні формули для розрахунку середніх коефіцієнтів тепловіддачі при краплинній конденсації. Запропонована методика узагальнення α із використанням характеристик механізму процесу. Визначено краплини яких розмірів вносять вирішальний внесок в середню тепловіддачу процесу.

6. Досліджений взаємозв'язок коефіцієнтів тепловіддачі, концентрації гідрофобізатора та корозійної активності теплоносія. Знайдена оптимальна концентрація фторовмісткого дисульфиду, яка дозволяє максимально інтенсифікувати процес і якнайдовше підтримувати краплинну конденсацію.

Основні результати дисертаційної роботи відображені у таких публікаціях:

1. Гавриш А. С., Ріферт В. Г., Сардак А. І., Подберьозний В. Л. Аналіз впливу діаметрів краплин на інтенсивність теплообміну при краплинній конденсації // Інженерно-фізичний журнал. - 1994. - Т. 66, № 6. - С. 668-672.

2. Гавриш А. С., Ріферт В. Г., Сардак А. І., Подберьозний В. Л. Перспективи використання нового стимулятора краплинної кон-

денсації в опріснюючому та енергетичному устаткуванні// Промислова теплотехніка. -1992. -Т.14, №3. - С.33-37.

3. Сардак А. І., Гавриш А. С., Подберезний В. Л. Вплив концентрації фторовмісткого дисульфиду на теплообмін при краплинній конденсації// Промислова теплотехніка. -1993. -Т.15, №2. - С.44-47.

4. Гавриш А. С., Сардак А. І., Подберезний В. Л., Грязнухіна Л. М. Про стимулювання краплинної конденсації водяної пари фторовмістким дисульфідом// М., Энергетик. -1994. -№4. - С.19.

5. Гавриш А. С., Ріферт В. Г., Сардак А. І., Подберезний В. Л. Мікроскопічне дослідження механізму краплинної конденсації водяної пари, стимульованої фторовмістким дисульфідом на плоских і угнутих поверхнях// Тези доповідей 8 Всес. конф. "Двофаз. потік в енерг. машинах і апаратах", Ленінград, 23-25 жовтня, 1990. Т.2. -Л., 1990. - С.72-74.

6. Ріферт В. Г., Долинський О. А., Гавриш А. С. Інтенсифікація теплообміну при конденсації усередині горизонтальних труб// Тепл. труби: теорія і практика: Матер. Міжнар. шк.-семін., (Мінськ, 1990). Ч.1. - Мінськ, 1990. - С.30-38.

7. Ріферт В. Г., Долинський О. А., Гавриш А. С. Режими течії фаз і теплообмін при конденсації рухомої пари усередині труб// 6 Міжнар. шк.: Моделювання тепло- і масообм. процесів хіміч. і біохіміч. реакторів, Болгарія, Варна, 15-23 травня 1989. - Варна, Болгарія, 1989. - С.100.

Особисто здобувачем одержані такі наукові результати:

- експериментально досліджені основні закономірності механізму краплинної конденсації в присутності фторовмісткого дисульфиду;

- визначені закономірності теплообміну при краплинній конденсації усередині горизонтальної труби та вплив на них режимних параметрів парового потоку;

- розроблена методика узагальнення експериментальних даних і розрахунку тепловіддачі по рухомій і нерухомій водяній парі із застосуванням загальних положень механізму процесу;

- визначено краплини яких типорозмірів вносять вирішальний внесок в середню тепловіддачу процесу;

- розроблені та відпрацьовані оптимальні режими створення і довготривалого підтримання краплинної конденсації із застосуванням фторовмісткого дисульфиду.

ЛНБ ім. В. Стефанишина
АН України

GAVRISH A.S. Heat exchange at water steam dropwise condensation, stimulated with fluorine disulphide in horizontal tube. Manuscript.

Thesis for a scientific degree of the candidate of technical sciences according to speciality 05.14.05. - "Theoretical heat technology", National technical university of Ukraine "Kiev politechnical institute", Kiev, 1996.

Thesis is being defended in which: has been carried out an experimental investigation of the dropwise condensation heat exchange regularity inside horizontal tube; has been determined basic steam flow rate parameters separate influence on the heat emission; has been considered different creation methods and peculiarity plotting hydrofobizator-agent coating on the heat exchange surface; has been made some recommendations, which promote highest possible dropwise condensation support; has been made research of the dropwise condensation mechanism for still and move vapour steam flow; has been proposed calculation method of heat removal coefficients at dropwise condensation.

АННОТАЦИЯ

Гавриш А. С. Теплообмен при капельной конденсации водяного пара, стимулированной фтородержащим дисульфидом в горизонтальной трубе. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05. - "Теоретическая теплотехника", Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 1996.

Защищается диссертация, в которой: экспериментально исследованы закономерности теплообмена при капельной конденсации внутри горизонтальной трубы; определено раздельное влияние на теплоотдачу основных режимных параметров потока пара; рассмотрены способы создания и особенности нанесения гидрофобизатора на теплообменную поверхность; выработаны рекомендации, способствующие максимально длительному поддержанию капельной конденсации; для неподвижного и движущегося пара исследованы закономерности механизма процесса; предложена методика расчета коэффициентов теплоотдачи при капельной конденсации.

Ключові слова: краплинна та плівкова конденсація, коефіцієнт тепловіддачі, тепловий потік, температура, гідрофобизатор, теплопровідність, теплообмін, краплина, поверхня, конденсат, водяна пара.

Подписано к печати 9.04.96 Формат 60x84. I/16
Объем I печ. лист. Заказ № 38 Тираж 100
Оптимиз. УкраинцО

AB 34.207

1111722

AB 34.584

AB 34.584