

# АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДІАМЕТРІВ ДЕСОРБЦІЙНИХ КРАПЛИН НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ ПІД ЧАС КОНДЕНСАЦІЇ

## Вступ

Розвиток процесу краплинної конденсації у просторі та часі визначається частковими процесами і факторами, до яких відносяться: початковий морфогенез, властивості центрів конденсації та їх концентрація, критичний діаметр розвитку, нерівномірність температури поверхні, механізм та динаміка десорбції і багато інших [1-4]. Питома тепловіддача процесу конденсації пов'язана із розподілом краплин за розмірами [5-8]. В свою чергу, цей розподіл залежить від долі теплообмінної поверхні, яку займають десорбційні краплини, та від значення максимального діаметру краплин. Вплив швидкості парового потоку, стан поверхні конденсації, її висота і нахил до горизонту мають свій прояв через механізм процесу і зміну значень характерних розмірів краплин. Таким чином, виникає необхідність встановити зв'язок між інтенсивністю теплообміну і діаметром краплин, які видаляються з теплообмінної поверхні.

## 1 Особливості функції розподілу краплин за розмірами

Якщо розподіл краплин за розмірами відомий для конкретного процесу краплинної конденсації, то можна створити модель розрахунку середньої тепловіддачі для всієї поверхні, яка базується на теорії термічного опору окремих краплин радіуса  $R$  [6]. Дотепер невідома універсальна формула для обрахунку розподілу краплин за розмірами. Найбільш зручно така функція визначається як:

$$N(R) = \lim_{\Delta R \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta N(R)}{\Delta R} \right), \quad (1)$$

де загальна кількість краплин на одиницю площі  $\Delta N$  розраховується для інтервалу радіусів краплин від  $R - (\Delta R/2)$  до  $R + (\Delta R/2)$ .

Така функція дозволяє визначити кількість краплин на одиницю площі в заданому інтервалі їх радіусів. Дослідна оцінка первинних краплин обмежується внаслідок

їхнього швидкоплинного розвитку аж до мікронного розміру. Дослідження умовного циклу краплинної конденсації [9] дозволяє стверджувати, що в цьому випадку розподіл краплин не залежатиме від параметрів поверхні і буде майже універсальним. Натомість можна розрахувати критичний радіус  $R_{кр}$  за формулою [6]:

$$R_{кр} = \frac{2\sigma T_H}{r\rho(T_H - T_C)}. \quad (2)$$

Щільність утворення первинних центрів конденсації можна оцінити, виходячи із відстані між сусідніми вузлами у трикутній решітці, як [10]:

$$\mu = 0.5(2n^2 - n + 1), \quad (3)$$

де  $n$  - локальна кількість краплин в непарних рядах решітки розташування із врахуванням відстані між їх центрами. Для зародкових краплин при конденсації водяної пари атмосферного тиску аналогічний розрахунок  $\mu$  складає від  $0.25 \times 10^{12} \text{ 1/m}^2$  до  $6.1 \times 10^{14} \text{ 1/m}^2$ . Для мікронних краплин  $\mu$  перевищує значення  $1.6 \times 10^{10} \text{ 1/m}^2$ . Ці дані корелюються із дослідженнями [11].

Іншою важливою геометричною характеристикою в умовному циклі краплинної конденсації є розмір краплин, що десорбуються із теплообмінної поверхні. Краплини відривного розміру існують на поверхні конденсації протягом значного проміжку часу порівняно із зародковими краплинами і мають суттєвий термічний опір. Під час видалення вони на своєму шляху змінюють велику кількість дрібних краплин і тим самим позитивно впливають на інтенсивність теплообміну.

Згідно із [6] можна розрахувати відривний  $R_0$  розмір краплин:

$$R_0 = \sqrt{\frac{3\sigma(1 + \cos \Theta)}{2\pi g \rho \sin \psi}}, \quad (4)$$

де  $\psi$  - кут нахилу теплообмінної поверхні до горизонту,  $\Theta$  - кут змочування.

Рішення (4) розглядається як середньостатистична величина і базується на балансі сил, що діють на напівсферичну краплину, яка рухається під дією сили тяжіння. Розрахункові значення десорбційних розмірів краплин добре корелюються із дослідними для конденсації водяної пари атмосферного тиску і складають до  $5.5 \times 10^{-3}$  м [1-11].

Проведений аналіз різноманітних процесів краплинної конденсації [1-11] вказує на те, що через зміну радіуса або діаметра краплин проявляється вплив на процес режимних параметрів парового потоку та стану поверхні теплообміну. Таким чином, доцільно обрати десорбційний розмір краплин як визначальний лінійний розмір для розрахунку інтенсивності теплообміну при краплинній конденсації.

## 2 Аналіз факторів впливу на десорбційні розміри краплин

Під час дослідження критичного десорбційного діаметра краплин [1-4] було встановлено, що він залежить від рівноважної зовнішніх та адгезійних сил, які обумовлюються поверхневим натягом між конденсаційною поверхнею та краплинами. Зміною кута контакту між краплинами і поверхнею за рахунок дії зовнішніх сил, таких, як сила тяжіння, відцентрова сила або динамічна дія парового потоку, досягається варіація десорбційного діаметра.

Зміна орієнтації конденсаційної поверхні у просторі призводить до того, що для вертикальної поверхні відривний діаметр краплин буде меншим, ніж для похилої. Стан самої гідрофобної поверхні, тобто її шорсткість та суцільність покриття стимулятором, також впливають на динаміку десорбції. На полірованих поверхнях із рівномірним оптимальним гідрофобним покриттям відривні розміри краплин будуть мінімізованими порівняно із нерівномірними гідрофобними та шорсткими поверхнями.

Найвпливовішими чинниками зміни геометричних характеристик краплинної конденсації є динамічна дія парового потоку та відцентрова сила [1-4]. Якщо дія відцентрової сили незначна, що спостерігається згідно з даними [4] для прискорення до  $3.3g$ , то вплив швидкості парового потоку стає визначальним. Цей вплив, крім зміни

десорбційного діаметра краплин, дозволяє навіть за швидкості  $4$  м/с попередити негативну дію накопичення газів, які не конденсуються. Зокрема, потік пари на поверхні, що обертаються, подається із суттєвою швидкістю  $5$  м/с і вище. Автори відомих праць із дослідження впливу відцентрової сили [1-4] на краплинну конденсацію розглядали зміну прискорення аж до  $39.9g$ , але однозначного узагальнення даних так і не отримали внаслідок відмінності інших параметрів процесу і певних труднощів у виконанні експериментів.

Таким чином, проведений аналіз дозволяє вважати швидкість парового потоку визначальним фактором впливу на десорбційні розміри краплин для конденсації в умовах, наближених до нормальних. На користь цього висновку слугує достатньо велика кількість експериментальних даних [1-11] для краплинної конденсації, отриманих навіть для швидкості до  $30$  м/с.

## 3 Механізм краплинної конденсації та швидкість парового потоку

Краплини конденсації на теплообмінній поверхні утворюють складну картину, що постійно змінюється. Інтенсивність теплообміну визначається механізмом процесу і залежить від кількості рідини, яка щомиті знаходиться на поверхні конденсації.

За невеликих швидкостей парового потоку його динамічна дія буде малосуттєвою. Із збільшенням швидкості тепловіддача може значно зрости. При цьому змінюється час перебування краплин всіх типорозмірів на поверхні і діаметр десорбційних краплин. Зростання швидкості потоку призводить до зменшення відривного розміру, який є характерним для ансамблю краплин на поверхні конденсації. Під час видалення на своєму шляху краплина знімає більш дрібні конденсаційні формування і дещо гальмується в русі. Чим менший десорбційний діаметр, тим сильнішою є така взаємодія. Тим самим змінюється траєкторія видалення.

З точки зору теплообмінних характеристик, великі краплини, що довготривалий термін перебувають на поверхні конденсації, мають значний термічний опір. З іншого боку, велика кількість конденсації створює умови для заливання поверхні або до розмазування по ній десорбційних краплин.

Зростання швидкості парового потоку сприяє інтенсивному об'єднанню краплин

різноманітних типорозмірів, швидкому видаленню десорбційних краплин та збільшенню швидкості збору конденсату. В результаті термічний опір конденсату зменшується і зростає інтенсивність теплообміну.

Таким складним механізмом процесу краплинної конденсації пояснюється той факт, що починаючи від нерухомої пари  $W=0$  до певного значення швидкості парового потоку  $W_{кр}$ , десорбційний розмір краплин майже не змінюється. При цьому інтенсивність теплообміну також може несуттєво коливатись у сторону збільшення. За даними різних дослідників [1-4, 6-8, 11, 12] значення критичної швидкості може сягати від 4 до 12 м/с.

Якщо швидкість парового потоку перевищить таке критичне значення  $W_{кр}$ , то інтенсивність теплообміну почне різко зростати, а діаметр видалення краплин зменшуватись. Такий характер процесу відповідає відомим дослідженням краплинної конденсації [1-4, 6-8, 11, 12] за швидкостей потоку пари до 30 м/с.

#### 4 Зв'язок тепловіддачі та геометричних розмірів десорбційних краплин

Фізичні уявлення про механізм процесу, експериментальні та теоретичні дослідження конденсації з врахуванням розподілу краплин за розмірами [1-8, 11, 12] дають можливість узагальнити краплинну конденсацію емпіричними залежностями у вигляді:

$$\alpha = \text{const} D_0^m, \quad (5)$$

де показник степеня  $m$  та константа пропорційності залежать від умов проведення дослідів.

Наявність суттєвих відмінностей в умовах конденсації різних теплоносіїв [1-8, 11, 12], а також відсутність одностайності у виборі лінійного визначального розміру  $D_0$  і систем одиниць вимірювання, не дозволяють уніфікувати розрахунки. Крім того, під такі узагальнення не підпадала частина дослідів, особливо для зони малих швидкостей парового потоку  $W \leq 5$  м/с.

Переваги в узагальненні даних краплинної конденсації дає приведення до безрозмірного вигляду залежності (5). Поточні значення коефіцієнтів тепловіддачі  $\alpha$  доцільно порівняти із максимальними  $\alpha_{\max}$  для краплинної конденсації нерухомої пари  $W \rightarrow 0$ . Лінійним визначальним розміром належить обрати десорбційний радіус краплин  $R_0$  і

порівняти його із значенням  $R_0^{\max}$  при конденсації нерухомої пари  $W \rightarrow 0$ .

Із метою порівняння результатів і продовження попередніх досліджень [9, 10] була проведена серія експериментів для краплинної конденсації на металевих поверхнях. Для стимулювання краплинної конденсації була застосована комплексна обробка латунних, мідно-нікелевих, сталевих, мідних, мельхіорових, титанових, алюмінієвих та інших металевих поверхонь. Глибина обробки відповідала діапазону мікронерівностей профілю поверхні.

В результаті була виявлена залежність тепловіддачі від геометричних розмірів десорбційних краплин, яка порівнювалась із даними інших авторів та попередніх досліджень. Графічне зображення отриманих результатів наведено на рис. 1:

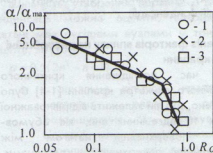


Рис. 1. Зміна інтенсивності процесу краплинної конденсації залежно від розмірів десорбційних краплин: 1 - дані [1-4]; 2 - дані [12], 3 - дані цієї роботи

Узагальнення досліджень виконано в безрозмірному вигляді, аналогічно до методики (5):

$$W \leq W_{кр}, \quad \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = 1.02 \left( \frac{R_0}{R_0^{\max}} \right)^{-1.1}, \quad (6)$$

$$W \geq W_{кр}, \quad \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = 1.154 \left( \frac{R_0}{R_0^{\max}} \right)^{-0.54}. \quad (7)$$

Таким чином, досягнуто погодження різних дослідних даних за впливом зміни радіусів десорбційних краплин на інтенсивність теплообміну. Можливі певні розбіжності таких розрахунків для інших процесів краплинної конденсації, наприклад, за рахунок дії відцентрової сили, що обумовлюється відмінностями в способах гідрофобізації, геометричних характеристиках теплообмінних поверхонь, режимних параметрів і т.ін.

## Висновки

1. Встановлено, що через зміну геометричних розмірів краплин проявляється вплив на процес режимних параметрів парового потоку та стану поверхні теплообміну.
2. Як визначальний лінійний розмір для розрахунку інтенсивності теплообміну при краплинній конденсації доцільно обрати десорбційний радіус або діаметр краплин.
3. За рахунок дії зовнішніх сил, таких, як сила тяжіння, відцентрова сила або динамічна дія парового потоку, досягається варіація десорбційного діаметра.
4. Швидкість парового потоку є визначальним фактором впливу на десорбційні розміри краплин для конденсації за умов, наближених до нормальних.
5. При невеликих швидкостях парового потоку, що прямують до нуля, його динамічна дія буде малосуттєвою. Із збільшенням швидкості потоку, що перевищує певне критичне значення, тепловіддача буде значно зростати.
6. Отримана залежність у безрозмірному вигляді для тепловіддачі як функції геометричних розмірів десорбційних краплин. Проведено порівняння із даними інших авторів та попередніх досліджень. Досягнуто погодження різних дослідних даних за впливом зміни радіусів відривних краплин на інтенсивність теплообміну.
7. Можливий подальший розвиток та вдосконалення отриманих результатів для інших процесів краплинної конденсації, що матимуть відмінності в способах гідрофобізації, геометричних характеристиках теплообмінних поверхонь, режимних параметрах парового потоку.

## Література

1. Tanasawa I. Advances in condensation heat transfer // *Advances in Heat Transfer*. - 1991. - Vol.21. - P. 55-139.
2. Танасава И. Капельная конденсация и пути ее практического применения // *Теплообмен. Достижения. Проблемы. Перспективы: Тр. 6-й Межд. конф. по теплообмену.*-М.: Мир, 1981. - С. 74-105.
3. Tanasawa I., Utaka Y. Measurement of condensation curve for dropwise

condensation heat transfer // *Saysun canque*. - 1978. - Vol.30. - P.262-265.

4. Танасава И. Состояние и перспективные направления в исследованиях капельной конденсации // *Нихон кикай гаккай ромбунсю*.-1982.-Т.48,№429.- С. 835-843.
5. Hanneman R.J., Mikic B.B. An analysis of effect of surface thermal conductivity on the rote of heat transfer in dropwise condensation // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. - 1976. - V.19. - P.1299-1307.
6. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. - М.: Энергия, 1981. - 240 с.
7. Rose J.W. Dropwise condensation theory // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. - 1981. - Vol.24, №2. - P. 191 - 194.
8. Rose J.W. Further aspects of dropwise condensation theory // *Int. J. Heat and Mass Transfer*.-1976.-Vol.19.-P.1363-1370.
9. Гавриш А.С. Об особенностях механизма, кривых и цикла капельной конденсации // *Промышленная теплотехника*. - 2004. - Т.26, №3. - С.20-24.
10. Гавриш А.С. О некоторых особенностях процесса капельной конденсации водяного пара на металлических поверхностях // *Труды 3-й Российской национальной конференции по теплообмену*. - М.: Издательство МЭИ, 2002. - Т.4. - С.249-252.
11. Tanaka H., Tsuruta T. A microscopic study of dropwise condensation // *Int. J. Heat and Mass Transfer*.-1984.-V.27.-P.327-335.
12. Гавриш А.С., Риферт В.Г., Сардак А.И. Анализ влияния диаметров капель на интенсивность теплообмена при капельной конденсации // *Инженерно-физический журнал*.-1994.-Т.66,№6.-С.668-672.

## Список позначень

- $D_0$  - характерний визначальний діаметр краплин;  
 $g$  - прискорення вільного тяжіння;  
 $q$  - густина (щільність) теплового потоку;  
 $n$  - локальна кількість краплин в непарних рядах трикутної решітки розташування;  
 $N(R)$  - функція розподілу краплин за розмірами;  
 $m$  - показник степеня;  
 $g$  - теплота фазового перетворення;  
 $R$  - радіус краплин;  
 $R_{кр}$  - критичний (зародковий) радіус краплин;  
 $R_0$  - відривний (десорбційний) радіус краплин;

$R_0^{\max}$  - максимальний відривний (десорбційний) радіус краплин для конденсації нерухомої пари;  
 $\Delta R$  - діапазон зміни радіусів краплин;  
 $T_C$  - температура поверхні конденсації;  
 $T_H$  - температура насичення;  
 $W$  - швидкість парового потоку;  
 $W_{KR}$  - швидкість парового потоку, яка відповідає зміні в характері залежності інтенсивності теплообміну від діаметра десорбційних краплин під час конденсації;  
 $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі;

$\alpha_{\max}$  - максимальний коефіцієнт тепловіддачі для краплиної конденсації нерухомої пари;  
 $\Theta$  - кут змочування;  
 $\mu$  - щільність центрів конденсації - кількість краплин на одиницю площі;  
 $\rho$  - густина (щільність) речовини;  
 $\sigma$  - поверхневий натяг на границі розподілу фаз пара-рідина;  
 $\tau$  - час;  
 $\psi$  - кут нахилу теплообмінної поверхні до горизонту.