

# КРАПЛИННА КОНДЕНСАЦІЯ ВОДЯНОЇ ПАРИ НА МАЛИХ ПОВЕРХНЯХ

## Вступ

На теплообмін при краплинній конденсації впливає велика кількість різноманітних факторів. Наприклад, вибір теплоносія, матеріалу конденсаційної поверхні, спосіб гідрофобізації, режимні параметри та таке інше. Дослідження теплообміну та механізму конденсації на малих поверхнях дозволяє встановити основні закономірності процесу.

Дотепер ще не знайдені універсальні рішення по гідрофобізації поверхні теплообміну. Всі основні способи створення гідрофобних поверхонь: застосування поверхнево-активних речовин [1-4], напилювання, полімеризація [5], аморфізація поверхонь, технологія йонного впровадження [6] та інші, дозволяють створити режим краплинної конденсації та потребують свого вдосконалення залежно від конкретних

умов їх впровадження.

Для найрозповсюдженішого теплоносія – води та водяної пари, також поки ще не знайдені універсальні рішення по гідрофобізації поверхні теплообміну.

## 1. Особливості гідрофобізації та механізму процесу краплинної конденсації

Під час механічної обробки металевих поверхонь відбувається їх насичення атомами неметалевих речовин з одночасною зміною властивостей кристалічної решітки. Глибина обробки повинна порівнюватися із діапазоном мікронерівностей профілю поверхні. Це змінює баланс сил, що діють на конденсації формувannya, і впливає на характер їх взаємодії з поверхнею. Навіть незначні зміни в технології обробки металу впливають на характер змочуваності

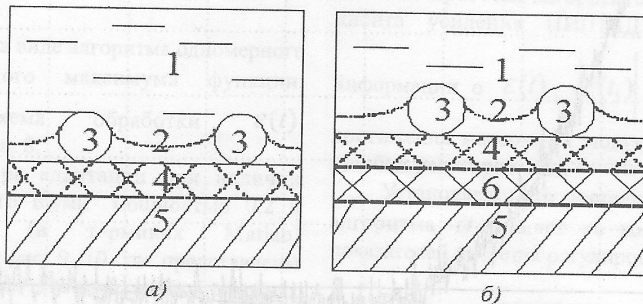


Рис.1. Схема організації краплинної конденсації на металевих поверхнях без проміжного покриття (а) та з проміжним покриттям (б):

1 - водяна пара; 2 - нестійка зародкова плівка конденсату; 3 - центри конденсації;  
4 - гідрофобне покриття; 5 - металева поверхня конденсації; 6 - проміжне покриття.

поверхні та дозволяють конденсувати в краплинному режимі невеликі порції пари. Наявність в парі домішок також призводить до зміни гідрофобних властивостей поверхні теплообміну.

Застосування органічних поверхнево-активних речовин залежить від якісно-кількісних характеристик стимулятора та способу його використання. Застосування для досліджень невеликих металевих поверхонь дає змогу оперативно змінювати в широкому діапазоні характер процесу в компактних умовах. Для латунних, мідно-нікелевих, сталевих, мідних, мільхіорових, титанових, алюмінієвих та інших металевих теплообмінних поверхонь можуть застосовуватись такі способи зміни поверхневих умов з метою організації краплинної конденсації: органічна гідрофобізація, хромування, шліфування та полірування поверхні теплообміну (рис.1 а), а також поєднання гідрофобізації з напленням і з поліруванням металу (рис.1 б).

Впровадження проміжного покриття (рис.1б) дозволяє гідрофобізатору утворювати покриття з тими поверхнями, з якими він безпосередньо контактує погано.

Механічні пошкодження гідрофобних поверхонь в процесі їх експлуатації, а також наявність забруднюючих домішок в теплоносії, погіршують якість краплинної конденсації. Усунення негативних зовнішніх факторів дозволяє поновити гідрофобні властивості поверхні і режим краплинної конденсації.

Фактори, які впливають на теплообмін, відображаються механізмом процесу. Дотепер відомі декілька моделей, що описують механізм краплинної конденсації [1-3]. Основною є теорія співіснування центрів конденсації і зародкової плівки [2], яка об'єднує теорії існування зародкової плівки конденсату та утворення центрів конденсації.

Встановлено, що центри конденсації утворюються залежно від структурних неоднорідностей теплообмінної поверхні, нерівномірності її гідрофобних властивостей та ступеня переохолодження тонкого пристінного прошарку пари. Також окремі краплини можуть утворюватись при розриві тонкого пласта конденсату, який має малий термічний опір. Кількість зародків, що утворюється за одиницю часу на одиниці площі поверхні, приймається як середньостатистична величина.

Розглядається можливість співіснування різних механізмів утворення краплин і різних видів конденсатних утворень: великих краплин, малих краплин і тонких плівок. Ці утворення характеризуються розмірами, які більші ніж

відстань дії міжмолекулярних сил, або сумірні з ними. Різниця в розмірах конденсатних утворень призводить до їх руху під дією капілярних сил і градієнта розклинюючого тиску. Динамічна нестійкість конденсату призводить до змінності по поверхні термічного опору. Посилюється дія на конденсат термокапілярних сил за рахунок пульсацій температури теплообмінної поверхні. До того ж фізичні властивості речовини, яка перебуває в стані тонкої плівки, можуть суттєво відрізнятися від властивостей великої маси рідини.

## 2. Криві та цикл краплинної конденсації

Фізичні уявлення про механізм процесу, експериментальні та теоретичні дослідження конденсації з врахуванням розподілу краплин за розмірами [1, 3, 5, 7-9] дають можливість якісного та кількісного його опису за допомогою безрозмірних кривих конденсації, як це показано на рис.2.

Режиму краплинної конденсації відповідає перша частина графіка (зона 1 рис.2), яка закінчується максимальним питомим тепловим потоком.

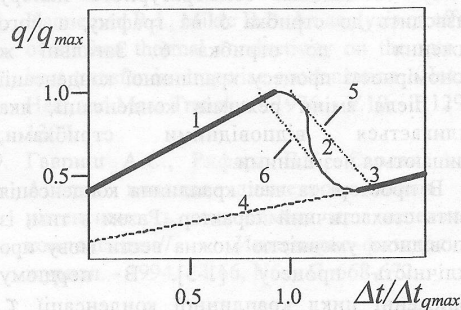


Рис.2. Криві конденсації:

- 1 — область краплинного режиму конденсації на гідрофобній поверхні;
- 2 — область змішаної конденсації, яка може зазнавати явища гістерезису;
- 3 — область плівкової конденсації;
- 4 — плівковий режим конденсації при відсутності гідрофобізації поверхні;
- 5 — стрибкоподібна зміна режимів з краплинного на плівковий;
- 6 — стрибкоподібна зміна режимів з плівкового на краплинний.

При прямому ході кривої у випадку, коли швидкість зростання конденсатних краплин перевищить швидкість їх відведення з теплообмінної поверхні, режим конденсації стане змішаним псевдокраплинним — зона 2 графіка. В цій зоні при збільшенні температурного напору густина теплового потоку буде знижуватись до

точки мінімуму. Режим конденсації зміниться на плівковий внаслідок заливання теплообмінної поверхні конденсатом. Зона 3 відповідає плівковій конденсації, для якої характерним є плавне зростання  $q$  при збільшенні  $\Delta t$ .

При зворотному ході кривої за умови плавного зменшення температурного напору після режиму плівкової конденсації настає в зоні 2 змішана псевдоплівкова струмкова конденсація, яка переходить у підсумку в краплинну. Мінімум і максимум кривої конденсації при прямому та зворотному ходах співпадають.

Якщо через недовговічність застосованого гідрофобизатора чи через механічні ушкодження та вплив забруднюючих домішок руйнується гідрофобне покриття поверхні конденсації, то крива конденсації вироджується. В цьому випадку після зони 3 графік плавно без екстремумів буде проходити через зону 4. За відсутності гідрофобизації поверхні прямий хід кривої конденсації буде відповідати зонам 4 і 3.

Різка стрибкоподібна зміна температурного напору "пара – ліофобна поверхня" призводить до явища гістерезису в зоні 2, як при прямому, так і при зворотному ході кривої конденсації (рис.2). Збільшення температурного напору призводить до стрибка 5 на графіку, а його зниження – до стрибка 6. Загальні ж закономірності процесу краплинної конденсації до і після зміни режимів конденсації, яка викликається відповідними стрибками, залишаються незмінними.

В просторі та часі краплинна конденсація носить стохастичний характер. Разом з тим, із відповідною умовністю можна вести мову про циклічність процесу [1-3]. В першому наближенні цикл краплинної конденсації  $\tau_0$  (крива 1-2-3-4 на рис.3, потім крива 4-5- і т.д.) складається із періоду зростання краплин  $\tau_1$  (крива 1-2 та 4-5) і періоду їх видалення з теплообмінної поверхні  $\tau_2$  (крива 2-6).

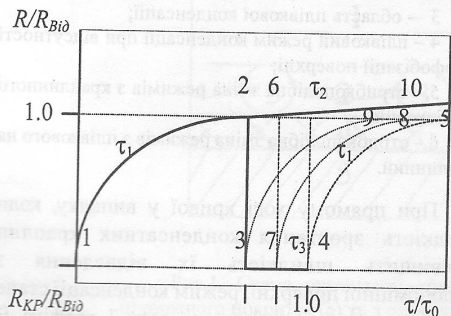


Рис.3. Цикл краплинної конденсації

Час видалення краплин  $\tau_2$  (крива 2-6 рис.3) може значно перевищувати час, необхідний для утворення зародкових конденсатних утворень  $\tau_3$  (дільниця 3-4). Такий цикл відповідає початку зони 1 на рис.2.

Коли  $\tau_2$  (дільниця 2-6 рис.3) корелюється із  $\tau_3$  (дільниця 3-7), то цикл конденсації 1-2-3-7-8 відповідає закінченню зони 1 кривої (рис.2). За умови сильного динамічного впливу парового потоку час видалення краплин  $\tau_2$  прямує до нуля, тобто крива 2-6 (рис.3) вироджується в точку 2. Відповідно час утворення зародкових конденсатних формуваль  $\tau_3$  збігається в точку 3. Крива 1-2-3-9 (рис.3) описує початок зони 2 (рис.2), де  $\tau_1$  зображується дільницями 1-2 і 3-9. У випадку, коли швидкість зростання краплин перевищує швидкість їх видалення з теплообмінної поверхні, режим конденсації спочатку стане змішаним, а потім – плівковим внаслідок заливу теплообмінної поверхні конденсатом. Крива 1-2-10 (рис.3) відповідає закінченню зони 2 та початку зони 3 (рис.2), де час зростання  $\tau_1$  зображується дільницею 1-2, а час видалення  $\tau_2$  – дільницею 2-10. Аналогічний характер процесу також буде спостерігатися для випадку відсутності гідрофобизації поверхні. Заливання теплообмінної поверхні конденсатом в цьому випадку буде мати місце вже після конденсації перших порцій пари.

Виділивши в циклі краплинної конденсації характерні класи краплин [8, 9], при детальному дослідженні за допомогою швидкісної відеозйомки при великому збільшенні було виявлено наступне. Загальний цикл зростання краплин, що знаходяться на елементарній площі теплообмінної поверхні, складається із підциклів зростання краплин характерних типорозмірів. Краплини відривного розміру, стікаючи по теплообмінній поверхні, змітають велику кількість краплин менших типорозмірів, тим самим для останніх скорочується довготривалість їх попередніх стадій процесу. На поверхні, яка таким чином вивільнилась, процес повторюється знову.

Після утворення життєздатних краплин на поверхні конденсації першочерговий їх розвиток відбувається, в основному, за рахунок прямої конденсації. Із збільшенням розміру краплин їх розвиток здійснюється за рахунок коалесценції та об'єднання. Після того, як краплина досягне відривного розміру, вона видалається з поверхні конденсації, при цьому вона змітає на своєму

шляху всі зустрічні краплини. Різноманітні процеси злиття краплин забезпечують високу інтенсивність конденсації.

Розглядаючи динамічну нестійкість конденсатних утворень, був введений розмір, що розмежує великі і малі конденсатні утворення. Він прийнятий як величина від 0,1 до 1 мкм [2]. У випадку, коли швидкість відведення рідини перевищує швидкість її утворення, на ліофобній теплообмінній поверхні будуть існувати тільки краплиноподібні утворення.

Згідно з [1-3, 5] можна розрахувати початковий критичний  $R_{KP}$  і відривний  $R_{Від}$  радіуси краплин. Для різних умов краплинної конденсації розрахунок призводить до результатів:  $R_{KP}$  – від  $10^{-8}$  до  $6 \times 10^{-7}$  м, а  $R_{Від}$  – від  $10^{-4}$  до  $5,5 \times 10^{-3}$  м.

### Висновки

1. Модель співіснування декількох видів конденсатних утворень на гідрофобних поверхнях враховує можливість формування краплин за різними механізмами. Вона найбільш повно відображує існуючі теорії опису краплинної конденсації.
2. В просторі та часі краплинна конденсація характеризується, в певній мірі, циклічністю процесу. В циклі краплинної конденсації розвиток краплин на теплообмінній поверхні відбувається від найменшого критичного до максимального відривного розміру, які відрізняються між собою на декілька порядків.
3. В циклі краплинної конденсації можна виділити характерні класи краплин. Загальне зростання краплин від критичного  $R_{KP}$  до відривного  $R_{Від}$  розмірів складається із підциклів розвитку краплин характерних типорозмірів.
4. Фізичні уявлення про механізм краплинної конденсації знайшли своє графічне відображення в кривих конденсації. Криві конденсації характеризуються декількома зонами, основними з яких є зони краплинної та плівкової конденсації. Зміна режимів конденсації може відбуватися як плавно, так і стрибкоподібно, утворюючи петлю гістерезису.
5. Розглянуті закономірності процесу краплинної конденсації сприяють подальшому якісному та кількісному його опису. Пошук нових підходів для вивчення закономірностей в опису краплинної конденсації є задачею подальших досліджень.

### 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. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. - М.: Энергия, 1981. - 240 с.
4. Филиппов Г.А., Салтанов Г.А., Кукушкин А.Н. Гидродинамика и тепломассообмен в присутствии поверхностно-активных веществ. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 184 с.
5. Rose J.W. Dropwise condensation theory // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1981. - Vol.24, №2. - P. 191 - 194.
6. Leipertz A. and Choi K.-H. Dropwise condensation on ion implanted metallic surfaces // 3d European Thermal Sciences Conference. - Pisa: Edizioni ETS, 2000. - P. 917-920.
7. Utaka Y., Saito A., Yanagida H. An experimental investigation of the reversibility and hysteresis of the condensation curves // Int. J. Heat and mass transfer. - 1990. - V.33. N.4. - P.649-659.
8. Hanneman R.J., Mikic B.B. An analysis of effect of surface thermal conductivity on the rate of heat transfer in dropwise condensation // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1976. - V.19. - P.1299-1307.
9. 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:

- $q$  – густина (щільність) теплового потоку;  
 $q_{max}$  – максимальна густина теплового потоку в режимі краплинної конденсації;  
 $R$  – радіус краплин;  
 $R_{KP}$  – критичний (зародковий) радіус краплин;  
 $R_{Від}$  – відривний (десорбційний) радіус краплин;  
 $\Delta t$  – температурний напір "пара - стінка";  
 $\Delta t_{q, max}$  – температурний напір "пара - стінка", який відповідає максимальній густині теплового потоку в режимі краплинної конденсації;  
 $\tau$  – час;

$\tau_0$  – час циклу краплинної конденсації;

$\tau_1$  – час зростання краплин;

$\tau_2$  – час видалення краплин з теплообмінної поверхні;

$\tau_3$  – час утворення зародкових конденсатних формувань.