

КОНДЕНСАЦІЯ ВОДЯНОЇ ПАРИ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ НА МАЛИХ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХНЯХ

Вступ

Властивості теплообмінної поверхні є важливим чинником, який впливає на впровадження краплинної конденсації. Дослідження конденсації водяної пари на малих металевих гідрофобних поверхнях із різною теплопровідністю дозволяє встановити загальні закономірності процесу, а також описати їх.

Режими конденсації водяної пари та інтенсивність теплообміну залежать від характеристик теплообмінної поверхні. За декілька останніх років підвищився інтерес вчених багатьох країн [1-4] до дослідження краплинної конденсації на різних ліо- та гідрофобних поверхнях. Значний успіх був досягнутий у вивченні конденсації на металах, що несуть іонні покриття [1-3]. Разом з цим не вистачає інформації по впливу поверхневих факторів і тепло-провідності матеріалів на характер та інтенсивність краплинної конденсації.

1 Аналіз попередніх досліджень краплинної конденсації на металевих поверхнях

Для металевих теплообмінних поверхонь, які працюють в режимі краплинної конденсації, був досягнутий певний технологічний прогрес [1-3], але при цьому залишається ряд невирішених проблем. Так, температура конденсаційної поверхні T_c в більшості відомих робіт [1-8] приймається

однорідною та сталою. Разом із тим, динамічна нестійкість конденсату як наслідок має змінність термічного опору поверхні. Це призводить до посилення впливу на конденсат термокапілярних сил. В результаті має місце локально-часова неоднорідність процесу конденсації.

Пульсації температури теплообмінної поверхні T_c також обумовлені кінцевим значенням теплопровідності матеріалу λ . Вплив на інтенсивність теплообміну цього фактора був підтверджений експериментальними роботами [4-8]. Дослідження проведені для краплинної конденсації водяної пари на поверхнях із нержавіючої сталі, купронікеля, монель-металу, золота та міді. Результати цих робіт наведені на рис. 1.

Відмінності способів гідрофобізації та умов проведення експериментів, а також наявність у парі газів, що не конденсуються, навіть в малих концентраціях, не дозволяють однозначно порівняти ці результати та проаналізувати вплив теплопровідності поверхні на інтенсивність теплообміну при краплинній конденсації. До того ж, в роботах [7, 8] розглянуті тільки по два метали: нержавіюча сталь і мідь в [7], та мідь і купронікель в [8]. Деяка невідповідність у висновках робіт [7] та [8] пояснюється відмінностями досліджуваних ансамблів краплин, нерівномірності температурних полів та теплових потоків. Повторюваність

результатів із підвищеним ступенем надійності експериментів [5,6] вказує на наявність характерної залежності тепловіддачі від теплофізичних властивостей матеріалу поверхні конденсації.

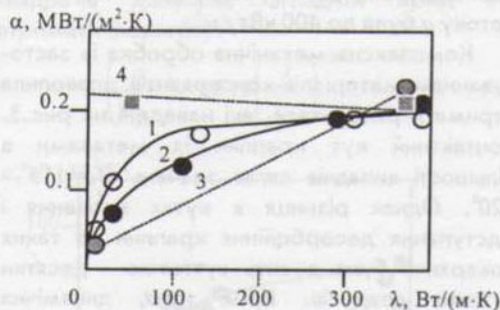


Рис.1. Вплив теплопровідності матеріалу конденсаційної поверхні на тепловіддачу при краплинній конденсації за даними різних авторів:

- 1 - Hanneman R.J., Mikic B.B. [5];
- 2 - Willkins D.G., Bromley L.A. [6];
- 3 - Tanner D.W., Potter C.J., Pope D., West D. [7];
- 4 - Aksan S., Rose J.W. [8]

Для всіх відомих досліджень за загальну точку відліку можна прийняти результати, які отримані на мідних поверхнях [5-8]. Ці результати добре корелюються одне з одним. При цьому належить взяти до уваги, що дані на рис.1 отримані для контактного кута краплин із поверхнею конденсації у 90° , який відповідає граничному куту змочування Θ . Отримані в цих роботах результати для низькотеплопровідних металів не дозволяють виключити вплив теплофізичних властивостей матеріалу поверхні конденсації на тепловіддачу для інших умов конденсації.

Для мідьмістких сплавів доцільне використання високомолекулярних органічних водовідштовхуючих речовин, які містять атоми сірки [9,10]. Такий спосіб виключає необхідність нанесення проміжного покриття для адаптації гідрофобізатора до поверхні конденсації. Результати [9] представлені кривою 1 на рис.2. Кут змочування в цьому випадку складав $\Theta=108^\circ$ і відповідав контактному куту конденсатних утворень із поверхнею теплообміну для всіх класів краплин. Для десорбційних краплин спостерігався невеликий гістерезис контактного кута натікання та відступання $108^\circ \pm 3^\circ$, що відповідало загальноновизнаним підходам до вивчення таких процесів [5,8].

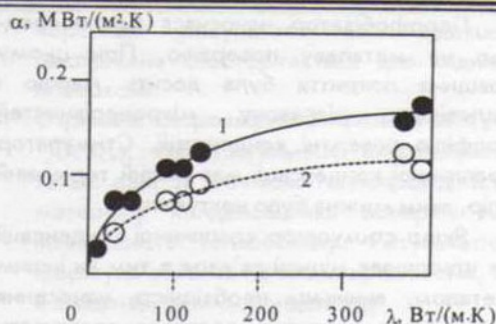


Рис.2. Вплив теплопровідності матеріалу конденсаційної поверхні на тепловіддачу при краплинній конденсації за результатами роботи [9]:

- 1 - гідрофобні металеві поверхні із органічним гідрофобізатором;
- 2 - хромовані гідрофобні металеві поверхні.

Разом із органічним гідрофобізатором застосовувалось хромування [9]. Результати наведені кривою 2 на рис.2. Значення коефіцієнтів тепловіддачі порівняно із кривою 1 на рис.2 були дещо нижчими. Це пояснюється зміною контактного кута краплин в бік зменшення і можливим виникненням динамічної нестійкості конденсатних утворень, що призводить до зростання термічного опору процесу.

2 Гідрофобні поверхні для краплинної конденсації

Для продовження та розвитку попередніх досліджень [9-14] проведено серію нових експериментів із застосуванням методики та обладнання [15]. Метою цього дослідження є вивчення конденсації водяної пари атмосферного тиску на металевих поверхнях із різною теплопровідністю, які несуть на собі гідрофобне покриття малої товщини. Причому, основним режимом конденсації розглядався краплинний, але не виключалась можливість виникнення зон змішаної конденсації у відповідності до кривих конденсації [14].

Досліди були виконані на металевих поверхнях, які широко застосовуються в промисловості, а також на поверхнях, що використовуються в наукових теоретичних і експериментальних роботах. До їх числа належать: мідь М1 та мідьмісткі сплави (патунь Л68, сплав мідь-нікель-залізо МНЖ 5-1, мельхіор); сталеві леговані (1Х18Н9Т), вогнетривкі (20Х23Н18) та вуглецеві (У8-У10, Ст3, Ст45) матеріали; дюралеві сплави (АЦ, ДЦ), титан.

Гідрофобізатор наносився безпосередньо на металеву поверхню. При цьому товщина покриття була досить малою і відповідала діапазону мікронерівностей профілю поверхні конденсації. Стимулятор краплинної конденсації мав малий термічний опір, яким можна було нехтувати.

Якщо стимулятор краплинної конденсації не утворював міцний зв'язок з тим чи іншим металом, виникала необхідність нанесення проміжного покриття, здатного адаптувати нанесення гідрофобізатора. Як варіант проміжного покриття застосовувалось напилювання товщиною менше, ніж 0.5мкм. За рахунок напилювання, також, вирівнювались мікронерівності профілю поверхні теплообміну.

Застосування комплексної механічної обробки поверхні із використанням абразивних матеріалів та консервуючих поліролей дозволило отримати якісну краплинну конденсацію. Такий метод гідрофобізації дозволяв наситити атомами неметалів поверхню конденсації товщиною до 1 мкм. Для детального вивчення процесу конденсації застосовувалась швидкісна відеозйомка при багатократному оптичному та цифровому збільшенні.

Залежно від структурної неоднорідності, ліофобних властивостей теплообмінної поверхні та від нерівномірності ступеня її переохолодження на таких поверхнях розглянуто співіснування декількох видів конденсації утворень. В першу чергу це стосувалось відповідних зон кривих конденсації [14]. Великі та дрібні краплини утворювали з поверхнею теплообміну контактний кут $\Theta_k \geq 90^\circ$. Локальні та зародкові конденсації півки утворювали з поверхнею теплообміну контактний кут $\Theta_k < 90^\circ$.

Для краплинної режиму конденсації кількість краплин на одиниці площі поверхні за одиницю часу може розглядатися як середньостатистична величина.

3 Теплопровідність поверхні та інтенсивність теплообміну під час краплинної конденсації

Теплопровідність матеріалу поверхні конденсації λ змінювалась від 12...14Вт/(м·К) для легованих нержавіючих сталей до 385Вт/(м·К) для міді М1. Діапазон мікронерівностей профілю конденсаційної поверхні складав менше, ніж 0.63 мкм.

Для нівелювання можливого негативного впливу газів, що не конденсуються, а саме - повітря, була організована продувка пари біля поверхні конденсації. Швидкість парового потоку $W_{\text{п}}$ у всіх дослідах не перевищувала 6.5 м/с. Густина тепловоз потоку q була до 400 кВт/м².

Комплексна механічна обробка із застосуванням матеріалів-консервантів дозволила отримати результати, які наведені на рис.3. Контактний кут краплин із металами в більшості випадків сягав значень $\Theta_k = 115^\circ - 120^\circ$. Однак різниця в кутах натікання і відступання десорбційних краплин на таких поверхнях була досить суттєвою - десятки кутів градусів. Крім того, динамічна нестійкість конденсації утворень із плином часу призводила до виникнення локальних півок із кутами змочування $\Theta < 90^\circ$.

Для деяких металевих поверхонь такий спосіб гідрофобізації не призвів до довготривалого стабільного режиму краплинної конденсації, тому ці результати можна розглядати тільки як контрольні. Це стосується в першу чергу титану та дюралю.

Широкий спектр конденсації утворень та їх контактних кутів обумовлює дещо меншу інтенсивність результатів, представлених на рис.3, порівняно із рядом попередніх досліджень - див. рис.1 та 2. Натомість середньостатистичний характер цих величин для кожної з кривих 1-3 на рис.3 дотримувався однаковим.

Виникнення локальних півок більш імовірно, коли швидкість зростання краплин конденсату перевищить швидкість їх відведення з теплообмінної поверхні. В результаті режим конденсації стане змішаним - криві 2, 3 на рис. 3. Аналогічна картина процесу спостерігається і для випадку, коли ліофобізатор недовгоживучий, або коли ліофобне покриття руйнується через механічні uszkodження та вплив забруднюючих домішок. Особливо це впливає на конденсацію на дюралевих, титанових поверхнях і з вогнетривкої сталі.

Загальні закономірності в характері залежності $\alpha = f(\lambda)$ проглядаються для кривих 1 і 2 рис.1, кривих 1 і 2 рис.2, кривих 1-3 рис.3. Для високих значень теплопровідності λ інтенсивність теплообміну в кожному конкретному випадку переходить майже в автономну область. Цей висновок підтверджується і залежністю 4 рис.1. Тобто, загальним пунктом для аналізу даних і

масштабом розрахунків доцільно прийняти результати на мідних поверхнях: α_{Cu} , λ_{Cu} . Тоді безрозмірна залежність $\alpha/\alpha_{Cu} = f(\lambda/\lambda_{Cu})$ узагальнить відомі експериментальні дані - рис. 1, 2 і 3. Використання методу найменших квадратів дозволяє згладити криві та отримати формулу:

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_{Cu}}\right) = 1.317 \left(\frac{\lambda}{\lambda_{Cu}}\right)^{0.558} \quad (1)$$

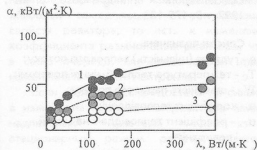


Рис.3. Вплив теплопровідності матеріалу конденсаційної поверхні на тепловіддачу при конденсації для комплексно оброблених металевих поверхонь:

- 1 - краплинна конденсація;
- 2 - змішана конденсація, коли 75% поверхні зайнято краплинами, а 25% - локальними плівками конденсації;
- 3 - змішана конденсація, коли 40% поверхні зайнято краплинами, а 60% - локальними плівками конденсації.

Для залежності (1) треба врахувати, що найкраща збіжність результатів досягається при λ/λ_{Cu} від 0.03 до 0.8, тобто для металевих поверхонь, які широко застосовуються в науці та промисловості. За відношення λ/λ_{Cu} , яке прямує до 1, формула (1) фактично має обмеження.

Висновки

1. Таким чином, дотепер в літературних джерелах має місце брак інформації щодо впливу поверхневих факторів і теплопровідності металів на характер та інтенсивність процесу краплинної конденсації.
2. Проведене експериментальне дослідження конденсації на гідрофобних металевих поверхнях, які широко застосовуються в промисловості та науці. Розглянуті різні методи створення незмочуваних поверхонь.
3. Встановлені загальні закономірності в характері залежності $\alpha = f(\lambda)$. Найкраща

кореляція результатів всіх відомих досліджень спостерігається для мідних поверхонь.

4. Отримана безрозмірна залежність $\alpha/\alpha_{Cu} = f(\lambda/\lambda_{Cu})$, яка узагальнює експериментальні дані за впливом теплопровідності матеріалу конденсаційної поверхні на інтенсивність теплообміну. Результатна формула обіймає не тільки краплинний, а й змішаний режим конденсації.
5. Розглянуті закономірності процесу конденсації дозволяють подальше удосконалення його опису та пошуку нових закономірностей.

Література

1. Koch G., Zhang D.C., and Leipertz A. Condensation of steam on the surface of hard coated copper discs // Heat and Mass Transfer. - 1997. - V.32. №.4. - P.149-156.
2. Leipertz A. and Koch G. Dropwise condensation of steam on hard coated surfaces // 11th Heat Transfer Conference. - 1998. - V.6. - P. 379-384.
3. Leipertz A. and Choi K.-H. Dropwise condensation on ion implanted metallic surfaces // 3^d European Thermal Sciences Conference. - Pisa: Edizioni ETS, 2000. - P. 917-920.
4. Ganzevles F.L.A. and Van der Geld C.W.M. Convective heat transfer in dropwise condensation of multicomponent mixtures with inert gases // International Journal of Heat Exchangers. - 2003. - V.4. - P.141-160.
5. 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.
6. Wilkins D.G., Bromley L.A. Dropwise condensation phenomena // AIChE Journal. - 1973. - V.19. - P.839-845.
7. Heat transfer in dropwise condensation / D.W. Tanner, C.J. Potter, D. Pope, D. West // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1965. - V.8. - P.419-436.
8. Aksan S., Rose J.W. Dropwise condensation - the effect of thermal properties of the condenser material // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1973. - V.16. - P.461-467.
9. Gavrish A. S. About particularities of dropwise condensation process at organic

- stimulator application // 3^d European Thermal Sciences Conference. - Pisa: Edizioni ETS, 2000. - P. 921-926.
10. Перспективы использования нового стимулятора капельной конденсации в опреснительных и энергетических установках / А.С. Гавриш, В.Г. Риферт, А.И. Сардак и др. // Промышленная теплотехника. -1992. - Т.14, №1-3. - С. 33-37.
 11. 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.
 12. Гавриш А.С. О некоторых особенностях процесса капельной конденсации водяного пара на металлических поверхностях // Тр. 3-й Российской национальной конференции по теплообмену. - М.: Издательство МЭИ, 2002. - Т.4. - С.249-252.
 13. Гавриш А.С. Особливості кривих та циклу процесу краплинної конденсації // Промышленная теплотехника. -2003.- Т.25, №4.-С.300-302.
 14. Гавриш А.С. Об особенностях механизма, кривых и цикла капельной конденсации // Промышленная теплотехника. -2004.-Т.26, №3. - С.20-24.
 15. Gavrish A. S., Rifert V. G. Investigation of transition mode phenomenon from dropwise to filmwise steam condensation // Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation. - Printing House "Shans", 1997. - P. 179-183.
- Список позначень**
- q - густина (щільність) теплового потоку;
 T_C - температура теплообмінної поверхні;
 W_{II} - швидкість парового потоку;
 α - коефіцієнт тепловіддачі;
 α_{Cu} - коефіцієнт тепловіддачі на мідній поверхні;
 λ - коефіцієнт теплопровідності;
 λ_{Cu} - коефіцієнт теплопровідності міді;
 Θ - кут змочування;
 Θ_K - контактний кут краплин з поверхнею теплообміну.