

ПРО ОСОБЛИВОСТІ КУТА ЗМОЧУВАННЯ ТА МЕХАНІЗМУ КОНДЕНСАЦІЇ

Вступ

На процес краплинної конденсації впливає велика кількість різноманітних факторів. До них відносять вибір теплоносія, матеріалу конденсаційної поверхні, способу ліофобізації та ін. [1]. Суттєвим фактором також може слугувати форма, розміри та орієнтація у просторі поверхні теплообміну.

Найважчих даних про краплинну конденсацію різних речовин поки що недостатньо для технічного застосування цього процесу. Винятком може бути лише конденсація водяної пари, для котрої у першому наближенні відомі основні закономірності краплинної конденсації [1,2]. Певні успіхи досягнуті в розширенні діапазонів дослідження краплинної конденсації також для інших теплоносіїв [3,4].

Аналіз накопиченого теоретичного та експериментального матеріалу доцільно виконувати по двох взаємопов'язаних напрямках. Одним із них є вивчення механізму процесу, який визначає його мікрорівень. Іншим напрямком слугує вивчення макрорівня процесу, що відповідає за його інтенсивність.

1. Загальні закономірності краплинної конденсації

Ліофобні властивості конденсаційних поверхонь знаходять своє відображення в балансі сил, які діють на паровий потік та на конденсаційні утворення. В свою чергу, баланс енергій (поверхневих натягів) на границях розділу між твердою, газоподібною та рідиною фазами характеризується крайовим кутом змочування. Тому значення крайового кута змочування розглядається як одна із важливих характеристик механізму процесу.

Прийнято вважати [1,5], що первинні краплини рівновеликі та їх розподіл по поверхні конденсації відповідає рівномірній трикутній решітці. При візуальному спостереженні зростання краплин аж до мікронного розміру відбувається майже миттєво. Швидкісна відеозйомка при багатократному як оптичному, так і цифровому збільшенні дозволяє встановити, що стадія розвитку краплин до десятків мікрон триває від одиниць до десятків мікросекунд. При цьому на конденсацію суттєво впливає стан поверхні теплообміну.

Подальший розвиток процесу аж до стомікронних розмірів супроводжується поступовим відносним зменшенням швидкості зростання. Стадія зростання краплин до відривного (десорбційного) розміру є найбільш тривалою порівняно із попередніми. При цьому розміри краплин можуть сягати декількох міліметрів. Видалення краплин з теплообмінної поверхні відбувається за доли секунди. На поверхні, що вивільнилась від конденсату, процес повторюється знову.

2 Механізм процесу та крайовий кут змочування

Аналізуючи фракційний стан краплин, можна стверджувати, що діапазон дисперсності розмірів залежить від теплофізичних властивостей рідини, стану поверхні та інших факторів. Поверхневі властивості, що обумовлюються багато в чому способом гідро- чи ліофобізації, проявляються через крайовий кут змочування.

На форму конденсатних утворень впливає їх маса, умови контакту з поверхнею (контактний кут) та її стан.

Початкова стадія краплинної конденсації характеризується чіткою сферичністю краплин. Чим більша сферичність, тим меншою є площа контакту краплин з поверхнею, і тим інтенсивніше відбувається їх рух по поверхні.

Для великих краплин форма більше залежить від дії гравітаційної сили, сили міжфазного тертя, динамічної та інших зовнішніх сил. Достатньо великі краплини рідко зливаються між собою. Їх розвиток йде в основному за рахунок поглинання краплин, що значно поступаються їм в розмірах, або тих, що знов утворюються на теплообмінній поверхні.

Форма відривних краплин може відрізнитися від сферичної внаслідок зміни балансу сил поверхневого натягу між рідиною, паром та конденсаційною поверхнею. Для початкових швидкоплинних стадій процесу незалежно від форми та орієнтації поверхні у просторі значення контактного кута краплин прямує до величини крайового кута змочування для умов рівноваги. Для краплин розмірами від 100 мкм і до відривних рівновага на поверхні теплообміну досягається за умови відхилення реальних контактних кутів від рівноважного значення Θ_K . Явище гістерезису крайового кута Θ_K призводить до суттєвої відмінності кута натікання Θ_H від кута відтікання Θ_O краплин. Вздовж лінії контакту трьох фаз крайовий кут може приймати будь-які значення між Θ_H та Θ_O .

Суто краплинний режим конденсації буде характерним для теплоносіїв із значеннями крайових кутів більшими, ніж 90° . Значення крайових кутів змочування для краплин на різних типах поверхонь наведені в табл. 1.

При кутах контакту менших, ніж 90° , але таких, що прямують до цього значення, мову можна вести про псевдо-краплинний режим конденсації. При кутах, що значно менші, ніж 90° , кажуть про краплинно-струмковий режим конденсації. А при кутах контакту, що прямують до 0° , мова

йде про плівково-струмковий режим конденсації. Значення крайових кутів змочування для псевдокраплинних конденсатних утворень наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Значення крайових кутів змочування більші ніж 90° для різних типів поверхонь

№	Речовина, спосіб ліофобізації	$\Theta_K, ^\circ$	Теплоносій, поверхня теплообміну	Автор, робота
1.	Стеаринова кислота	155	Конденсація води на поверхні мідної труби	Kim K. та ін.[7]
2.	N-октадецил меркаптан	148	Конденсація води на поверхні мідної труби	Kim K. та ін.[7]
3.	Скло	140	Циклічний квазірівноважний механічний процес для ртуті	Попов В.Г.[8]
4.	Скло	124	Ртуть на склі	Попов В.Г.[8]
5.	Політетрафлуороетилен PTFE1010*	114	Конденсація води на твердій поверхні	Xuehu M. та ін. [9]
6.	Комплексна обробка поверхні	110	Конденсація води на металевих поверхнях	Дані автора [10]
7.	Політетрафлуороетилен PTFE1013*	109	Конденсація води на твердій поверхні	Xuehu M. та ін. [9]
8.	Фторомісткий дисульфід (958 а.о.м.)	108	Конденсація води на поверхні мідно-нікелевої труби	Croix J.M. та ін. [11-13]
9.	Дисульфід (582 а.о.м.)	108	Конденсація води на металевих поверхнях	Дані автора [14]
10.	Октадециламін (269 а.о.м.)	105	Конденсація води на поверхні маловуглецевої сталі та міді	Філіпов Г.А. та ін.[6]
11.	Полігексафлуоропропен RHFP140W**	104	Конденсація води на твердій поверхні	Xuehu M. та ін. [9]
12.	Політетрафлуороетилен PTFE1015*	100	Конденсація води на твердій поверхні	Xuehu M. та ін. [9]
13.	Фторомістка кислота (492 а.о.м.)	98	Конденсація води на поверхні мідно-нікелевої труби	Croix J.M. та ін. [11-13]
14.	Фторомістка кислота (246 а.о.м.)	98	Конденсація води на металевих поверхнях	Дані автора [14]
15.	Олеат кальція (602 а.о.м.)	95	Конденсація води на поверхні маловуглецевої сталі	Філіпов Г.А. та ін.[6]
16.	Парафінова плівка	93	Вода на склі	Попов В.Г. [8]
17.	Полігексафлуоропропен RHFP80W**	93	Конденсація води на твердій поверхні	Xuehu M. та ін. [9]
18.	Олеат магнію (586 а.о.м.)	92	Конденсація води на поверхні маловуглецевої сталі	Філіпов Г.А. та ін.[6]
19.	Полігексафлуоропропен RHFP60W**	92	Конденсація води на твердій поверхні	Xuehu M. та ін. [9]

Примітки:

* - Метод DIMI - метод змішаної динамічної іонно-променевої імплантації для створення політетрафлуороетиленових поверхонь PTFE1015, PTFE1013, PTFE1010.

** - Метод PP - метод плазменної поліризації для створення полігексафлуоропропенових поверхонь RHFP60W, RHFP80W, RHFP140W.

3 Про гістерезис крайового кута змочування

Якщо врахувати, що для кожного конкретного процесу краплеутворення може мати місце явище гістерезису, то про суто краплинну конденсацію можна вести мову лише у випадку, коли весь спектр контактних кутів (рівноважний статичний, натікання та відтікання) буде перевищувати 90° . Якщо ж рівноважний контактний кут Θ_K буде близьким до 90° , а Θ_0 буде відрізнятися в бік зменшення і Θ_H - в бік збільшення, то мова швидше за все піде про краплеподібні формування. Такі дані про гістерезис контактного кута наведені на рис.1 в порядку зменшення значення рівноважного кута Θ_K .

Таблиця 2

Значення крайових кутів змочування менших ніж 90° для різних типів поверхонь

№	Речовина, спосіб ліофобізації	$\Theta_K, ^\circ$	Теплоносій, поверхня теплообміну	Автор, робота
1.	Офсетний папір	88	Гліцерин в середовищі вазелинового масла	Попов В.Г. [8]
2.	Олеїнова кислота (282 а.о.м.)	86	Конденсація води на поверхні маловуглецевої сталі	Філіпов Г.А. та ін.[6]
3.	Олеат олова (681 а.о.м.)	85	Конденсація води на поверхні маловуглецевої сталі	Філіпов Г.А. та ін.[6]
4.	Олеат триетеноламіна (432 а.о.м.)	82	Конденсація води на поверхні маловуглецевої сталі	Філіпов Г.А. та ін.[6]
5.	Ілюстративний папір	82	Гліцерин в середовищі вазелинового масла	Попов В.Г. [8]
6.	Олеат натрію (304 а.о.м.)	80	Конденсація води на поверхні маловуглецевої сталі	Філіпов Г.А. та ін.[6]
7.	Крейдяний папір	76	Гліцерин в середовищі вазелинового масла	Попов В.Г. [8]
8.	Мінеральна поверхня	73	Вода на поверхні твердого тіла	Попов В.Г. [8]
9.	Скло	60	Вуглеводень в середовищі води на твердій поверхні	Попов В.Г. [8]
10.	16% $\text{Na}_2\text{O} + 64\% \text{SiO}_2 + 20\% \text{MnO}$	50	Розплав в середовищі аргону на залізі	Попов В.Г. [8]
11.	Кальцит	44	Вода на поверхні твердого тіла	Попов В.Г. [8]
12.	Мінеральна поверхня	39	Вода на поверхні твердого тіла	Попов В.Г. [8]
13.	Поверхня без обробки	33	Конденсація води на поверхні мідної труби	Kim K. та ін.[7]
14.	Поліетилен	22	Вода в середовищі декантатора	Попов В.Г. [8]
15.	Кварц	13	Конденсація етанолу на склі	Zheng L. та ін. [15]

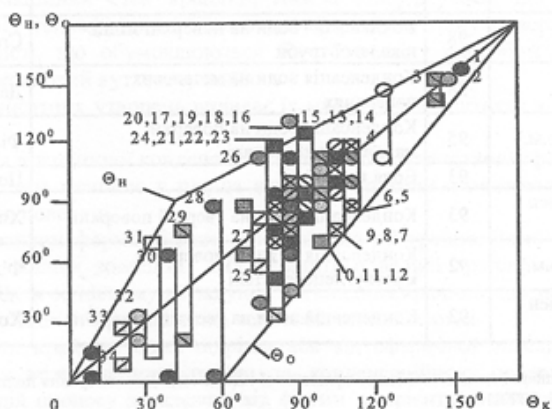


Рис.1. Зміна кутів натікання та відтікання при різних значеннях рівноважного крайового кута змочування Θ для краплин, краплеподібних конденсатних формувань та псевдокраплинних конденсатних утворень: 1-19 - відповідають таблиці 1 поз. 1-19; 20-34 - відповідають таблиці 2 поз. 1-15

Чим більше значення має Θ_K , і чим якіснішим є ліофобізатор, тим меншою буде відмінність між кутами натікання Θ_N і відтікання Θ_0 . Наприклад, див. рис.1, поз. 3. А в окремих випадках гістерезис контактних кутів може прямувати до нуля - див. рис.1, поз. 1,2.

Якщо ж кути натікання та відтікання будуть меншими, ніж 90° , то будуть розглядатися псевдокраплинні конденсатні утворення.

Дані рис.1 дозволяють отримати формули для розрахунку діапазонів зміни кутів натікання та відтікання залежно від значення рівноважного крайового кута змочування:

$$0 \leq \Theta_K \leq 40^\circ, \quad \Theta_N = 2,25 \cdot \Theta_K, \quad (1)$$

$$40^{\circ} \leq \Theta_K \leq 180^{\circ}, \Theta_H = 0,643 \cdot \Theta_K + 64,26^{\circ}, \quad (2)$$

$$0 \leq \Theta_K \leq 180^{\circ}, \Theta_O = 1,5 \cdot \Theta_K - 90^{\circ}. \quad (3)$$

Під таке узагальнення підпадає 95% відомих результатів досліджень.

Висновки

1. Встановлено, що всі відомі способи гідрофобізації поверхонь конденсації можуть досить ефективно застосовуватись для високотеплопровідних металів та сплавів. Для низькотеплопровідних матеріалів флуктуаційний характер взаємодії краплин конденсату та поверхні згладжується повільніше, ніж для високотеплопровідних. В результаті тепловіддача знижується.
2. Визначальним лінійним розміром для розрахунку інтенсивності теплообміну при краплинній конденсації доцільно обрати десорбційний радіус або діаметр краплин як середньостатистичну величину процесу.
3. Дослідження краплинної конденсації являє собою двоєдину задачу: з одного боку - це вивчення механізму процесу, який визначає його мікрорівень; з іншого - це вивчення макрорівня процесу, що визначає його інтенсивність.
4. Для механізму процесу є характерним те, що зростання відносно великих краплин до відривного розміру - більш тривалий процес порівняно зі стадіями зародження первинних та розвитком мікронних краплин.
5. Для початкових швидкоплинних стадій процесу контактний кут краплин прямує до величини крайового кута змочування в умовах рівноваги, а форма краплин наближається до сферичної. Внаслідок зміни балансу сил поверхневого натягу між рідиною, паром та конденсаційною поверхнею, форма десорбційних краплин може відрізнятись від сферичної.
6. Розглянуто явище гістерезису крайового кута для краплин, краплеподібних, псевдо-краплинних, краплинно-струмкових та плівково-струмкових утворень. Отримані залежності для розрахунку можливих діапазонів зміни кутів натікання та відтікання залежно від значення рівноважного крайового кута змочування, які узагальнюють більшість відомих результатів.
7. З точки зору макрорівня процесу для створення якісної краплинної конденсації необхідно застосування надійних ліофобізаторів, які здатні забезпечити крайові кути змочування більші, ніж 90° . При цьому гістерезис контактного кута повинен бути якомога меншим, тобто прямувати до нуля.

Література

1. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. - М.: Энергия, 1981. - 240 с.
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. Танасава И. Состояние и перспективные направления в исследованиях капельной конденсации // Нихон кикай гаккай ромбунсю. - 1982. - Т.48, №429. - С. 835-843.
4. Tanasawa I. Advances in condensation heat transfer // Advances in Heat Transfer - 1991. - V.21. - P. 55-139.
5. Tanaka H., Tsuruta T. A microscopic study of dropwise condensation // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1984. - V.27. - P.327-335.
6. Филиппов Г.А., Салтанов Г.А., Кукушкин А.Н. Гидродинамика и тепломассообмен в присутствии поверхностно-активных веществ. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 184 с.
7. Kim K., Vemuri S., Bell T., Govindaraju S. Advanced heat exchangers using tunable nanoscale-molecular assembly (Innovative concept phase - 1) // Nanoscience program university of Nevada, Nevada ventures, Reno. - 2004. - No DE-FG26-02NT41543. - P.1-42.
8. Попов В.Г. О гистерезисе краевого угла смачивания капель (пузырей) // Теплофизика высоких температур. - 1991. - Т.29, №3. - С. 530-539.
9. Xuehu M., Dunqi X., Jifand L. A study of dropwise condensation on the ultra-thin polymer surfaces// Heat Transfer, Brighton, UK. - 1994. - V.3. - P. 359-364.
10. Гавриш А.С., Дейнеко А.И., Рейда А.В. Конденсация водяного пара на гидрофобных поверхностях с различной теплопроводностью // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: - М.: Издательство МЭИ, 2005. - Т.1. - С. 173-176.

11. Croix J.M., Casset R., Camus R. Etude de condensation en gouttes par promoteurs organiques. - Lyon: SETRE, 1978. - 32 p.
12. Croix J.M., Liegeois A. Condensation Dans Un Faisceau Tubulaire Horizontal. - Lyon: SETRE, 1978. - 51 p.
13. Croix J.M. Etude de la condensation en gouttes par promoteurs organiques et effect du missellement sur un faisceau de tubes // Int. Symp. Fresh Water Sea, Las Palmas. - 1978. - V.2. - P. 105-111.
14. 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.
15. Zheng L., Wang Y-X., Plawsky J. L., Wayner P. C. Effect of curvature, contact angle, and interfacial sub cooling on contact line spreading in a micro drop in dropwise condensation // Langmuir. - 2002. - № 18. - P. 5170-5177.

Список позначень

Θ_K - рівноважний крайовий кут змочування;

Θ_H - кут натікання;

Θ_O - кут відтікання.