

числа Нуссельта від безрозмірного відстання до перешкоди зміщується в сторону менших відстаней. Збільшення амплітуди пульсацій веде до зменшенню області впливу перешкоди на характеристики струї і викликає зменшення максимальних значень

швидкості в області пристінної плоскості струї. При різних комбінаціях кутів (в діапазоні 30...90 градусів), амплітуд a_v (в діапазоні 0...0,5 V_0) і частот (в діапазоні 10...50 Гц) найбільший приріст теплообміну досягав 75%.

Література

1. Дыбан Е.П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур – Киев : Наук. думка. – 1982. – 303 с.
2. Mladin E.C. Local convective heat transfer to submerged pulsating jets. / E.C. Mladin, D.A. Zumbrennen // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1997. – Vol. 40, – No. 14, – С. 3305–3321.
3. Юдаев Б.Н. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин – М., «Машиностроение». – 1977. – 248 с.

Представлено огляд робіт, що описують критичні режими гідродинаміки в контактних апаратах. Розглянуто процеси хвильового руху, утворення та розриву плівки, винесення рідини з плівки. Встановлено параметри, що мають вплив на ці процеси

Ключові слова: захливання, плівка, розрив, кут змочування

An overview of works describe the critical regimes of hydrodynamics in contact apparatus. Equations for calculating processes - wave creation for laminar and turbulent motion, formation and film rupture, making liquid film. Parameters that influence these processes is established

Key words: film, contact angle, film break, flooding

Представлен обзор работ, описывающих критические режимы гидродинамики в контактных аппаратах. Рассмотрены процессы волнообразования при ламинарном и турбулентном движении, образования и разрыва пленки, выноса жидкости с пленки. Установлены параметры, влияющие на эти процессы

Ключевые слова: захлебывание, пленка, разрыв пленки, угол смачивания

УДК 532.546.2

ГІДРОДИНАМІКА ПОТОКІВ В КОНТАКТНИХ АПАРАТАХ

І.М. Кузьменко

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів та систем
Теплоенергетичний факультет
Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут"
пр. Перемоги, 37, корпус 5, кафедра АПЕПС, м. Київ,
03056
Контактний тел.: 068-375-79-43
E-mail: ozirno@ukr.net

1. Вступ

Відомо, що на роботу плівкових тепломасообмінних апаратів істотно впливають режими руху плівки рідини. Зокрема, за певних умов збігання рідини може відбуватися перехід від плівкового до струмкового режиму руху, що зменшує поверхню тепло-

масообміну і, відповідно, інтенсивність процесу. Це явище характеризується мінімальною густиною зрошення Γ_{\min} і визначає нижню межу стійкості руху плівки. Верхня межа стійкості руху плівки визначається як початок зриву крапель з поверхні плівки, або перехід до барботажного режиму в протиточних апаратах.

Стійкість плівки прямо пов'язана з її товщиною. За низхідного супутного руху парова фаза внаслідок механічного впливу на плівку збільшує швидкість рідини й товщина плівки зменшується, що може призвести до розриву плівки, тобто нижньої межі втрати стійкості. При збіганні плівки і зустрічному русі газу спочатку зі збільшенням швидкості парової (газової) фази w''_0 товщина плівки зростає, поки не виникає зворотний рух зовнішніх шарів рідини. Подальші збільшення приводить до верхньої межі втрати стійкості плівки та виникнення підйомного супутнього плинку.

Стабільність структури двофазного потоку визначається стійкістю утворюючих його елементів [1], тому допустимим є розгляд стабільності плівки, як складової такого потоку. В цілому, втрата стійкості рідини на нижній або верхній межі пов'язана з дією кількох сил – інерції, ваги, поверхневого натягу, тертя та ін. На рис. 1 наведено залежність режимів руху плівки від швидкості повітря з температурою 20°C [2], що показує межі режимів руху плівки води по плоскій поверхні, що омивається супутнім потоком газу. Як видно з рисунка, за малих швидкостей газу та товщин плівки спостерігається рух рідини із гладкою поверхнею, або повільними хвилями малої амплітуди (області I і II). З ростом швидкості й товщини плівки спочатку спостерігається перехід до хвильового руху (III), а надалі відривання і руйнування плівки (IV), що характеризує низку межу стійкості рідини. За високих швидкостей газу тонкі плівки розриваються на окремі струмки або краплі (V), залежно від параметрів змочування. Цей режим характеризує верхню межу стійкості плівки.



Рис. 1. Залежність режимів руху плівки від швидкості повітря

При швидкості повного зриву плівки рідини одночасно відбувається відрив крапель від плівки та випадання їх частини на стінку за рахунок турбулентності потоку. [3] Тому навіть за високих значень швидкості парорідинної суміші, що перевищує швидкість звуку, не можна повністю осушити стінки.

2. Нижня межа стабільності плівки

Перехід потоку через нижню межу стабільності зменшує поверхню тепло- і масообміну і, відповідно, інтенсивність процесу. Це явище іменується ще мінімальною густиною зрошення Γ_{min1} і є недопустимим в роботі контактних апаратів. В ізотермічних умовах, Γ_{min1} залежить від сили поверхневого натягу рідини та

кута змочування оскільки чим менший кут змочування, тим стабільніша плівка.

Як відомо [4, 5], густина зрошення сухої Γ_{min1} та попередньо змоченої поверхні Γ_{min2} , можуть відрізнятись навіть на порядок. При цьому зі зростанням густини зрошення сухої поверхні до значення мінімальної густини зрошення відбувається приріст маси рідини, яка при Γ_{min1} зливається в плівку, а при зменшенні густини зрошення поверхні до розриву плівки при тих же значеннях крайового кута змочування θ отримуємо значення Γ_{min2} . Це явище отримало назву гістерезису крайового кута змочування.

У [6] на підставі аналізу сил, що впливають на ламінарну плівку, яка рухається по нерухомій поверхні, отримано рівняння для визначення Re_{min} $Re_{min} = \frac{1}{n^3} 8,629 We^{0,6} (1 - \cos\theta)^{0,6}$, де $n = \frac{2,498}{We^{0,125}}$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність зрошення і хвилювання плівки. Проте, автори відзначають значні розбіжності цього рівняння з експериментом.

Для води і парів гліцерину при температурах 8..30°C на трубах $\varnothing 34..46$ мм зі скла, неіржавіючих, або гладких труб мінімальна товщина плівки наближається до ідеальної при рівномірному зрошенні, а $n \approx 1,26 = \frac{S_{min}}{S}$.

На підставі посилки, прийнятих попередніми дослідниками, в [7] отримана аналогічна залежність $Re_{min} = 10,6 We^{0,6} (1 - \cos\theta)^{0,6}$ або, для випадку необмеженої плівки рідини $Re_{min} = 4,78 We^{0,6}$.

У роботах [8, 9], відзначається, що хвилювання плівки можна врахувати введенням поправки $\left(\frac{\delta_{ост}}{\delta}\right)$, яка характеризує відношення залишкової товщини плівки до середнього значення цієї товщини, тобто $Re_{min} = C_1 K_{пл} (1 - \cos\theta)^{0,6} \left(\frac{\delta_{ост}}{\delta}\right)^3$, де $K_{пл} = \frac{\sigma^3}{g v^4 \rho^3}$ – плівковий критерій.

У роботі [10] експериментально встановлено, що розрив плівки рідини відбувається за рахунок випаровування рідини в процесі спільного тепло- та масообміну. Досліди проводилися при випаровуванні етилового спирту, ацетону та бензолу при сталій густині зрошення. Проте, автори не наводять залежності для розрахунку висихання плівки.

При вивченні труб, які обігрівалися зсередини [11, 12] встановили, що за зменшення густини зрошення в плівці відбувається утворення двох-трьох вертикальних струменів, якими збігає тонка плівка рідини. При цьому за рахунок нагріву плівки тонші шари плівки мають вищу температуру ніж товсті. А оскільки з ростом температури сила поверхневого натягу зменшується, то виникає термокапілярна сила, направлена до більш товстих шарів плівки, яка і призводить до розриву плівки та появи сухих плям на нагрітих поверхнях.

Ракенштайн, [13] розглянувши стабільність сухих плям при ізотермічному русі плівки, пропонує замість статичного кута змочування $(1 - \cos\theta)$, використовувати змінну, що характеризує динамічний кут змочування, який завжди менший статичного $\psi = \frac{1 - \cos\theta}{\alpha_0}$, де α_0 – поправка, що враховує зміну чисельника виразу при русі плівки. Проте, її значення не вказано.

У роботах [8, 14] якісно встановлено, що розрив плівки рідини настає у випадку якщо динамічний напір рідини менший суми сил поверхневого натягу, термокапілярних сил і сили реактивного тиску пари, що діють на плівку. А основним фактором впливу на термокапілярні сили поверхневого натягу є змочувальність поверхні і густина теплового потоку. Для води силою реактивного тиску рекомендується нехтувати.

У [15,16,17] відзначається залежність Γ_{\min} від стану поверхні зрошення й умов подачі рідини. Авторами встановлено, що для температури стінки 20...120 °С для поверхні з нержавіючої сталі $\Gamma_{\min 3} = 4...140$ г/(м с), для сталі Ст20 3...97 г/(м с).

У [18] досліджено випаровування плівки на поверхні труби з нержавіючої сталі ($\varnothing 32$ мм). Встановлено, що при кипінні на поверхні труби кут змочування перевищує 90° і не залежить від матеріалу (особливо для металів).

Проте за даними [19], змочування залежить від сили поверхневого натягу рідини і, оскільки поверхневий натяг залежить від матеріалу, то для насадки необхідно обирати матеріал з мінімальним кутом змочування θ (мідь - вода $\theta = 84^\circ$, вода - сталь 79° , поліетилен - вода 90°). Також відзначається, що чим нижче кут змочування, тим стабільніша плівка рідини, що ускладнює повне змочування сухої поверхні.

У [20] для визначення Γ_{\min} приводиться теоретична залежність $\frac{\Gamma_{\min}}{\nu\rho} = k \left(\frac{\sigma}{\nu^{4/3} g^{1/3} \rho} \right)^{5/8}$, де $k \approx 1$ – експериментальний коефіцієнт, що залежить від кута змочування.

Порівняння експериментальних результатів з виснаведеною теоретичною залежністю Доманського виконано в [21] при розриві плівок фреону у вертикальних трубах. Встановлено що тепловий потік здійснює більш істотний вплив на $\Gamma_{\min 2}$, ніж передбачалося.

У [22] приводиться теоретичне рівняння, що включає хвильові характеристики плівки, проте практичні результати автора досить приблизно корелюються з теорією.

Ряд узагальнюючих рівнянь [23, 24] включають комплекс $\Delta\sigma/\sigma$, де $\Delta\sigma$ – різниця коефіцієнтів поверхневого натягу при температурі поверхні плівки і поблизу стінки. В роботі [19] розрізняють чотири зони впливу даного комплексу в залежності від гідродинаміки і теплообміну при русі плівки рідини по поверхні труби з нержавіючої сталі. Для течії плівки по сталевих трубах отримано емпірично $Re_{\text{пл}_{\min}} = C(\Delta\sigma/\sigma) + D$, де C і D – коефіцієнти, що залежать від $\Delta\sigma/\sigma$.

У [25] встановлено, що Γ_{\min} не залежить від щільності зрошення на вході в трубу і від значення теплового потоку на докритичній ділянці труби. Зміна цих параметрів лише переміщує місце появи сухих плям по висоті труби. У діапазоні $L/D = 300$ із балансу сил на вільній поверхні плівки для гравітаційної збігаючої плівки, у випарному апараті $\Gamma_{\min} = 3,1 \left[\frac{\sigma(1 - \cos\theta\nu^{0,29}\rho^{0,34})}{D^{0,383}g^{0,47}} \right] 0,75$. Це співвідношення підтверджено авторами експериментально.

Результати експериментів по змочуванню водою вертикальної труби з нержавіючої сталі при

тисках біля 0,08 бар [26], узагальнені емпірично $\Gamma_{\min} = 0,0314(t_{\text{cr}} - t)^{0,5}$.

При супутньому русі теплоносіїв у пористому каналі [27] отримано залежність мінімальної густини зрошення від швидкості повітря $Re_{\text{пл}_{\min 2}} = Re_{\text{пл}_0} + 0,31Re_r^{0,4}$. Рівняння узагальнює експериментальні дані при швидкостях повітря 3,5...25 м/с. В роботі застосовано метод визначення розриву плівки рідини в непрозорих трубах. Для цього встановлюється середній коефіцієнт тепловіддачі на робочій ділянці залежно від густини зрошення. А перехід від плівкового режиму течії до струмкового режиму фіксується за зменшенням значення середнього коефіцієнту тепловіддачі і пояснюється зниженням поверхні теплообміну.

Експериментальні дані по мінімальній густині зрошення для рідин з різними фізичними властивостями узагальнені емпірично [28] $\Gamma_{\min 2} = 1,7 \cdot 10^{10} \sigma^{3,6} \mu^{0,49}$.

Досліди проводилися на воді $t = 10 - 80$ °С і суміші метиловий спирт-вода. При цьому в'язкість складала $\nu = (0,36...2,6)10^{-8}$ м²/с, а поверхневий натяг $\sigma = (30...73)10^{-3}$ Н/м. Вищенаведена залежність отримана для труби з нержавіючої сталі наступним методом: на нижньому торці труби фрезувалося 12 зубців з кожного з яких збиралася рідина. При розходженні для різних зубів у 20% фіксувався струмковий режим течії.

Для процесу плівкової ректифікації бінарних сумішей органічних сполук і абсорбції аміаку водою отримано [29] $Re_{\text{пл}_{\min}} = E(\theta)Re_r^{-0,4} \left(\frac{\rho_{\text{пл}}\Delta\sigma^3}{\mu_{\text{жг}}^4 g} \right)^{0,2}$, де $E(\theta)$ – коефіцієнт, що залежить від кута змочування; Re_r – критерій Рейнольдсу, розрахований по середній швидкості, $\Delta\sigma$ – різниця поверхневих натягів рідини на вході та виході. Формула враховує збільшення товщини плівки в результаті масообміну.

На підставі лінійної теорії гідродинамічної стабільності при малих значення дотичної напруги в [8] отримано значення $Re_{\min} = 4,18$. Проте експериментальні дані самих авторів перевищили це значення в 1,5-3 рази.

У роботі [30] значення Re_{\min} складає 0..13, залежно від умов, а в [14] 13,8, що говорить про складність визначення величини.

Також слід зупинитися на методах, що дозволяють встановити момент переходу від плівкової до струмкової течії плівки, тобто Γ_{\min} .

Так, в роботі [31] значення мінімальної густини зрошення встановлювали візуально - по моменту появи сухих плям на дослідній ділянці. Це самий простий спосіб. Разом з тим [32], він не може застосовуватися для процесів всередині труби.

У цьому разі застосовують [28] методику визначення Γ_{\min} за показами терморпар, що монтувалися в стінку дослідної трубки. Тоді, в випадку появи в певному місці сухої плями за показами терморпар фіксується підвищення температури стінки. Проте даний метод не може застосовуватися в випадку двофазного руху теплоносіїв.

В роботі [33] при збіганні рідини по зовнішній поверхні вертикальних труб на робочій ділянці просвердлювали кілька отворів, через які виходило повітря, що подавалося всередину труби. Якщо при відключенні повітря сухі плями навколо отворів змочувалися плівкою, то знижували втрати води. Настання розриву

плівки фіксували по існуванню сталих сухих плям. Превагою вищевказаних методів є те що вони дозволяють встановити місця локального розриву плівки.

тичної та потенційної енергії в плівці, що враховується критерієм Вебера та теплофізичними параметрами і геометрією каналу.

Основним методом визначення мінімальної густини зрошення є феноменологічний. Не існує єдиного теоретичного погляду на розрив плівки при її переході від плівкового до струмкового руху. Це обумовлює необхідність подальших досліджень в даному напрямку.

Висновки

Як видно з залежностей, нижня межа зрошування залежить від кута змочування, співвідношення кіне-

Литература

1. Кутателадзе С.С., Сорокин Ю.Л. О гидродинамической устойчивости некоторых газожидкостных систем.- В кн.: Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред. М.-Л: Госэнергоиздат, 1961, с. 315-324.
2. В.П. Исаченко Теплообмен при конденсации – М. Энергия, 1977. – 240 с.
3. А.И. Дмитриев Экспериментальное исследование условий полного срыва пленки жидкости со стенок паропровода. Теплоэнергетика, 1969, №11, с.51-57.
4. Hobler T., Minimum zrazania powierzchni // Chem. Stosow., 1968. – Ser. B, №3 – P. 265-274.
5. Hobler T., Czajka J. Doswiadczenie sprawdzenie teorii minimum zrazania powierzchni // Chem. Stosow., 1968. – Ser.B, №2 – P. 168-178.
6. Hobler T., Minimum zrazania powierzchni w polu sol odsrodkowgen // Chem. Stosow., 1968. – Ser.B, №3 – P. 168-178.
7. Hartley D.E., Murgatroyd W. Criteria for the break-up of thin liquid layers flowing isothermally over solid surface // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1964. – Vol.7. – P. 1003-1015.
8. Woronzow E.G. Die minimale Reynoldszahl bei Reiselilm-apparaten // BWK. – 1992. –Bd. 44 – №5. – P. 201-205.
9. Woronzow E.G. Untersuchung mittelstatistischer Charakteriken von Wellenstromungen in Rieselfilmen // BWK. – 1990. – Bd. 42. – №12. – P. 730-734.
10. Булатов А.А., Зиннатулин Н.Х., Николаева С.Г. Испарение легколетучей жидкости на поверхности вращающегося диска .. ИФЖ. – 1997. – т.7. – №2. – С. 216-218.
11. Norman W.S., Binns D.M. – Trans. Int. Chem. Engineers, v.38, №6, – P. 294-300, 1960.
12. Norman W.S., McIntyre V. – Trans. Int. Chem. Engineers, v.38, №6, – P. 301-307, 1960.
13. Ruckenstein E. – Int. J. Heat Mass Transfer, v.9, №9, 897, 1966.
14. Zuber N., Straub F. – Int. J. Heat Mass Transfer, v.9, №9, 987, 1966.
15. Norman W.S., Binns D.M. – Trans. Int. Chem. Engineers, v.38, №6, – P. 294-300, 1960.
16. Norman W.S., McIntyre V. – Trans. Int. Chem. Engineers, v.38, №6, – P. 301-307, 1960.
17. Воронцов Е.Г. О минимальной плотности орошения вертикальных пленочных аппаратов. – ИФЖ. – т.14. 1968. – №8. – С. 1075-1078.
18. Доманский И.В., Соколов В.Н. Определение режимов устойчивой работы выпарных аппаратов с падающей жидкостной пленкой// ЖПХ- 1967. – т.40. – С. 112-117.
19. Крель Э. Руководство по лабораторной перегонке: Пер. с нем. – М.: Химия, 1980. – 520 с.
20. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976. – 214 с.
21. Struve H. Der Warmeubergang an einem verdampfender Rieselfilm. // VDI Forschungsheft. – 1969. – Bd 534. S. 36.
22. Hsu Y.Y., Simon F.F., Lad J.F.// Chem Eng. Progr. Symp. – 1965. – Ser. 61. – №57 – P. 139-142.
23. Hallet V.A. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1966. – Vol.9. – №4. – P. 283-286.
24. Конеру Р.Д. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплоотдачи в стекающих пленках воды, водных растворов солей и поверхностно- активных веществ по наружной поверхности вертикальных труб: Дисс. ... канд. техн. наук. – К., 1970. – 204 с.
25. Ардашев В.А. Исследование теплообмена при выпаривании гравитационно стекающей пленки жидкости в вертикальных трубах.: Автореф. дис. ... к.т.н. – Л., 1970 – 17 с.
26. Якубовский Ю В Исследование тепломассообмена в вертикальном вакуумном испарителе со стекающей пленкой морской воды.: Автореф. дис.... к.т.н. – Л., 1970. – 17 с.
27. Туз В.Е. Контактный тепломассообменный аппарат с пористой насадкой для топливной системы промышленной ГТУ: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – К., 1989. – 200 с.
28. Жмай Л.А., Олевский В.М. – Труды ГИАП, вып.1, ч.2, «Процессы и аппараты », №2, с. 5-12.
29. Олевский В.М., Ручинский В.Р. Ректификация термически нестойких продуктов – М.: Химия, 1972. – 200 с.
30. Watanabe K., Munakata T., Mutsuda A. Minimum wetting rate on wetted-wall column-correlation over wide range of liquid viscosity. // J. Chem. Eng., Japan. – 1975. Vol.8. – №1. – P. 75-77.
31. Пуховой И.И. Исследование минимальной плотности орошения и теплоотдачи при парообразовании в пленке жидкости на вращающемся диске: Дисс. канд. наук. – К., 1973. -217с.
32. Тананайко Ю.М., Воронцов Е.Г. Методы расчета и исследования пленочных процессов. – К.: Техника, 1975. – 307 с.
33. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения, Пер. с англ. – М.: Энергия, 1974. – 407 с.