

УДК 66.06

**КОСТЮЧЕНКО Є. В.*, БУТАР В. В., РОМАНЬКО С. М., ЛУКАШОВ В. К.
Шосткинський інститут Сумського державного університету**

ПРОЯВ КАПІЛЯРНИХ ЕФЕКТІВ ЗА УМОВ СТІКАННЯ ПЛІВКИ РІДИНИ, ЩО ВИПАРОВУЄТЬСЯ В ПЕРЕХРЕСНИЙ ГАЗОВИЙ ПОТІК

Представлені результати експериментального дослідження прояву термокапілярного і концентраційнокапілярного ефектів (ефекту Марангоні) за стікання плівки рідини, що випаровується в перехресний газовий потік. Прояв цих ефектів пов'язане з градієнтом поверхневого натягу плівки під час зміни її температури й концентрації розчину і виражається у зменшенні ширини плівки. Встановлені закономірності зменшення ширини плівки в залежності від параметрів процесу стікання. Для визначення зменшення поверхні випаровування плівки, що має місце в цьому випадку, введена величина ширини середньої поверхні випаровування плівки й отримані емпіричні рівняння для її оцінки.

Ключові слова: *поверхня, плівка, рідина, випаровування, стікання, капілярний ефект.*

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2022.254156

*Corresponding author: odler1993@gmail.com

Received 10 August 2021; Accepted 16 December 2021

Постановка проблеми. Гравітаційна течія рідини у вигляді плівки з нагрітої твердої поверхні широко використовуються в технологічних процесах. Для деяких з них, наприклад, процесу концентрування водних розчинів малолетких рідин (сульфатна кислота, гліцерин та ін.) характерно випаровування з вільної поверхні стікаючої плівки в газову фазу. Наявність потоку нейтрального (інертного) газу над плівкою збільшує рушійну силу тепломасопереносу при випаровуванні за рахунок видалення пари, що утворюється. Це найбільш ефективно досягається при перехресному русі плівки й газу [1]. Крім того, за умов поверхневого випаровування, відповідно до закону Дальтона, присутність нейтрального газу в такій системі дозволяє знизити температуру процесу [2]. Недостатня продуктивність процесу в цьому випадку може бути компенсована за рахунок збільшення поверхні випаровування.

Однак, особливістю стікання рідкої плівки з вертикальної поверхні являється її нестійкий рух. Поряд з хвилюванням, для плівки, що стікає з нагрітої поверхні, характерна поява термокапілярного, а в разі концентрування розчину й концентраційнокапілярного ефекту (ефекту Марангоні) [3]. Їх поява пов'язана з виникненням градієнта поверхневого натягу в плівці при зміні її температури й концентрації (для розчину). Зазначені капілярні ефекти посилюють хвилюву нестійкість, що призводить до порушення звичайного двовимірного хвилювального режиму та утворення хвиль у поздовжньому напрямку. Подальший розвиток цієї нестійкості призводить до розриву плівки і її переходу у струминну течію [4].

Аналіз попередніх досліджень. У роботі [5], на основі експериментального дослідження течії плівки фреону з вертикальної нагрітої поверхні в умовах випаровування, показано, що для такої течії має місце не розтікання рідини за шириною твердої поверхні, а стягування вниз за потоком. Причиною цього явища автори пояснюють інтенсивним випаровуванням рідини в області контактної лінії рідина - пар - тверда поверхня, де плівка має мінімальну товщину. Це випаровування не компенсується капілярним підтоком рідини, в результаті чого встановлюється контактний кут, величина якого більше рівноважного кута змочування. Зміна кривизни міжфазної поверхні під дією капілярних сил у цьому випадку призводить до того, що плівка переходить у струминну (ручайну) течію. Такий перехід призводить до зменшення ширини плівки і відповідно до зниження поверхні випаровування, що ускладнює підвищення продуктивності процесу. Зменшення ширини плівки в рідині, що стікає з нагрітої поверхні, виявлено також у наших дослідженнях тепломасопереносу за умов випаровування в перехресний газовий потік [6].

Більшість робіт, в яких розглядається течія тонкої плівки рідини за наявності капілярних ефектів,

присвячені вивченню механізмів виникнення цих ефектів і їх вплив на стійкість плівки [7-11]. У той же час, не вирішеною частиною наукової проблеми є відсутність у літературі даних, що дозволяють оцінити зменшення поверхні випаровування плівки, які необхідні для практичних розрахунків технологічних процесів.

Метою цієї роботи є експериментальне визначення закономірностей зміни ширини стікаючої плівки рідини, що випаровується в перехресний газовий потік за умов капілярних ефектів і отримання емпіричних виразів для коригування поверхні випаровування плівки за цих умов.

Методика експериментального дослідження. Дослідження проводили на експериментальній установці, яку раніше використовували для дослідження тепломасопереносу стікаючої плівки рідини, в розглянутих умовах, детально описаній в [6]. Основним елементом цієї установки є прямокутна ємність, зовнішня поверхня однієї з вертикальних стінок (робоча поверхня) якої служить для стікання плівки рідини. Розміри робочої поверхні: висота 0,8 м ширина 0,1 м. Ємність заповнена високотемпературним теплоносієм (гліцерин), що контактує з внутрішньою поверхнею зазначеної стінки. Теплоносій циркулює через ємність за допомогою рідинного термостата, де нагрівається до заданої температури. Зверху на ємності встановлено розподільний пристрій, призначений для рівномірного розподілу рідини на робочої поверхні. Розподільний пристрій дозволяє підбирати таку початкову ширину плівки, при якій забезпечувалося її однострумкова течія. На відстані 18 мм від робочої поверхні розміщена огорожувальна стінка. У простір між цією стінкою й робочою поверхнею рівномірно за висотою й перпендикулярно до руху плівки надходило повітря. Установка забезпечена системами регулювання й вимірювання витрат та температури рідини, що надходить зверху і стікає знизу робочої поверхні, швидкості й температури повітря на вході та виході з простору між робочою поверхнею й огорожуючою стінкою, температури теплоносія в ємності. За значеннями температури теплоносія в ємності, з використання відомих залежностей і даних отриманих в [6], обчислювали температуру робочої поверхні. В якості модельних рідин використовували воду й водні розчини гліцерину.

У ході дослідів, поряд з вимірами зазначених параметрів процесу, оцінювали ширину плівки у фіксованих її перерізах за висотою робочої поверхні на відстанях 0,15; 0,3; 0,45; 0,6; 0,8 м від початкового перерізу. Досліди проводилися за умов усталеної течії рідини та газу, а також температур. Заміри ширини плівки проводилися за допомогою штангенциркуля з ціною поділу шкали 0,05 мм з візуальною оцінкою границі плівки. За цими даними для кожного дослідів будували межі плівки, й за допомогою пакету прикладних програм "КОМПАС 3D" визначали площу поверхні між границями, яку приймали за поверхню випаровування $F_{\text{вип}}$ (м²). У розрахунках цю поверхню замінювали середньою (еквівалентною) поверхнею випаровування з прямолінійними границями плівки та площею, що дорівнює виміряній поверхні $F_{\text{вип}}$. У якості характеристики цієї середньої поверхні випаровування використовували її ширину, яку визначали як $b_{\text{вип}} = F_{\text{вип}}/H$, де H – висота поверхні стікання плівки (робочої поверхні).

Виклад основного матеріалу. Для встановлення закономірностей зміни ширини стікаючої за висотою робочої поверхні плівки рідини результати експериментального дослідження представляли у вигляді графіків залежностей, що виражають ступінь зменшення ширини плівки $b/b_0 = f(z/H)$, отриманих при різних параметрах процесу стікання, де b_0 , b – відповідно початкове й поточне значення ширини плівки, м; z – поздовжня координата в напрямку її руху, м. Аналіз цих залежностей в цілому показав, що у всіх випадках вони мають початкову ділянку з різким падінням ширини плівки, нижче якого ширина плівки змінюється більш плавно. Ступінь зменшення ширини плівки в залежності від параметрів процесу стікання може досягати 0,8.

На рис. 1 наведено зазначені залежності для різних початкових потоків (L_0 , кг/с) рідини (води), з якого слідує, що для початкових потоків, які відповідають ламінарному ($Re_{ж0} = 4\Gamma_0 / \mu_{ж} < 500$) та турбулентному ($Re_{ж0} > 500$) режимам, ці залежності різняться, де $Re_{ж0}$ – число Рейнольдса, що відповідає початковому потоку; Γ_0 – лінійна масова густина початкового зрошення поверхні, кг/(м·с); $\mu_{ж}$ – динамічна в'язкість, Н·с/м² [6].

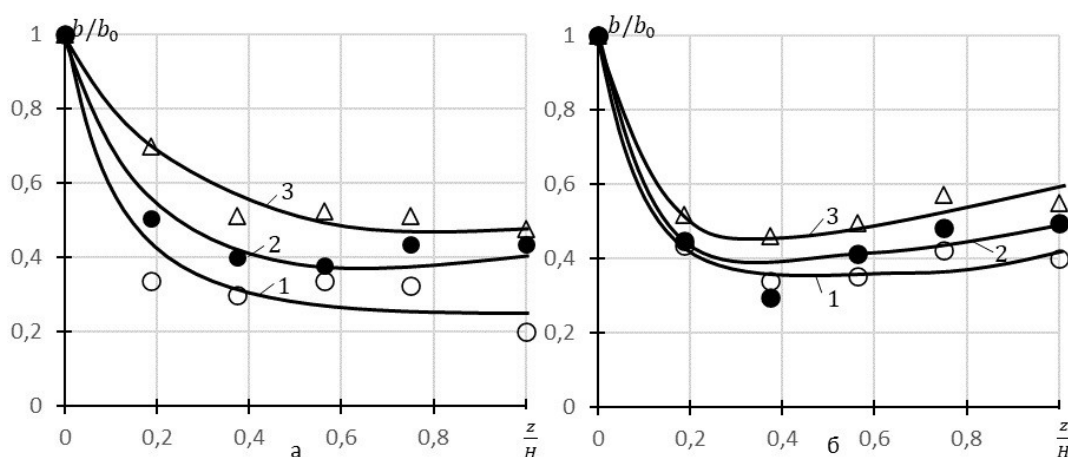


Рис. 1 – Вплив величини початкового потоку рідини на зміну ширини плівки за її довжиною:
 а – ламінарний режим стікання (1 – $L_0=0,00171$ кг/с; 2 – $0,00444$ кг/с; 3 – $0,00653$ кг/с);
 б – турбулентний режим стікання (1 – $L_0=0,00748$ кг/с; 2 – $0,0103$ кг/с; 3 – $0,0139$ кг/с).

Значний вплив на зміну ширини плівки надає температура робочої поверхні (t_{cr} , °C), причому характер цієї зміни залежить від виду рідини (рис. 2).

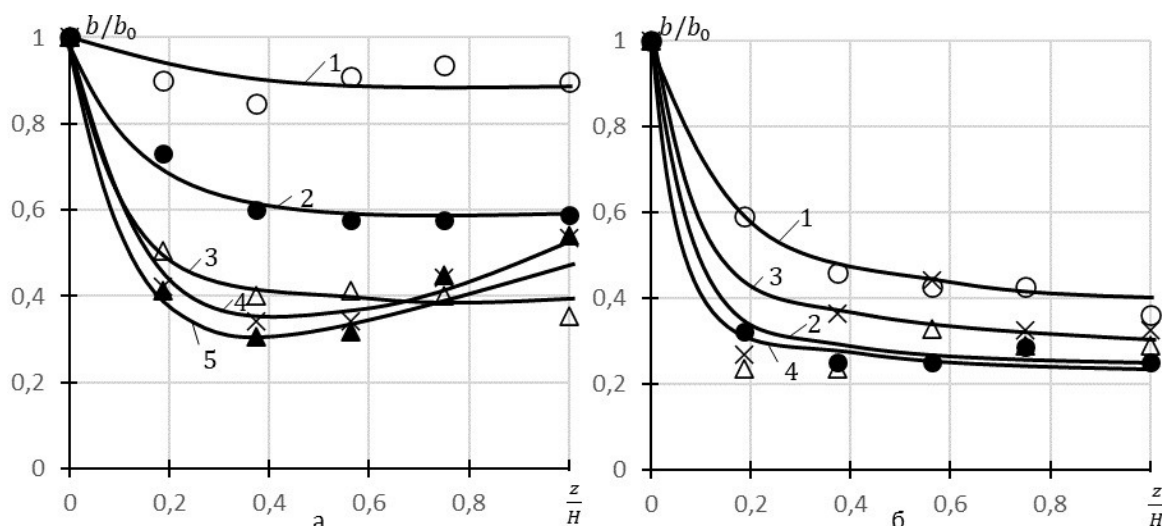


Рис. 2 – Вплив температури робочої поверхні на зміну ширини плівки за її довжиною: а – для води (1 – $t_{cr}=50$ °C; 2 – 80 °C; 3 – 100 °C; 4 – 150 °C; 5 – 174 °C); б – для розчину гліцерину (1 – $t_{cr}=50$ °C; 2 – 80 °C; 3 – 120 °C; 4 – 150 °C).

Для води зі збільшенням температури робочої поверхні ступінь зменшення ширини плівки зростає, для значень $t_{cr} > 100$ °C за межами початкової ділянки спостерігається збільшення ширини плівки (рис. 2а), що, очевидно пов'язано з переходом до об'ємного випаровування. Зміни ширини плівки 15% - вого розчину гліцерину відбувається більш інтенсивно, але температура робочої поверхні менше впливає на неї, чим для води (рис. 2б).

Експериментальні дані показують, що початкова температура рідини (t_{p0} , °C) і початкова концентрація розчину (C_0 , %) слабо впливають на ступінь зменшення ширини плівки (рис. 3), яка в цілому досягає 50% для води (рис. 3а) і 70% для розчину гліцерину (рис. 3б).

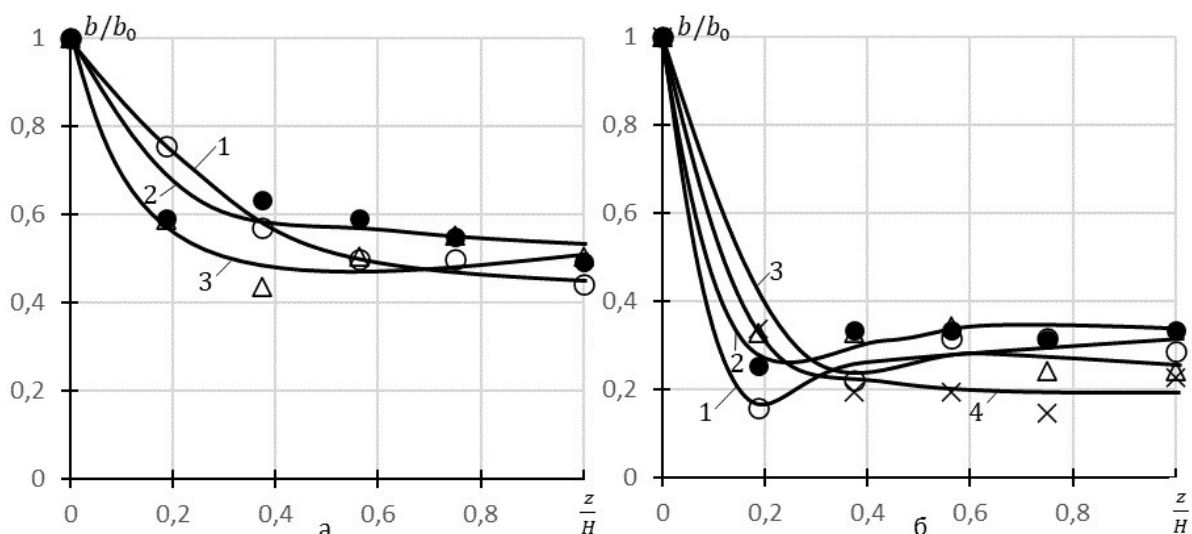


Рис. 3 – Вплив початкової температури води (а) і початкової концентрації розчину гліцерину (б) на зміну ширини плівки за її довжиною: а) 1 – $t_{p0} = 30^\circ\text{C}$; 2 – 40°C ; 3 – 50°C ; б) 1 – $C_0 = 11,4\%$; 2 – $15,0\%$; 3 – $23,4\%$; 4 – $28,9\%$.

З представлених на рис. 4 даних впливу параметрів повітря, що подається в простір над плівкою, на ступінь зменшення ширини плівки води виходить, що зі збільшенням швидкості повітря ступінь зменшення ширини плівки зростає (рис. 4а.)

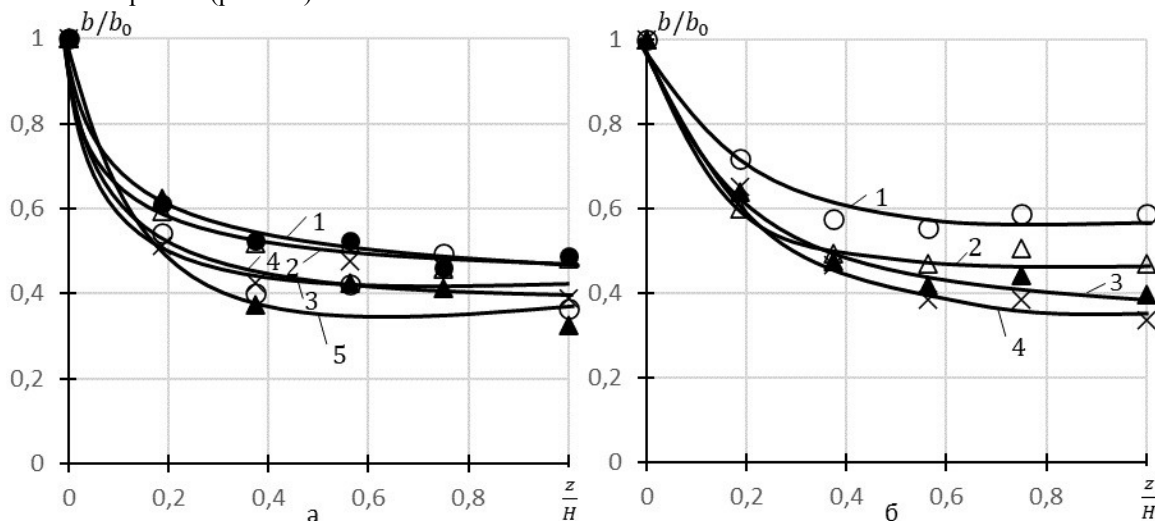


Рис. 4 – Вплив параметрів повітря, що подається в простір над плівкою, на зміну ширини плівки за її довжиною: а – швидкість повітря (1 – $v = 0,249\text{ м/с}$; 2 – $0,492\text{ м/с}$; 3 – $0,736\text{ м/с}$; 4 – $1,046\text{ м/с}$; 5 – $1,528\text{ м/с}$); б – початкової температури повітря (1 – $t_0 = 56^\circ\text{C}$; 2 – 80°C ; 3 – 125°C ; 4 – 174°C ; 5 – 207°C).

Це можна пояснити підвищенням інтенсивності випаровування плівки, що призводить до більшої зміни температури за її довжиною і відповідно зміни градієнта поверхневого натягу в ній. Аналогічний вплив на ступінь зменшення ширини плівки надає й початкова температура повітря (t_0 , $^\circ\text{C}$) (рис. 4б). Однак, в обох випадках зміна ступеня зменшення ширини плівки знаходиться в досить вузькому діапазоні, що відповідає приблизно 40-60%.

Таким чином, основний вплив на зміну ширини плівки за її довжиною в умовах капілярних ефектів надає початковий потік рідини (густина зрошення робочої поверхні) і температура цієї поверхні. Можна припустити, що це пов'язано зі збільшенням товщини плівки зі зростанням початкового потоку і нагріву плівки за її довжиною, характеристиками, які визначають градієнт поверхневого натягу на вільній поверхні.

Експериментальне дослідження зміни ширини середньої поверхні випаровування плівки рідини також включала встановлення залежностей цієї величини від параметрів процесу стікання плівки за умов випаровування в перехресний повітряний потік і подальші узагальнення отриманих результатів у вигляді емпіричних виразів.

Аналіз отриманих залежностей ширини середньої поверхні випаровування від параметрів процесу стікання плівки показав, що ця ширина зростає зі збільшенням початкового потоку як води, так і водних розчинів гліцерину (рис. 5).

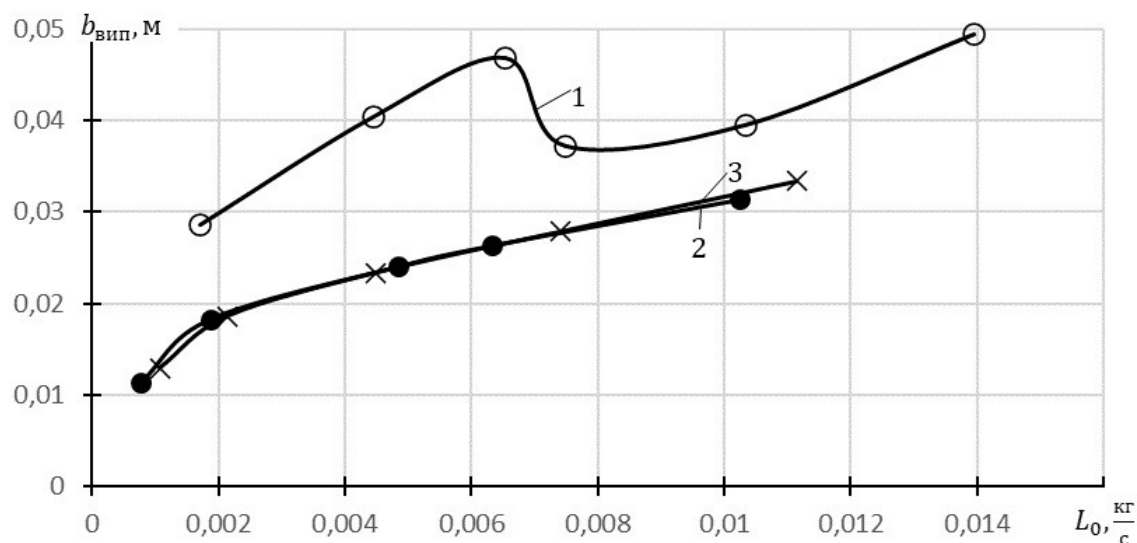


Рис. 5 – Закономірності ширини середньої поверхні випаровування від початкового потоку води й водних розчинів гліцерину: 1 – вода; 2 – розчин гліцерину $C_0=5,9\%$; 3 – $28,9\%$.

У той же час ці залежності мають різний характер для зазначених видів рідини. Для води характерний стрибкоподібний перехід (розрив) на більш низькі значення $b_{\text{вип}}$ при зміні режиму стікання плівки з ламінарного на турбулентний [6]. Для розчину гліцерину такий розрив відсутній навіть для низькоконцентрованого розчину ($C_0 = 5,9\%$), що можна пояснити наявністю для таких розчинів тільки ламінарного режиму через підвищену їх в'язкість.

Залежності ширини середньої поверхні випаровування плівки від інших параметрів процесу її стікання для води й водних розчинів гліцерину показані на рис. 6.

Зі збільшенням температури робочої поверхні ширина середньої поверхні випаровування плівки зменшується (рис. 6а), спочатку різко, потім при наближенні до $t_{\text{ст}} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ більш плавно з виходом практично на постійне значення. При цьому перехід від води до розчину гліцерину призводить до значного зменшення $b_{\text{вип}}$, в той час як концентрація розчину в розглянутих межах її зміни практично не впливає на цю залежність.

Деяке зменшення ширини середньої поверхні випаровування плівки, що носить лінійний характер, спостерігається при збільшенні швидкості повітря (рис. 6б). Вплив початкових температур рідини (рис. 6в) і повітря (рис. 6г) на $b_{\text{вип}}$ за умов даного розкиду експериментальних точок не виявлено.

Слід зазначити, що у всіх випадках ширина середньої поверхні випаровування плівки розчинів гліцерину на 30-40% менше, ніж для води. Це дозволяє припустити, що тут, поряд з термокапілярним, можливо проявляється концентраційнокапілярний ефект.

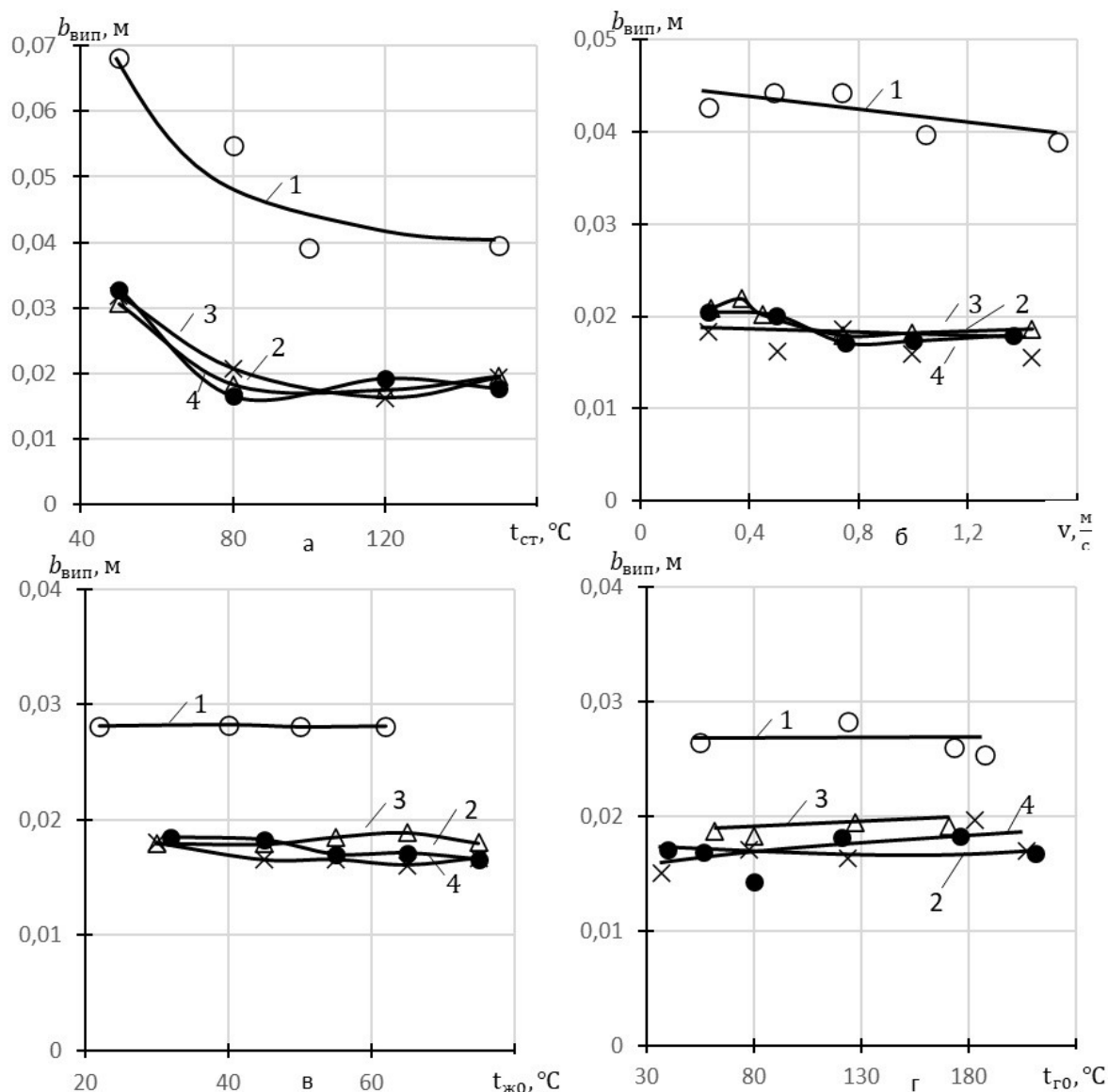


Рис. 6 – Залежності ширини середньої поверхні випаровування від параметрів процесу стікання плівки для води і водних розчинів гліцерину (1 – вода; 2 – розчин гліцерину $C_0=5,9\%$; 3 – $15,0\%$; 4 – $28,9\%$): а) температури робочої поверхні; б) швидкості повітря; в) початкової температури рідини; г) початкової температури повітря.

У цілому аналіз отриманих залежностей ширини середньої поверхні випаровування плівки від параметрів процесу її стікання показує, що основними параметрами, які визначають цю величину, залишаються початковий потік рідини та температура поверхні, з якої стікає плівка. Обробка експериментальних даних дозволила отримати вираз, що пов'язує ширину середньої поверхні випаровування з початковою шириною плівки в наступному вигляді

$$b_{\text{вип}} = kb_0 \quad (1)$$

де коригувальний коефіцієнт k визначається за допомогою емпіричних рівнянь:

– для води

$$k = 42,5 \cdot L_0^{0,355} \cdot t_{\text{ст}}^{-0,549}$$

– для гліцерину

$$k = 5,6 \cdot L_0^{0,235} \cdot t_{ст}^{-0,287}$$

Рівняння (1) можна використовувати в умовах проведених досліджень: $0,79 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с} < L_0 < 11,15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; $50 \text{ }^\circ\text{C} < t_{ст} < 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Співставлення розрахункових і експериментальних значень ширини середньої поверхні випаровування плівок води і 15% –вого розчину гліцерину (рис. 7), показує їх досить хорошу відповідність.

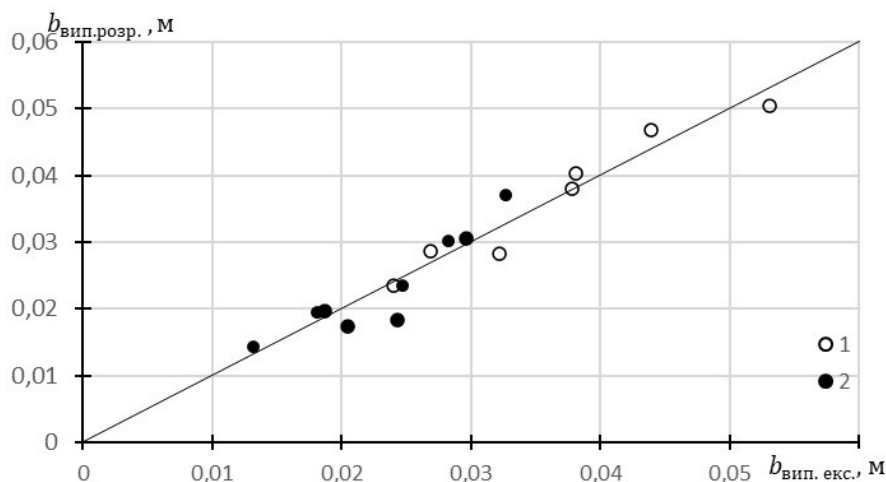


Рис. 7 – Порівняння розрахункових і експериментальних значень ширини середньої поверхні випаровування: 1 – вода; 2 – 15%–вий розчин гліцерину.

Середньоквадратичне відхилення цих значень становить: для води $S = 0,0026\text{м}$; для розчину гліцерину $S = 0,0030\text{м}$.

Для наближеної оцінки ширини середньої поверхні випаровування плівки можна використовувати значення коригувального коефіцієнта.

$$k = 0,2 \div 0,5$$

де верхнє значення відноситься до води, до нижнього значення наближаються водні розчини гліцерину.

Співвідношення (1) і наведені емпіричні рівняння дозволяють проводити коригування поверхні випаровування стікаючої плівки води і водних розчинів гліцерину в умовах капілярних ефектів, яка попередньо визначається з проектного розрахунку плівкового апарату з перехресним газовим потоком.

Висновки. На основі експериментального дослідження показано прояв капілярних ефектів за умов стіканні плівки рідини, що випаровується в перехресний газовий потік, який виражається зменшенням ширини плівки. Встановлені закономірності цього зменшення для плівок води й водних розчинів гліцерину залежно від параметрів процесу стікання. Найбільший вплив на зменшення ширини плівки за цих умов дають початковий потік рідини й температура поверхні стікання. Для коригування поверхні випаровування плівки, визначеної на основі технологічного розрахунку, введена величина ширини середньої поверхні випаровування плівки. Результати експериментального дослідження впливу параметрів процесу стікання плівки води й водних розчинів гліцерину на ширину середньої поверхні випаровування узагальнені у вигляді емпіричних рівнянь, що пов'язують коригувальний коефіцієнт з основними параметрами процесу стікання.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть направлені на розробку математичної моделі стікання плівки рідини в умовах прояву капілярних ефектів, яка дозволить обґрунтувати отримані емпіричні закономірності.

Список використаної літератури

1. Апарат для концентрування розчину сірчаної кислоти : пат. №134162 Україна : С01В 17/88. № u 2018 10018 ; заявл. 08.10.18 ; опуб. 10.05.19, Бюл. №9. 4 с.

2. Серафимов Л.А., Фролкова А.В. Соблюдение первого закона Коновалова в процессе ректификации с инертным газом // Вестник МИТХТ. 2008. Т. 3, № 2. С. 45-52.
3. Зейтунян Р.Х. Проблема термокапиллярной неустойчивости Бенара-Марангони // Успехи физических наук. 1998. Т. 168, № 3. С. 259-286.
4. Шатский Е.Н. Влияние термокапиллярных эффектов на характеристики течения нагреваемой плёнки жидкости: дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.14. Новосибирск, 2018. 111 с.
5. Kuznetsov V.V., Vitovskii O.V., Krasovskii V.A. An experimental investigation of modes of flow under conditions of evaporation of liquid on a vertical heating surface // High Temp. 2007 Vol. 45, № 1. P. 68–75. DOI:10.1134/S0018151X07010099.
6. Lukashov V.K., Kostiuhenko Y.V., Timofeev S.V., Ochowiak M. An experimental study of heat and mass transfer in a falling liquid film evaporation into a crossflow of neutral gas // Journal of Engineering Sciences. 2020. Vol. 7, № 1. P. 30-38, DOI: 10.21272/jes.2020.7(1).f3.
7. Gordeeva V.Yu., Lyushnin A.V. Influence of the thermocapillary effect on the dynamics and stability of motion of a thin evaporating film // Technical Physics. 2013. Vol. 58, №. 3. P. 351-357. DOI:10.1134/s1063784213030092.
8. Aktershev S.P. Stability of the heated liquid film in the presence of the thermocapillary effect // Thermophysics and Aeromechanics. 2013. Vol. 20, № 1. P. 1-16. DOI:10.1088/1742-6596/891/1/012023.
9. Chinnov E.A., Kabov, O.A. Jet Formation in Gravitational Flow of a Heated Wavy Liquid Film // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2003. Vol. 44, № 5. P. 708–715. DOI:10.1023/A:1025564605979.
10. Birikh R.V., Denisova M.O., Kostarev K.G. Development of concentration-capillary convection on an interfacial surface. Fluid Dynamics. 2015. Vol. 50, № 3, P. 361-370. DOI:10.1134/S0015462815030060.
11. Прокудина Л.А. Моделирование влияния градиентов температуры на состояние свободной поверхности жидкой пленки // Вестник Ю Ур ГУ. 2014. Т. 7, № 2. С. 118-123.

Yevhen Kostiuhenko, Serhii Romanko, Vitalii Butar, Volodymyr Lukashov

CAPILLARY EFFECTS MANIFESTED IN THE PROCESS OF DRAINING A LIQUID FILM THAT EVAPORATED INTO A GAS CROSS FLOW

The aim of the work is to determine the regularities of changes in the width of the flowing liquid film evaporating into a gas cross flow resulting from thermocapillary and concentration-capillary effects (Marangoni effect).

The research was carried out experimentally employing an installation with a heated (working) surface, on which a liquid film (water or aqueous glycerol solution) was flowing. A flow of air was fed into the space between the working surface and the enclosing wall located at a distance from it, evenly in height and perpendicularly to the film movement. The film width was measured along the height of the working surface and the obtained dependencies were presented as graphs for different parameters of the flowing process.

In all experiments, the graphs have an initial section with a sharp decrease in the film width, below which its change occurs smoothly. The degree of reduction in the film width depending on the parameters of the flowing process can reach 80%. In laminar mode, the reduction of the film width is more uniform than in turbulent mode, when some rise of the curves beyond the initial section is observed and can be explained by intensive mixing of the liquid. As the initial liquid flow increases, the degree of reduction in the film width decreases. Significant influence on the change in the film width is exerted by the temperature of the working surface during the flow of water: with increasing temperature, the film width decreases. At values of this temperature greater than 100°C, the rise of the curves is observed, possibly associated with the transition to volumetric evaporation.

When the glycerol solution is flowing, the temperature of the working surface less influences the change in film width, although its decrease along the height of the working surface is greater than for water. The process parameters such as initial liquid temperature, initial solution concentration, and velocity and air temperature have relatively little effect on the change in film width. To correct the area of the film evaporation surface, determined by technological calculation, the width of the average evaporation surface is introduced under capillary effects. Its value increases with the initial liquid flow. For water, this dependence is characterized by a jump-like decrease in the film width in the transition from laminar to turbulent flow mode. This effect is absent on the dependence for glycerol solution, which can be explained by its higher viscosity. As the temperature of the working surface increases, the width of the average evaporation surface of the film decreases, some decrease being also observed with an increase in air velocity.

Empirical equations for estimation of the correction factor were obtained. Capillary effects in this case are expressed by decrease in the width of the film at the height of its runoff, which leads to the need to correct the area of the film evaporation surface determined by technological calculation.

Keywords: *surface, film, liquid, evaporation, flowing, capillary effect.*

References

1. Shostka Institute of Sumy State University (2019). “Aparat dlia kontsentrivannia rozchynu sirchanoi kysloty” [Apparatus for concentrating a solution of sulfuric acid]. Inventors: Volodymyr Kostiantynovyc Lukashov, Serhii Mykolaiovych Romanko, Yevhen Volodymyrovych Kostiuchenko. 10 May. Appl: 08 October 2018. Ukraine Patent UA134162U.
2. Serafimov, L. A., Frolkova, A. V., (2008). “Sobliudenyje pervoho zakona Konovalova v protsesse rektyfikatsyy s ynertnum hazom” [Konovalov's First Law Validity in Reactive Distillation Processes With Inert]. *Fine Chemical Technologies*. 3(2), 47-54.
3. Zeytounian, R. H., (1998). “Problema termokapyllyarnoi neustoichyvosti Benara-Maranhony” [The Benard–Marangoni thermocapillary instability problem]. *Physics-Uspexhi*. 1(68), 259–286.
4. Shatskyi, E.N., (2018) “Vlyianyie termokapyllyarnukh efektoiv na kharakterystyky techenyia nahrevaemoi plenky zhydkosti” [Influence of thermocapillary effects on the flow characteristics of a heated liquid film: Candidate of Physico-Mathematical Sciences]. Kutateladze Institute of Thermophysics Kutateladze Institute of Thermophysics.
5. Kuznetsov, V.V., Vitovskii, O.V., Krasovskii, V.A., (2007) An experimental investigation of modes of flow under conditions of evaporation of liquid on a vertical heating surface. *High Temp*. 45 (1), 68–75. DOI:10.1134/S0018151X07010099.
6. Lukashov, V.K., Kostiuchenko, Y.V., Timofeev, S.V., Ochowiak, M., (2020). An experimental study of heat and mass transfer in a falling liquid film evaporation into a crossflow of neutral gas. *Journal of Engineering Sciences*. 7 (1), 30-38, DOI: 10.21272/jes.2020.7(1).f3.
7. Gordeeva, V.Yu., Lyushnin, A.V., (2013). Influence of the thermocapillary effect on the dynamics and stability of motion of a thin evaporating film. *Technical Physics*. 58(3), 351-357. DOI:10.1134/s1063784213030092.
8. Aktershev, S.P., (2013). Stability of the heated liquid film in the presence of the thermocapillary effect. *Thermophysics and Aeromechanics*. 20 (1), 1-16. DOI:10.1088/1742-6596/891/1/012023.
9. Chinnov, E.A., Kabov, O.A., (2003). Jet Formation in Gravitational Flow of a Heated Wavy Liquid Film. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 44 (5), 708–715. DOI:10.1023/A:1025564605979.
10. Birikh, R.V., Denisova, M.O., Kostarev, K.G., (2015). Development of concentration-capillary convection on an interfacial surface. *Fluid Dynamics*. 50 (3), 361-370. DOI:10.1134/S0015462815030060.
11. Prokudina, L.A., (2014). “Modelyrovanye vlyianyia hradyentov temperaturu na sostoianye svobodnoi poverkhnosti zhydkoi plenky” [Modelling the Influence of Temperature Gradients on the State of a Free Liquid Surface]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 7 (2), 118-123.