

П.О. Барабаш, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1252-494X  
 А.С. Соломаха, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1061-6277  
 В.В. Серета, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-4645-3123  
 М.В. Совінський, магістр, ORCID 0000-0001-8734-1411  
 Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ПРИ ТЕЧІЇ ПЛІВКИ РІДИНИ ВЕРТИКАЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ З ПОВЗДОВЖНІМ ОРЕБРЕННЯМ

*Розглянуто особливості розподілу плівки рідини при її течії по вертикальній поверхні з поздовжніми ребрами. На основі аналізу сил, які діють у плівці рідини при відсутності міжфазного тертя між рідиною та газовим середовищем, отримані залежності, які описують форму поверхні рідини у міжреберному проміжку. Показано, що коли густина зрошення більша за мінімальну, при якій оребрена поверхня буде гарантовано повністю змоченою (мінімальна товщина плівки на середині міжреберного проміжку  $>0$ ), поверхня плівки рідини приймає форму з рівною кривизною. В залежності від конкретних поперечних геометричних розмірів труби, ребра і міжреберного проміжку поверхня рідини може мати як ввігнуту, так і випуклу форму. Отримані результати дають можливість визначити граничні умови на міжфазній поверхні (рідина – газ), які необхідні для аналітичних та експериментальних досліджень гідродинаміки і тепломасообміну при течії рідини по вертикальній оребреній поверхні.*

**Ключові слова:** плівка рідини, поздовжнє оребрення, мінімальна густина зрошення, краєвий кут змочування, інтенсифікація процесів тепломасообміну.

### Мета дослідження

Для інтенсифікації тепломасообмінних процесів у плівкових апаратах з вертикальною теплообмінною поверхнею використовують різноманітне оребрення [1-10]. Враховуючи тісний зв'язок питань гідродинаміки плівки рідини та інтенсивності теплообміну, доцільно проаналізувати основні параметри плівки та мінімальної щільності зрошення рідиною поверхні з повздовжнім оребренням. З метою спрощення проведення експериментальних досліджень ці ребра можна моделювати дротами різного діаметра, закріплених на плоскій, чи трубчастій базовій поверхні з необхідним кроком.

### Аналітичні залежності для визначення основних параметрів плівки рідини

При течії плівки рідини гладкою вертикальною поверхнею параметри плівки (товщина плівки, режим течії і т.д.) обумовлені такими факторами як сила тяжіння, сила в'язкого тертя всередині рідини, а також умовами на зовнішній поверхні плівки, тобто наявністю або відсутністю дотичного напруження на поверхні розподілу рідкої та газоподібної фази. Течія ламінарної плівки рідини описується рівнянням Нав'є-Стокса, яке для випадку стікання рідини з гладкої поверхні, з врахуванням загальноприйнятих припущень, записується у вигляді:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{g}{\nu} = 0 \quad (1)$$

Граничні умови та рівняння нерозривності роблять систему рівнянь замкнутою, що дозволяє отримати достатньо прості вирази для товщини плівки рідини, величина яких визначається інтенсивністю теплообміну, як при плівковій конденсації, так і при пароутворенні в плівці рідини, що стікає гладкою поверхнею.

При течії плівки рідини поверхнею з повздовжнім оребренням (тут та надалі розглядається випадок, коли рідина змочує поверхню та ребро) швидкість течії змінюється не тільки за напрямком осі  $y$  (рис. 1), але і в напрямку осі  $x$ . Тому, рівняння Нав'є-Стокса, з врахуванням аналогічних загальноприйнятих припущень, набуває вигляду:

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{g}{\nu} = 0 \quad (2)$$

Граничні умови:

- а) при  $y = 0$  і  $w = 0$ ;
- б) при  $x = l$  та  $x = -l$  і  $w = 0$ ;

в) при  $y = \delta$  і  $\frac{\partial \omega}{\partial y} = 0$  умова яка має місце при відсутності дотичного напруження на поверхні плівки.

У випадку, коли товщина плівки рідини не перевищує висоту ребра, поверхня рідини підходить до точки дотику з ребром під кутом рівним краєвому куту змочування  $\theta_p$ . При цьому на поверхню рідини, в горизонтальній площині, діють лише сили поверхневого натягу і тиск парової фази, оскільки проекція сили тяжіння на горизонтальну площину рівна нулю. Формування поверхні плівки в цьому випадку відбувається в умовах, які нагадують умови при нульовій гравітації, коли поверхня рідини набуває сферичної форми. З цього випливає, що при течії рідини пласкою поверхнею з дротяним оребренням (якщо товщина плівки менша висоти ребра) поверхня рідини має прийняти увігнуту форму з рівною кривизною (рис. 1). Відомо що тиск парової фази на рідину більше над вигнутою поверхнею ніж над гладкою, а над гладкою – більше, ніж над увігнутою. Якщо припустити, що поверхня плівки в проміжку між двома сусідніми ребрами має змінну кривизну, то на поверхні рідини буде діяти градієнт тиску, спричиняючи переміщення рідини, там де поверхня плівки має більшу позитивну кривизну (позитивно будемо вважати кривизну увігнутою поверхні). Перетікання рідини припиниться тільки тоді, коли зникне градієнт тиску, а він буде рівним нулю, коли поверхня плівки прийме форму однакової кривизни.

Радіус кривизни поверхні залежить від кроку  $s$  між ребрами, діаметра (висоти ребра)  $d = 2 \cdot r$ , краєвого кута змочування ребра  $\theta_p$  та мінімальної товщини плівки  $\delta_0$ , значення якої змінюється зі зміною витрати рідини.

Для визначення  $R_{nl}$  для пласкої поверхні з дротяним оребренням (рис. 1) використаємо теорему косинусів. Тоді з трикутника  $\Delta O_1OK$  (рис. 1), в якому сторона  $OK$  – шуканий радіус кривизни плівки  $R_{nl}$ , а  $O_1K$  – радіус дротяного ребра, отримаємо:

$$O_1O^2 = R_{nl}^2 + r^2 - 2 \cdot r \cdot R_{nl} \cdot \cos(180 - \theta_p) \quad (3)$$

З врахуванням того, що  $\cos(180 - \theta_p) = -\cos \theta_p$ , а  $O_1O^2 = \left(\frac{s}{2}\right)^2 + (R_{nl} - r + \delta_0)^2$ , і прийнявши

$\frac{s}{2} = l$ , маємо

$$l^2 = (R_{nl} - r + \delta_0)^2 = R_{nl}^2 + r^2 + 2 \cdot r \cdot R_{nl} \cdot \cos \theta_p \quad (4)$$

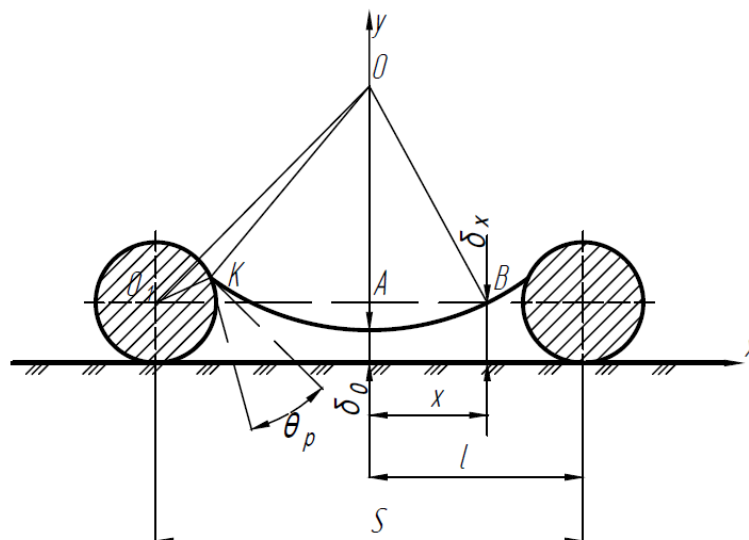


Рис. 1. Форма поверхні плівки на вертикальній пластині з дротяними ребрами

Перетворивши вираз (4) і вирішивши його відносно  $R_{nl}$  отримаємо:

$$R_{nl} = \frac{l^2 + 2 \cdot r \cdot \delta_0 + \delta_0^2}{2 \cdot (r + r \cdot \cos \theta_p - \delta_0)} \quad (5)$$

За  $R_{nl}$  з  $\Delta OAB$  нескладно визначити товщину плівки в будь-якому перерізі  $x$  (рис. 1).

$$\delta_x = R_{nl} + \delta_0 - OA$$

$$OA = \sqrt{R_{nl}^2 + x^2}$$

Тоді:

$$\delta_x = R_{nl} + \delta_0 - \sqrt{R_{nl}^2 - x^2} \quad (6)$$

Середньо-інтегральну товщину плівки можна знайти діленням площі, обмеженої поверхнею плівки і стінкою на  $s-d$  (якщо знехтувати кількістю рідини, що знаходиться під дротом). Шукана площа визначається як різниця між площею прямокутника  $(s-d)dx$  та сегменту, що утворився в наслідок перетину радіусу  $R_{nl}$  лінією паралельною осі  $x$  і проведеною на відстані  $h$  від стінки, де:

$$h = \delta_x = l = R_{nl} + \delta_0 - \sqrt{R_{nl}^2 - (l-r)^2} \quad (7)$$

Якщо, площу сегменту знайти за наближеною формулою  $s_{сегм} = 2/3 \cdot (h - \delta_0) \cdot (s - d)$ , то середньо-інтегральну товщину плівки, можна буде визначити з виразу:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{3} \cdot h + \frac{2}{3} \cdot \delta_0 \quad (8)$$

Для гладкої поверхні з прямокутними ребрами (рис.2) необмеженої висоти радіус кривизни поверхні плівки рідини (якщо змочено весь простір між ребрами) можна визначити з виразу, що використовується для визначення радіусу меніска у капілярах:

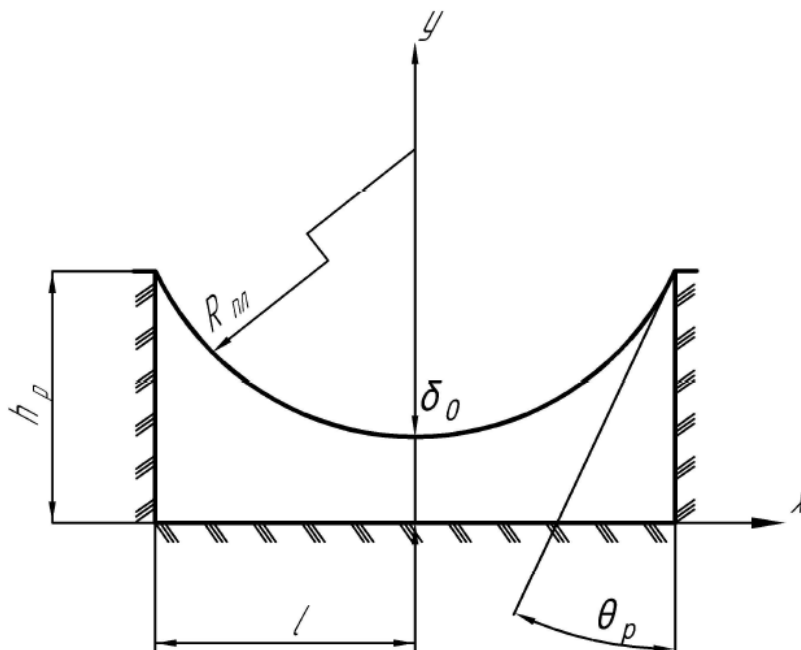


Рис. 2. Форма поверхні плівки на вертикальній пластині з прямокутними ребрами

$$R_{nl} = \frac{l}{\cos \theta_p} \quad (9)$$

Підстановка в (6) значення  $R_{nl}$  з (9), при  $x=l$ , дає висоту підйому плівки біля ребра:

$$h = \frac{l}{\cos \theta_p} + \delta_0 - \sqrt{\frac{l^2}{\cos^2 \theta} - l^2} \quad (10)$$

У випадку, коли ребро нижче  $h$  – поверхня плівки буде підходити до нього під кутом, більшим від кута крайового змочування  $\theta_p$ . При цьому ребро по всій висоті змочене, а це означає, що радіус кривизни поверхні плівки нескладно отримати з виразу для сегменту  $h_p - \delta_0 = R_{nl} - \sqrt{R_{nl}^2 - l^2}$ , якщо розв'язати його відносно  $R_{nl}$ :

$$R_{nl} = \frac{l^2}{2(h_p - \delta_0)} + \frac{h_p - \delta_0}{2} \quad (11)$$

Локальні товщини плівки знаходяться з рівняння (6), а середнє інтегральне значення з рівняння (8), для якого  $h=h_p$ .

В промислових апаратах теплообмінна поверхня в більшості випадків виготовляється з труб різного діаметру, тому доцільно отримати залежності аналогічні рівняння (5), (6), (7) та (8) для випадку коли кривизна поверхні з дротяним оребренням співрозмірна з кривизною плівки рідини.

В залежності від співвідношення діаметра труби, висоти ребр і їх кількості, поверхня плівки може приймати, як увігнуту форму (рис.3а), так і вигнуту (рис.3б).

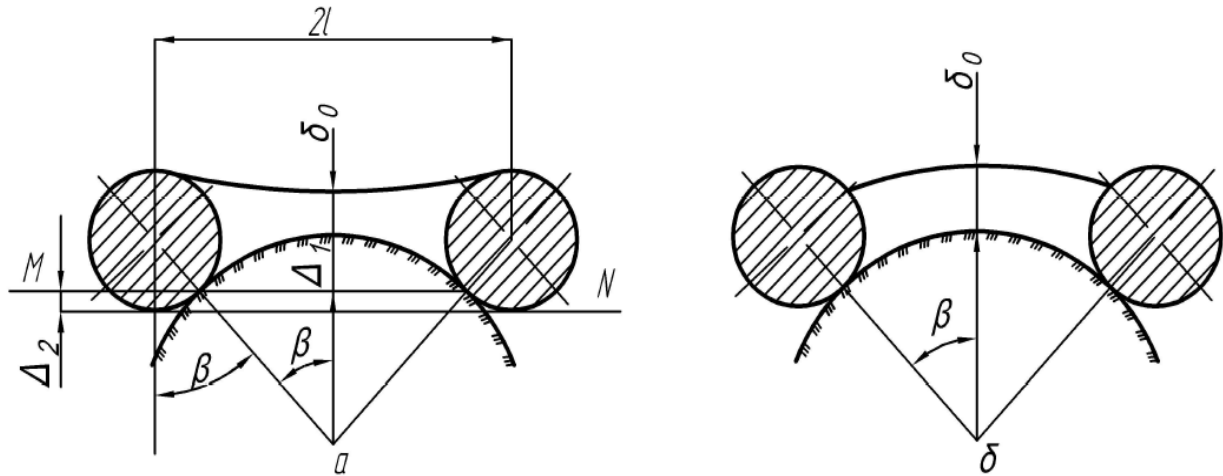


Рис. 3. Форма поверхні плівки на вертикальній трубі з дротяними ребрами: а – увігнута; б – вигнута

З рис.3а видно, що радіус кривизни плівки на циліндричній поверхні буде рівним радіусу для гладкої поверхні MN з тими самими ребрами, якщо мінімальна товщина плівки рівна:

$$\delta'_0 = \delta_0 + \Delta_1 + \Delta_2 \quad (12)$$

Враховуючи, що:

$$\Delta_1 = R_{ноє} \cdot (1 - \cos \beta) \quad (13)$$

$$\Delta_2 = r \cdot (1 - \cos \beta) \quad (14)$$

Після підстановки (12), (13) та (14) в (5) отримаємо вираз для радіусу кривизни плівки на циліндричній поверхні з дротяними ребрами:

$$R_{nl} = \frac{[\delta_0 + (r + R_{ноє}) \cdot (1 - \cos \beta)]^2 - 2r \cdot [\delta_0 + (r + R_{ноє}) \cdot (1 - \cos \beta)] + l^2}{2[r \cos \theta_p - \delta_0 - (R_{ноє} + r) \cdot (1 - \cos \beta) + r]}$$

Позначимо комплекс  $\delta_0 + (r + R_{ноє}) \cdot (1 - \cos \beta) = \delta_0^*$ , тоді:

$$R_{nl} = \frac{(\delta_0^*)^2 - 2 \cdot \delta_0^* \cdot r + l^2}{2 \cdot (r \cdot \cos \theta_p - \delta_0^* + r)} \quad (15)$$

де  $l = (R_{ноє} + r) \cdot \sin \beta$ ,  $\beta = 360/2N$

$N$  – кількість ребер.

Рівняння (15) можна використовувати і для випадку, коли плівка рідини стає випуклою (рис.3б); значення радіусу кривизни  $R_{nl}$  в цьому випадку – від'ємне. Перевірити це твердження можливо шляхом виводу залежності для радіусу кривизни випуклої плівки методом, що вже використовувався при отриманні формул (5) та (15). Враховуючи простоту виведення, опустимо його, зазначивши лишень, що прийнявши кривизну випуклої плівки від'ємною, залежність для  $R_{nl}$  буде ідентичною (15).

За локальну товщину плівки рідини, що стікає циліндричною поверхнею з дротяним оребренням будемо приймати товщину по нормалі до поверхні труби. Тому вираз для неї доцільно шукати в циліндричних координатах, за вісь яких прийнято вісь труби.

З рис.4, видно, що локальна товщина плівки є

$$\delta_\varphi = AK = OK - OA \quad (16)$$

Позначивши  $OK=\eta$  та  $O_1O=\eta_0$  з трикутника  $\Delta O_1OK$  можливо отримати з теореми косинусів

$$\eta^2 = 2\eta\eta_0 \cos \varphi + \eta_0^2 - R_{nl}^2 = 0$$

Розв'язуючи квадратне рівняння відносно  $\eta$ , знайдемо:

$$\eta = \eta_0 \cos \varphi \pm \sqrt{\eta_0^2 \cos^2 \varphi - \eta_0^2 + R_{nl}^2}$$

Цим умовам задовольняє корінь

$$\eta = \eta_0 \cos \varphi - \sqrt{\eta_0^2 \cos^2 \varphi - \eta_0^2 + R_{nl}^2} \quad (17)$$

При  $\varphi = 0$ , отримуємо  $\eta = \eta - R_{nl}$ , що узгоджується з рис. 4.

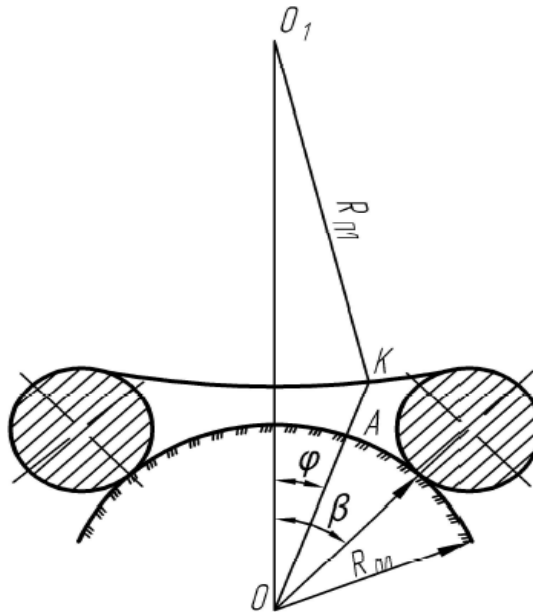


Рис. 4 До розрахунку увігнутої форми поверхні півки на вертикальній трубі з дротяними ребрами

Підставивши (17) в (16), отримаємо вираз для локальних товщин увігнутої півки рідини на циліндричній поверхні з поздовжньо-дротяним оребренням:

$$\delta\varphi = \eta_0 \cos \varphi - \sqrt{\eta_0^2 \cos^2 \varphi - \eta_0^2 + R_{nl}^2} - R_{нов} \quad (18)$$

З рис.4 видно, що  $\eta_0 = R_{nl} + R_{нов} + \delta_0$

Якщо поверхня півки випукла, то шляхом аналогічних міркувань можна отримати

$$\delta\varphi = \sqrt{\eta_0^2 \cos^2 \varphi - \eta_0^2 + R_{nl}^2} - \eta_0 \cos \varphi - R_{нов} \quad (19)$$

де  $\eta_0 = |R_{nl}| - R_{нов} - \delta_0$ .

Середня товщина півки рідини, що стікає циліндричною поверхнею з дротяним оребренням, простіше отримати з виразу для локальної товщини її в декартових координатах. Скориставшись рис.3а, знайдемо:

$$\delta_x = R_{нов} + \delta_0 - \sqrt{R_{нов}^2 - x^2} + R_{nl} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_{nl}^2}} \right) \quad (20)$$

Площа поперечного перерізу півки  $F$  на ділянці  $0+l$ , де  $l_1 = R_{нов} \sin \beta$ , буде виражена інтегралом:

$$F = \int_0^{l_1} \delta_x dx = x(R_{нов} + \delta_0 + R_{nl}) - 0,5 \cdot \left( x\sqrt{R_{нов}^2 - x^2} + R_{нов}^2 \arcsin \frac{x}{R_{нов}} \right) - 0,5 \cdot \left( xR_{nl} \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_{nl}^2}} + \arcsin \frac{x}{R_{nl}} \right) \Bigg|_0^{l_1} \quad (21)$$

Підстановку радіусу профілю півки у виразах (20) та (21) варто виконувати з врахуванням його знаку, тобто від'ємним, якщо поверхня півки – випукла (рис.3б).

Знаючи  $F$ , не складно отримати вираз для  $\bar{\delta}$ , якщо розділити  $F$  на довжину дуги  $l^* = \pi R_{нов} \beta / 360$ .

$$\bar{\delta} = \frac{l_1 \cdot (R_{нов} + R_{пл} + \delta_0) - 0,5 \cdot \left( l_1 \sqrt{R_{нов}^2 - l_1^2} + R_{нов}^2 \cdot \arcsin l_1 / R_{нов} \right) - 0,5 \cdot \left( R_{пл} \cdot l_1 \sqrt{1 - l_1^2 / R_{пл}^2} + \arcsin l_1 / R_{пл} \right)}{\pi R_{нов} \beta / 360} \quad (22)$$

$\beta = \frac{360}{2N}$ , де  $N$  – кількість ребер.

### Висновки

В роботі отримані аналітичні залежності для параметрів плівки рідини на вертикальній оребреній поверхні. Ці залежності можуть бути використані у якості краєвих умов при розрахунку поля швидкостей у плівці рідини на оребреній поверхні, витрат рідини, мінімальної густини зрошення та дослідженні коефіцієнтів тепловіддачі при нагріванні плівки рідини та при її випаровуванні.

### Список літератури

1. Xuehu Ma, A. Briggs, J. Rose. Heat transfer and pressure drop characteristics for condensation of R113 in a vertical micro-finned tube with wire insert. International communications in heat and mass transfer. 2004, Vol. 31, № 5, pp. 619-627.
2. Park, I.S. Numerical analysis for flow, heat and mass transfer in film flow along a vertical fluted tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(1-3), pp. 309–319.
3. Dengliang, Z., Hong, X., Yan, S., & Baojin, Q. (2010). Numerical heat transfer analysis of laminar film condensation on a vertical fluted tube. Applied Thermal Engineering, 30(10), 1159–1163.
4. Cho, J. M., Kim, Y. J., & Kim, M. S. Experimental studies on the characteristics of evaporative heat transfer and pressure drop of CO2/propane mixtures in horizontal and vertical smooth and micro-fin tubes. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(1), 170–179.
5. Aroonrat, K., & Wongwises, S. Evaporation heat transfer and friction characteristics of R-134a flowing downward in a vertical corrugated tube. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(1), 20–28.
6. Tong, P., Fan, G., Sun, Z., & Ding, M. Experimental study of steam–air condensation over a vertically longitudinal finned tube. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89, 1230–1238.
7. Tong, P., Fan, G., Sun, Z., Ding, M., & Su, J. An experimental investigation of pure steam and steam–air mixtures condensation outside a vertical pin-fin tube. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 69, 141–148.
8. Yildiz, S., Duymaz, G., Ziegler, F., & Auracher, H. Heat transfer during reflux condensation of R134a inside a micro-fin tube with different tube inclinations. International Journal of Refrigeration, 2017, 74, 425–434.
9. Talesh Bahrami, H. R., Saffari, H. Theoretical study of stable dropwise condensation on an inclined micro/nano-structured tube. International Journal of Refrigeration, 2017, 75, 141–154.
10. Fan, G., Tong, P., Sun, Z., Chen, Y. Experimental study of pure steam and steam–air condensation over a vertical corrugated tube. Progress in Nuclear Energy, 2018, 109, 239–249.

УДК 66.045.12

**П.А. Барабаш**, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-1252-494X  
**А.С. Соломаха**, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-1061-6277  
**В.В. Серeda**, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-4645-3123  
**Н.В. Совинский**, магистр, **ORCID** 0000-0001-8734-1411  
**Национальный технический университет Украины**  
**«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПРОДОЛЬНОМ ОРЕБРЕНИЕМ

*Рассмотрены особенности распределения пленки жидкости при ее течении по вертикальной поверхности с продольными ребрами. На основе анализа сил, действующих в пленке жидкости при отсутствии межфазного трения между жидкостью и газовой средой, получены зависимости, описывающие форму поверхности жидкости в межреберном промежутке. Показано, что когда плотность орошения больше минимальной, при которой оребренная поверхность будет гарантировано полностью смоченной (минимальная толщина пленки на середине межреберных промежутков  $> 0$ ), поверхность пленки жидкости принимает форму с ровной кривизной. В зависимости от конкретных поперечных геометрических размеров трубы ребра и межреберных промежутков поверхность жидкости*

может иметь как вогнутую, так и выпуклую форму. Полученные результаты дают возможность определить граничные условия на межфазной поверхности (жидкость - газ), которые необходимы для аналитических и экспериментальных исследований гидродинамики и тепломассообмена при течении жидкости по вертикальной оребренной поверхности.

**Ключевые слова:** пленка жидкости, продольное оребрение, минимальная плотность орошения, краевой угол смачивания, интенсификация процессов тепломассообмена.

**P. Barabash**, Cand. Sc. Sciences, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-1252-494X  
**A.S. Solomakha**, Cand. Sc. Sciences, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-1061-6277  
**V. Sereda**, Cand. Sc. Sciences, Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-4645-3123  
**M. Sovinskyi**, Msc., **ORCID** 0000-0001-8734-1411

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## STUDY OF THE HYDRODYNAMICS OF THE LIQUID FILM FLOW ON A VERTICAL SURFACE WITH LONGITUDINAL FINNING

*The features of the flow of a liquid film on a vertical surface with longitudinal ribs are considered. The forces that are present in the liquid film in the absence of interfacial friction between the liquid and the gas medium are analyzed. Dependencies are obtained that describe the shape of the surface of the fluid in the space between fins. It was shown that when the irrigation density is greater than the minimum at which the finned surface is guaranteed to be completely wetted (the minimum film thickness in the middle between the fins is greater than zero), the surface of the liquid film has a shape with smooth curvature. Depending on the specific transverse geometric dimensions of the pipe, the ribs and the gaps between the ribs, the surface of the liquid can have either a concave or convex shape. The results obtained make it possible to determine the boundary conditions on the interphase surface (liquid - gas), which are necessary for analytical and experimental studies of hydrodynamics and heat and mass transfer during fluid flow along a vertical fin surface.*

**Key words:** liquid film, longitudinal finning, minimum irrigation density, contact angle, intensification of heat and mass transfer processes.

### References

1. Xuehu Ma, A. Briggs, J. Rose. Heat transfer and pressure drop characteristics for condensation of R113 in a vertical micro-finned tube with wire insert. *International communications in heat and mass transfer*. 2004, Vol. 31, № 5, pp. 619-627.
2. Park, I.S. Numerical analysis for flow, heat and mass transfer in film flow along a vertical fluted tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(1-3), pp. 309-319.
3. Dengliang, Z., Hong, X., Yan, S., Baojin, Q. (2010). Numerical heat transfer analysis of laminar film condensation on a vertical fluted tube. *Applied Thermal Engineering*, 30(10), 1159-1163.
4. Cho, J. M., Kim, Y. J., & Kim, M. S. Experimental studies on the characteristics of evaporative heat transfer and pressure drop of CO<sub>2</sub>/propane mixtures in horizontal and vertical smooth and micro-fin tubes. *International Journal of Refrigeration*, 2010, 33(1), 170-179.
5. Aroonrat, K., & Wongwises, S. Evaporation heat transfer and friction characteristics of R-134a flowing downward in a vertical corrugated tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, 35(1), 20-28.
6. Tong, P., Fan, G., Sun, Z., & Ding, M. Experimental study of steam-air condensation over a vertically longitudinal finned tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 89, 1230-1238.
7. Tong, P., Fan, G., Sun, Z., Ding, M., & Su, J. An experimental investigation of pure steam and steam-air mixtures condensation outside a vertical pin-fin tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 69, 141-148.
8. Yildiz, S., Duymaz, G., Ziegler, F., & Auracher, H. Heat transfer during reflux condensation of R134a inside a micro-fin tube with different tube inclinations. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 74, 425-434.
9. Talesh Bahrami, H. R., Saffari, H. Theoretical study of stable dropwise condensation on an inclined micro/nano-structured tube. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 75, 141-154.
10. Fan, G., Tong, P., Sun, Z., Chen, Y. Experimental study of pure steam and steam-air condensation over a vertical corrugated tube. *Progress in Nuclear Energy*, 2018, 109, 239-249.

Надійшла 19.11.2019  
Received 19.11.2019