

УДК 66.021.4

*В.К. Лукашов^а, Е.В. Костюченко^{а, б}, Т.М. Шевцова^а***МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ В СТИКАЮЧІЙ ПЛІВЦІ РІДИНИ, ЩО ВИПАРОВУЄТЬСЯ В ПЕРЕХРЕСНИЙ ПОТІК НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗУ**^а Шосткінський інститут Сумського державного університету, м. Шостка, Україна^б Сумський державний університет, м. Суми, Україна

Наведені результати дослідження закономірностей теплоперенесення в стикаючій з нагрітої вертикальної поверхні плівки рідини в умовах випаровування в перехресний потік нейтрального (інертного) газу. Це дослідження здійснювали на математичній моделі, заснованій на запропонованих фізичних уявленнях про даний процес, що дозволило отримати диференціальні рівняння теплоперенесення в рідкій плівці і газовій фазі. В результаті чисельного рішення цих рівнянь і за рахунок використання раніше отриманих при розв'язанні гідродинамічної задачі рівнянь встановлені закономірності зміни температури плівки і газового потоку за висотою нагрітої поверхні, а також зміни температури газу за шириною поверхні. Показано, що температура плівки при віддаленні від її початкового перерізу досягає рівноважного значення, а при подальшому збільшенні відстані від цього перерізу відбувається повне випаровування рідини. Розроблений алгоритм розрахунку дозволяє визначити ці відстані за різних вихідних параметрах процесу теплоперенесення. Отримані результати можуть бути використані для розроблення плівкових тепло- і масообмінних апаратів з перехресною взаємодією потоків рідини і газу.

Ключові слова: випаровування, теплоперенесення, плівка рідини, перехресний потік, нейтральний газ, рівноважна температура.

DOI: 10.32434/0321-4095-2020-130-3-108-115

Вступ

Плівкова течія рідини реалізується в багатьох тепло- і масообмінних апаратах, які широко застосовуються в хімічній промисловості. У більшості випадків така течія супроводжується випаровуванням з вільної поверхні плівки. Наявність над цією поверхнею нейтрального (інертного) щодо рідини газу значно впливає на випаровування і теплоперенесення в цій системі. Важливе значення має також організація взаємодії плівки і газового потоку. І якщо для прямого і протитечії теплоперенесення при випаровуванні з рідкої плівки досить добре вивчений, то для перехресної взаємодії цих потоків відомості про його дослідження майже відсутні, що ускладнює розрахунок і моделювання теплоперенесення. У той же час апарати з перехресною взаємодією рідкої плівки і потоку газу мають певну перевагу [1].

Згідно з існуючими уявленнями, теплоперенесення в плівці рідини, що стікає без кипін-

ня з поверхні нагрітої стінки, включає тепловіддачу від стінки до плівки, нагрівання рідини, що супроводжується пароутворенням на вільній поверхні плівки, і тепломасовіддачу від цієї поверхні в середовище, що контактує з нею.

Тепловіддача від стінки до плівки і нагрівання рідини плівки на даний час є найбільш вивченими процесами. В літературі наведені відповідні узагальнюючі залежності і методи розрахунку [2]. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний з математичним моделюванням для конкретних практичних задач. Нагрівання ламінарної рідкої плівки, що стікає з стінки з постійною температурою з урахуванням теплообміну на вільній поверхні плівки без випаровування розглянуто в роботі [3]. Запропонована математична модель дозволяє оцінити відстань, на якій встановлюється рівноважний розподіл температури в плівці. Показано, що ця відстань залежить від напрямку газового потоку: прямоточний рух приводить до його

збільшення, протитечійний – навпаки до зменшення. Модель, що описує міжфазний тепло- і масоперенесення в застосуванні до процесу абсорбції, представлена в роботі [4].

У реальних умовах нагрівання плівки рідини супроводжується випаровуванням в простір над її поверхнею. Якщо цей простір обмежений, що має місце, наприклад, у плівкових випарних апаратах, то випаровування відбувається в системі «рідина–пара», як правило, у рівноважних умовах. Такий процес плівкового випаровування розглядався в публікаціях [5,6]. Значний інтерес із технологічної точки зору становить введення в простір над плівкою рідини, що випаровується, нейтрального газу. Згідно із законом Дальтона в цьому випадку відбувається зменшення тиску пари в парогазовій суміші і відповідно зниження температури процесу [7]. Наявність же над плівкою потоку нейтрального газу інтенсифікує процес випаровування в результаті видалення пари від її поверхні. Зазначений інтерес став причиною появи публікацій, які присвячені моделюванню та експериментальному дослідженню плівкових процесів з випаровуванням в газовий потік, наприклад [8,9]. Однак ці дослідження, як правило, не враховують вказані вище особливості присутності над плівкою потоку нейтрального газу, а у запропонованих математичних моделях розглядається тільки прямоточна та протитечійна взаємодія потоків, а також використовується складний математичний апарат, який не дозволяє проводити інженерні розрахунки.

У зв'язку з цим, завданням даного дослідження була розроблення спрощеної математичної моделі теплоперенесення в стікаючій з нагрітої поверхні плівки рідини, що випаровується, в перехресний потік нейтрального газу, і встановлення на її основі закономірностей цього процесу

Математична модель теплоперенесення

На основі схеми, яка наведена на рис. 1, розглянемо теплові потоки в системі «плівка рідини–газовий потік».

Відповідно до цієї схеми плівка 1 рухається під дією сили тяжіння з поверхні вертикальної стінки 2, рівномірно нагрітої із зовнішньої сторони. Тепло від поверхні передається плівці і в результаті її нагрівання рідина випаровується в простір обмежений стінкою 4. У цей простір у поперечному напрямку рівномірно за висотою нагрітої стінки надходить потік нейтрального газу. Він захоплює пару і виносить його за межі плівки. Приймаємо температуру поверхні на-

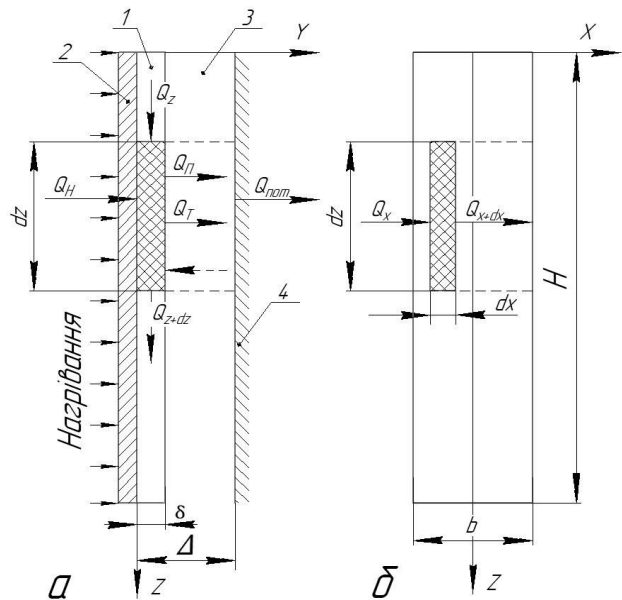


Рис. 1. Схема теплових потоків при взаємодії стікаючої плівки рідини і газового потоку: а – плівка і газова фаза; б – газова фаза. 1 – плівка рідини; 2 – нагріта стінка; 3 – газова фаза; 4 – обмежуюча стінка

грітої стінки постійною, рух плівки й газового потоку, а також теплоперенесення в них такими, що встановилися. Тертям між газом і рідиною нехтуємо. Вважаємо, що теплообмін між плівкою й потоком газу відбувається як за рахунок потоку теплоти, що переноситься з паром, так і за рахунок теплообмінного потоку, що виникає в результаті контакту фаз. І якщо перший потік завжди спрямований від рідкої в газову фазу, то другий, залежно від умов, може мати й зворотний напрям.

Допускаючи, що характеристики рідини плівки в її поперечному перерізі постійні, виділимо в плівці елемент висотою dz (рис. 1, а), для якого запишемо рівняння теплового балансу

$$dQ_H \pm dQ_T + dQ_{пл(z)} - dQ_{пл(z+dz)} - dQ_{г} = 0, \quad (1)$$

де потоки теплоти (Дж/с): dQ_H – що підводиться від нагрітої поверхні; dQ_T – що передається у міжфазному теплообміні (знак «+» – від газової фази, знак «-» – від рідкої фази); $dQ_{пл(z)}$ – що надходить з рідкою фазою; $dQ_{пл(z+dz)}$ – що виходить з рідкою фазою; $dQ_{г}$ – що переноситься в газову фазу з паром.

Члени рівняння (1) запишемо в наступному вигляді:

$$dQ_H = \alpha_{пл} \cdot (t_{ст} - t_{пл}) \cdot b \cdot dz,$$

де $\alpha_{пл}$ – середній коефіцієнт тепловіддачі до плівки, Дж/м²·с·К; $t_{сг}$ – температура поверхні, К; $t_{пл}$ – середня температура рідини в перерізі плівки, К; b – ширина плівки, м;

$$dQ_T = \alpha_T \cdot (t_{пл} - t_r) \cdot b \cdot dz,$$

де α_T – середній коефіцієнт тепловіддачі до газової фази, Дж/м²·с·К; t_r – температура газової фази, К;

$$dQ_{пл(z)} = q \cdot \delta \cdot b,$$

де q – питомий потік теплоти, що переноситься рідиною, Дж/м²·с; δ – товщина плівки, м;

$$dQ_{п} = w \cdot r \cdot b \cdot dz,$$

де w – швидкість випаровування рідини, кг/м²·с; r – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Тепловий потік, що виходить із елемента рідкої фази, запишемо з урахуванням зміни товщини плівки в результаті випаровування рідини

$$dQ_{пл(z+dz)} = b \cdot \left(q + \frac{\partial q}{\partial z} \cdot dz \right) \cdot \left(\delta + \frac{\partial \delta}{\partial z} \cdot dz \right).$$

У розрахунках будемо враховувати, що питомий тепловий потік який переноситься рідиною плівки, дорівнює:

$$q = c_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot u_{пл} \cdot t_{пл}, \quad (2)$$

де $c_{ж}$ – питома теплоємність рідини, Дж/кг·К; $\rho_{ж}$ – густина рідини, кг/м³; $u_{пл}$ – швидкість руху плівки (середня швидкість рідини в перерізі плівки), м/с.

Вводячи величину лінійної (віднесеної до змоченої ширини поверхні, з якої стікає плівка) густину потоку теплоти δq (Дж/м·с) і підставляючи наведені вище вирази теплових потоків у рівняння (1), після відповідних перетворень отримуємо звичайне диференціальне рівняння наступного вигляду:

$$\frac{d(\delta q)}{dz} = f(dq, z), \quad (3)$$

де $f(dq, z) = \alpha_{пл} \cdot t_{сг} \pm \alpha_T \cdot t_r - w \cdot r -$

$$- \frac{\alpha_{пл} \pm \alpha_T}{c_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot u_{пл} \cdot \delta} \cdot (\delta q)$$

Враховуючи, що газовий потік спрямова-

ний поперек руху плівки, розглянемо елемент газової фази шириною dx , розташований над елементом плівки висотою dz (рис. 1,б). Для цього елемента газової фази запишемо рівняння теплового балансу

$$dQ_{(x)} + dQ_{п} \pm dQ_T - dQ_{T(x+dx)} - dQ_{пот} = 0. \quad (4)$$

Члени рівняння (4) виражають потоки теплоти (Дж/с): $dQ_{(x)}$ – що надходить з потоком газу; $dQ_{п}$ – що принесена з парою рідини; dQ_T – що передана при міжфазному теплообміні (знак «+» – від рідкої фази, знак «-» – від газової фази); $dQ_{T(x+dx)}$ – що виходить з потоком газу; $dQ_{пот}$ – що втрачається через огорожувальну стінку.

Ці члени запишемо в наступному вигляді:

$$dQ_{(x)} = q_r \cdot \Delta \cdot dz,$$

де q_r – питомий потік теплоти, що переноситься газом, Дж/м²·с; Δ – відстань від плівки до обмежувачої стінки, м;

$$dQ_{п} = w \cdot r \cdot dx \cdot dz;$$

$$dQ_T = \alpha_T \cdot (t_{пл} - t_r) \cdot dx \cdot dz;$$

$$dQ_{T(x+dx)} = \left(q_r + \frac{\partial q_r}{\partial x} \right) \cdot \Delta \cdot dz;$$

$$dQ_{пот} = K_{oc} \cdot (t_r - t_{oc}) \cdot dx \cdot dz;$$

де K_{oc} – коефіцієнт теплопередачі від газового потоку в навколишнє середовище через обмежувачу стінку, Дж/м²·с·К; t_{oc} – температура навколишнього середовища, К.

Величину питомого потоку теплоти, що переноситься газом, та входить у вищенаведені вирази приймаємо рівною

$$q_r = c_r \cdot \rho_r \cdot v \cdot t_r, \quad (5)$$

де c_r – питома теплоємність парогазової суміші, Дж/кг·К; ρ_r – густина парогазової суміші, кг/м³; v – швидкість газового потоку в просторі між плівкою і обмежувачою стінкою, м/с.

Підставляючи вищенаведені вирази теплових потоків у рівняння (4), після відповідних перетворень, також одержимо звичайне диференціальне рівняння:

$$\frac{dq_r}{dx} = f(q_r, x), \quad (6)$$

$$\text{де } f(q_r, x) = \frac{w \cdot r - \alpha_t \cdot t_{\text{пл}} + K_{\text{oc}} \cdot t_{\text{oc}}}{\Delta} - \frac{(K_{\text{oc}} - \alpha_t) \cdot q_r}{c_r \cdot \rho_r \cdot v \cdot \Delta}$$

Дана математична модель, поряд з рівняннями (3) і (6), які являють собою рівняння теплоперенесення в рідкій плівці і газовому потоці, також включає отримані в роботі [10] рівняння: руху рідини в плівці; нерозривності плівки; масовіддачі від вільної поверхні плівки; матеріального балансу газової фази з речовини, що випаровується; відносного вмісту випарюваної речовини в газовій фазі; закону Дальтона.

Для вирішення такої системи рівнянь використовуємо найпростіший чисельний метод явної схеми Ейлера. У цьому випадку, дискретизуючи розрахунковий інтервал, відповідний до заданої висоти поверхні, на осі Z від $z_0=0$ до $z_n=H$ з прийнятою величиною кроку, замінимо похідну в лівій частині рівняння (3) різницеvim аналогом для деякого i-го поперечного перерізу плівки z_i (рис. 2):

$$\frac{d(\delta q)}{dz} \approx \frac{(\delta q)_{i+1} - (\delta q)_i}{z_{i+1} - z_i}$$

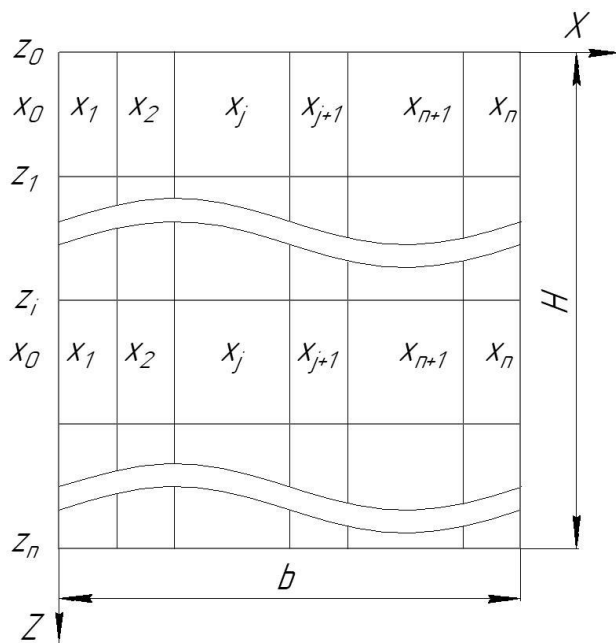


Рис. 2. Схема розрахунків характеристик плівки та газового потоку: i – номер перерізу плівки; j – номер перерізу газового потоку.

Рівняння (3) у цьому випадку можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{(\delta q)_{i+1} - (\delta q)_i}{z_{i+1} - z_i} = f_i$$

$$\text{де } f_i = \alpha_{\text{пл}} \cdot t_{\text{ст}} \pm \alpha_t \cdot t_{r_i} - w_i \cdot r_i - \frac{\alpha_{\text{пл}} \pm \alpha_t}{c_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot u_{\text{пл}} \cdot \delta_i} \cdot (\delta q)_i$$

звідки, використовуючи вираз (2), після відповідних перетворень, отримаємо рекурентну формулу вигляду:

$$t_{\text{пл}(i+1)} = \frac{c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} u_{\text{пл}} \delta_i - (\alpha_{\text{пл}} \pm \alpha_t)(z_{i+1} - z_i)}{c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} u_{\text{пл}(i+1)} \delta_{i+1}} t_{\text{пл}i} + \frac{(\alpha_{\text{пл}} t_{\text{ст}} \pm \alpha_t t_{r_i} - w_i r_i)(z_{i+1} - z_i)}{c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} u_{\text{пл}(i+1)} \delta_{i+1}} \quad (7)$$

де $t_{(r_i)}$, w_i , ρ_i , $u_{\text{пл}i}$, δ_i – середні величини за шириною плівки, постійні на кроці $z_{(i+1)} - z_i$.

Формула (7) дозволяє при відомих значеннях параметрів плівки й газового потоку в перерізі z_i визначити температуру рідини в перерізі плівки $z_{(i+1)}$ і в наступних перерізах розрахункового інтервалу. При цьому середню за шириною плівки температуру газової фази над перерізом плівки z_i , що входить у формулу (7), можна визначити вирішуючи диференціальне рівняння (6) описаним вище методом. Розрахунковим інтервалом у цьому випадку є ширина плівки, дискретизація якої на осі X від $x_0=0$ до $x_i=b$ із заданим кроком дозволяє замінити похідну в лівій частині рівняння (6) різницеvim аналогом для деякого j-го поздовжнього щодо плівки перерізу газової фази x_j над плівкою в межах кроку $z_{(i+1)} - z_i$.

У результаті одержимо рекурентну формулу вигляду:

$$t_{r(j+1)} = \frac{c_{rj} \rho_{rj} v \Delta - (K_{\text{oc}} \pm \alpha_t)(x_{j+1} - x_j)}{c_{r(j+1)} \rho_{r(j+1)} v \Delta} t_{rj} + \frac{(w_j r_j \pm \alpha_t t_{\text{пл}i} - K_{\text{oc}} t_{\text{oc}})(x_{j+1} - x_i)}{c_{r(j+1)} \rho_{r(j+1)} v \Delta} \quad (8)$$

яка за відомих значеннях параметрів для x_j дозволяє визначити температуру газової фази в її перерізі $x_{(j+1)}$ і далі в інших поздовжніх перерізах

газової фази.

При моделюванні теплоперенесення розрахунки проводимо в такій послідовності.

Спочатку встановлюємо залежність $t_r=f(x)$. Для цього, використовуючи результати, отримані в роботі [10] при вирішенні гідродинамічної задачі і виходячи з початкових умов при z_0 для плівки, а також при x_0 для газового потоку, розраховуємо для кожного перерізу x_j на кроці $z_{i+1}-z_i$ (рис. 2) значення швидкості випаровування рідини w_j і за формулою (8) значення температури газової фази t_{rj+1} з урахуванням того, що значення t_{rj} відоме в результаті послідовного розрахунку, починаючи із заданого t_{r0} .

При цьому табличний показник питомої теплоти пароутворення r_j визначаємо для кожного перерізу x_j відповідно до значення t_{rj} , вважаючи його постійним на кроці $x_{j+1}-x_j$ у межах кроку $z_{(i+1)}-z_i$ (рис. 2). За результатами такого розрахунку проводимо чисельне інтегрування отриманої залежності $t_r=f(x)$, а також залежностей $w=f(x)$ і $r=f(x)$ за шириною плівки і обчислюємо середнє значення t_{rj} , w_j , r_j у межах кроку $z_{i+1}-z_i$.

Потім за формулами, отриманими при розв'язку гідродинамічної задачі [10], на кроці $z_{i+1}-z_i$ розраховуємо величини товщини плівки δ_i і швидкість її руху $u_{пл}$, а також за формулою (7) середню температуру рідини в перерізі плівки z_i .

За результатами розрахунків будуємо залежності $t_r=f(x)$; $t_r=f(z)$; $t_{пл}=f(z)$, що характеризують теплоперенесення у системі «плівка рідини – газовий потік».

Результати дослідження закономірностей теплоперенесення

Дослідження проводили за наступними припущеннями, що рідиною, яка стікає з нагрітої поверхні, є вода, а нейтральним газом – повітря. Необхідні для розрахунків значення коефіцієнтів тепловіддачі від поверхні стінки до плівки $\alpha_{пл}$ визначали за формулами, які були взяті з роботи [2], що враховують конкретні режими руху плівки. Коефіцієнт масовіддачі β необхідний для визначення швидкості випаровування рідини, розраховували за відомою формулою Джиллиланда і Шервуда. Коефіцієнт тепловіддачі K_{oc} визначали за залежностями, що виражають тепловіддачу від газового потоку до обмежуючої стінки і від цієї стінки в навколишнє середовище. За встановленими значеннями зазначених коефіцієнтів визначали коефіцієнт тепловіддачі від плівки до газової фази α_r з використанням формули (8) за відомого значення тем-

ператури газової фази на першому кроці x_0-x_1 (рис. 2). Такий підхід заснований на тому, що на цьому досить малому кроці можна знехтувати зміною температури газу і вважати, що вона дорівнює t_{r0} . Отримане значення α_r приймали постійним за шириною плівки.

Результати розрахунків представляли у вигляді графіків зміни температури плівки і температури газу за висотою нагрітої поверхні, а також зміни температури газу над плівкою за її шириною, при різних режимних параметрах теплоперенесення.

На рис. 3 показаний вплив температури поверхні, з якої стікає плівка, на зміну температури плівки за висотою поверхні.

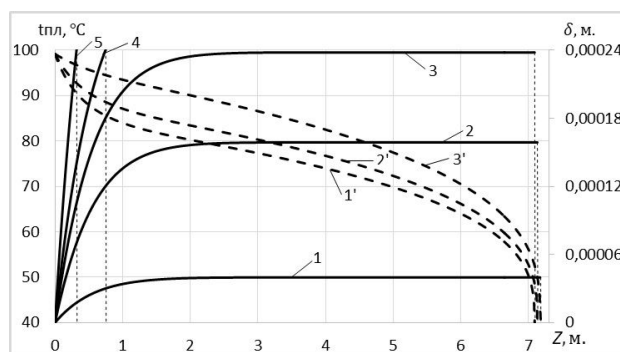


Рис. 3. Зміни температури (суцільні лінії) і товщини (пунктирні лінії) плівки за висотою нагрітої поверхні ($L_0=0,0065$ кг/с; $v=0,75$ м/с; $t_{пл0}=40^\circ\text{C}$; $t_{r0}=125^\circ\text{C}$) за різних її температур: 1 – $t_{ст}=50^\circ\text{C}$; 2 – 80°C ; 3 – 100°C ; 4 – 120°C ; 5 – 177°C

На цьому графіку нанесені також криві зміни товщини плівки, які зменшуються за висотою поверхні в результаті випаровування рідини. Як впливає з цих даних температура плівки в усіх випадках зростає при зі збільшенням відстані від початкового перерізу плівки і за певних умов ($t_{ст}<100^\circ\text{C}$) досягає рівноважної температури (суцільні лінії 1, 2, 3), яка залишається постійною доти, поки рідина повністю не випарується (показано пунктирними перпендикулярами). Про повне випаровування свідчить значення товщини плівки $\delta=0$ (пунктирні лінії 1', 2', 3'). Доцільно зазначити, що відстань, на якій відбувається повне випаровування рідини слабо залежить від температури поверхні. У випадку, коли $t_{ст}>100^\circ\text{C}$, температура плівки швидко доходить до температури кипіння води і плівка руйнується (суцільні лінії 4 і 5).

Температура газу в цих же умовах (рис. 4,а) змінюється за висотою поверхні несуттєво (у

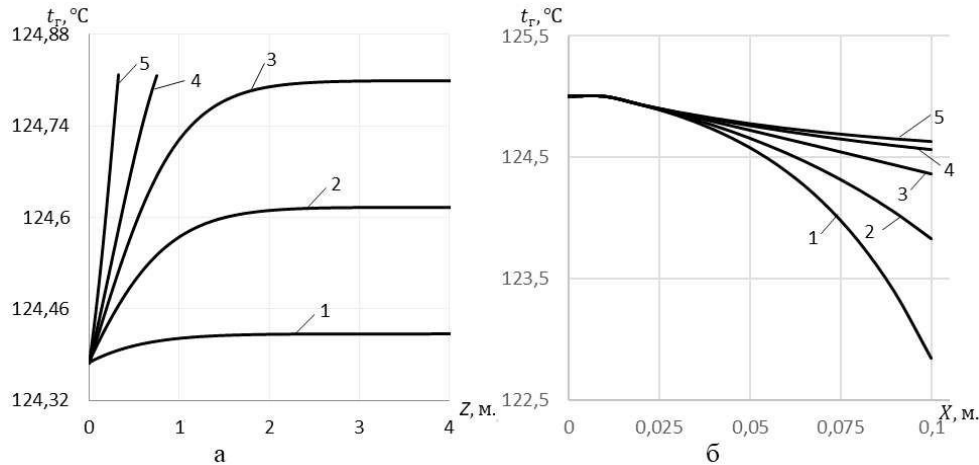


Рис. 4. Зміна температури газу над плівкою ($L_0=0,0065$ кг/с; $v=0,75$ м/с; $t_{н,0}=40^\circ\text{C}$; $t_{г,0}=125^\circ\text{C}$): а – за висотою нагрітої поверхні (1 – $t_{cr}=50^\circ\text{C}$; 2 – 80°C ; 3 – 100°C ; 4 – 120°C ; 5 – 177°C), б – за шириною поверхні при $t_{cr}=150^\circ\text{C}$ (1 – $Z=0$; 2 – 0,5 м; 3 – 1,0 м; 4 – 1,5 м; 5 – 2,0 м)

межах одного градуса), але за своїм характером ця зміна відповідає розподілу температури в плівці рідини.

Приблизно на тій же відстані від початкового перерізу при $t_{cr}<100^\circ\text{C}$ вона також досягає рівноважного значення, яке залишається постійним при віддаленні від початкового перерізу. Зі збільшенням температури поверхні це рівноважне значення зростає (криві 1, 2, 3). При температурі $t_{cr}>100^\circ\text{C}$ температура газу не досягає рівноважного значення у зв'язку з руйнуванням плівки при кипінні рідини (води).

У поперечному напрямку (за шириною поверхні) температура газу над плівкою спочатку падає (рис. 4,б), потім, зі збільшенням відстані від початкового перерізу, це падіння зменшується і при досягненні відстані, на якому в поздовжньому напрямку вона приймає рівноважне значення, падіння стає незначним (криві 4 і 5).

Дослідження впливу витратних параметрів плівки і газу на зміну температури за висотою поверхні плівки показало, що зі збільшенням початкового потоку рідини інтенсивність зміни цієї температури зменшується. Відповідно відстані, на яких досягається рівноважна температура і відбувається повне випаровування рідини, збільшується. При всіх значеннях цього параметра рівноважна температура плівки має приблизно однакову величину, яка наближається до температури поверхні.

Швидкість газу слабо впливає на зміну температури плівки за висотою поверхні. Рівноважна температура плівки має приблизно однакову величину при всіх значеннях швидкості газу, що наближається до температури поверхні, але

відстань, на якій відбувається повне випаровування плівки, зі зростанням швидкості газу зменшується.

Що стосується температурних параметрів процесу перенесення, то, як показали розрахунки (рис. 5), зі збільшенням початкової температури рідини інтенсивність зміни температури плівки за висотою поверхні збільшується, відповідно зменшується відстань, на якому досягається рівноважна температура.

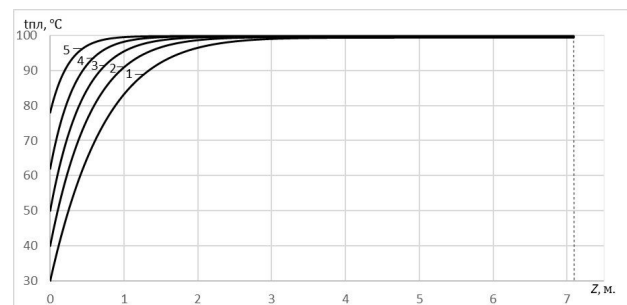


Рис. 5. Вплив початкової температури рідини на зміну температури плівки за висотою поверхні ($t_{cr}=100^\circ\text{C}$; $L_0=0,0065$ кг/с; $v=0,75$ м/с; $t_{г,0}=125^\circ\text{C}$): 1 – $t_{н,0}=30^\circ\text{C}$; 2 – 40°C ; 3 – 50°C ; 4 – 62°C ; 5 – 78°C

Величина рівноважної температури плівки і відстань, на якій плівка повністю випаровується, не залежать від початкової температури рідини.

Зі збільшенням початкової температури газу інтенсивність зміни температури плівки також зростає, відстань на якій відбувається повне випаровування рідини зменшується (рис. 6), а рівноважна температура плівки наближається до

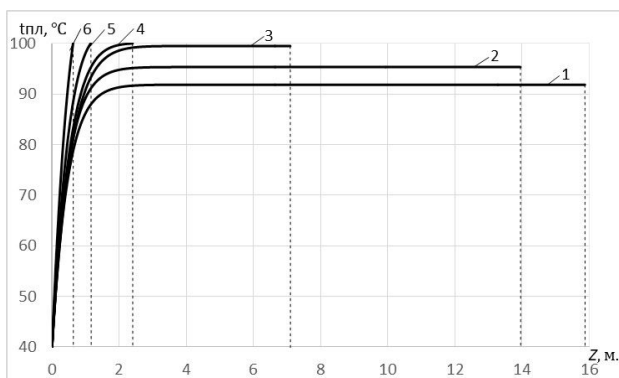


Рис. 6. Вплив початкової температури газу на зміну температури плівки рідини за висотою поверхні ($t_{ст}=100^{\circ}\text{C}$; $L_0=0,0065$ кг/с; $v=0,75$ м/с; $t_{пл0}=40^{\circ}\text{C}$): 1 – $t_{г0}=56^{\circ}\text{C}$; 2 – 80°C ; 3 – 125°C ; 4 – 150°C ; 5 – 170°C ; 6 – 207°C

температури поверхні (криві 1, 2, 3, 4). У тому випадку, коли температура поверхні рівна або більша за температуру кипіння рідини, рівноважна температура плівки не досягається (криві 5 і 6), рідина раніше переходить у стан кипіння й плівка руйнується.

Висновки

На підставі запропонованих фізичних уявлень про теплоперенесення в стікаючій з нагрітої поверхні плівки рідини, що випаровується в перехресний потік нейтрального газу, розроблена спрощена математична модель цього процесу. Дослідження, що проведені за допомогою моделі, дозволили встановити його закономірності, які виражаються в зміні температури плівки і газового потоку за висотою нагрітої поверхні, а також у зміні температури газової фази за шириною поверхні. Встановлений вплив параметрів процесу теплоперенесення на характер зміни вказаних температур. Показано, що температура плівки при віддаленні від її початкового перерізу досягає рівноважного значення, а при подальшому віддаленні рідина повністю випаровується. Розроблений алгоритм розрахунків дозволяє визначити відстані, на яких досягається рівноважна температура плівки і газової фази, а також відбувається повне випаровування рідини. Отримані результати можуть бути використані для розробки плівкових і масообмінних апаратів з перехресною взаємодією потоків рідини і газу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 134162 Україна, МПК С01В 17/88. Апарат для концентрування розчину сірчаної кислоти / В.К. Лукашов, С.М. Романько, Є.В. Костюченко; заявл. 02.10.18; опубл. 10.05.19. Бюл. № 9.
2. Тананайко Ю.М., Воронцов Е.Г. Методы расчета и исследования пленочных процессов. – К.: Техника, 1975. – 312 с.
3. Барташевич М.В., Чиннов Е.А., Актершев С.П. Полуаналитический метод расчета теплопереноса в пленке жидкости в условиях постоянного теплового потока на стенке // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т.55. – № 1. – С.115-121.
4. Islam R.M., Wijesundera N.E., Ho J.C. Simplified models for coupled heat and mass transfer in falling-film absorbers // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2004. – Vol.47. – № 2. – P.395-406.
5. Анализ пленочных испарителей для обработки (облагораживания и охлаждения) гидролизата древесины / Войнов Н.А., Плеханов Ю.В. Смирнова Н.Ю., Лапшевкин Н.В. // Химия растительного сырья. – 2004. – № 2. – С.83-96.
6. Данилов Ю.Б., Ульев Л.М. Теоретические и экспериментальные исследования теплопередачи и кипения в выпарных аппаратах со стекающей плёнкой // Интегрированные технологии та енергозбереження. – 2012. – № 3. – С.84-96.
7. 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.
8. Туз В.Е., Письменный Е.Н., Лебедь Н.Л. Тепло- и массообмен в каналах с сеточным покрытием пленки жидкости при противоточном движении газа // Вост.-евр. журн. передовых технол. – 2009. – Т.4. – № 6(40). – С.63-68.
9. Изучение конвективных течений жидкости и спутного потока газа с учетом испарения / Гончарова О.Н., Резанова Е.В., Люлин Ю.В., Кабов О.А. // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т.55. – № 6. – С.720-732.
10. Lukashov V.K., Kostiuchenko Y.V., Timofeev S.V. Hydrodynamics of a liquid film downflow on a flat surface in evaporation conditions into a flow of neutral gas // J. Eng. Sci. – 2019. – № 1. – P.F19-F24.

Надійшла до редакції 24.02.2020

SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN A FLOWING FILM OF A EVAPORATING LIQUID INTO A CROSS FLOW OF A NEUTRAL GAS

V.K. Lukashov ^{a,*}, Y.V. Kostiuchenko ^{a,b}, T.M. Shevtsova ^a

^a Shostka Institute of Sumy State University, Shostka, Ukraine

^b Sumy State University, Sumy, Ukraine

* e-mail: khtms@ishostka.sumdu.edu.ua

The article presents the results of investigation concerning the heat transfer in a liquid film flowing down from a heated vertical surface and evaporating into a cross stream of a neutral (inert) gas. The cross interaction of fluid and gas flows is of interest from the point of view of increasing the intensity of the evaporation process by removing vapor from the surface of the liquid. The presence of a neutral gas above the film allows reducing the vapor pressure of the vaporized liquid in the vapor-gas mixture and, accordingly, gaining the effect concerned at lower temperatures. The investigation was performed using a mathematical model based on physical concepts, which include assumptions about a constant surface temperature and the absence of friction between the film and gas. When developing the model, it was assumed that the motion of the film and the gas stream as well as the heat transfer in them, is an established processes. The heat transfer between the film and gas stream occurs due to both the heat flow transferred by the steam and the heat exchange flow resulted from the contact of the phases. These ideas allowed obtaining differential equations of the heat transfer in a liquid film and a gas phase. By means of the numerical solution of these equations and using the equations that were previously derived by solving the hydrodynamic problem, the equations were obtained, which describe the changes in the temperatures of the film and gas flow along the height of the heated surface and in the temperatures of the gas along the width of the surface. It is shown that the film temperature reaches an equilibrium value when moving away from its initial section. With a further increase in the distance from the section, the liquid can completely evaporate. The developed calculation algorithm allows determining these distances for various initial parameters of the heat transfer process. The results can be used to develop film heat and mass transfer apparatus with cross-interaction of liquid and gas flows.

Keywords: evaporation; heat transfer; liquid film; cross flow; neutral gas; equilibrium temperature.

REFERENCES

1. Lukashov V.K., Romanko S.M., Kostyuchenko Ye.V., *Apparat dlya kontsentrivann'ya rozchynu sirchanoyi kysloty* [Apparatus for concentration of sulfuric acid solutions]. Patent UA, no. 134162, 2019. (in Ukrainian).
2. Tananaiko Yu.M., Vorontsov E.G., *Metody rascheta i issledovaniya plenochnykh protsessov* [Methods of calculation and investigation of film processes]. Tekhnika Publishers, Kyiv, 1975. 312 p. (in Russian).
3. Bartashevych M.V., Chynnov E.A. Aktershev S.P. Poluanaliticheskii metod rascheta teploperenosa v plenke zhidkosti v usloviyakh postoyannogo teplovogo potoka na stenke [Semi-analytical method of calculation of heat transfer in a liquid film under conditions of continuous heat flow on the wall]. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 2017, vol. 55, no. 1, pp. 115-121. (in Russian).
4. Islam R.M., Wijesundera N.E., Ho J.C. Simplified models for coupled heat and mass transfer in falling-film absorbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, pp. 395-406.
5. Voinov N.A., Plekhanov Yu.V., Smirnova N.Yu., Lapshevkin N.V. Analiz plenochnykh isparitelei dl'ya obrabotki (oblagorazhivaniya i okhlazhdeniya) gidrolizata drevesiny [Analysis of film evaporators for treatment of wood hydrolyzate]. *Khimiya Rastitel'nogo Syrya*, 2004, no. 2, pp. 83-96. (in Russian).
6. Danilov Yu.B., Ulev L.M. Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya teploperedachi i kipeniya v vyparnykh apparatakh so stekayushchei plyonkoi [Theoretical and experimental investigations of heat transfer and boiling in vaporizers with draining film]. *Integrovani Tekhnologii ta Energozberezhennya*, 2012, no. 3, pp. 84-96. (in Russian).
7. Serafimov L.A., Frolova A.V. Soblyudenie pervogo zakona Konovalova v protsesse rektifikatsii s inertnym gazom [Observance of first Konovalov law in rectification process with inert gas]. *Vestnik MITKht*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 45-52. (in Russian).
8. Tuz V.E., Pismennyi E.N., Lebed N.L. Teplo- i massoobmen v kanalah s setochnym pokrytiem plenki zhidkosti pri protivotochnom dvizhenii gaza [Heat and mass exchange in channels with a grid coating of a liquid film at counterflow movement of a gas]. *Vostochno-Evropeiskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii*, 2009, vol. 4, no. 6(40), pp. 63-68. (in Russian).
9. Goncharova O.N., Rezanova E.V., Lyulin Yu.V., Kabov O.A. Izuchenie konvektivnykh techenii zhidkosti i sputnogo potoka gaza s uchetom ispareniya [Investigation of convection currents of fluids and gas streams with regard for evaporation]. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 2017, vol. 55, no. 6, pp. 720-732. (in Russian).
10. Lukashov V.K., Kostiuchenko Y.V., Timofeev S.V. Hydrodynamics of a liquid film downflow on a flat surface in evaporation conditions into a flow of neutral gas. *Journal of Engineering Sciences*, 2019, vol. 6, no. 1, pp. F19-F24.