

# ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.20535/kpissn.2021.3.239569

УДК 536.24

А.С. Соломаха\* , П.О. Барабаш, П.С. Стринада, П.П. Куделя

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

\*corresponding author: as\_solomaha@ukr.net

## МАСОВІДДАЧА ЗА ПРОТИТЕЧІЇ ПЛІВКИ РІДИНИ ТА ГАЗУ У ВЕРТИКАЛЬНІЙ ТРУБІ

Received: 9 Sep. 2021. Accepted: 7 Dec. 2021.

**Проблематика.** Контактні тепломасообмінні апарати застосовуються у багатьох технологічних процесах: охолодженні оборотної води або димових газів, зволоженні повітря у системах кондиціонування та ін. У найпоширеніших апаратах такого типу основними елементами є вертикальні труби, в яких плівка рідини стікає під дією гравітації назустріч потоку газу. Однак не існує універсальної залежності для розрахунку таких процесів.

**Мета дослідження.** Дослідити процес масообміну при протиточковій взаємодії плівки води і повітря у вертикальній трубі до початку виникнення режиму захлинання.

**Методика реалізації.** Було створено експериментальний стенд, в якому дослідною ділянкою слугувала труба внутрішнім діаметром 34 мм та довжиною 1,4 м. На вході та виході з труби вимірювали витрати повітря та води, температури по сухому та мокрому термометру. Змочування поверхні зрошення контролювали візуально через отвори для виходу парогазової суміші у верхній частині дослідної ділянки. Коефіцієнт масовіддачі визначали за спеціально розробленою методикою.

**Результати дослідження.** Отримано експериментальні залежності для визначення коефіцієнту масовіддачі. Показано наявність впливу витрати води на коефіцієнт масовіддачі. Проаналізовано межі застосування аналогії між тепло- та масообміном.

**Висновки.** Запропоновано зручну для інженерних розрахунків емпіричну залежність. Підтверджено надійність методики експерименту та обробки його результатів, що дозволяє використовувати методику для експериментального дослідження більш складних систем. У майбутніх дослідженнях планується більш детально дослідити вплив витрати рідини на процес масовіддачі.

**Ключові слова:** теплообмін; масообмін; контактні тепломасообмінні апарати; режим захлинання.

### Вступ

Контактні тепломасообмінні апарати застосовуються у багатьох технологічних процесах: охолодженні оборотної води або димових газів, зволоженні повітря у системах кондиціонування та ін.

Процеси тепло- та масообміну в таких апаратах відбуваються за контакту рідкої та газової фази (води та повітря або димових газів) на міжфазній поверхні. При цьому тепло- та масообмін загалом визначається геометричними характеристиками поверхні контакту між двома фазами, які, в свою чергу залежать від конструкції апарата.

Одними з найбільш простих та найбільш поширених конструкцій тепломасообмінних апаратів є вертикальні труби, в яких плівка рідини стікає під дією гравітації назустріч потоку газу. Вони

відрізняються не лише простотою конструкції, але й забезпечують високу інтенсивність тепломасообміну. Процесам у апаратах такого типу присвячено багато різноманітних досліджень.

Математичну модель випаровування рідини з ламінарної плівки, що стікає внутрішньою поверхнею гладкої трубки з протитоком ламінарному потоку газу, представлено у [1]; модель підтверджено результатами експериментів. Досліджено інтенсифікацію теплообміну та масопередачі для протитоку гравітаційної плівки води та повітря у вертикальній трубці за допомогою поперечних дротів, розміщених у прикордонному шарі повітря поблизу межі розмежування повітря-вода [2]. Порівняно емпіричні та теоретичні значення характеристик потоку, тепло- та масообміну для протитечії потоку повітря та води у вертикальній

**Рекомендуємо цитувати цю статтю так:** А.С. Соломаха, П.О. Барабаш, П.С. Стринада, П.П. Куделя “Масовіддача за протитечії плівки рідини та газу у вертикальній трубі”, *Наукові вісті КПІ*, № 3, с. 7–13, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.3.239569.

**Please cite this article as:** A.S. Solomakha, P.O. Barabash, P.S. Strynada, and P.P. Kudelya, “Mass transfer in counter-current liquid and gas flow in a vertical pipe”, *KPI Science News*, no. 3, pp. 7–13, 2021. doi: 10.20535/kpissn.2021.3.239569.

круглій трубі [3]. Розглянуто процеси течії та тепломасообмін у вертикальній трубі зі спіральною вставкою і запропоновано поділ на режими течії та формули для розрахунку процесу тепломасообміну [4]. Проведено детальне чисельне дослідження впливу теплової та масової дифузії на турбулентну течію для системи повітря-вода у вертикальній трубці [5]. Експериментально досліджено вертикальний протиточний двофазний потік повітря та води, зроблено спробу виявити та класифікувати режими течії [6], [7]. Проаналізовано тепло- та масообмін плівок спадної води у трубці охолоджувальної камери промислового масштабу за допомогою чисельного моделювання; виявлено значний вплив товщини вхідної водної плівки та швидкості плівки у трубці на тепломасообмін та структуру плівки спадної води [8]. Вивчалось висихання плівки рідини протифазного двофазного потоку газу та рідини у вертикальній трубці [9]. Досліджувалось охолодження вертикальної трубки раповим уведенням спадної плівки рідини за протитоку гарячих газів; експерименти виконувались з різними витратами повітря та спадної рідкої плівки, початковими температурами трубки та переохолодженням рідкої плівки [10]. Описано складну поведінку протиточних потоків повітря-вода в концентричних вертикальних кільцях у широкому діапазоні витрат газу та рідини [11]. Досліджено різні режими течії в концентричному вертикальному кільці 170 на 70 мм і їх перехід точним вимірюванням сигналів тиску протифазної двофазної течії [12]. Узагальнено роботи з CFD-моделювання характеристик гідродинаміки, тепло- та масообміну між гравітаційною плівкою та газом для випадків уловлювання діоксиду вуглецю, дистиляції (опріснення), випаровування та конденсації [13].

Незважаючи на велику кількість досліджень, ряд процесів, пов'язаних з масообміном між рідиною і газом у вертикальних трубах, залишаються мало вивченими. Зокрема не існує універсальної залежності для розрахунку коефіцієнту масообміну при зустрічній течії води і повітря, що спонукає провести спеціальні експериментальні дослідження.

### Постановка задачі

Дослідити процес протитокової взаємодії плівки води і повітря до початку виникнення режиму захлинання та запропонувати розрахункову формулу для знаходження коефіцієнта масовіддачі.

### Експериментальний стенд

Принципова схема стенда для дослідження процесів тепломасообміну у вертикальному плівковому контактному апараті зображена на рис. 1.

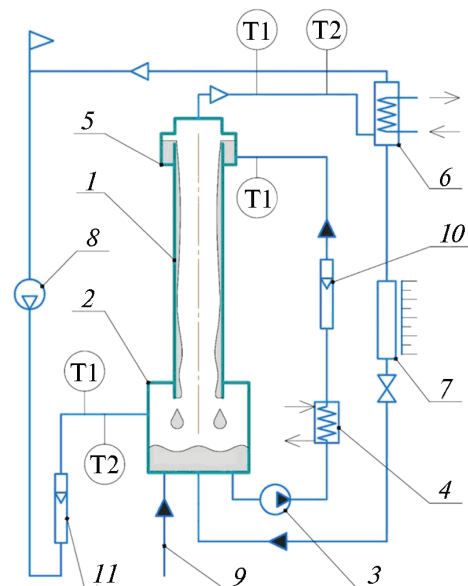


Рис. 1. Принципова схема стенда для дослідження тепломасообміну у вертикально-трубному плівковому контактному апараті: 1 – теплообмінна труба, 2 – збірник, 3 – циркуляційна помпа, 4 – підігрівач, 5 – зрошувач, 6 – конденсатор, 7 – мірник, 8 – повітродувка, 9 – лінія підживлення, 10 – рідинний ротаметр, 11 – повітряний ротаметр.

Основним елементом експериментального стенда є контактний апарат, що складається з теплообмінної труби 1 із внутрішнім діаметром 34 мм і довжиною 1,4 м, збірника 2, циркуляційної помпи 3, підігрівача води 4, зрошувача 5, конденсатора 6, мірника конденсату 7, повітродувки 8, лінії підживлення 9 і ротаметрів: рідинного 10 і повітряного 11. Зовнішня сторона теплообмінної труби була теплоізолювана.

Схема контактного апарата протитечійна: по внутрішній поверхні труби стікає плівка рідини, що взаємодіє із зустрічним потоком повітря. Рідина зі збірника 2 помпою 3 подається в підігрівач 4. Після підігріву до заданої температури рідина подається в зрошувач 5, який розподіляє по внутрішній поверхні труби 1 плівку рідини, що потім стікає у збірник 2. Повітродувка 8 нагнітає у збірник 2 повітря, що потім надходить у трубу 1, де його вологовміст підвищується під час контакту з плівкою підігрітої рідини. Утворена пароповітряна суміш надходить

у поверхневий конденсатор 6, де її вологовміст знижується, а потім повітродувкою 8 подається через повітряний ротаметр 11 до збірника 2. Утворений конденсат відводиться у збірник 2, після чого його кількість визначається в мірнику 7. Витрата рідини на вході у зрошувач 5 вимірюється ротаметром 10, а її температура – хромель-копелевою термпарою. Для визначення інтенсивності тепло- та масообмінних процесів за контакту плівки рідини з пароповітряним потоком вимірюють температуру пароповітряного потоку сухим (T1) і мокрим (T2) термометрами на вході у збірник 2 і на виході з контактного апарата. Контроль за повним змочуванням поверхні зрошення здійснювався візуально через отвори для виходу парогазової суміші у верхній частині дослідної ділянки.

На рис. 2 показано режими гравітаційної течії плівки рідини та зустрічного руху повітря. За невисокої швидкості повітря плівка рухається плавно зверху-вниз майже без збурення (рис. 2, а). Якщо поступово збільшувати швидкість газу, то можна досягти моменту (рис. 2, б), за якого на плівці рідини утворюються хвилі, що газовою фазою рухаються вгору. За подальшого зростання швидкості газу відбувається одночасний рух рідини й вгору, і вниз (рис. 2, в). Перехід до цього режиму називають “захлинанням” (англійською flooding). Швидкість потоку газу, за якої відбувається захлинання, можна ідентифікувати візуальним спостереженням або за стрибкоподібним зростанням гідравлічного опору. Якщо швидкість газу досить висока, вся рідина починає рухатися вгору (рис. 2, г).

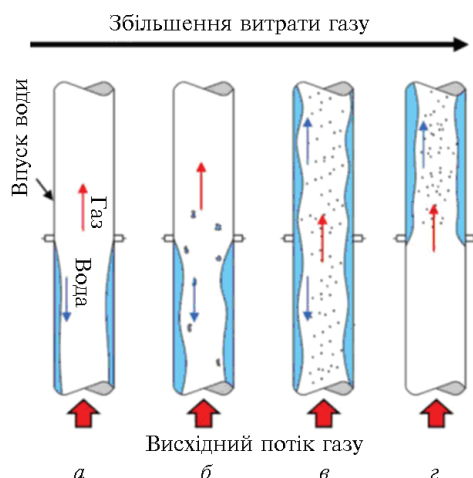


Рис. 2. Режими руху плівки води та повітря у вертикальній трубі: а – течія без збурення; б – хвилі на поверхні рідини; в – режим «захлинання», г – рідина рухається вгору.

У наших попередніх роботах [14], [15] досліджено процеси тепломасообміну в трубі у режимах захлинання. Перед цими дослідженнями для перевірки адекватності методики вимірювання й оброблення результатів виконано тестові дослідження для краще вивченого процесу тепломасообміну за гравітаційного стікання плівки рідини у вертикальній трубі та зустрічного руху повітря.

### Методика розрахунку основних величин

У даній роботі під час оброблення експериментальних даних зроблено такі припущення:

- 1) усі теплофізичні властивості теплоносіїв (води та повітря) залишаються постійними;
- 2) коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha$  і масовіддачі  $\beta$  також є постійними на дослідній ділянці;
- 3) парціальний тиск повітря дорівнює барометричному тиску;
- 4) витрата води залишається постійною в процесі взаємодії води та повітря (нехтуємо частковим випаровуванням води за контакту з повітрям, вологість якого менша ніж 100 %);
- 5) температура поверхні рідини в заданому перерізі дорівнює середній температурі плівки рідини в цьому ж перерізі.

Тож, згідно з [16]–[18], можна записати такі рівняння:

Кількість теплоти  $dQ_\alpha$ , що передається від води до повітря конвекцією через ділянку трубки довжиною  $dx$ :

$$dQ_\alpha = m_w c_w \frac{dt_w}{dx} dx = m_n c_n \frac{dt_n}{dx} dx, \quad (1)$$

де  $m_w$  – масова витрата води, кг/с;  $m_n$  – масова витрата повітря, кг/с;  $c_w$  – теплоємність води, кДж/(кг·К);  $c_n$  – теплоємність повітря, кДж/(кг·К);  $t_w$  – температура води, °С;  $t_n$  – температура повітря, °С.

Кількість теплоти  $dQ_\beta$ , що передається внаслідок випаровування води та підвищення вологовмісту повітря:

$$dQ_\beta = d(m_w r) = m_n r \frac{dd}{dx} dx, \quad (2)$$

де  $r$  – теплота випаровування води, кДж/кг;  $d$  – вологовміст повітря, кг/кг.

Крім того, можна скористатися аналогією між тепло- та масообміном (у якій враховують напівпроникність на границі розділення фаз газ-рідина), що її для тисків, близьких до атмосферного, можна записати так [17], [18]:

$$\alpha = \beta c_a \left( \frac{p_n - p_n''}{p_n} \right), \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $p_n$  – тиск повітря, Па;  $p_n''$  – парціальний тиск пари біля поверхні рідини, Па.

Якщо скласти рівняння теплового балансу для виділеної елементарної ділянки  $dx$  із рівнянь (1) і (2) з урахуванням рівняння (3), можна отримати [17], [18]:

$$\frac{m_n}{\beta dF} \frac{dh}{(h'' - h)} = \frac{m_a c_a}{\beta dF} \frac{dt}{(h'' - h)}, \quad (4)$$

де  $F$  – площа теплообмінної поверхні, м<sup>2</sup>;  $h_n$  – ентальпія повітря, кДж/кг;  $h_a$  – ентальпія води, кДж/кг;  $t$  – температура води;  $h''$  – ентальпія насиченого повітря за середньої температури  $t_{cp} = (t_1 - t_2)/2$ .

Рівняння (4) враховує повну кількість теплоти, що передається в апараті конвекцією, теплопровідністю та випаровуванням.

В інтегральній формі рівняння (4) можна записати як

$$\frac{m_n}{\beta F} \frac{(h_2 - h_1)}{\Delta h_{cp}} = \frac{m_a c_a}{\beta F} \frac{(t_2 - t_1)}{\Delta h_{cp}}, \quad (5)$$

де індекси 1 і 2 – відповідно параметри на вході та виході;  $\Delta h_{cp}$  можна розрахувати методом Л.Д. Бермана [16]:

$$\Delta h_{cp} = \frac{(h_1'' - h_2) - (h_2'' - h_1)}{\ln \frac{h_1'' - h_2 - \delta h''}{h_2'' - h_1 - \delta h''}}, \quad \delta h'' = \frac{h_1'' - h_2'' - 2h''}{4},$$

де  $h_1''$  і  $h_2''$  – ентальпія насиченого повітря біля поверхні води за відповідної температури.

З рівняння (5) можна визначити коефіцієнт масовіддачі:

$$\beta = \frac{m_n (h_2 - h_1)}{F \Delta h_{cp}} = \frac{m_a c_a (t_2 - t_1)}{F \Delta h_{cp}}. \quad (6)$$

У рівнянні (6) коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці вологовмістів повітря біля поверхні рідини та вдалині від неї, можна отримати з експерименту за відомими витратами та параметрами теплоносіїв.

З експерименту встановлено температуру повітря сухим і мокрим термометрами на вході та виході з установки, температуру води на вході та виході з установки, витрату води та паропові-

тряної суміші. Після вимірювання автоматично оброблено первинні дані з використанням таких рівнянь для розрахунку відповідних величин:

1) відносної вологості повітря

$$\varphi = \frac{p_m}{p_n} - A \frac{B}{p_m} (t_c - t_m),$$

де  $A = \left( 65 + \frac{6,75}{w} \right) \cdot 10^{-5}$ ;  $w$  – швидкість газу, м/с;

$B$  – барометричний тиск, Па;  $p_m$  і  $p_n$  – відповідно тиск насичення за температури мокрого та сухого термометрів, Па; тиск насичення при відповідних температурах сухого і мокрого термометрів розраховувався за залежністю:

$$\lg p = \frac{156 + 8,12t}{236 + t};$$

2) вологовмісту

$$d = 622 \frac{\varphi p_m}{B \varphi p_n};$$

3) ентальпії вологого повітря

$$h = t + 0,001d(2493 + 1,97t).$$

### Результати експериментального дослідження

На рис. 3 показано залежність коефіцієнта масовіддачі від швидкості руху повітря у вертикальній трубі за постійної витрати води 2,4 л/хв. Зростання швидкості повітря  $w$  вище за 3,6 м/с викликає захливання дослідної ділянки з подальшим переходом до супутнього руху повітря та води. Перехід до цього режиму ідентифікували візуально та за різким зростанням перепаду тиску на дослідній ділянці. Детальніше цей процес ми розглянули в роботі [14].

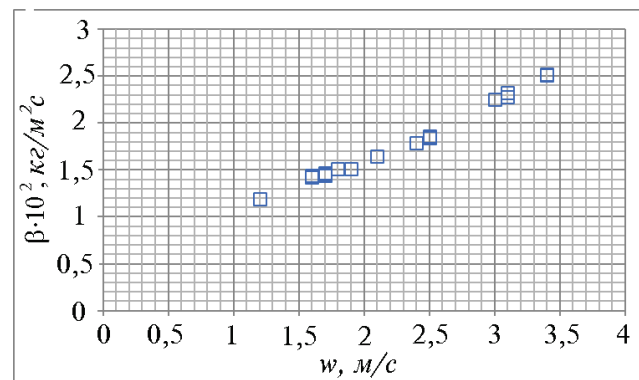


Рис. 3. Залежність коефіцієнта масовіддачі від швидкості руху повітря у вертикальній трубі

При узагальненні процесів масовіддачі використовують [17], [18] критеріальне рівняння виду

$$Sh = f(Re, Sc).$$

У цьому рівнянні число Шервуда:

$$Sh = \frac{K \cdot d}{D},$$

де  $d$  – діаметр трубки, м;  $D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;  $K$  – коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці концентрацій, м/с. Зв'язок між  $\beta$  і  $K$  записують як

$$K = \frac{\beta \cdot R_n \cdot T_n}{p_n}, \text{ м/с,}$$

де  $R_n$  – газова стала повітря, Дж/(кг·К);  $p_{\text{пов}}$  – тиск повітря, Па;  $T_n$  – середня температура повітря в трубі, К.

Число Рейнольдса:

$$Re_n = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu},$$

де  $w$  – швидкість повітря в трубі, м/с;  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря, м<sup>2</sup>/с;  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря, кг/(м<sup>2</sup>/с);  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Число Шмідта:

$$Sc = \frac{\nu}{D}.$$

Існує аналогія між процесами конвективного теплообміну та масообміну. В умовах малого потоку маси коефіцієнти для масової конвекції можна визначити, підібравши відповідне співвідношення конвективного числа Нуссельта для цієї геометрії й аналогічних умов, замінивши число Нуссельта на число Шервуда, а число Прандтля на число Шмідта. З використанням вказаної аналогії для випадку турбулентної течії в круглій трубі число Шервуда можна записати [9], [17] так:

$$Sh = 0,023 Re_n^{0,8} Sc^{0,4}. \quad (7)$$

На рис. 4 експериментальні дані наведено в безрозмірних координатах. Усі дані можна з достатньою точністю узагальнити рівнянням, яке відрізняється від рівняння (7) лише показником степеня біля числа Рейнольдса – 0,83 замість 0,8:

$$Sh = 0,023 Re_n^{0,83} Sc^{0,4}. \quad (8)$$

Як видно з формул (7) і (8), у них взагалі не враховують вплив витрати рідини на процес масообміну. Тому проведено дослідження для встановлення характеру впливу витрати рідини на коефіцієнт масовіддачі у вертикальній трубі за незмінної витрати повітря  $w_{\text{пов}} = 2,2 \dots 2,4$  м/с (рис. 5). Витрата рідини змінювалася від мінімально можливої для повного змочування внутрішньої поверхні трубки до настання режиму захливання.

За меншої витрати води експериментальні дані наближаються до класичної формули (7) з показником степеня 0,8 біля числа Рейнольдса, що відповідає випадку повної аналогії між конвективним теплообміном і масообміном.

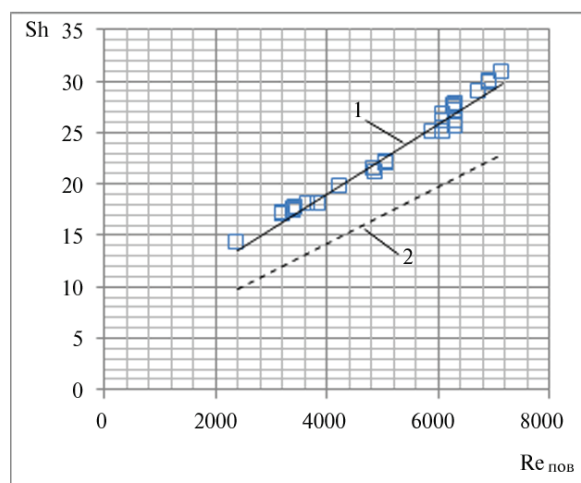


Рис. 4. Залежність числа Шервуда від числа Рейнольдса у вертикальному плівковому апараті: точки – експеримент; 1 – розрахунок за рівнянням (8); 2 – розрахунок за рівнянням (7)

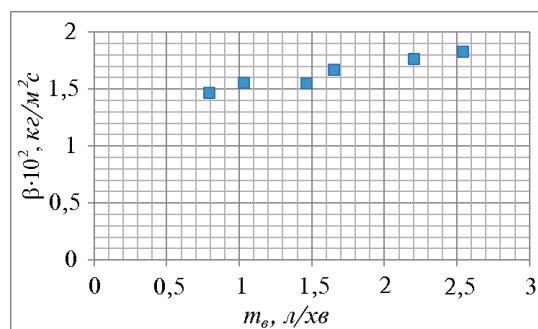


Рис. 5. Вплив витрати рідини на коефіцієнт масовіддачі у вертикальному плівковому контактному апараті

### Обговорення результатів

Отримані результати доводять, що необхідно бути обережними, використовуючи аналогію

між тепло- та масообміном. Є кілька факторів, які впливають на точність співвідношення (7). По-перше, розрахункові формули для числа Нуссельта зазвичай виведені для гладких поверхонь, тоді як для нашого випадку масообміну відбувається стікання плівки рідини, що за високих витрат перестає бути гладкою, а на ній з'являються хвилі. По-друге, більшість розрахункових формул для числа Нуссельта отримано для ситуацій із постійною температурою поверхні, тоді як масова концентрація водяної пари у пароповітряній суміші найчастіше непостійна по всій поверхні. Спосіб подачі рідини в контактну зону також може спричинити певні відхилення, особливо якщо це відбувається зі значним збуренням плівки рідини.

Зазначене вище дає можливість зробити висновок, що за зростання витрати рідини відбувається інтенсифікація масообміну та відхилення отриманих експериментальних даних від формули (7). Однак урахування впливу витрати рідини на інтенсивність процесів потребує подальших досліджень.

## References

- [1] J. R. Conder, D. J. Gunn, and M. Ashfaq Shaikh, "Heat and mass transfer in two-phase flow – a mathematical model for laminar film flow and its experimental validation", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 25, no. 8, pp. 1113–1126, Aug. 1982, doi: 10.1016/0017-9310(82)90206-X.
- [2] R. L. Webb and H. Perez-Blanco, "Enhancement of Combined Heat and Mass Transfer in a Vertical-Tube Heat and Mass Exchanger", *J. Heat Transfer*, vol. 108, no. 1, pp. 70–75, Feb. 1986. doi: 10.1115/1.3246907.
- [3] S. Wongwises and P. Naphon, "Heat-mass transfer and flow characteristics of two-phase countercurrent annular flow in a vertical pipe," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 25, no. 6, pp. 819–829, Aug. 1998, doi: 10.1016/S0735-1933(98)00068-2.
- [4] H. Y. Kim, S. Koyama, and W. Matsumoto, "Flow pattern and flow characteristics for counter-current two-phase flow in a vertical round tube with wire-coil inserts," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 27, no. 12, pp. 2063–2081, Dec. 2001, doi: 10.1016/S0301-9322(01)00052-0.
- [5] M. Feddaoui, A. Mir, and E. Belahmidi, "Cocurrent turbulent mixed convection heat and mass transfer in falling film of water inside a vertical heated tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 46, no. 18, pp. 3497–3509, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0017-9310(03)00129-7.
- [6] S. Ghosh, D. K. Pratihar, B. Maiti, and P. K. Das, "Identification of flow regimes using conductivity probe signals and neural networks for counter-current gas–liquid two-phase flow," *Chemical Eng. Sci.*, vol. 84, pp. 417–436, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ces.2012.08.042.
- [7] S. Ghosh, D. K. Pratihar, B. Maiti, and P. K. Das, "Automatic classification of vertical counter-current two-phase flow by capturing hydrodynamic characteristics through objective descriptions," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 52, pp. 102–120, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.12.007.
- [8] Y. Wang, Q. Guo, B. Fu, J. Xu, G. Yu, and F. Wang, "Numerical analysis of the flow characteristics and heat and mass transfer of falling-water films in an industrial-scale dip tube of a WSCC in an OMB gasifier", *Ind. & Eng. Chemistry Res.*, vol. 52, no. 26, pp. 9295–9300, Jun. 2013. doi: 10.1021/ie2025294.
- [9] T. Ami, H. Umekawa, and M. Ozawa, "Dryout of counter-current two-phase flow in a vertical tube," *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 67, pp. 54–64, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.09.002.
- [10] S. A. Nada, "Cooling of very hot vertical tubes by falling liquid film in presence of countercurrent flow of rising gases," *Int. J. Thermal Sci.*, vol. 88, pp. 228–237, Feb. 2015. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.10.005.
- [11] B. Wu, M. Firouzi, T. E. Rufford, and B. Towler, "Characteristics of counter-current gas-liquid two-phase flow and its limitations in vertical annuli," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 109, p. 109899, Dec. 2019. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109899.

## Висновки

1. Унаслідок проведених досліджень отримано залежності коефіцієнтів масовіддачі, що якісно сходяться з дослідженнями інших авторів, однак рекомендовані розрахункові залежності не узагальнюють отримані нами дані, що можна пояснити різними умовами взаємодії плівки рідини та повітря. Тому запропоновано емпіричну залежність, що узагальнює наші результати задовільно для інженерних розрахунків.

2. Встановлено, що збільшення витрати рідини та поява хвиль на поверхні плівки рідини порушує аналогію між тепло- та масообміном.

3. Підтверджено надійність методики експерименту та оброблення його результатів, що дає змогу використовувати методику для експериментального дослідження складніших систем.

4. У майбутніх дослідженнях заплановано детальніше дослідити вплив витрати рідини на процес масовіддачі.

- [12] B. Wu, A. S. Ribeiro, M. Firouzi, T. E. Rufford, and B. Towler, "Use of pressure signal analysis to characterise counter-current two-phase flow regimes in annuli," *Chemical Eng. Res. Des.*, vol. 153, pp. 547–561, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.cherd.2019.11.009.
- [13] T. Wen, L. Lu, W. He, and Y. Min, "Fundamentals and applications of CFD technology on analyzing falling film heat and mass exchangers: A comprehensive review", *Appl. Energy*, vol. 261, p. 114473, Mar. 2020. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114473.
- [14] P. A. Barabash, A. S. Solomakha, A. I. Gurov, and O. A. Panchenko, "Regimes of motion of water–air flow in a short vertical tube with the underfeed of phases," *J. Eng. Physics Thermophysics*, vol. 93, no. 2, pp. 443–451, Mar. 2020. doi: 10.1007/s10891-020-02139-y.
- [15] P. A. Barabash, A. S. Solomakha, and V.V. Sereda, "Experimental investigation of heat and mass transfer characteristics in direct contact exchanger," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 162, p. 120359, Dec. 2020. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120359.
- [16] T. K. Sherwood, R. L. Pigford, and C. R. Wilke, *Mass Transfer*, USSR, Moscow, Khimiia, 1982.
- [17] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, 5th ed. McGraw-Hill, 2015.
- [18] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed. McGraw-Hill, 2010.

А.С. Соломаха, П.А. Барабаш, П.С. Стринада, П.П. Куделя

#### МАССООТДАЧА ПРИ ПРОТИВОТОКЕ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ

**Проблематика.** Контактные теплообменные аппараты применяются во многих технологических процессах: охлаждении оборотной воды или дымовых газов, увлажнении воздуха в системах кондиционирования и др. В наиболее распространенных аппаратах такого типа основными элементами являются вертикальные трубы, в которых пленка жидкости стекает под действием гравитации навстречу потоку газа. При этом не существует универсальной зависимости для расчета таких процессов.

**Цель исследования.** Исследовать процесс массообмена для случая противотокового взаимодействия пленки воды и воздуха в вертикальной трубе до начала возникновения режима захлебывания.

**Методика реализации.** Был создан экспериментальный стенд, в котором опытным участком служила труба внутренним диаметром 34 мм и длиной 1,4 м. На входе и выходе из аппарата измеряли расход воздуха и воды, температуры по сухому и мокрому термометру. Смачивание поверхности орошения визуально контролировали через отверстия для выхода парогазовой смеси в верхней части опытного участка. Коэффициент массоотдачи определяли по специально разработанной методике.

**Результаты исследования.** Получены экспериментальные зависимости для определения коэффициента массоотдачи. Показано наличие влияния расхода воды на коэффициент массоотдачи. Проанализированы границы применения аналогии между тепло- и массообменом.

**Выводы.** Предложена удобная для инженерных расчетов эмпирическая зависимость. Подтверждена надежность методики эксперимента и обработки его результатов, что позволяет использовать методику для экспериментального исследования более сложных систем. В будущих исследованиях планируется более подробно исследовать влияние расхода жидкости на процесс массоотдачи.

**Ключевые слова:** теплообмен; массообмен; контактные теплообменные аппараты; режим захлебывания.

A.S. Solomakha, P.O. Barabash, P.S. Strynada, P.P. Kudelya

#### MASS TRANSFER IN COUNTER-CURRENT LIQUID AND GAS FLOW IN A VERTICAL PIPE

**Background.** Contact heat and mass exchangers are used in many technological processes: cooling of circulating water or fume gases, air humidification in air conditioning systems, etc. In the most common types of these devices, the main elements are vertical pipes in which a film of liquid flows down under the pull of gravity against the gas flow. However, there is no universal dependence for the calculation of such processes.

**Objective.** The purpose of the paper is to investigate the process of mass transfer for the case of counter-current interaction of a film of water and air in a vertical pipe before the onset of the flooding regime.

**Methods.** An experimental stand was created, a pipe with an inner diameter of 34 mm and a length of 1.4 m was used as a working area. Air and water flow rates, dry and wet bulb temperatures at the inlet and outlet of the apparatus were measured. The control over the complete wetting of the irrigation surface took place visually through the holes in the exit of the vapour-gas mixture in the upper part of the experimental setup. According to the developed method, the mass transfer coefficient was determined.

**Results.** Experimental dependences for determining the mass transfer coefficient are obtained. The presence of the influence of water consumption on the mass transfer coefficient is shown. The limits of application of the analogy between heat and mass transfer are analysed.

**Conclusions.** An empirical dependence convenient for engineering calculations is proposed. The reliability of the experimental technique and processing of its results is confirmed, which allows using the technique for experimental research of more complex systems. In future studies, it is planned to investigate in more detail the effect of fluid flow on the mass transfer process.

**Keywords:** heat transfer; mass transfer; contact heat and mass transfer devices; flooding mode.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
9 вересня 2021 року

Прийнята до публікації  
7 грудня 2021 року