

УДК 536.24

**В.В. ДУБРОВСЬКИЙ**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,  
Інститут загальної енергетики НАН України,  
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

## ВИСОКОЕФЕКТИВНА ТЕПЛОБМІННА ПОВЕРХНЯ ДЛЯ ПЛІВКОВИХ ПРОЦЕСІВ

*На базі виконаних експериментальних досліджень знайдено вискоефективну теплообмінну поверхню зі сферичними лунками, яку можна використовувати у плівкових технологічних апаратах різного призначення. Наведено переваги профільованих поверхонь над гладкими.*

*Ключові слова:* профільована поверхня, тепловіддача, плівкові процеси.

Плівкові технологічні апарати різного призначення достатньо широко використовуються в промисловості та енергетиці. Інтенсивність тепло- і масообміну в таких апаратах залежить від ефективності процесів, що відбуваються у тонких рідинних шарах, тобто плівках, що стікають по їх поверхнях. Кожний крок, який збільшує інтенсифікацію взаємодії контактуючих фаз, призводить до покращення роботи апаратів і, у кінцевому результаті, до зростання їх продуктивності. Так, на енергетичних плівкових градирнях теплових і атомних електростанцій зниження температури води перед конденсатором на 1°C за рахунок підвищеного теплообміну рідини з повітрям призводить до значного економічного ефекту – зростанню потужності турбіни на 0,4 %. Тому впровадження вискоефективних теплообмінних поверхонь – це актуальна задача. В Інституті загальної енергетики НАН України з метою пошуку таких поверхонь було проведено комплекс експериментальних досліджень процесів теплообміну між плівкою води, що стікає по нахилених

поверхнях. Було досліджено вплив профілювання поверхні на процес, а також різні фактори, що впливають на теплообмін [1, 2]. В результаті дослідів було визначено оптимальний кут нахилу поверхні до горизонту ( $\varphi = 30$  град), що забезпечує найкращу тепловіддачу від води до повітря без утворення бризок при плівковій течії рідини. Експерименти проводились з низкою поверхонь зі сферичними лунками різного розміру, результати порівнювались з течією по гладкій поверхні. Досліди показали, що наявність сферичних лунок на поверхні суттєво інтенсифікує тепловіддачу від стікаючої плівки до повітря у порівнянні з гладкою поверхнею. Перехід від гладкої поверхні до поверхні з лунками призводить до неочікувано високого рівня інтенсифікації теплообміну.

У результаті проведених досліджень в нерухомому повітряному середовищі, а також в умовах поздовжнього та перехресного напрямку повітряного потоку над плівкою води було встановлено, що залежність коефіцієнта тепловіддачі від розмірів сферичних лунок (їх діаметра та глибини) має немонотонний характер. На рис. 1 наведено дані

щодо коефіцієнта тепловіддачі від води до повітря для досліджених п'яти профільованих лотків та гладкого лотка. Стовпчики на діаграмі відповідають різній швидкості повітряного потоку  $V_a$ , м/с, що обдуває стікаючу плівку: стовпчики з косою штриховкою – 4,3; з вертикальною – 3,3; з горизонтальною – 0 (нерухоме повітряне середовище). Експерименти показали, що найбільш інтенсивна тепловіддача має місце на лотку Л16 (діаметр лунок  $D = 16$  мм, їх глибина  $h = 5$  мм) на усіх дослідних режимах, далі йде лоток Л20 ( $D = 20$  мм,  $h = 6$  мм), а потім Л13 ( $D = 13$  мм,  $h = 4$  мм). Замикають низку лотків Л30 ( $D = 30$  мм,  $h = 9$  мм), Л24 ( $D = 24$  мм,  $h = 7,5$  мм) і гладкий. Ймовірно, саме розміри лунок по-різному впливають на гідродинаміку потоку, турбулізацію течії і інтенсифікацію теплообміну.

Ймовірно, таку поведінку можна пояснити складною гідродинамікою течії води по поверхні з лунками. В літературі, яка присвячена дослідженням теплофізики інтенсифікаторів теплообміну (наприклад, в огляді [3]), поверхні зі сферичними виїмками класифікують як поверхні з «дискретною регулярною шорсткістю». Принцип дії таких виїмок базується на організації відривного обтікання

поверхні та формуванні рециркуляційної зони, яка генерує крупні вихорі, що інтенсифікують процес переносу тепла. Ефект інтенсифікації теплообміну на поверхнях зі сферичними лунками пояснюється викидом вихорів із виїмок, які турбулізують потік. Як вказується в [3], глибина елемента шорсткості впливає на турбулізацію і зміну шарів рідини в зоні потоку. Відмічається сильна залежність інтенсивності тепловіддачі у сферичних виїмках від їх глибини. Тому, можливо, геометричні характеристики лунок лотка Л24 погіршують перемішування шарів води при її течії по виїмках у порівнянні з іншими розмірами лунок.

У результаті було знайдено високоєфективну теплообмінну профільовану поверхню, яка може бути запропонована для тепломасообмінних плівкових процесів ( $D = 16$  мм,  $h = 5$  мм, лунки розташовані у шаховому порядку на відстані між їх центрами  $S = 24$  мм). За коефіцієнтом тепловіддачі вона майже утричі перевищує показники для гладкої поверхні. Також визначено, що поперечне обдування плівки води повітрям, коли постійно відбувається приплив свіжого повітря вздовж течії рідини на всій довжині поверхні (перехресна взаємодія фаз), набагато краще,

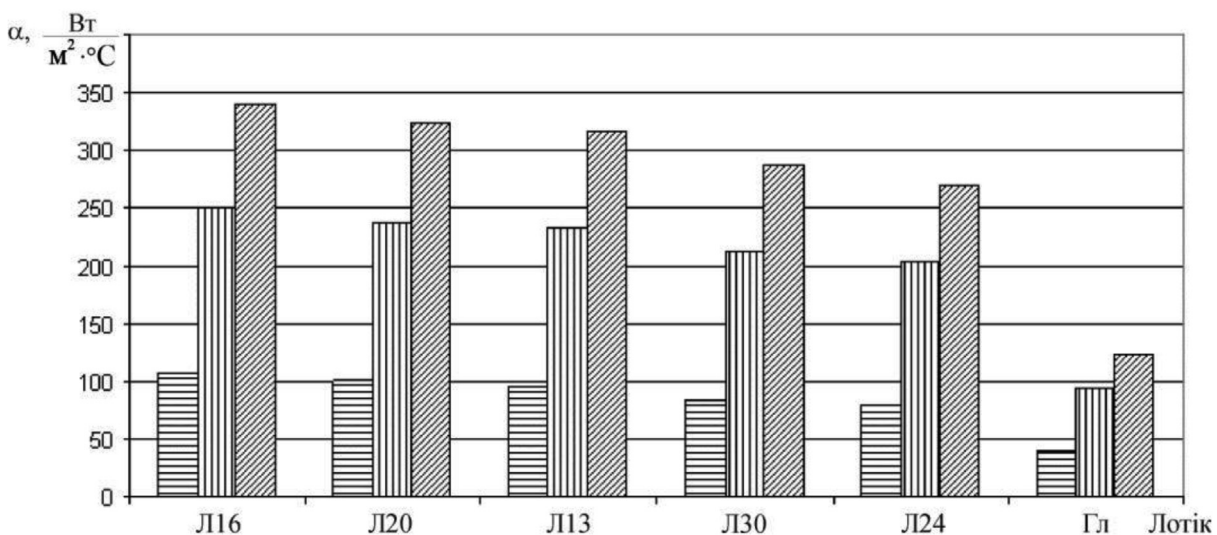


Рис. 1. Коефіцієнт тепловіддачі від води до повітря для лотків з різними розмірами сферичних лунок; витрата води на поверхні  $G = 0,143$  кг/с

ніж обдування в режимі протитечії фаз, коли повітря по мірі руху над плівкою помітно нагрівається. Тому пріоритет треба надавати перехресному руху взаємодіючих фаз вода – повітря. Знайдена поверхня має високу охолоджувальну спроможність і може бути запропонована для контактних теплообмінників різного призначення.

Для цієї профільованої поверхні було здійснено узагальнення масиву експериментальних даних для різних режимів стікання води, а також різних швидкостей повітряного потоку в режимі перехресного руху фаз. Дані було оброблено методом найменших квадратів за допомогою середовища програмування TurboBasic. В результаті отримано емпіричну залежність для безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі – числа Нуссельта ( $Nu = \alpha L / \lambda_a$ ,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від води до повітря,  $L$  – довжина поверхні течії води,  $\lambda_a$  – коефіцієнт теплопровідності повітря) [4]:

$$Nu = 7,3 Re_{пл}^{0,026} Re_{від}^{0,5} (L/l)^{0,57}, \quad (1)$$

у діапазоні  $510 \leq Re_{пл} \leq 3180$ ;  $26070 \leq Re_{від} \leq 1462000$ ;  $3,2 \leq L/l \leq 28,3$ .

Тут числа Рейнольдса для плівки і відносного руху фаз дорівнюють:

$$Re_{пл} = 4G / (l v_w \rho_w); \quad Re_{від} = V_a L / \nu_a, \quad (2)$$

де  $l$  – ширина поверхні течії води,  $v_w, \nu_a$  – коефіцієнти кінематичної в'язкості води та повітря;  $\rho_w$  – густина води.

При розрахунку числа Рейнольдса  $Re_{від}$  для відносного руху фаз вода – повітря слід враховувати їх відносну швидкість, але, оскільки швидкість руху плівки по профільованій поверхні набагато менша, ніж можлива швидкість повітря, що обдуває плівку, можна використовувати замість відносної швидкості лише швидкість повітря  $V_a$ . В нерухомому повітрі, коли  $V_a = 0$ , в формулу для визначення  $Re_{від}$  замість  $V_a$  треба вводити швидкість течії води по поверхні  $V_l$ .

З отриманої формули (1) може бути обчислено ефективний коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ , який для умов експериментів відображає сумарний ефект теплообміну плівки води з повітрям за рахунок конвекції та випаровування рідини.

Обробка даних для гладкого лотка також дозволила знайти емпіричну формулу для числа Нуссельта  $Nu_{гл}$  [5]:

$$Nu_{гл} = 3,18 Re_{пл}^{0,177} Re_{від}^{0,434} \varphi^{0,042} \quad (3)$$

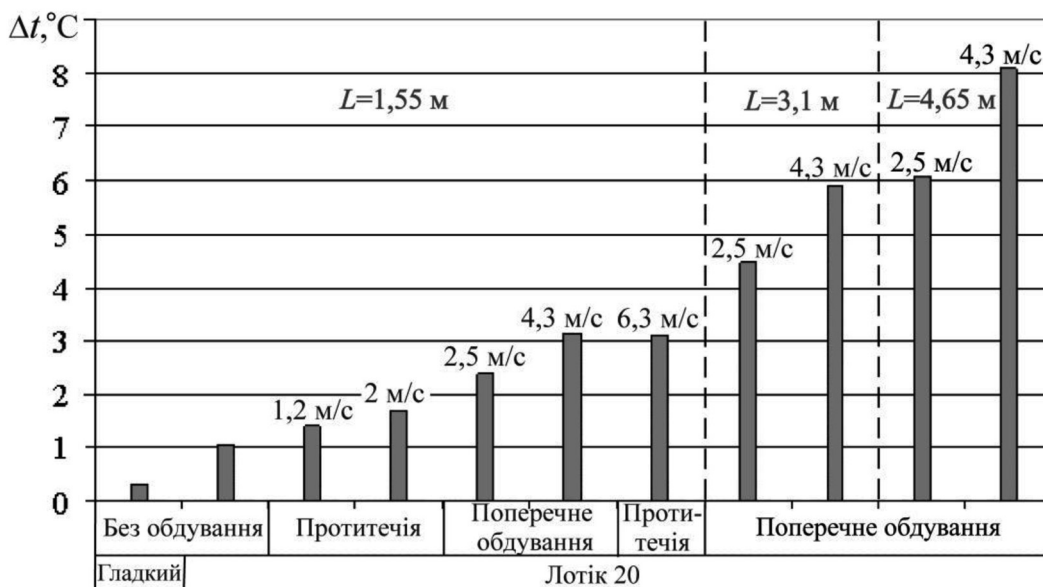


Рис. 2. Охолоджувальна спроможність різних поверхонь

у діапазоні  $1510 \leq Re_{пл} \leq 3980$ ,  $38400 \leq Re_{від} \leq 162100$ ,  $15 \text{ град} \leq \varphi \leq 30 \text{ град}$ .

Одним із напрямків впровадження високоефективних теплообмінних поверхонь зі сферичними лунками може бути їх використання як зрошувачів плівкових градирень. Слід зазначити, що зрошувачі, по яких стікає плівка, повинні бути розташовані в градирні не вертикально (як у типових плівкових градирнях), а під кутом 30 град до горизонту. Для отримання найбільш ефективною тепловіддачі від води на зрошувачах градирні рекомендовано підтримувати об'ємну густину зрошування  $g/l$  в діапазоні від 0,44 до 2,83  $m^3/(m \cdot год)$ , де  $g$  – об'ємна витрата води.

На рис. 2 проілюстровано охолоджувальну спроможність гладкої і профільованої поверхні при різній довжині лотків і різних напрямках та інтенсивностях обдування. Як видно з рисунка, однаковий ступінь охолодження води можна забезпечити за рахунок різних факторів (умови дослідів:  $G = 0,106 \text{ кг/с}$ , початкова температура води  $t_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура оточуючого повітря  $t_a = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ , кут нахилу поверхні  $\varphi = 30 \text{ град}$ ). Наприклад, охолодження приблизно на 6  $^\circ\text{C}$  можна досягти двома способами:

1) за рахунок збільшення довжини потоку до  $L = 4,65 \text{ м}$  при швидкості повітря у поперечному напрямку  $V_a = 2,5 \text{ м/с}$ ;

2) шляхом зменшення довжини потоку до  $L = 3,1 \text{ м}$  (тобто зменшення габаритів апарата), але при цьому треба забезпечити більшу інтенсивність обдування ( $V_a = 4,3 \text{ м/с}$ ). Вибір того чи іншого варіанта здійснюється в залежності від поставленої задачі.

З рисунка також видно, що на довжині течії  $L = 1,55 \text{ м}$ , щоб отримати, наприклад, однакову ступінь охолодження ( $\Delta t \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ) для різних напрямків повітряного потоку, треба підвищити швидкість повітря в режимі протитечії до 6,3 м/с.

Покажемо перспективність впровадження теплообмінної поверхні в енергетиці та промисловості на прикладі плівкових градирень. Необхідність модернізації сучасних баштових градирень не викликає сумнівів. Основна кон-

структивна схема таких градирень з крапельними або плівковими зрошувачами і природною тягою не змінювалися вже майже 100 років. Змінювалися лише розбризкуючі пристрої, а також матеріал і форма зрошувачів. Листи зрошувачів, по яких стікає рідина, завжди розташовуються в градирні вертикально [6].

Таке розташування листів зрошувача в градирні викликано бажанням отримати плівку стікаючої води з обох боків листа з метою збільшення поверхні контакту води з повітрям. Однак такий спосіб течії призводить до дуже невеликого часу контакту фаз, що несприятливо позначається на ступені охолодження.

Подібні типові градирні, як відзначають практично всі дослідники, мають низку суттєвих недоліків. Аеродинаміка градирні складна і непередбачувана, вона істотно залежить від внутрібаштових конструкцій: зрошувачів, водовловлювачів і водорозподільних систем. У градирні намагаються збільшити площу поверхні охолодження, тобто збільшити кількість листів зрошувача, однак це призводить до захаращення перерізу башти і одночасно до великої щільності зрошення.

У результаті істотно зростає аеродинамічний опір потоку охолоджуючого повітря. У просторі башти виникають як вихрові зони, так і застійні, що також помітно погіршує її аеродинаміку. На периферії і в центрі градирні швидкість потоку повітря може відрізнятись в 4–6 разів. Нерівномірність розподілу повітря погіршує роботу градирні. Все це призводить до того, що різниця температур між центром градирні та її периферією може досягати 7  $^\circ\text{C}$ . При експлуатації з погіршенням роботи зрошувачів (викривлення листів, засмічення тощо) аеродинаміка градирні також погіршується.

Відзначаються труднощі, пов'язані з нерівномірним розподілом рідини по площі градирні при розбризкуванні, а також з утворенням струмків на поверхні листів замість однорідної плівки, що погіршує тепловіддачу. До недоліків таких градирень можна також від-

**Таблиця – Приклад переваг профільованого лотка  
у порівнянні з гладким за ефективністю охолодження води**

Поверхня	$V_a$ , м/с	$V_b$ , м/с	$Re_{пл}$	$Re_{від}$	$Nu$	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> °С)	$\Delta t$ , °С
Гладка	0	1,3	1500	346670	3344	22	0,58
Профільована		0,3		80000	5990	39	1,52
	4,3			1146670	22690	147	5,14

нести неможливість ремонту внутрішньо баштових пристроїв під час роботи градирні.

А тепер обґрунтуємо доцільність використання градирень з нахиленими лотками з профільованою поверхнею. Ефективна тепловіддача таких лотків дозволяє істотно знизити загальну площу поверхні зрошувачів, по якій стікає рідина, тобто помітно знизити матеріалоемність. У градирні практично виключається утворення крапель (течія рідини тільки в формі плівок), тому немає необхідності у водовловлювачах. Відсутність водовловлювачів позитивно відображається не лише в помітному зменшенні матеріалоемності градирні, а і в покращенні її аеродинаміки.

Помітно краще можна організувати взаємодію повітря з плівкою рідини. Градирня складається з певної кількості автономних секцій, які розташовуються по периметру всередині башти або по площі іншої спроектованої споруди. За необхідності ремонту або заміни лотків існує легкий доступ до секції в башті або витяг секції з башти без зупинки роботи інших секцій градирні, що дуже важливо при експлуатації. Без зміни ефективності охолодження можна відключати секції, регулюючи продуктивність градирні, що істотно покращує маневреність її роботи.

Слід також відзначити екологічні переваги профільованої градирні: практична відсутність виносу крапель (що одночасно і зменшує втрати рідини) і зниження шуму при роботі. При модернізації існуючих баштових градирень замість зрошувачів, водовловлювачів і водорозподільних систем в башту вводиться певна кількість секцій. При будівництві нових градирень секції компонується

довільно за вибраною конфігурацією градирні. При цьому, як показують розрахунки, можна в кілька разів зменшити площу, займану градирнею в порівнянні з типовою градирнею такою ж продуктивності.

В таблиці як приклад наведено дані щодо переваг профільованої поверхні над гладкою. Тут використовуються розрахунки за отриманими узагальнюючими залежностями (1)–(3). Вихідні дані: профільована поверхня Л16 шириною  $l = 0,8$  м та довжиною течії води по ній  $L = 4$  м, витрата води  $G = 0,3$  кг/с, її температура на вході до поверхні  $40$  °С, температура оточуючого повітря  $24$  °С, взаємодія контактуючих фаз вода – повітря в режимі перехресного руху. Ступінь охолодження  $\Delta t$  визначається за методикою [4].

Як видно з таблиці, в умовах нерухомого повітря коефіцієнт тепловіддачі  $i$ , відповідно, ступінь охолодження води на профільованій поверхні значно кращі у порівнянні з гладкою. Обдування плівки, природно, помітно збільшує інтенсивність тепловіддачі.

## ВИСНОВКИ

Пропонується профільована високоефективна теплообмінна поверхня, яка може бути використана у плівкових апаратах контактного типу. Знайдено оптимальну геометрію цієї поверхні, за якою досягається найбільш інтенсивна тепловіддача від стікаючої плівки рідини до повітря.

1. Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М., Шрайбер А.А. Экспериментальное исследование теплообмена пленки жидкости, стекающей по профилированной поверхности, с воздухом.

*Проблеми загальної енергетики*. 2009. № 19. С. 39–45.

2. Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М. Возможности повышения эффективности работы пленочных градирен при использовании оросителей с профилированной поверхностью. *Проблеми загальної енергетики*. 2011. Вип. 1 (24). С. 40–45.

3. Леонтьев А.И., Олимпиев В.В. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор). *Энергетика*. РАН (Известия АН). 2011. № 1.

4. Дубровський В.В., Підвисоцький О.М., Гришук М.С., Неділько А.П. Тепловіддача на профільованих поверхнях промислових плівкових градирень. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. Вип. 3 (38). С. 50–56.

5. Шрайбер А.А., Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М. Обобщение опытных данных по теплообмену пленки жидкости, стекающей по гладким и профилированным поверхностям, с воздухом. *Промышленная теплотехника*. 2010. Т. 32, № 4. С. 21–27.

6. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. Москва. Энергоатомиздат. 1998. 372 с.

*Надійшла до редколегії 12.09.2017.*