

## ТЕПЛООБМІН У ПЛІВКОВИХ ГРАДИРНЯХ З ПРОФІЛЬОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ЗРОШУВАЧІВ В УМОВАХ ПОЗДОВЖНЬОГО ТА ПЕРЕХРЕСНОГО НАПРЯМКУ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ

*Експериментально досліджено вплив поздовжнього та перехресного напрямку повітряного потоку на тепловіддачу до оточуючого середовища від плівки води, що стікає по профільованій поверхні зі сферичними лунками. Отримано узагальнені безрозмірні залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі від води до повітря для поздовжньої та перехресної взаємодії фаз.*

*Ключові слова:* тепловіддача, профільована поверхня зрошувачів, відносна швидкість води та повітря, поздовжня та перехресна взаємодія фаз.

Пошук можливостей інтенсифікувати процес охолодження циркуляційної води у градирнях становить значний практичний інтерес, оскільки ступінь її охолодження істотно впливає на техніко-економічні показники енергоблоків ТЕС і АЕС та різних промислових об'єктів. Одним із шляхів інтенсифікації охолодження є використання профільованих поверхонь як зрошувачів плівкових градирень. Як показали проведені нами експериментальні дослідження по теплообміну стікаючої плівки води з оточуючим повітрям, нанесення сферичних лунок на плоску поверхню зрошувача істотно підвищує інтенсивність тепловіддачі і, відповідно, ступінь охолодження води [1, 2]. Крім того, при стіканні рідини по лунках істотно знижується середня швидкість течії плівки, що призводить, природно, до помітного збільшення часу контакту фаз вода – повітря у порівнянні з течією по гладкій поверхні. Це також позитивно впливає на охолодження рідини.

Як відомо, процес охолодження циркуляційної води у градирнях істотно залежить від

інтенсивності повітряного потоку, що обдуває плівку. Дослідженню впливу відносної швидкості води та повітря в режимі протитечії контактуючих фаз на їх теплообмін при стіканні плівки по профільованій поверхні присвячена робота [3]. В ній показано наскільки збільшується тепловіддача від плівки води до оточуючого повітря в умовах примусового обдування у порівнянні з нерухомим середовищем.

Але в градирнях, залежно від того, як розташовані зрошувачі відносно потоків повітря, обдування поверхонь з плівкою рідини може бути не лише протитечійне, а і поперечне. Тому мета цієї роботи – дослідження теплообміну між водою і повітрям в умовах поздовжньої та поперечної (перехресної) взаємодії фаз. В експериментах моделювались процеси взаємодії стікаючої по лотках плівки води з повітряним потоком, який у градирнях може утворюватися як природною тягою, так і за допомогою вентиляторів.

**Проведення дослідів.** Під час проведення експериментів за основу був взятий стенд, який докладно описано в роботі [3]. Установку було

модернізовано – виготовлено спеціальну касету з вісьмома осьовими вентиляторами, які були розташовані на стенді вздовж дослідного лотка, по якому стікала вода. Модернізований стенд дозволяв проводити досліди теплообміну в умовах дії повітряного потоку у двох режимах взаємодії контактуючих фаз:

1) протитечії, коли рух повітря за допомогою спеціального пристрою обдування відбувався над поверхнею плівки рідини, що стікала по лотку, назустріч її течії;

2) перехресної течії, коли повітряний потік обдував плівку рідини у поперечному до стікання води напрямку.

На рис. 1 показано фрагмент модернізованого стенда з лотком та пристроями обдування повітрям у двох напрямках.

Досліди проводились на лотках з різними розмірами сферичних лунок, розташованих у шаховому порядку, при різних режимах стікання води та різних швидкостях повітряного потоку. Дані порівнювались з лотком з гладкою поверхнею та з умовами, коли оточуюче повітря було нерухомим.

Лотки було виготовлено з оцинкованої сталі товщиною 0,55 мм. Довжина лотків дорівнювала 1,7 м, їх ширина – 0,18 м, при цьому довжина поверхні зі сферичними лунками становила 1,55 м. Геометричні характеристики лунок наведено в табл. 1, тут  $D$  – діаметр лунки,  $h$  – її глибина,  $S$  – відстань між центрами лунок.

На стенді кут нахилу лотків до горизонту

було вибрано 30 град. Якщо кут був більший, то течія води по лунках призводила до утворення бризок, що небажано. Менший кут нахилу, як показали проведені раніше експерименти, хоча дещо і збільшував час контакту фаз (за рахунок меншої швидкості течії), але приводив до гіршого охолодження, оскільки погіршувалась турбулізація потоку в лунках.

**Таблиця 1 – Геометричні характеристики лунок на лотках**

Лотік	$D$ , мм	$h$ , мм	$S$ , мм	$h/D$
Л30	30	9	60	0,3
Л24	24,4	7,4	48,8	
Л20	20	6	40	
Л16	16,1	4,9	32,2	
Л13	13	4	26	

Вимірювання полів швидкостей повітряного потоку над плівкою здійснювалось за допомогою анемометра з крильчаткою Testo 416. Точність вимірювання дорівнювала 0,01 м/с.

У процесі експериментів дослідні лотки розміщувались на стенді, встановлювались вибраний термостабілізований режим циркуляції води в замкненому контурі, її витрата та інтенсивність повітряного потоку. За допомогою цифрового диференціального термометра проводились вимірювання різниці температур води на початку та в кінці її течії по лотку (ступінь охолодження  $\Delta t$ , точність вимірюван-



**Рис. 1.** Фрагмент експериментального стенда

ня 0,01 град). Методика визначення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  від води до повітря не відрізнялась від тієї, що використовувалась в [3].

**Результати досліджень при протитечійній взаємодії фаз.** Витрата води  $G$  в експериментах змінювалась від 0,068 до 0,143 кг/с, а швидкість повітряного потоку над плівкою – від 0 до 5,4 м/с. Для кожного дослідження визначався ступінь охолодження води  $\Delta t$ , та розраховувались коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha$ .

Як видно з рис. 2, збільшення відносної швидкості  $V_r$  контактуючих фаз приводить, природно, до зростання коефіцієнта тепловіддачі. У порівнянні з гладким лотком тепловіддача на профільованих поверхнях набагато краща. Лотки зі сферичними лунками за рахунок інтенсивної турбулізації потоку води забезпечують більш ефективну взаємодію з повітрям, що призводить до помітної інтенсифікації тепловіддачі. Наприклад, при відносній швидкості 2 м/с коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  зростає у 2,5 – 4 рази у порівнянні з гладким лотком.

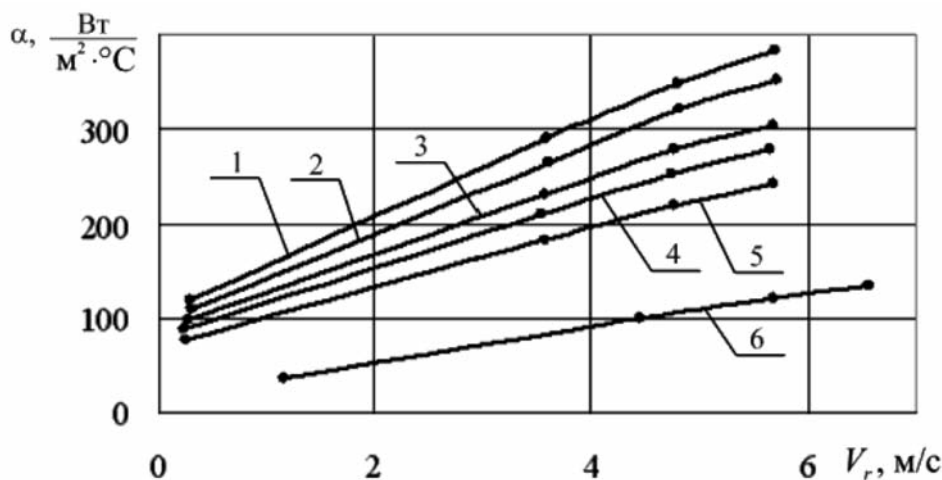
У результаті проведених експериментів було визначено профільовану поверхню з лунками, найбільш ефективну за коефіцієнтом тепловіддачі в умовах нерухомого та рухомого повітря. У дослідженому діапазоні витрат це поверхня з лунками Л16. Поверхні з меншими та більшими лунками давали в експериментах гірші результати.

**Таблиця 2 – Приклад переваг профільованого лотка у порівнянні з гладким за ефективністю охолодження води**

Лотік	$G$ , кг/с	$V_r$ , м/с	$\Delta t$ , °C	
Л16	0,068	3,59	3,53	
		5,69	5,2	
Гладкий		4,46	1,41	
		6,56	1,98	
Л16		0,143	3,79	1,73
			5,89	2,3
Гладкий	4,62		0,67	
	6,72		0,98	

В табл. 2 наведено порівняння охолодження води у профільованому і гладкому лотках в умовах дії повітряного потоку проти течії води.

Отриманий масив даних було проаналізовано та систематизовано. На основі аналізу експериментальних даних було встановлено вигляд узагальнюючої залежності, що враховує вплив відносної швидкості фаз. Дослідні дані було описано як  $\alpha / \alpha_n = A Re_{пл}^m (V_r / V_l)^n$ . Тут  $\alpha$  і  $\alpha_n$  – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від води до повітря на профільованих лотках в умовах примусового обдування плівки повітрям та у нерухомому середовищі. Число Рейнольдса для плівки  $Re_{пл} = 4G / (l v_w \rho_w)$ ,  $l$  – ширина лотка;  $v_w$  та  $\rho_w$  – відповідно коефіцієнт кінематичної в'язкості та густина стікаючої плівки води,  $V_l$  – швидкість руху води по лотку.



**Рис. 2.** Залежність коефіцієнта тепловіддачі від відносної швидкості фаз в режимі протитечії,  $G = 0,068$  кг/с: криві 1 – 5 – профільовані лотки (1 – лотік Л16; 2 – Л13; 3 – Л20; 4 – Л30; 5 – Л24), 6 – гладкий лотік

Обробку даних було виконано методом найменших квадратів у середовищі TurboBasic. В результаті було отримано емпіричну залежність

$$\alpha / \alpha_n = 1,339 \cdot 10^{-2} \operatorname{Re}_{\text{пл}}^{0,484} (V_r / V_l)^{0,626} \quad (1)$$

при  $1510 \leq \operatorname{Re}_{\text{пл}} \leq 3180$ ;  $1 \leq V_r / V_l \leq 23,5$ .

Абсолютне відхилення дослідних даних  $\alpha / \alpha_n$  від розрахункових не перевищує 0,4. Середньоквадратична похибка окремого вимірювання становить 0,176.

Швидкість  $V_l$  течії води по профільованих лотках при різних кутах нахилу та витратах рідини було визначено експериментально. В табл. 3 наведено дані щодо величини  $V_l$  для найкращого з точки зору тепловіддачі профільованого лотка Л16. Для порівняння в таблиці наведено і швидкість течії води по гладкому лотку. Відзначимо, що швидкість течії води по профільованому лотку, яка входить як складова у відносну швидкість фаз вода – повітря, має значно меншу величину порівняно зі швидкістю повітряного потоку. На лотку Л16 в умовах проведених дослідів вона не перевищує 0,49 м/с.

Величина коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_n$  із формули (1) для лотків з лунками при нерухомому повітряному середовищі знаходиться з отриманої раніше [2] емпіричної формули

$$\alpha_n / \alpha_{\text{гл}} = 5,265 (h/b)^{0,115} \operatorname{Re}_{\text{пл}}^{-0,55} \times \operatorname{Re}_{\text{від}}^{0,324} \varphi^{-0,028}, \quad (2)$$

де  $\alpha_{\text{гл}}$  – коефіцієнт тепловіддачі для лотка з гладкою поверхнею,  $b$  – капілярна стала,  $b = (\sigma / (g(\rho_w - \rho_a)))^{0,5}$ ,  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\rho_a$  – густина повітря,  $\operatorname{Re}_{\text{від}}$  – відносне число Рейнольдса,  $\operatorname{Re}_{\text{від}} = V_r L / \nu_a$ ,  $L$  – довжина лотка,  $\nu_a$  – кінематична в'язкість повітря,  $\varphi$  – кут нахилу лотка у градусах. Величина капілярної

**Таблиця 3 – Швидкість течії води по лотку Л16**

Лотік	$G$ , кг/с	$V_l$ , м/с
Л16	0,068	0,29
	0,106	0,4
	0,143	0,49
Гладкий	0,068	1,16
	0,106	1,24
	0,143	1,32

сталої для умов проведених дослідів дорівнювала 2,724 мм.

Значення  $\alpha_{\text{гл}}$  із формули (2) знаходиться згідно з отриманою раніше [2] залежністю

$$\operatorname{Nu}_{\text{гл}} = 3,178 \operatorname{Re}_{\text{пл}}^{0,177} \operatorname{Re}_{\text{від}}^{0,434} \varphi^{0,042}, \quad (3)$$

$$\text{де } \operatorname{Nu}_{\text{гл}} = \alpha_{\text{гл}} L / \lambda_a, \quad (4)$$

$\operatorname{Nu}_{\text{гл}}$  – число Нусельта для гладкої поверхні,  $\lambda_a$  – коефіцієнт теплопровідності повітря.

За формулами (1) – (4) можна визначити вплив відносної швидкості фаз вода – повітря у поздовжньому напрямку на коефіцієнт тепловіддачі при течії води по профільованих поверхнях і розрахувати параметри охолодження за співвідношенням

$$\Delta t = \frac{\alpha F (t_w - t_a)}{cG}, \quad (5)$$

де  $F$  – площа поверхні плівки, що контактує з повітрям;  $t_w$  – середня температура води в лотку;  $t_a$  – температура повітря;  $c$  – питома теплоємність води.

**Результати досліджень при перехресній взаємодії фаз.** Досліди в режимі перехресної течії контактуючих фаз проводились при різних режимах стікання води, на лотках з різними розмірами сферичних лунок, а також різних швидкостях повітряного потоку. Витрата води в експериментах змінювалась, як і раніше, від 0,068 до 0,143 кг/с, а швидкість повітряного потоку над плівкою – від 0 до 4,3 м/с. У результаті проведених експериментів було виявлено, що, як і у випадку з обдуванням проти течії, найкраща тепловіддача від води до повітря має місце на лотку Л16. На рис. 3 показано залежність ступеня охолодження води від відносної швидкості фаз для лотка Л16. Зі збільшенням швидкості обдування плівки ступінь охолодження води зростає. Менша витрата води приводить до кращого охолодження.

Отримані експериментальні дані щодо теплообміну між плівкою води, що стікає по профільованій поверхні, та поперечним потоком повітря для лотка Л16 було оброблено методом найменших квадратів за допомогою програми TurboBasic. В результаті отримано залежність для безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі:

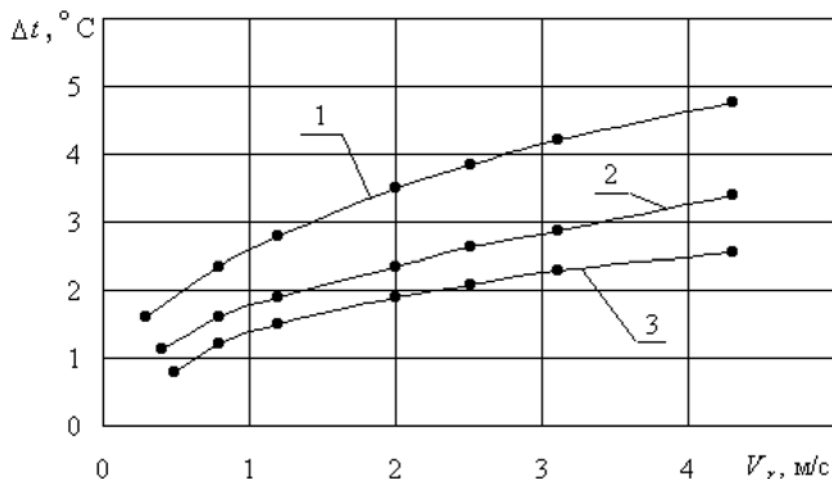


Рис. 3. Залежність ступеня охолодження води від відносної швидкості рідини та повітря в режимі перехресної взаємодії фаз, лоток Л16: крива 1 –  $G = 0,068$ ; 2 –  $0,106$ ; 3 –  $0,143$  кг/с

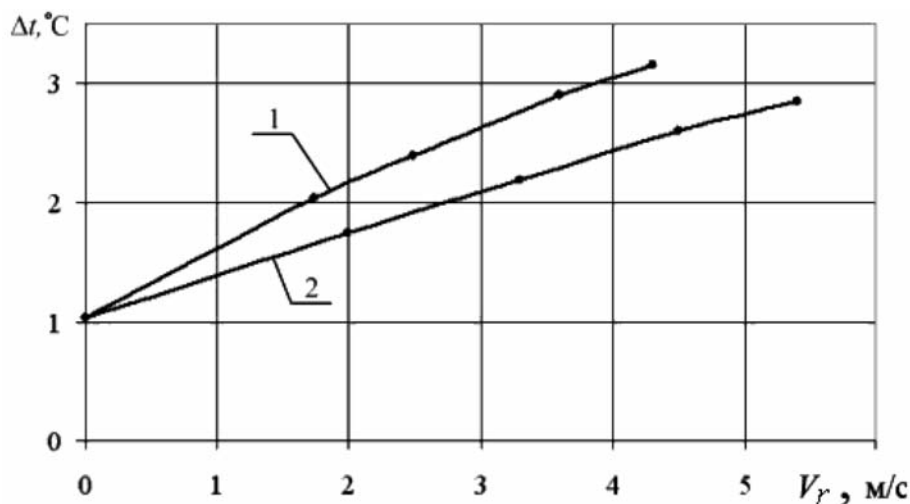


Рис. 4. Вплив напрямку потоку повітря на ступінь охолодження води: крива 1 – перехресна взаємодія фаз; 2 – режим протитечії

$$Nu = 48,8 Re_{пл}^{-0,03} Re_{від}^{0,5} \quad (6)$$

у діапазоні  $1500 \leq Re_{пл} \leq 3180$ ,  $33000 \leq Re_{від} \leq 490000$ . Тут  $Nu$  – число Нусельта для профільованої поверхні ( $Nu = \alpha L / \lambda_a$ ).

Максимальне відхилення експериментальних точок від залежності (6) не перевищує 10,2%, а середнє квадратичне відхилення становить 4%.

**Порівняння поздовжнього та перехресного обдування.** На експериментальному стенді обдування плівки води, що стікала по лотку,

проводилось поперемінно проти і поперек течії води. Досліди показали, що ефективність охолодження води при поперечній взаємодії фаз, коли забезпечується приплив свіжого повітря вздовж всієї стікаючої плівки, вища, ніж у режимі протитечії.

На рис. 4 показано залежність ступеня охолодження води  $\Delta t$  від відносної швидкості повітря  $V_r$  у двох режимах обдування (витрати повітря не контролювались). Дані приведено для профільованого лотка Л20, витрати води  $G = 0,106$  кг/с, температури води на вході в лоток  $t_1 = 40$  °С, температури повітря  $t_a = 23$  °С.

Коли повітря нерухоме, ступінь охолодження дорівнює приблизно  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Під дією повітряного потоку величина  $\Delta t$ , природно, збільшується, але залежно від того, в якому напрямку по відношенню до стікаючої плівки води діє потік, ступінь охолодження різний. Практично однакове значення  $\Delta t \sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  можна забезпечити на обох режимах обдування, але швидкість повітряного потоку в режимі протитечії має бути помітно більша.

## ВИСНОВКИ

Визначено вплив поздовжнього та поперечного обдування повітрям плівки води, що стікає по профільованій поверхні зі сферичними лунками, на теплообмін між рідиною і повітрям. Встановлено, що ефективність охолодження води в режимі поперечної дії повітря вища, ніж у режимі протитечії. Отримано безрозмірні узагальнюючі залежності для визначення тепловіддачі від води до повітря при її течії по профільованих поверхнях зрошувачів в умовах поздовжньої та перехресної взаємодії контактуючих фаз, які можуть бути використані при розрахунках ступеня охолодження у плівкових градирнях.

1. Дубровский В.В., Подвысоцкий А.М., Шрайбер А.А. Экспериментальное исследование теплообмена пленки жидкости, стекающей по профилированной поверхности, с воздухом // Проблемы загальної енергетики. – 2009. – № 19. – С. 39–45.
2. 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.
3. Дубровський В.В., Підвисоцький О.М. Вплив відносної швидкості води та повітря на їх теплообмін при течії плівки по профільованій поверхні // Проблемы загальної енергетики. – 2012. – № 3 (30). – С. 26–29.

*Надійшла до редколегії 05.03.2014*

*Рецензент*

*Зав.відділу оптимізації розвитку  
паливних баз ІЗЕ НАН України,  
канд. техн. наук  
О.В. Стогній*