

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

ISSN 1562-8965. The problems of general energy. 2017, 1(48): 74–78
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2017.01.074>

УДК 536.24

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

РОЗРАХУНОК ОХОЛОДЖЕННЯ РІДИНИ У ПЛІВКОВИХ ГРАДИРНЯХ ІЗ ПРОФІЛЬОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ ЗРОШУВАЧІВ

Розроблено методику розрахунку охолодження рідини для плівкової градирні із профільованою поверхнею зрошувачів. Методика базується на експериментальних дослідженнях, за результатами яких було знайдено високоефективну теплообмінну поверхню зі сферичними лунками, яку можна рекомендувати як зрошувач. Методику розроблено для інженерного використання.

Ключові слова: розрахунок, тепловіддача, охолодження, плівкова градирня.

У рамках задачі пошуку високоефективної теплообмінної поверхні, яку можна буде використати як зрошувач у плівкових градирнях, було проведено комплекс експериментальних досліджень тепловіддачі від стікаючої плівки води до повітря при її течії по профільованих поверхнях [1, 2]. Зміна рельєфу поверхні за рахунок нанесення поглиблень, як показали дослідження, призводить у порівнянні з гладкою поверхнею до інтенсивної турбулізації потоку і значної інтенсифікації теплообміну. В процесі досліджень було виявлено та вивчено низку факторів, які впливають на тепловіддачу на профільованих поверхнях [3, 4]. Аналіз результатів отриманих даних дозволив зробити висновок про те, що до таких факторів відносяться:

– геометрична форма поглиблень на поверхні зрошувача. Серед досліджених чотирьох форм поглиблень (сферичних,

© В.В. ДУБРОВСЬКИЙ, 2017

циліндричних, ромбоподібних та квадратних) найкращими з точки зору тепловіддачі є поверхні з поглибленнями у вигляді сферичних лунок. Саме сферичні лунки за гідродинамікою стікання у поглиблення призводять до найкращої турбулізації течії, перемішуванню шарів рідини і, відповідно, інтенсифікації теплообміну;

– геометричні характеристики поглиблень: їх розмір та глибина. Визначена сукупність певних розмірів сферичних лунок (їх діаметр у площині поверхні течії і глибина), що призводять до інтенсивної тепловіддачі;

– розташування сферичних лунок на поверхні течії. Дослідження з шаховим та коридорним розташуванням лунок показали, що шахове розташування значно краще за тепловіддачею, оскільки турбулізація потоку води по такій поверхні значно краща, ніж при течії при коридорному розташуванні, де спостерігаються незбурені потоки між поглибленнями;

– щільність розташування поглиблень на поверхні зрошувача. Збільшення кількості сферичних лунок на одиниці площі поверхні течії за рахунок кращої турбулізації потоку помітно збільшує коефіцієнт тепловіддачі від води до повітря. Проте, кількість поглиблень на поверхні обмежується конструктивно-технологічними особливостями;

– кут нахилу зрошувача, по якому стікає рідина. Визначено кут, який не уповільнює рух стікаючої плівки води і викликає інтенсивну турбулізацію потоку, але при цьому не призводить до утворення небажаних крапель (бризок) при стіканні;

– витрата води, тобто товщина плівки, що стікає по профільованій поверхні. При занадто великій товщині плівки ефект втручання поглиблень на турбулізацію потоку і перемішування шарів рідини втрачається. Визначено величини об'ємної густини зрошування, що призводять до високого ступеня охолодження у плівкових градирнях;

– ширина зрошувача, яка пов'язана з взаємодією потоку плівки води з оточуючим повітрям, оскільки повітря при русі над плівкою нагрітої рідини нагрівається, і ефект його охолоджувальної спроможності помітно зменшується. Ширина зрошувача залежить також від швидкості повітря, що його обдуває у поперечному до течії води напрямку: чим воно більше, тим ширше може бути зрошувач;

– довжина зрошувача, яка фактично визначає час контакту фаз вода – повітря. Природно, зі збільшенням довжини течії рідина краще охолоджується;

– інтенсивність і напрямок дії повітряного потоку відносно руху потоку рідини. Визначено, що поперечне обдування потоку плівки води повітрям, коли постійно відбувається приплив свіжого повітря вздовж течії рідини на всій довжині зрошувача (перехресна взаємодія фаз), набагато краще, ніж обдування в режимі протитечії фаз, коли повітря по мірі руху над плівкою помітно нагрівається. Відомо, що довжина зрошувача у градирні перебільшує його ширину.

Безумовно, треба також завжди враховувати кліматичні умови (або температурні перепади) взаємодії контактуючих фаз, але це не відноситься до можливостей самих поверхонь.

У результаті було знайдено високоефективну теплообмінну профільовану поверхню. За

коефіцієнтом тепловіддачі вона майже утричі перевищує показники для гладкої поверхні. Це поверхня зі сферичними лунками діаметром $D = 16$ мм та глибиною $h = 5$ мм, розташованими у шаховому порядку на відстані між їх центрами $S = 24$ мм. Така поверхня має високу охолоджувальну спроможність і може бути запропонована для реальних плівкових градирень як зрошувач. 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 ефективної тепловіддачі на зрошувачах градирні рекомендовано створювати об'ємну густину зрошування G/l в діапазоні від 0,44 до 2,83 м³/(м·год), де G – масова витрата води, l – ширина поверхні течії.

Охолодження води при її течії по поверхні зрошувача здійснюється за рахунок конвективного теплообміну плівки з оточуючим повітрям і, крім того, за рахунок масообмінних процесів – випаровування рідини з поверхні плівки. Оскільки в експериментах неможливо було усунути вплив випаровування, в процесі досліджень визначався ефективний коефіцієнт тепловіддачі α , який відображає сумарний ефект охолодження плівки води за рахунок обох процесів.

Методика проведення експериментів та розрахунку ступеня охолодження рідини у плівкових градирнях із профільованою поверхнею зрошувачів взагалі базується на такому.

У дослідах за допомогою високоточного диференціального цифрового термометра визначався ступінь охолодження води – різниця Δt між температурами на вході та виході зрошувача. Потім за отриманими даними за відомою формулою визначалась кількість тепла Q , яка відбиралась від води при її стіканні по лотку:

$$Q = cG\Delta t, \quad (1)$$

де c – питома теплоємність води.

Коефіцієнт тепловіддачі α визначався за формулою:

$$\alpha = Q/(F(t_w - t_a)), \quad (2)$$

де F – площа зрошувача, що покрита плівкою стікаючої води ($F = lL$), t_w – середня температура води на зрошувачі, t_a – температура оточуючого повітря.

Отримані дані експериментів було представлено у вигляді безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі – числа Нуссельта:

$$\text{Nu} = \alpha L / \lambda_a, \quad (3)$$

де L – довжина поверхні течії води, λ_a – коефіцієнт теплопровідності повітря.

Для знайденої високоефективної теплообмінної поверхні було здійснено узагальнення дослідних даних для різних режимів стікання води, а також різних швидкостей повітряного потоку в режимі перехресної течії фаз вода – повітря. Дані було оброблено методом найменших квадратів за допомогою середовища програмування TurboBasic. В результаті отримано емпіричну залежність для числа Нуссельта:

$$\text{Nu} = 7 \text{Re}_{\text{пл}}^{0,026} \text{Re}_{\text{від}}^{0,5} (L/l)^{0,57} \quad (4)$$

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

Тут числа Рейнольдса для плівки і відносно-го руху фаз дорівнюють:

$$\begin{aligned} \text{Re}_{\text{пл}} &= 4G / (l v_w \rho_w); \\ \text{Re}_{\text{від}} &= V_a L / v_a, \end{aligned} \quad (5)$$

де v_w , v_a – коефіцієнти кінематичної в'язкості води та повітря; ρ_w – густина води; V_a – швидкість повітря, що обдуває стікаючу плівку. Зробимо зауваження щодо швидкості повітря. При взаємодії двох фаз вода – повітря треба враховувати їх відносну швидкість. Але, оскільки швидкість руху плівки води по профільованій поверхні зрошувача становить малу величину і яка є набагато меншою у порівнянні з можливою швидкістю повітря, що обдуває плівку, можна використовувати замість відносної швидкості фаз лише швидкість повітря V_a . Додамо до цього, що в умовах нерухомого повітря значення величини V_a у виразі (5) не дорівнює 0, а дорівнює 0,3 м/с, що відповідає швидкості течії води по поверхні зі сферичними лунками під кутом 30 град (тобто відносної швидкості контактуючих фаз).

Для визначення впливу окремих факторів (розмірних величин) на тепловіддачу від води до повітря при її течії по рекомендованій профільованій поверхні формулу (4) можна представити як

$$\text{Nu} = 7,26 L^{1,07} \times V_a^{0,5} \times G^{0,026} \times v_w^{-0,026} \times$$

$$\times \rho_w^{-0,026} \times v_a^{-0,5} \times l^{-0,6}.$$

Як видно, найбільший вплив на число Нуссельта чинить довжина течії рідини (тобто час контакту фаз), а потім у порядку зменшення впливу – швидкість повітряного потоку та витрата рідини.

На коефіцієнт тепловіддачі α окремі фактори впливають так:

$$\begin{aligned} \alpha &= 7,26 \lambda_a \times V_a^{0,5} \times L^{0,07} \times G^{0,026} \times v_w^{-0,026} \times \\ &\times \rho_w^{-0,026} \times v_a^{-0,5} \times l^{-0,6}. \end{aligned}$$

У першу чергу на величину α впливає теплопровідність повітря, меншою мірою його швидкість, довжина течії рідини та її витрата.

Вплив окремих факторів на ступінь охолодження води можна представити так:

$$\begin{aligned} \Delta t &= 7,26 L^{1,07} \times \lambda_a \times \Delta T \times V_a^{0,5} \times l^{0,4} \times \\ &\times v_w^{-0,026} \times \rho_w^{-0,026} \times v_a^{-0,5} \times G^{-0,974} \times c^{-1}, \end{aligned}$$

де ΔT – різниця між середньою температурою води на зрошувачі та температурою оточуючого повітря.

Тут практично однаковий вплив чинять довжина течії води по зрошувачу, теплопровідність повітря та різниця температур ΔT . Меншою мірою впливають швидкість повітря та ширина зрошувача.

Після аналізу параметрів, що впливають на охолоджувальну спроможність профільованих зрошувачів, було розроблено конструктивну схему плівкової градирні [5]. Важливою особливістю таких градирень у порівнянні з типовими плівковими є те, що зрошувачі у вигляді лотків розташовуються у просторі градирні не вертикально, а під кутом 30 град до горизонту на деякій відстані один над одним, утворюючи окремий блок. Кількість блоків градирні визначають її продуктивність. Запропоновано оригінальну компоновку зрошувачів у блоках градирні, що дозволяє маневрувати її продуктивністю, ступенем охолодження циркуляційної води та габаритами.

Для плівкової градирні цього типу розроблено методику розрахунку ступеня охолодження рідини при її течії по рекомендованій профільованій поверхні в умовах нерухомого оточуючого повітря та поперечної дії потоку.

Спочатку задаються геометричні розміри поверхні зрошувача – його ширина l і довжина

L , а також витрата води G та швидкість повітря V_a . Значення цих параметрів необхідно задавати у рекомендованих за результатами експериментів діапазонах, враховуючи вимоги щодо об'ємної густини зрошування, тобто товщини плівок на поверхні течії, при яких має місце їх інтенсивна турбулізація, і досягається ефективне охолодження рідини. Довжина зрошувачів у градирні при їх зигзагоподібному розташуванні [5] не обмежена і пов'язана з її габаритами. Ширина зрошувача, згідно з рекомендаціями, які базуються на проведених експериментах, може досягати 1 м при швидкості повітря у поперечному напрямку до 4,5 м/с.

Потім за отриманою емпіричною формулою (4) знаходимо число Нуссельта, а за формулою (3) обчислюємо коефіцієнт тепловіддачі ($\alpha =$

$= Nu\lambda_a/L$). Далі прирівнюємо величину Q із (1) та (2):

$$cG \Delta t = \alpha F(t_1 - \Delta t/2 - t_a),$$

при цьому середню температуру води на зрошувачі t_w виражаємо як $(t_1 - \Delta t/2)$, де t_1 – температура води, що подається на зрошувач для охолодження, і знаходимо коефіцієнт A :

$$A = 2\alpha F / (2cG + \alpha F). \quad (6)$$

Остаточний ступінь охолодження води у плівкових градирнях із профільованою поверхнею зрошувачів визначаємо з формули:

$$\Delta t = A(t_1 - t_a).$$

Таблиця – Дані розрахунків ступеня охолодження води

Рядки	l , м	G , кг/с	V_a , м/с	L , м	G/l	t_1 , °C	t_a , °C	Nu	α , Вт/(м ² °C)	A	Δt , °C
1	0,8	0,1	4,3	4	0,45	40	24	22050	143	0,708	11,3
2		0,3			1,35			22689	147	0,317	5,1
3		0,6			2,7			23101	150	0,175	2,8
4	0,8	0,3	0,3	4	1,35	40	24	5993	39	0,095	1,5
5			1,4					12946	84	0,194	3,1
6			4,3					22689	147	0,317	5,1
7	0,8	0,3	1,4	4	1,35	40	24	12946	84	0,194	3,1
8				8				27179	88	0,368	5,9
9				16				57061	93	0,642	10,3
10	0,8	0,3	1,4	8	1,35	40	10	27179	88	0,368	11
11							24				5,9
12							30				3,7
13	0,8	0,3	1,4	8	1,35	40	24	27179	88	0,368	5,9
14						50					9,6
15						70					16,9

Знаючи температуру води, яка подається на градирню, та температуру повітря, що взаємодіє з рідиною, можна розрахувавши коефіцієнт A за формулою (6), визнати наскільки охолоне рідина у плівковій градирні з певними заданими параметрами.

В таблиці наведено деякі дані розрахунків ступеня охолодження води у плівковій градирні із профільованою поверхнею зрошувачів при поперечному обдуванні повітрям за вказаною методикою. Рядки 1–3 таблиці характеризують вплив витрати води на зрошувачі на її охолодження при усіх інших незмінних параметрах. Як видно, збільшення витрати у 6 разів призводить до зменшення величини Δt у 4 рази. Впливу швидкості повітря на ступінь охолодження при усіх інших незмінних параметрах відповідають рядки 4–6. Природно, що більша інтенсивність дії повітря приводить до кращого охолодження води. Збільшення швидкості обдування у 14 разів у порівнянні з нерухомим повітрям призводить до покращення величини Δt у 3,4 раза. Рядки 7–9 характеризують вплив довжини течії води по зрошувачу на ефективність її охолодження також при усіх інших незмінних параметрах. Чим довше тече рідина у контакт з повітрям, тим краще вона охолоджується. Збільшення величини L у 4 рази викликає зростання ступеня охолодження у 3,3 раза. Рядки 10–12 таблиці показують як змінюється охолодження при різній температурі повітря, а рядки 13–15 – при різній початковій температурі технологічної води, що подається на зрошувач. Аналізуючи дані таблиці, можна побачити, що майже однаковий ступінь охолодження можна отримати у рекомендованій градирні різними шляхами: наприклад, варіюючи витратою рідини та швидкістю обдування (рядки 3 та 5), або довжиною зрошувача та швидкістю обдування (рядки 2 та 8). Все це розширює можливості маневрування режимними та конструктивно-технологічними параметрами градирні в залежності від заданих умов.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику розрахунку ступеня охолодження рідини для плівкової градирні із профільованою поверхнею зрошувачів в умо-

вах нерухомого повітря та інтенсивного обдування плівки стікаючої води. Методика базується на експериментальних дослідженнях, за результатами яких було знайдено високоефективну теплообмінну поверхню зі сферичними лунками, яку можна рекомендувати як зрошувач. Методику розроблено для інженерного використання.

1. 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.
2. 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.
3. Дубровський В.В., Підвисоцький О.М. Вплив геометричних характеристик поверхні зі сферичними лунками на теплообмін води з повітрям. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 3 (42). С. 50–56.
4. Дубровський В.В. Теплообмін між рідиною та повітрям на поверхнях з різною формою поглиблень. *Проблеми загальної енергетики*. 2016. Вип. 1 (44). С. 41–47.
5. Дубровський В.В. Плівкова градирня із профільованою поверхнею зрошувачів. *Проблеми загальної енергетики*. 2016. Вип. 2 (45). С. 52–56.

Надійшла до редколегії 30.12.2016