

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 536.24

В.В. ДУБРОВСЬКИЙ¹, канд. техн. наук, ст.наук.співр.,
О.М. ПІДВИСОЦЬКИЙ¹, канд. техн. наук, ст.наук.співр.,
М.С. ГРИШУК², **А.П. НЕДІЛЬКО²**

¹ Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172,
м. Київ, 03680, Україна

² Акціонерне товариство «Бротеп-Еко», вул. Кірова, 88,
м. Бровари Київської обл., 07400, Україна

ТЕПЛОВІДДАЧА НА ПРОФІЛЬОВАНИХ ПОВЕРХНЯХ ПРОМИСЛОВИХ ПЛІВКОВИХ ГРАДИРЕНЬ

Експериментально досліджено вплив геометричних розмірів профільованих поверхонь зрошувачів на ефективність охолодження циркуляційної води у плівкових градирнях. Визначено основні фактори, що впливають на тепловіддачу від води до повітря. Знайдено коефіцієнти тепловіддачі для різних режимних параметрів взаємодії фаз. Дослідні дані узагальнено у вигляді безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі – числа Нуссельта. Запропоновано схемні рішення використання профільованих поверхонь у плівкових градирнях та методику розрахунку ступеня охолодження рідини.

Ключові слова: плівкова градирня, профільована поверхня зрошувачів, тепловіддача, ступінь охолодження.

Для охолодження циркуляційної води в енергетиці і промисловості широко використовуються плівкові градирні. Принцип роботи таких установок ґрунтується на контакті з повітрям плівки рідини, яка стікає по поверхнях зрошувачів і охолоджується за рахунок поверхневого випаровування та конвективного теплообміну при контакті фаз. Для забезпечення необхідної площі поверхні контакту градирні обладнують зрошувальними пристроями. Пошук нових форм поверхонь зрошувачів, які можуть підвищити ефективність роботи градирні, є актуальною науковою і технічною задачею.

В Інституті загальної енергетики НАН України останніми роками при вирішенні задачі покращення охолоджувальної спроможності градирень (за участю підприємства «Бротеп-Еко») проведено комплекс досліджень ступеня охолодження Δt води, що стікає не по гладкій поверхні зрошувачів (як у

сучасних типових плівкових градирнях), а по профільованих – поверхнях зі сферичними лунками. Як показали проведені авторами експериментальні дослідження, при течії води по таких поверхнях величина Δt значно збільшується, і ефективність охолодження зростає [1, 2]. Сферичні лунки помітно (у порівнянні з течією по гладкій поверхні) змінюють характер течії плівки. Лунки призводять до утворення вихорів та бурунів у поглибленнях, що істотно турбулізує потік і інтенсифікує теплообмін. Значення коефіцієнтів тепловіддачі α , які було отримано в результаті експериментів, відображали сумарний ефект тепловіддачі – конвективного теплообміну та випаровування, оскільки усунути вплив випаровування у досліді було неможливо. Окремо ступінь впливу випаровування води з поверхні плівки не оцінювався. Необхідно зазначити, що поверхні зрошувачів, по яких стікає плівка, повинні бути розташовані в градирні не вертикально (як у типових плівкових градирнях), а під певним кутом до горизонту.

© В.В. ДУБРОВСЬКИЙ, О.М. ПІДВИСОЦЬКИЙ,
М.С. ГРИШУК, А.П. НЕДІЛЬКО, 2014

Проведені дослідження дозволили запропонувати високоефективні нові поверхні зрошувачів. Визначено найкращу з точки зору тепловіддачі поверхню лотка – Л16 зі сферичними лунками діаметром 16 мм та глибиною 5 мм, розташованими у шаховому порядку на відстані між їх центрами 32 мм. Визначено вплив поздовжнього та поперечного обдування повітрям плівки, що стікає по профільованій поверхні, на теплообмін між рідиною і повітрям [3, 4]. Слід відзначити, що ці експерименти [1–4] було виконано на стенді з невеликими розмірами дослідних поверхонь зрошування – лотків довжиною 1,7 м і шириною 0,18 м. Але з метою використання у плівкових градирнях зрошувачів з профільованою поверхнею, які відповідають їх реальним геометричним характеристикам, необхідно провести експерименти з більшими розмірами зрошувачів, у чому і полягає основна мета цієї роботи. Крім того, було узагальнено отримані дані щодо тепловіддачі від води до повітря для поверхонь, які мають високу охолоджувальну спроможність і можуть бути запропоновані для реальних градирень з відповідними розмірами і продуктивностями.

Проведення дослідів. Експериментальний стенд, на якому проводились дослідження на лотках невеликих розмірів [1 – 4], було реконструйовано, що дозволило провести досліді на широкій поверхні, яка приблизно відповідає реальним розмірам зрошувачів та продуктивностям градирень. Стенд дозволяв встановлювати один дослідний лоток або поруч два чи три лотки з лунками, що були розділені невисокими боковими стінками (буртиками). При цьому загальна ширина поверхні, по якій стікала вода, змінювалась від 180 до 540 мм. За допомогою низки осьових вентиляторів, розташованих вздовж дослідних лотків, плівка води обдувалась потоком повітря у поперечному напрямку. При реконструкції було збережено характеристики стенда щодо циркуляції води у замкненому контурі, її термостабілізації та витрати. На стенді вузол подачі води на лотки було переоброблено таким чином, щоб забезпечити підведення води на кожний лоток з певною витратою. Поперечний потік повітря імітував його рух із вхідних вікон градирні. Вимірювання полів швидкостей повітря над плівкою здійснювалось за допомогою анемометра з криль-

чаткою Testo 416. Точність вимірювання становила 0,01 м/с. Методики проведення експериментів та визначення коефіцієнта тепловіддачі від води до повітря описано в роботах [3, 4].

Запропонована нами нова конструктивна схема плівкової градирні з профільованими зрошувачами (див. нижче) складається з низки лотків, розташованих під нахилом один над одним. На експериментальному стенді імітувалась саме така схема розташування лотків, коли три лотки, які утворювали широку поверхню стікання води, накривались другим ярусом – гладкою сухою поверхнею. Охолоджуюче повітря рухалось між ярусами у поперечному напрямку. Відстань S між ярусами лотків (за нормаллю до лотків) могла змінюватися. При такій схемі поперечний потік повітря рухався у стисненому просторі. В досліді з широким лотком обдування плівки води проводилось в умовах як вільного простору над ним, так і стисненого.

Проведені експерименти показали, що ступінь охолодження води при інших незмінних параметрах майже не залежить від того, як рухається повітря: у вільному чи стисненому просторі. Теплообмін при стисненому просторі між ярусами (в досліді відстань S дорівнювала 100 і 150 мм) у дослідженому діапазоні параметрів незначно відрізнявся від теплообміну в умовах вільного простору. Такий результат дає можливість при конструюванні плівкових градирень з профільованою поверхнею розташовувати зрошувачі ярусами, що позитивно впливає на зменшення габаритів градирні при незмінній продуктивності.

Досліді проводились на лотках зі сферичними лунками Л16 при різних геометричних розмірах лотків, режимах стікання води, а також швидкостях повітряного потоку в режимі перехресної течії фаз. При цьому “свіже” повітря у поперечному напрямку діяло на всій довжині лотка. Кут нахилу φ лотків до горизонту дорівнював 30 град. Дані порівнювались з умовами, коли оточуюче повітря було нерухомим. Витрата води G в експериментах змінювалась від 0,068 до 0,143 кг/с, ширина лотка l – від 0,18 до 0,54 м, його довжина L – від 1,7 до 5,1 м, середня швидкість повітряного потоку V_a над плівкою стікаючої води – від 0 до 4,3 м/с.

Результати досліджень. В процесі проведення кожного досліді за допомогою цифрового

диференціального термометра з точністю вимірювання 0,01 град визначався ступінь охолодження води Δt – різниця її температур на початку та в кінці течії по лотку, а також вимірювалась температура повітря t_a . Потім розраховувались коефіцієнти тепловіддачі α [2, 3].

Безумовно, на ступінь охолодження води впливає її витрата. В межах незмінної ширини поверхні зрошувача, по якій стікає вода, від витрати залежить товщина плівки і ступінь турбулізації рідини, що, в свою чергу, позначається на тепловіддачі. За результатами проведених експериментів визначено, що для розмірів сферичних лунок, що досліджувались, а також ширини l лотків, по яких стікала вода, є конкретний діапазон витрат (тобто товщин плівок), при яких відбувається ефективна тепловіддача. При пониженій витраті ($G < 0,068$ кг/с) вода може не покрити плівкою всю ширину лотка (при $l > 0,54$ м), а при великій витраті ($G > 0,143$ кг/с) формується занадто товста плівка, турбулізація якої за рахунок лунок буде незначною, що відіб'ється, відповідно, на зниженні тепловіддачі. Тому під час використання рекомендованої нами профільованої поверхні Л16 зі сферичними лунками треба не виходити за межі діапазону витрат води: від 0,068 до 0,143 кг/с (від 0,24 до 0,51 м³/год) при ширині лотка від 0,18 до 0,54 м. Відповідно, об'ємна густина зрошування G/l повинна знаходитись у діапазоні від 0,44 до 2,83 м³/(м·год). В табл. 1 наведено приклад впливу витрати на ступінь охолодження (рівно-

мірний розподіл води по лотках, вхідна температура води $t_1 = 40^\circ\text{C}$, $t_a = 24^\circ\text{C}$, $\varphi = 30$ град).

Таблиця 1 – Вплив витрати води на ступінь її охолодження

G , кг/с	l , м	L , м	V_a , м/с	Δt , °C
0,068	0,54	5,1	2	12,3
0,106				8,3
0,143				6,6

На рис. 1 показано залежність різниці температур Δt води від ширини лотка. Умови експериментів: $G = 0,068$ кг/с, рівномірний розподіл води по лотках, $t_1 = 40^\circ\text{C}$, $t_a = 24^\circ\text{C}$, $\varphi = 30$ град.

З розширенням поверхні лотка від 0,18 до 0,54 м при незмінній витраті товщина плівки, що стікає, зменшується, і ступінь охолодження води, як вже відзначалось, збільшується. В умовах нерухомого повітря (криві 3, 4) величина Δt значно менша порівняно з умовами, коли швидкість повітряного потоку дорівнює, наприклад, $V_a = 4,3$ м/с (криві 1 і 2). Різниця ступеня охолодження для кривих 1 і 2, також як і для кривих 3 і 4 пояснюється лише довжиною течії води по лотку. Краще охолодження спостерігається, природно, на більш довгому лотку з більш інтенсивним обдуванням (крива 1). Необхідно відзначити, що навіть при виконанні зазначених умов об'ємної густини зрошуван-

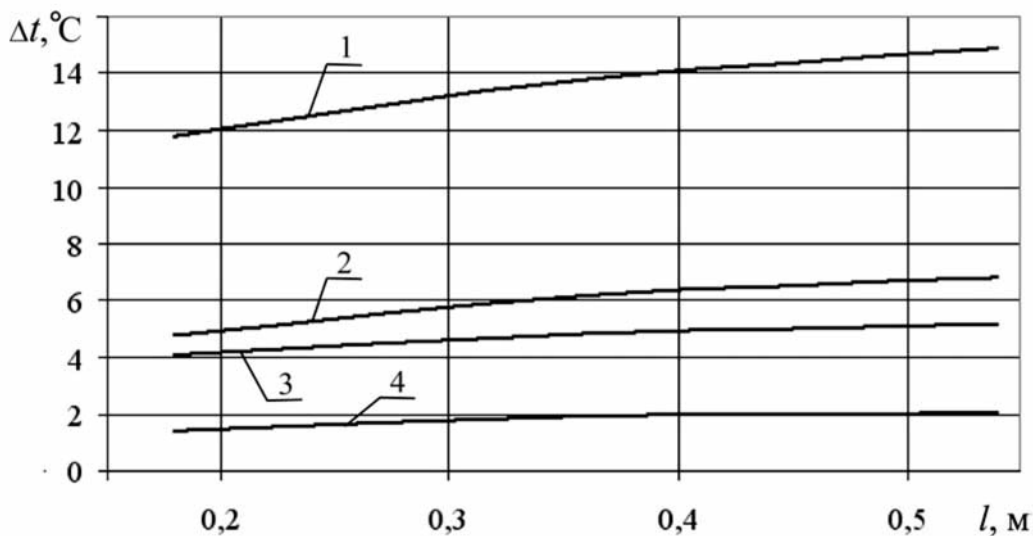


Рис. 1. Залежність ступеня охолодження води від ширини лотка: 1, 3 – $L = 5,1$ м; 2, 4 – $L = 1,7$ м; 1, 2 – $V_a = 4,3$ м/с; 3, 4 – $V_a = 0$

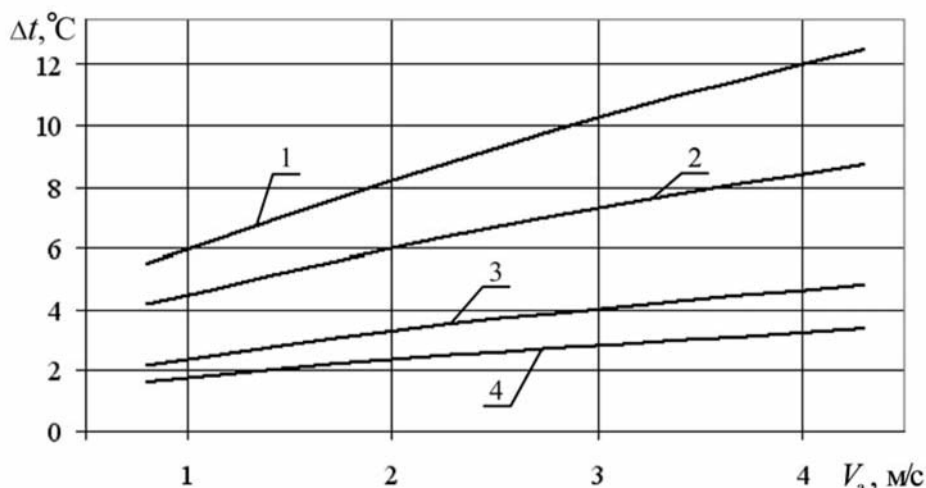


Рис. 2. Залежність ступеня охолодження води від середньої швидкості повітря: 1, 2 – $L = 5,1$ м; 3, 4 – $L = 1,7$ м; 1, 3 – $l = 0,54$ м; 2, 4 – $l = 0,18$ м

ня необґрунтоване розширення поверхні течії може призвести до зменшення ефективності охолодження за рахунок нагріву повітря, що рухається у поперечному до течії води напрямку.

Із збільшенням довжини лотка час контакту фаз вода–повітря збільшується, і охолодження покращується. Коли плівка стікає у нерухомому повітрі, значення Δt невеликі порівняно з умовами, коли плівка обдувається повітрям. Навіть невелика швидкість повітря ($V_a = 2$ м/с) призводить до зростання Δt більш ніж удвічі.

На рис. 2 наведено залежність різниці Δt від швидкості повітря. Експерименти проведено в таких умовах: $G = 0,106$ кг/с; рівномірний розподіл води по лотках; $t_1 = 40^\circ\text{C}$, $t_a = 24^\circ\text{C}$, $\varphi = 30$ град.

Як показує рис. 2, в дослідженому діапазоні швидкостей повітря, зі збільшенням її швидкості величина Δt зростає.

Взагалі на ступінь охолодження води при її течії по профільованих зрошувачах впливають такі фактори:

- геометрія сферичних лунок, від розмірів яких залежить турбулізація потоку і інтенсифікація теплообміну;
- витрата води безпосередньо, яка, крім того, впливає на турбулізацію потоку і перемішування шарів рідини;
- довжина зрошувача, яка фактично визначає час контакту фаз;
- ширина зрошувача, фактично товщина стікаючої плівки води при незмінній витраті;

– інтенсивність дії повітряного потоку, за рахунок якого покращується теплообмін з нагрітою поверхнею води.

Узагальнення дослідних даних. Масив експериментальних даних, отриманих в умовах обдування плівки води, що стікає по поверхні лотка Л16, у поперечному напрямку, було проаналізовано і систематизовано. Дані було оброблено методом найменших квадратів за допомогою програми TurboBasic. В результаті отримано емпіричну залежність для безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі – числа Нуссельта:

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

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

З цієї формули може бути обчислено ефективний коефіцієнт тепловіддачі α , який для умов експериментів відображає сумарний ефект теплообміну плівки води з повітрям за рахунок конвекції та випаровування рідини. В цілому на профільованих поверхнях ефективність тепловіддачі збільшувалась більш ніж у 2,5 раза.

Тут числа Рейнольдса для плівки і відносного руху фаз, а також число Нуссельта дорівнюють [1, 2]:

$$\begin{aligned} \text{Re}_{\text{пл}} &= 4G / (l v_w \rho_w); \\ \text{Re}_{\text{від}} &= V_a L / \nu_a; \\ \text{Nu} &= \alpha L / \lambda_a, \end{aligned} \quad (2)$$

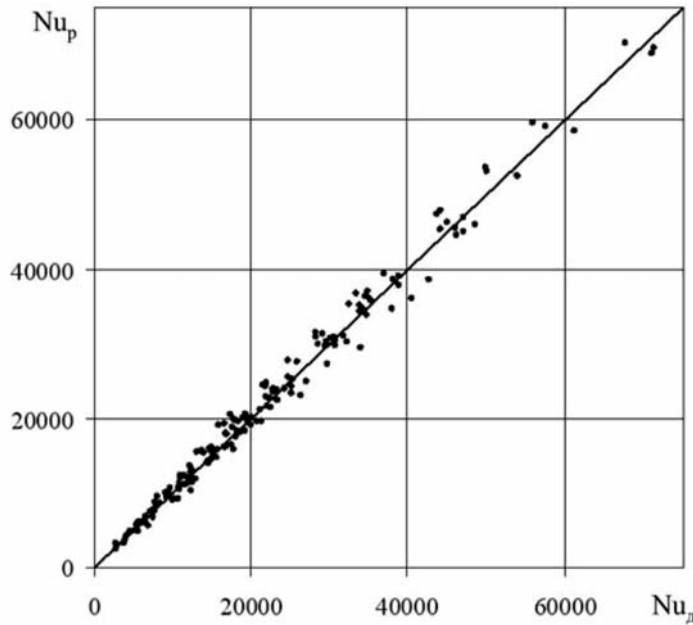


Рис. 3. Зіставлення дослідних Nu_d та розрахункових Nu_p даних

де ν_w, ν_a – коефіцієнти кінематичної в'язкості води та повітря; ρ_w – густина води; λ_a – коефіцієнт теплопровідності повітря.

На рис. 3 показано зіставлення дослідних Nu_d та розрахункових Nu_p чисел Нуссельта за формулою (1). Максимальне відхилення дослідних точок від розрахункових не перевищувало 17,3%, середньоквадратична похибка окремого вимірювання – 7,1%.

Методика розрахунку ступеня охолодження рідини при її течії по профільованому лотку така. Спочатку задаємо геометричні розміри зрошувача – його ширину l і довжину L , витрату рідини G (з урахуванням вимог щодо об'ємної густини зрошування) та швидкість повітря V_a . За формулами (1), (2) обчислюємо число Нуссельта та коефіцієнт тепловіддачі α . Потім знаходимо коефіцієнт A , який враховує тепловіддачу від рідини до повітря для вибраних умов взаємодії, площу контакту фаз F ($F = l \cdot L$) і витрату рідини:

$$A = 2\alpha F / (2cG + \alpha F), \quad (3)$$

де c – питома теплоємність рідини. Ступінь охолодження визначаємо з формули:

$$\Delta t = A (t_1 - t_a). \quad (4)$$

Формули (3) і (4) дозволяють за відомими величинами площі зрошувача і витрати на ньому та розрахунковим коефіцієнтом тепловіддачі за залежностями (1) і (2) визначати ступінь охолодження рідини.

Використання профільованих поверхонь у градирнях. Для використання профільованої поверхні зі сферичними лунками Л16 як зрошувача у плівковій градирні пропонується конструктивна схема, яка наведена на рис. 4. Лотки розташовуються під кутом 30 град до горизонту на деякій відстані один над одним. Набір певної кількості однакових лотків утворює блок. Циркуляційна вода підводиться до кожного лотка, охолоджується при її течії по профільованій поверхні і стікає вниз, до басейну. Блоки розташовуються у просторі таким чином, щоб потік повітря діяв на стікаючу плівку води у поперечному напрямку.

При конструюванні блока слід враховувати рекомендації щодо витратних характеристик рідини (тобто товщин плівок на поверхні зрошувача), за яких має місце їх інтенсивна турбулізація, і досягається ефективно охолодження рідини [1–4]. Наприклад, якщо ширину поверхні зрошувача треба вибрати 0,8 м, то витрата рідини повинна бути такою, щоб об'ємна густина зрошування G/l знаходилась у зазначених вище межах: від 0,44 до 2,83 м³/(м·год).

В табл. 2 як приклад розглянуто чотири варіанти блоків (рис. 4) з шириною зрошувачів 0,8 м, відстанню між ними 100 мм у ярусі та їх різною довжиною: 3,4 і 5,1 м. Об'ємна густина зрошування відповідає вказаному вище діапазону. Кількість N_d зрошувачів, з яких склада-

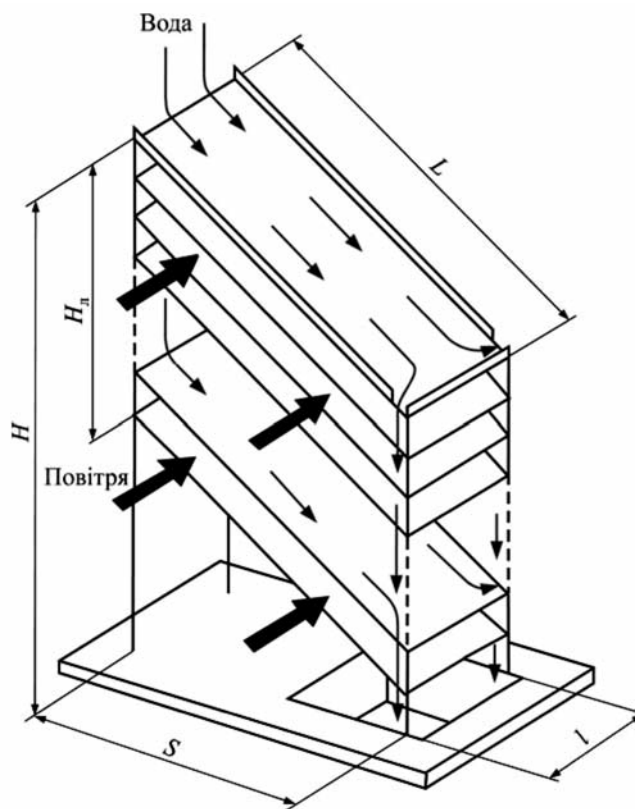


Рис. 4. Блок зрошувачів для плівкової градирні

ється блок (у даному прикладі 10 та 30), та задана витрата на окремому зрошувачі визна-

чають його загальну продуктивність G (у даному прикладі від 10,8 до 68,7 м³/год). Для кожного гідралічного навантаження блока в табл. 2 вказано його габарити (довжину S , ширину l , висоту H).

В табл. 3 наведено охолоджувальну спроможність блоків (див. табл. 2). Ступінь охолодження розраховано за формулами (1)–(4). Дані приведені для температури води на вході в лотік $t_1 = 40^\circ\text{C}$, а температура оточуючого повітря $t_a = 24^\circ\text{C}$. В залежності від швидкості повітря, довжини зрошувача та об'ємної густини зрошування ступінь охолодження води може відрізнятися у 2,5 раза. У варіантах 1 та 3 продуктивність блока вища, але ступінь охолодження нижчий (за рахунок більшої витрати).

Варіант схеми плівкової градирні з профільованою поверхнею зрошувачів може, наприклад, складатися з чотирьох блоків, утворюючи в плані квадрат. Вода за допомогою системи водорозподілу подається на лотки блоків. Рух повітря над стікаючими плівками води забезпечується або природною тягою, або примусово – витяжним вентилятором. Продуктивність градирні визначається кількістю блоків, що входять до неї. Блоки можуть розташовуватися у градирнях на промислових площадках у квадратній або прямокутній конфігурації.

Таблиця 2 – Варіанти блоків із різною довжиною зрошувачів

Варіант	L , м	N_l	H_l , м	G/l , м ³ /(м·год)	G , м ³ /год	Габарити, м		
						S	L	H
1	3,4	10	1,04	2,83	22,9	2,94	0,8	2,74
		30	3,34		68,7			5,04
2	3,4	10	1,04	1,35	10,8	2,94	0,8	2,74
		30	3,34		32,4			5,04
3	5,1	10	1,04	2,83	22,9	4,42	0,8	3,59
		30	3,34		68,7			5,89
4	5,1	10	1,04	1,35	10,8	4,42	0,8	3,59
		30	3,34		32,4			5,89

Таблиця 3 – Охолоджувальна спроможність блока

Ступінь охолодження	Варіант											
	1			2			3			4		
	V_a , м/с											
	0,8	2	4,3	0,8	2	4,3	0,8	2	4,3	0,8	2	4,3
Δt , °C	2,4	3,4	4,7	4,5	6,5	8,8	3,3	4,7	6,7	6,2	8,9	11,8

Однаковий ступінь охолодження води у плівковій градирні з профільованими поверхнями зрошувачів можна забезпечити за рахунок різних факторів, наприклад, за рахунок збільшення довжини потоку при невеликій швидкості повітря або шляхом зменшення довжини потоку при більшій інтенсивності обдування. Це розширює можливості експлуатаційних характеристик градирні.

ВИСНОВКИ

Вперше виконано експериментальне дослідження тепловіддачі від плівки рідини до повітря у діапазоні розмірів зрошувачів промислових плівкових градирень. При використанні профільованих поверхонь зрошувачів інтенсивність теплообміну збільшується більш ніж у 2,5 раза. Отримано узагальнюючу формулу для безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі — числа Нуссельта при перехресному русі фаз, що забезпечує найкращу інтенсивність теплообміну. На основі отриманих даних запропоновано метод розрахунку ступеня охолодження води при її контакті з повітрям 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. Дубровский В.В., Підвисоцький О.М. Вплив відносної швидкості води та повітря на їх теплообмін при течії плівки по профільованій поверхні // Проблеми загальної енергетики. — 2012. — Вип. 3 (30). — С. 26–29.

4. Дубровский В.В., Підвисоцький О.М. Теплообмін у плівкових градирнях з профільованою поверхнею зрошувачів в умовах повздовжнього та перехресного напрямку повітряного потоку // Проблеми загальної енергетики. — 2014. — Вип. 1 (36). — С. 55–60.

Надійшла до редколегії 30.05.2014