

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНІ ЗІ СФЕРИЧНИМИ ЛУНКАМИ НА ТЕПЛОБМІН ВОДИ З ПОВІТРЯМ

Експериментально досліджено вплив глибини сферичних лунок та щільність їх розташування на поверхні зрошувача на тепловіддачу від стікаючої плівки води до оточуючого повітря. Визначено геометричні параметри профільованих поверхонь, які забезпечують найбільш ефективний теплообмін води з повітрям і можуть бути використані у плівкових градирнях для охолодження циркуляційної води.

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

Підвищення ефективності охолодження технологічної циркуляційної води в плівковій градирні завжди є актуальною задачею. В залежності від того, по якому профілю стікає плівка води, інтенсивність тепловіддачі різна. Використання рельєфних поверхонь, профільованих сферичними лунками, в ролі зрошувачів, як показав комплекс проведених нами експериментальних досліджень [1 – 4], призводить до істотного підвищення ступеня охолодження рідини. За результатами цих дослідів з широкою низкою профільованих поверхонь з різними геометричними розмірами сферичних лунок було знайдено поверхню з діаметром лунок $D = 16$ мм і глибиною $h = 5$ мм, яка забезпечує найвищий рівень теплообміну води з повітрям. Лунки такого профілю найкращим чином сприяли турбулізації течії і інтенсифікації тепловіддачі. У той самий час треба зазначити, що природа механізму інтенсифікації теплообміну на профільованій поверхні полягає у організації обтікання потоком малої перешкоди (інтенсифікатора) на поверхні і турбулізації течії. Від

геометричних характеристик, які притаманні таким інтенсифікаторам, залежить гідродинаміка потоку і в результаті ефект тепловіддачі. Тому важливою є задача дослідити вплив деяких геометричних особливостей сферичних лунок, а саме їх глибини (відносна глибина лунок у попередніх дослідях була незмінною і становила $h/D = 0,31$), а також щільності розташування лунок на поверхні течії на теплообмін. За результатами проведених раніше дослідів було визначено, що краща тепловіддача від води до повітря спостерігається при шаховому розташуванні лунок на поверхні зрошувача. Коридорне розташування дає гірші результати. При такому рельєфі поверхні виникають потоки води між рядами, які не потрапляють у поглиблення, що погіршує загальну турбулізацію течії і тепловіддачу у цілому. Але щільність розташування лунок на поверхні зрошувача, тобто відстань S між центрами лунок (сторона рівнобічного трикутника) раніше в дослідях була незмінною і дорівнювала 32 мм. У той самий час лунки на поверхні мають бути розташовані таким чином, щоб досягався якомога більший ступінь перемішування потоку рідини.

© В.В. ДУБРОВСЬКИЙ, О.М. ПІДВИСОЦЬКИЙ, 2015

Проведення дослідів

1. Варіювання глибини лунок. Було виготовлено нові дослідні лотки шириною 0,18 м та довжиною 0,9 м зі сферичними лунками різної глибини h (див. табл. 1). При цьому діаметр лунок на поверхні лотків підтримувався незмінним $D = 16$ мм. Розташування лунок – шахове, відстань між їх центрами 32 мм.

Таблиця 1 – Лотки з різною глибиною лунок

Лотік	D , мм	h , мм	h/D
Л16/3	16	3	0,19
Л16/5		5	0,31
Л16/7		7	0,44

На рис. 1 показана лунка на поверхні, розташованій горизонтально (кут нахилу лотка до горизонту $\varphi = 0$). Діаметр лунки D на поверхні лотка визначається як розмір хорди be у вертикальному перетині сфери діаметром $D_{\text{сф}}$. Геометрична форма сферичної лунки зумовлює гідродинамічні особливості потоку рідини, що її обтікає. Кут β визначає напрямок руху потоку рідини і вимірюється між вертикаллю у точці b та дотичною bd до кола радіусом ob . Плівка рідини тече по поверхні ab і в точці b змінює напрямок і рухається у сферичну лунку під кутом β . Якщо нахилити поверхню лотка під кутом φ , то β також зростає на величину φ . В досліді лотки-зрошувачі розташовувались на стенді під кутом $\varphi = 30$ град. Саме при такому куті за результатами попередніх проведених нами дослідів спостерігалась найбільша інтенсивність тепловіддачі на всіх режимах течії. При більшому куті нахилу стікання води супроводжується утворенням небажаних бризок.

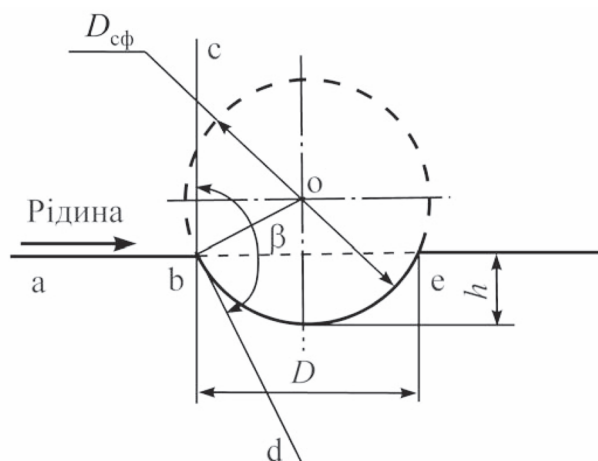


Рис. 1. Сферична лунка на горизонтальній поверхні

Таблиця 2 – Дані профільованих поверхонь лотків з різною щільністю розташування лунок

Лотік	D , мм	h , мм	S , мм	S/D	n , шт.	F , м ²	F_n , м ²	K
Л16/5/24	16	5	24	1,5	204	0,144	0,041	0,28
Л16/5/32			32	2	122		0,024	0,17
Л16/5/42			42	2,6	74		0,015	0,1

2. Зміна щільності розташування лунок на поверхні. Було також виготовлено нові дослідні лотки-зрошувачі довжиною 0,8 м і шириною 0,18 м з різною відстанню S між сферичними лунками, розташованими у шаховому порядку. Діаметр лунок дорівнював 16 мм, їх глибина 5 мм. Треба відзначити, що така глибина лунок була зумовлена найкращими отриманими результатами експериментів з різними глибинами лунок щодо тепловіддачі від води до повітря.

В табл. 2 наведено дані щодо поверхонь дослідних лотків. Тут n – кількість лунок на поверхні лотка, F – площа поверхні лотка, по якій стікає плівка рідини, F_n – площа поверхні лотка, яку займають лунки, K – ступінь заповнення лунками поверхні лотка (щільність розташування лунок), $K = F_n/F$.

Експерименти з різними геометричними характеристиками сферичних лунок проводились в умовах нерухомого оточуючого середовища, а також на різних режимах взаємодії фаз вода–повітря при поперечному обдуванні стікаючої плівки на всій протяжності лотка повітрям зі швидкістю V_a . Витрата G води при течії по лотку становила від 0,068 до 0,143 кг/с. Об'ємна густина зрошування – відношення витрати до ширини поверхні течії, відповідно, була від 0,44 до 2,83 м³/(м·год), швидкість повітря V_a змінювалась від 0 до 4,3 м/с. В процесі проведення кожного дослідів, як і раніше,

за допомогою цифрового диференціального термометра з точністю вимірювання 0,01 град визначався ступінь охолодження води Δt – різниця температур на початку та в кінці течії по лотку. Також вимірювалась температура оточуючого повітря t_a . Методика проведення дослідів з визначенням ступеня охолодження рідини та коефіцієнта тепловіддачі залишалась незмінною як у дослідів зі сферичними лунками [1].

Результати досліджень

1. Вплив глибини лунок. На рис. 2 як приклад показано отриману за даними дослідів залежність ступеня охолодження Δt води від відносної глибини h/D лунок при різних швидкостях повітря. Витрата води $G = 0,068$ кг/с. Температура води на початку зрошувача становила $t_1 = 40$ °С, а повітря $t_a = 23$ °С.

Експерименти показали, що ступінь охолодження води залежить від глибини лунки. На рис. 2 проілюстровано параболічний характер залежностей $\Delta t (h/D)$ з явно вираженим максимумом.

Експериментальні дані щодо ступеня охолодження води для лотків Л16 з різною глибиною лунок $h = 3, 5$ і 7 мм, для витрат рідини $G = 0,068, 0,106$ і $0,143$ кг/с та різної інтенсивності дії повітря V_a за допомогою програми CurveExpert 1.3 було апроксимовано параболіч-

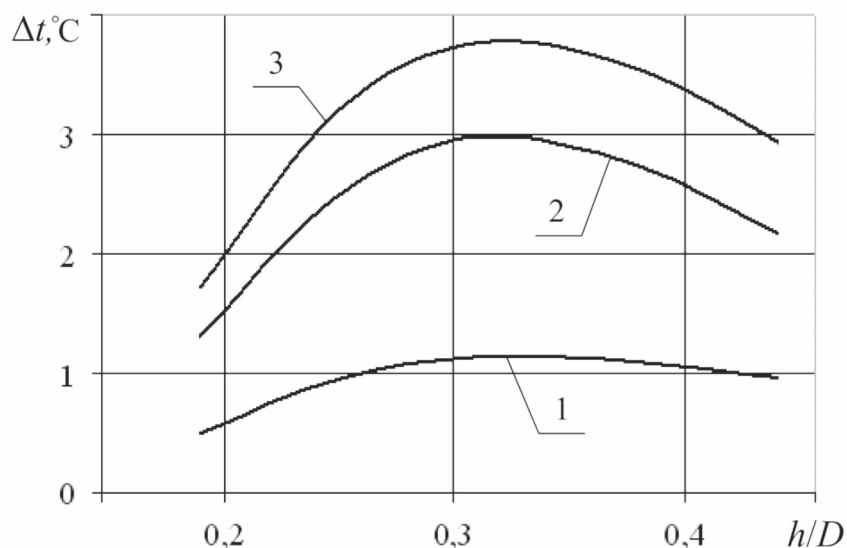


Рис. 2. Вплив відносної глибини сферичних лунок на ступінь охолодження води; V_a , м/с: крива 1 – 0; 2 – 2,5; 3 – 4,3

Таблиця 3 – Дані щодо пошуку $(h/D)_{\text{опт}}$

G , кг/с	V_a , м/с	h/D
0,068	0	0,346
	2,5	0,334
	4,3	0,337
0,106	0	0,338
	2,5	0,345
	4,3	0,336
0,143	0	0,333
	2,5	0,344
	4,3	0,344

ними залежностями. Для трьох глибин лунок, трьох витрат, трьох швидкостей повітря було отримано 9 емпіричних залежностей $\Delta t(h/D)$. Далі за допомогою функції «пошук рішення» програми Microsoft Excel було знайдено значення $(h/D)_{\text{опт}}$ – оптимальні значення, за яких має місце максимум цих функцій, тобто досягається максимальна ступінь охолодження води.

В табл. 3 наведено величини h/D , які відповідають максимальному ступеню охолодження води. Їх середня величина становить 0,34, тобто максимальний ступінь охолодження води досягається для відносної глибини сферичних лунок $(h/D)_{\text{опт}} = 0,34$.

Розглянемо гідродинамічні особливості течії води у лунках з різною глибиною h . На рис. 3 показано розташування лунок різної глибини на нахиленій поверхні. Діаметр лунок на поверхні течії однаковий ($D = 16$ мм), а їх глибина h , яка утворюється на різних діаметрах сфери $D_{\text{сф}}$, дорівнює: $a - 3$ мм, $b - 5$ мм, $в - 7$ мм. Вода стікає по поверхні лотка під кутом $\varphi = 30$ град вздовж поверхні ab і попадає в лунку під різними кутами β .

В табл. 4 наведено дані для трьох різних глибин лунок.

При відношенні $h/D = 0,31$ кут β дорівнював

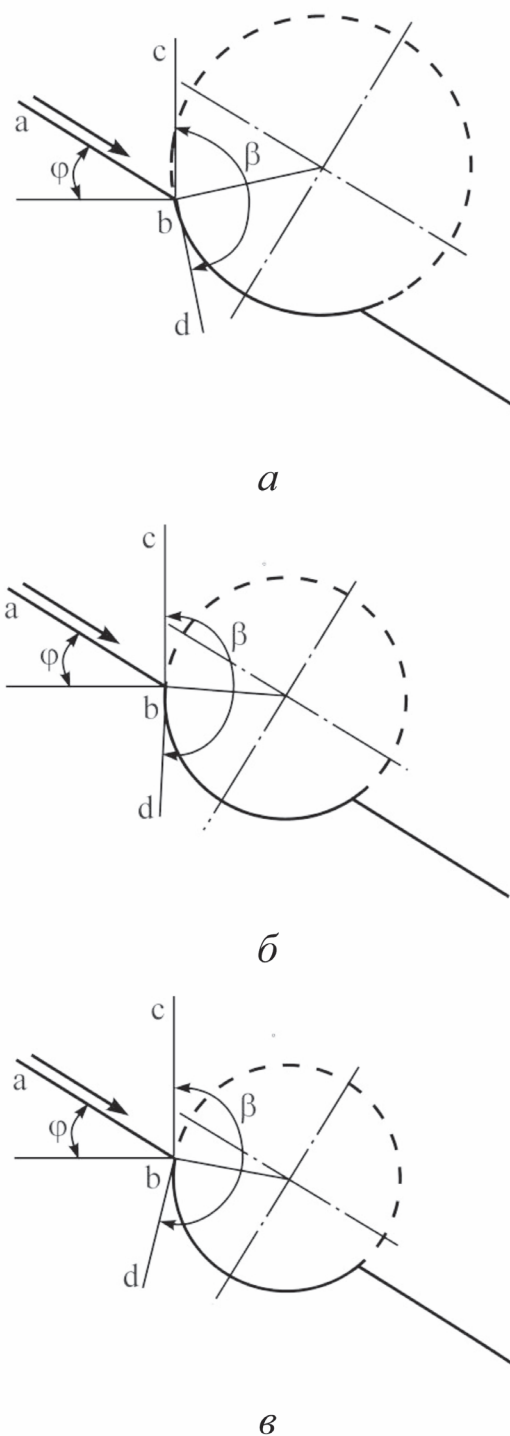


Рис. 3. Особливості течії рідини в лунках різної глибини; $\varphi = 30$ град, β , град: $a - 161$; $b - 184$; $в - 204$

184 град (рис. 3, б). Можна припустити, що коли потік води, який рухається по лотку вздовж поверхні ab , падає в лунку вертикально ($\beta \sim 180$ град), гідродинаміка потоку така, що

Таблиця 4 – Параметри поверхні з лунками різної глибини

Лотік	D , мм	ϕ , град	$D_{\text{сф}}$, мм	h , мм	h/D	β , град
Л16/3	16	30	24,3	3	0,19	161
Л16/5			17,8	5	0,31	184
Л16/7			16,1	7	0,44	204

сприяє суттєвій турбулізації потоку в лунці, перемішуванню шарів рідини при течії по поверхні, і у підсумку до інтенсифікації теплообміну з повітрям. У випадках рис. 3, *a* і *в* (відповідно $h/D = 0,19$ і $0,44$) ступінь охолодження значно менший (див. рис. 2). У випадку рис. 3, *a* (кут $\beta = 161$ град) попадання рідини в лунку досить спокійне, а у випадку рис. 3, *в* ($\beta = 204$ град) течія може супроводжуватись відривом потоку від поверхні після точки *b*. Такі лунки гірше турбулізують плівку рідини і призводять до меншої тепловіддачі порівняно з лунками при відношенні $h/D = 0,31$ з кутом $\beta \approx 180$ град.

Наведемо аналіз картини течії води по поверхні з лунками різної глибини. Спочатку, коли глибина лунки невелика, стікання води з усіх її сторін у центр мляве, турбулізація потоку слабка, і тепловіддача від рідини невелика. З поглибленням сферичної лунки інтенсивність турбулізації води збільшується за рахунок більш активного стікання у лунку, ступінь охолодження підвищується і досягає максимуму у момент, коли потік попадає в лунку майже вертикально. В цьому випадку сферична лунка, як турбулізатор потоку і інтенсифікатор теплообміну, працює найбільш ефективно. За подальшого поглиблення лунки кут β перевищує 180 град, потік починає відриватися від поверхні течії і інтенсивність охолодження зменшується. Додамо до цього, що інтенсивне утворення бризок на лотку при куті нахилу його поверхні більше 30 град (що спостерігається в дослідах) можна пов'язати саме з величиною кута β при його перевищенні 180 град.

2. Вплив щільності розташування лунок на поверхні. Досліди показали, що щільність роз-

ташування лунок на поверхні зрошувача (тобто, різні відстані S між лунками) також впливає на гідродинаміку течії, і це відбивається на турбулентності потоку і ефективності тепловіддачі.

На рис. 4 показано залежність ступеня охолодження води Δt від відносної відстані між лунками (відношення відстані S до їх діаметра D). Як видно з рисунка, величина Δt в умовах проведених дослідів дещо зменшується зі збільшенням відстані S . Для нерухомого повітря (криві 1 та 4) ступінь охолодження, природно, менший, ніж для умов обдування потоку води повітрям. Криві 2 та 5 відповідають швидкості повітря $V_a = 2,5$ м/с, криві 3 та 6 – $V_a = 4,3$ м/с. Досліди проводились при початковій температурі води $t_1 = 40$ °С, та температурі оточуючого повітря $t_a = 26$ °С.

Проведені експерименти з різними витратами води показали, що зі збільшенням витрати ступінь охолодження, природно, зменшується, при цьому зменшення відстані між лунками (до $S = 24$ мм) призводить до покращення охолодження рідини порівняно з відстанями $S = 32$ і 42 мм. Зрозуміло, що обдування повітрям плівки стікаючої води призводить до істотного підвищення величини Δt .

Візуальне спостереження картини течії води по профільованій поверхні з різною щільністю розташування лунок дозволило визначити, що гідродинаміка потоку відрізняється залежно від відстані S . На невеликих відстанях ($S = 24$ мм) спостерігається інтенсивний рух рідини з лунки в лунку, практично без розтікання у плівку; на великій відстані ($S = 42$ мм), навпаки, формуються досить великі ділянки, по яких рідина стікає у вигляді незбуреної плівки.

На рис. 5 показано залежність коефіцієнта тепловіддачі α від води до повітря, обчисленого

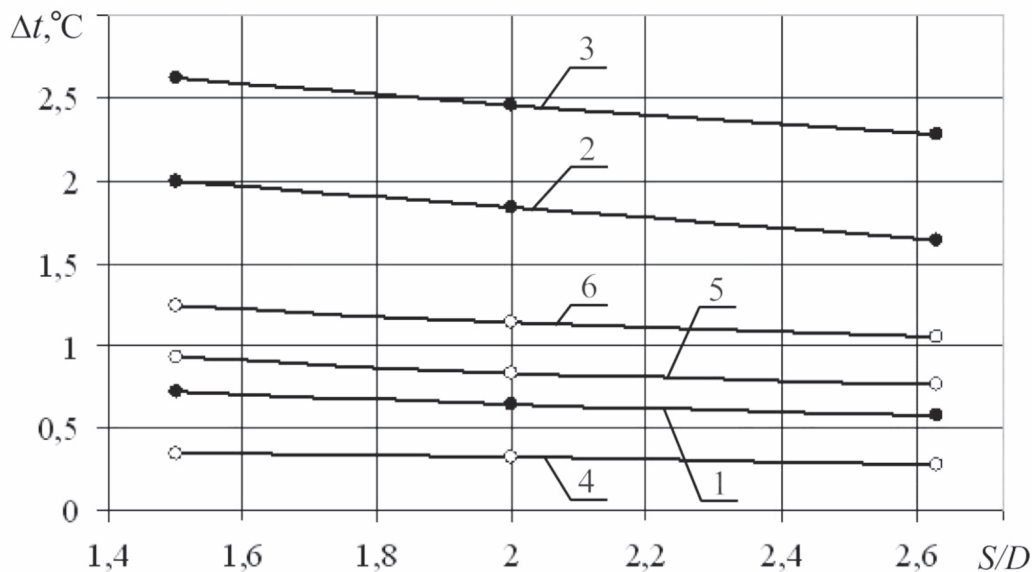


Рис. 4. Вплив відносної відстані між лунками на ступінь охолодження води, G , кг/с: ● — 0,068; ○ — 0,143

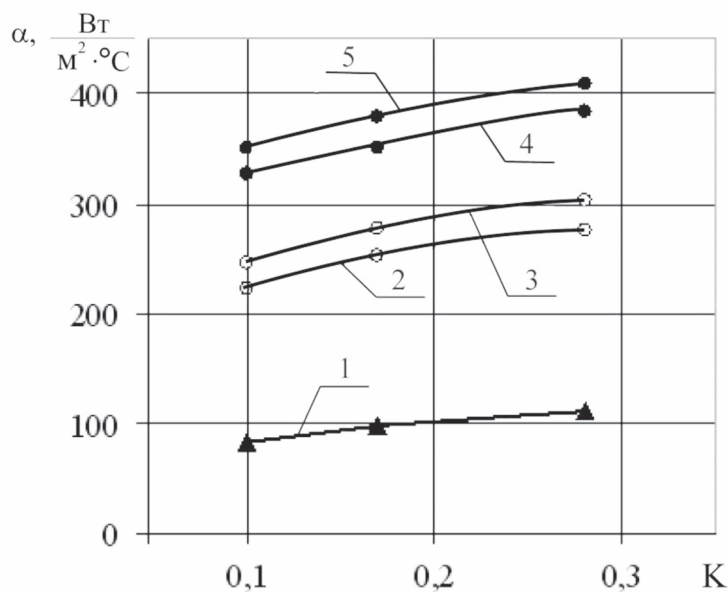


Рис. 5. Вплив ступеня заповнення поверхні зрошувача лунками на коефіцієнт тепловіддачі, V_a , м/с: ▲ — 0; ○ — 2,5; ● — 4,3

за результатами експериментів, від ступеня заповнення K поверхні течії лунками. Значення t_1 і t_a відповідають рис. 4. Зі збільшенням величини K коефіцієнт α помітно збільшується. Більша інтенсивність повітряного потоку призводить до більших значень коефіцієнтів α . Досліди показали, що для кривої 1 (в умовах $V_a = 0$) значення α практично однакові для різних витрат води: $G = 0,068$ кг/с і $G =$

$0,143$ кг/с. При дії повітря зі швидкостями $V_a = 2,5$ м/с та $V_a = 4,3$ м/с спостерігається деяке розшарування значень α для різних витрат: криві 2 та 4 — при $G = 0,143$ кг/с; криві 3 та 5 — $G = 0,068$ кг/с.

Оскільки лунки вносять ефект значного підвищення тепловіддачі, їх кількість на поверхні течії впливає на процес теплообміну. Чим більше лунок на одиниці поверхні зрошувача, тим

краще перемішування рідини, турбулізація усього потоку і, відповідно, ефективність теплообміну. Треба особливо відзначити, що підвищення кількості лунок є необхідною, але недостатньою умовою досягнення високої тепловіддачі. В проведених нами раніше дослідах деякі лотки мали більшу кількість лунок на поверхні (ніж вказано в табл. 2), але давали гірші результати щодо охолодження, оскільки мали розміри лунок, які призводили до гіршої турбулізації потоку і тепловіддачі від води до повітря. Зазначимо, що мінімальна відстань між лунками, звичайно, має конструктивно-технологічні обмеження.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що при використанні профільованих поверхонь зі сферичними лунками в ролі зрошувачів плівкових градирень треба враховувати сукупність таких факторів, як розміри лунок, їх глибину, відстань одна від одної та спосіб розташування лунок на поверхні.

2. В результаті проведених експериментальних досліджень знайдено, що при діаметрі лунок $D = 16$ мм, відносної глибини сферичних лунок $h/D = 0,34$ та відносної відстані $S/D = 1,5$ забезпечується найбільш ефективна тепловіддача від води до повітря в межах об'ємної густини зрошування від 0,44 до 2,83 м³/(м·год).

3. Виявлено, що підвищення щільності розташування лунок на поверхні зрошувача помітно збільшує коефіцієнт тепловіддачі від води до оточуючого повітря.

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. 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.

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

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.

Надійшла до редколегії 23.09.2015