

## ТЕПЛОБМІН МІЖ РІДИНОЮ ТА ПОВІТРЯМ НА ПОВЕРХНЯХ З РІЗНОЮ ФОРМОЮ ПОГЛИБЛЕНЬ

*Експериментально досліджено вплив форми поглиблень на поверхні зрошувача на тепловіддачу від стікаючої плівки води до оточуючого повітря. Розглянуто поверхні з чотирма формами поглиблень: сферичною, циліндричною, ромбоподібною та квадратною. Встановлено, що найкращі з точки зору тепловіддачі є поверхні з поглибленнями у вигляді сферичних лунок і вони можуть бути рекомендовані для впровадження на плівкових градирнях. Отримано емпіричні залежності, що дозволяють обчислити коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях з циліндричними, ромбоподібними та квадратними поглибленнями.*

*Ключові слова:* плівкова градирня, форма поглиблень на поверхні зрошувача, тепловіддача, ступінь охолодження.

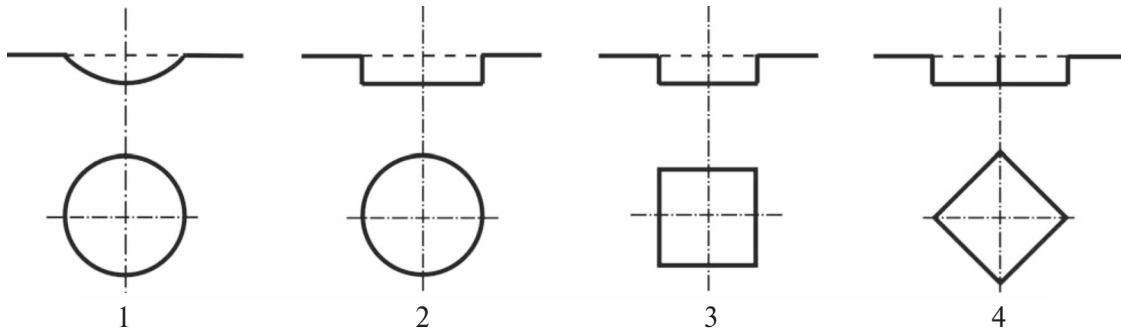
Як відомо, профілювання поверхні, по якій стікає плівка води, наприклад, у вигляді сферичних лунок, призводить до суттєвого підвищення теплообміну між рідиною та оточуючим повітрям у порівнянні з гладкою поверхнею [1–3]. Від форми поглиблень на поверхні течії залежить той чи інший ефект тепловіддачі. У роботах [4, 5] розглядаються теплообмін та гідродинаміка на поверхнях з циліндричними, сферичними, квадратними та іншими формами поглиблень. Відзначається глибока спільність фізичної природи механізму інтенсифікації теплообміну для усіх видів інтенсифікаторів, принцип дії яких зводиться до організації обтікання потоком малої перешкоди (інтенсифікатора) на стінці каналу і турбулізації течії. В роботі [5] навіть відзначається, що для технічного застосування у випадку теплообміну твердої поверхні з несучим середовищем, циліндричні поглиблення мають перевагу над сферичними.

Окрім досліджених раніше закономірностей тепловіддачі від води до оточуючого повітря при її течії по профільованій поверхні зі сферичними лунками, з метою визначення най-

кращої профільованої поверхні постала задача вивчити такий теплообмін при течії рідини по поверхнях іншої форми, зокрема, циліндричної, ромбоподібною та квадратною.

**Проведення дослідів.** На рис. 1 показано поглиблення чотирьох форм, що досліджувались та порівнювались між собою. В табл. 1 наведено їх геометричні характеристики. Однаковий діаметр сферичного та циліндричного поглиблення  $D = 16$  мм, а також однакову глибину  $h = 5$  мм усіх поглиблень, які використовувались в досліді, було вибрано за результатами проведених раніше експериментів зі сферичними лунками, що давали найкращу тепловіддачу від води до повітря. Площа у плані усіх дослідних форм поглиблень була однаковою.

Для проведення експериментів було виготовлено нові дослідні лотки-зрошувачі довжиною  $L = 600$  мм і шириною  $l = 100$  мм з оцинкованої сталі, які показано на рис. 2. Поглиблення трьох нових форм виготовлялись за допомогою спеціально розробленої технологічної оснастки. На лотках поглиблення усіх форм розташовувались у шаховому порядку із відстанню між їх центрами 32 мм.



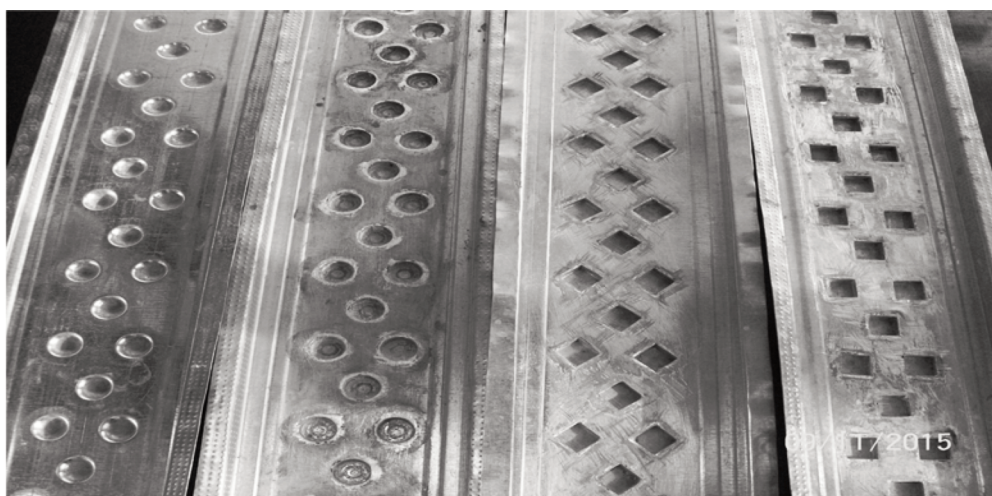
**Рис. 1.** Сферичне (1), циліндричне (2), квадратне (3) та ромбоподібне (4) поглиблення на поверхні зрошувача

**Таблиця 1 – Геометричні характеристики поглиблень різних форм**

Форма поглиблень	$D, \text{мм}$	Сторона квадрата та ромба, мм	$h, \text{мм}$	Площа поглиблення (у плані), $\text{мм}^2$
Сферична	16	–	5	201
Циліндрична				
Квадратна	14,2			
Ромбоподібна				

Лотки встановлювались на експериментальному стенді під кутом 30 град до горизонту. Плівку стікаючої води обдувало повітря у

поперечному до руху течії рідини напрямку. Методика проведення дослідів з визначенням ступеня охолодження рідини та коефіцієнта



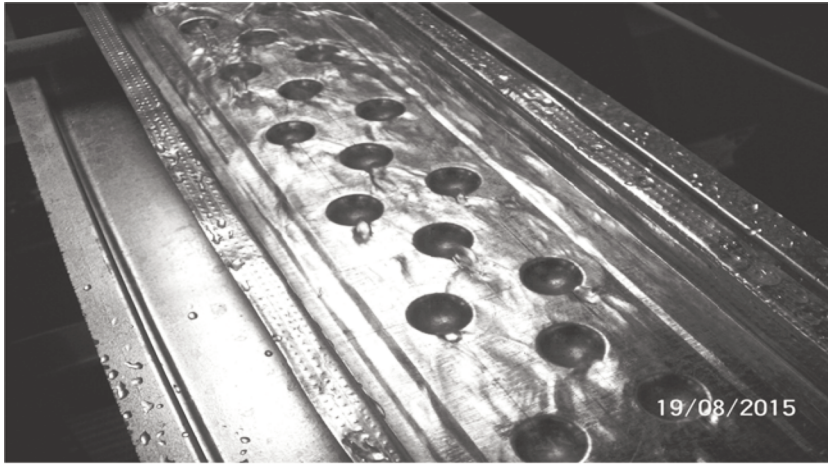
1 2 3 4

**Рис. 2.** Дослідні лотки з чотирма формами поглиблень: 1 – сферичними, 2 – циліндричними, 3 – ромбоподібними, 4 – квадратними

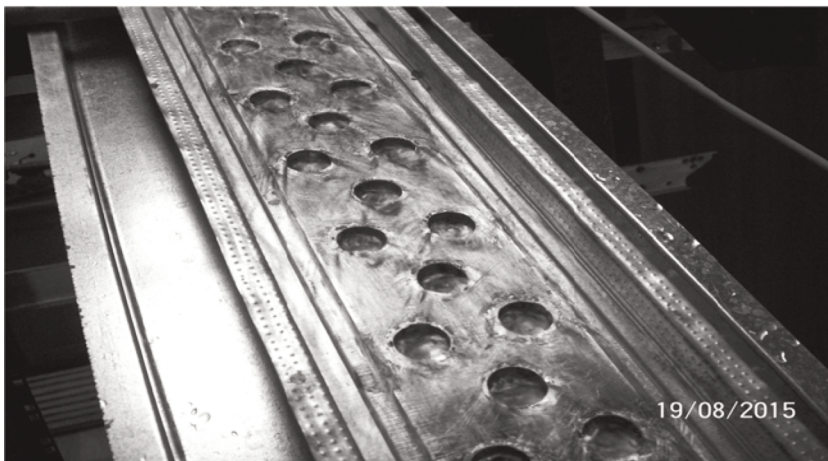
тепловіддачі залишалась незмінною [2].

Досліди проводились в діапазоні витрат рідини  $G$  від 0,025 до 0,08 кг/с. При цьому виконувались вимоги щодо величин густини зрошу-

вання  $G/l$ , при яких за результатами виконаних раніше експериментів зі сферичними лунками ефективність тепловіддачі найбільша. Нагадаємо, що густина зрошування зумовлює

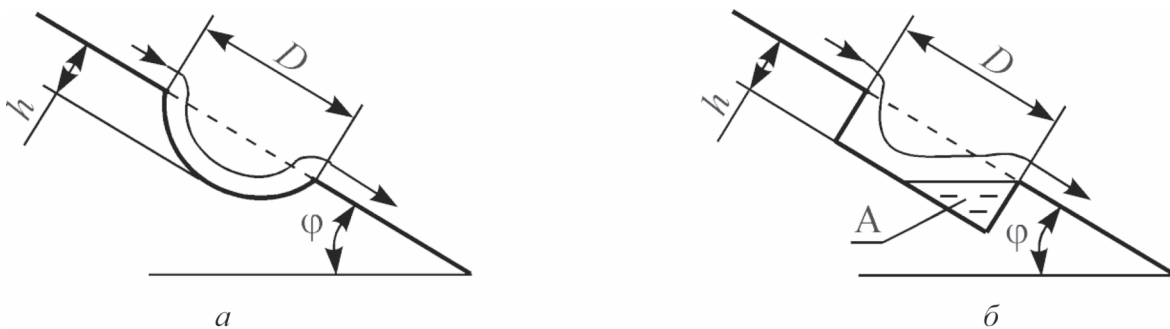


*a*



*б*

**Рис. 3.** Течія рідини на поверхнях зі сферичними (*a*) та циліндричними (*б*) поглибленнями



**Рис. 4.** Особливості течії рідини у сферичному (*a*) і циліндричному (*б*) поглибленнях,  $\varphi = 30$  град

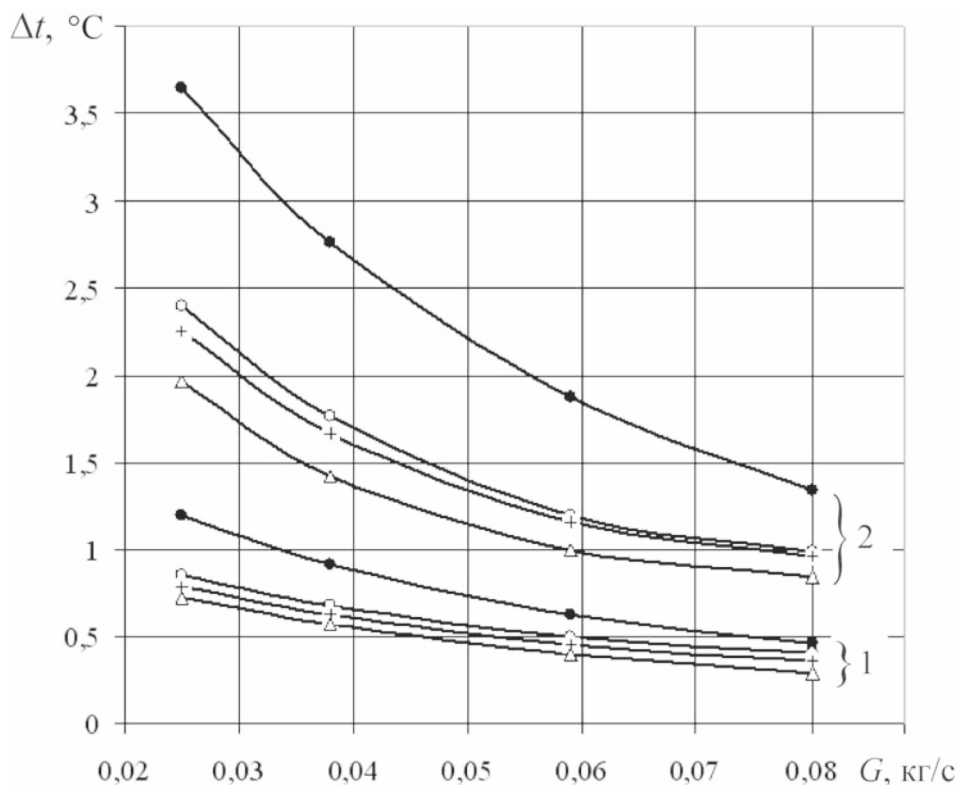
товщину плівки, що тече по поверхні зрошувача і суттєво впливає на теплообмін з повітрям. Швидкість  $V_a$  повітряного потоку, що обдуває плівку, у дослідях змінювалась від 0 для нерухомого повітря до 4,3 м/с. Результати експериментів порівнювались із добре вивченими нами раніше поверхнями зі сферичними лунками.

Візуальні спостереження потоків води по дослідних лотках з різною формою поглиблень показали, що якісна картина течії та її гідродинаміка відрізняється. На рис. 3, як приклад, проілюстровано структуру потоків на профільованих поверхнях зі сферичними та циліндричними поглибленнями. На поверхні зі сферичними лунками – поверхневими генераторами вихорів (рис. 3, а) спостерігається утворення специфічних бурунів на виході з лунки, які підвищують турбулентність течії, перемішуючи шари, з подальшим розтіканням буруна у плівку. На поверхні з циліндричними поглибленнями (рис. 3, б) явно вираженого буруна немає. Рідина розтікається у плівку, заповнюючи при цьому частину циліндричного поглиблення. Приблизно така сама картина течії плів-

ки води по поверхні спостерігалась для ромбоподібної та квадратної форми поглиблень.

Експерименти показали, що структура потоку всередині сферичного та інших трьох форм поглиблень різна (в умовах проведених дослідів, коли плівка стікає під нахилом і не заповнює повністю поглиблення). На рис. 4 умовно показано рух потоку рідини у сферичному і циліндричному поглибленнях. Кут нахилу  $\varphi$  становить 30 град. Течія плівки води у сферичній лунці (рис. 4, а) супроводжується безвідривним обтіканням поверхні з активним перемішуванням потоків і виносом течії у формі буруна на поверхню. У циліндричному поглибленні спостерігається відрив плівки від поверхні течії з можливим утворенням застійних зон А (рис. 4, б). Поглиблення, в яких є різка зміна поверхні течії, тобто поглиблення циліндричної, квадратної або ромбоподібної форми призводять до гіршої турбулізації потоку і, відповідно, гіршої інтенсивності тепловіддачі.

**Результати досліджень.** На рис. 5 показано вплив витрати води на ступінь її охолодження



**Рис. 5.** Залежність ступеня охолодження води від її витрати на поверхнях з різною формою поглиблень: ● – сферичні поглиблення; ○ – циліндричні; + – ромбоподібні; Δ – квадратні; швидкість повітря  $V_a$ , м/с: криві 1 – 0; 2 – 2,5

$\Delta t$  при течії по поверхнях з чотирма різними формами поглиблень в умовах дії повітря різної інтенсивності. Початкова температура води на вході в лотік становила  $t_1 = 40^\circ\text{C}$ , температура оточуючого повітря  $t_a = 25^\circ\text{C}$ .

Поверхня зі сферичними поглибленнями дає значно кращий результат щодо ступеня охолодження води у порівнянні зі іншими поглибленнями. Наприклад, при витраті  $G = 0,038$  кг/с та обдуванні повітрям зі швидкістю  $V_a = 2,5$  м/с величина  $\Delta t$  відрізняється майже удвічі у порівнянні сферичного та квадратного поглиблення. Зі збільшенням витрати води (тобто потовщенням стікаючої плівки) величина  $\Delta t$ , природно, у всіх випадках зменшується.

Інтенсифікація тепловіддачі помітно зростає за рахунок дії повітряного потоку у поперечному напрямку. Притік свіжого повітря призводить до підвищення ступеня охолодження в усіх випадках, але вплив відносної швидкості фаз вода – повітря на тепловіддачу на поверхні зі сферичними лунками вище.

Коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha$  від води до повітря обчислювались, як і раніше [2], за відомими формулами:

$$Q = c G \Delta t; \quad \alpha = Q/(F(t_w - t_a)),$$

де  $Q$  – кількість тепла, яка відбиралась від води,  $c$  – питома теплоємність води,  $F$  – площа поверхні зрошувача ( $F = L \times l$ ),  $t_w$  – середня температура води в лотку. Отримані дані для чотирьох форм поглиблень було представлено у вигляді безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі – числа Нуссельта:

$$\text{Nu} = \alpha L / \lambda_a,$$

де  $\lambda_a$  – коефіцієнт теплопровідності повітря.

В табл. 2 для трьох форм поглиблень та різних чисел Рейнольдса  $\text{Re}_{\text{пл}}$  для плівки стікаючої води ( $\text{Re}_{\text{пл}} = 4G/(lv_w \rho_w)$ ,  $v_w$ ,  $\rho_w$  – відповідно коефіцієнт кінематичної в'язкості та густина води) наведено осереднені дослідні значення відношення  $\text{Nu}/\text{Nu}_c$ , де  $\text{Nu}_c$  – число Нуссельта для поверхні зі сферичними поглибленнями. Це відношення характеризує ефективність тепловіддачі на різних профільованих поверхнях у порівнянні з найкращою поверхнею зі сферичними лунками. На рис. 6 проілюстровано залежність відношення  $\text{Nu}/\text{Nu}_c$  від числа Рейнольдса.

Дані, наведені у табл. 2, було апроксимовано лінійною функцією

$$\text{Nu}/\text{Nu}_c = a + b \cdot \text{Re}_{\text{пл}} \quad (1)$$

В табл. 3 наведено результати розрахунку величин  $a$  та  $b$ .

Для поверхні зі сферичними лунками раніше [3] було отримано емпіричну узагальнюючу залежність для безрозмірного коефіцієнта тепловіддачі:

$$\text{Nu}_c = 7 \text{Re}_{\text{пл}}^{0,026} \text{Re}_{\text{від}}^{0,5} (L/l)^{0,57}, \quad (2)$$

у діапазоні  $510 \leq \text{Re}_{\text{пл}} \leq 3200$ ;  $26070 \leq \text{Re}_{\text{від}} \leq 1462000$ ;  $3,2 \leq L/l \leq 28,3$ . Тут  $\text{Re}_{\text{від}} = V_a L / \nu_a$ ,  $\nu_a$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря.

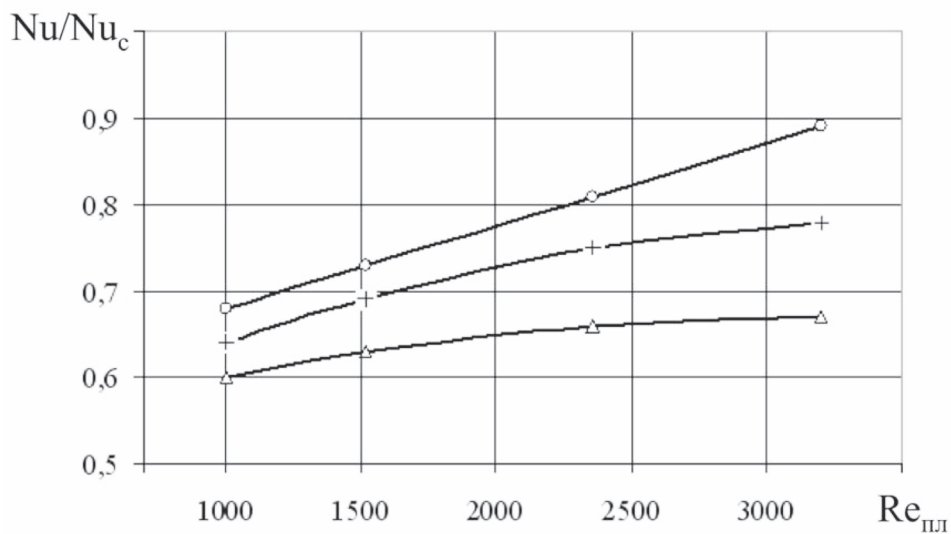
З формули (2) може бути обчислено ефективний коефіцієнт тепловіддачі, який відобра-

**Таблиця 2 – Дослідні дані щодо ефективності тепловіддачі на різних формах поглиблень**

$\text{Re}_{\text{пл}}$	$V_a$ , м/с	$\text{Nu}/\text{Nu}_c$		
		Поглиблення		
		Циліндричні	Ромбоподібні	Квадратні
1000	0	0,68	0,64	0,6
1520		0,73	0,69	0,63
2360		0,81	0,75	0,66
3200		0,89	0,78	0,67

Таблиця 3 – Коефіцієнти лінійної апроксимації за формулою (1)

Форма поглиблень на поверхні	$a$	$b \cdot 10^5$
Циліндрична	0,585	9,541
Ромбоподібна		6,346
Квадратна	0,576	3,145

Рис. 6. Залежність відношення  $Nu/Nu_c$  від числа Рейнольдса:

○ – циліндричні поглиблення; + – ромбоподібні;  $\Delta$  – квадратні

жає сумарний ефект охолодження плівки води за рахунок конвективного теплообміну та випаровування рідини. З використанням формул (2) та (1), а також даних табл. 3 можна обчислити коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях з циліндричними, ромбоподібними та квадратними поглибленнями.

Таким чином, за результатами експериментів можна зробити висновок, що використання у плівкових градирнях поверхонь з циліндричними, ромбоподібними чи квадратними поглибленнями як зрошувачів є нераціональним. Для впровадження можна рекомендувати профільовані поверхні зі сферичними лунками діаметром 16 мм і глибиною 5 мм в межах об'ємної густини зрошування від 0,44 до 2,83 м<sup>3</sup>/(м·год).

## ВИСНОВКИ

1. Вперше експериментально досліджено вплив геометричної форми поглиблень на поверхні зрошувачів на тепловіддачу від стікаючої плівки води до оточуючого повітря. Розглянуто та порівняно чотири форми поглиблень з однаковою площею у плані та глибиною: сферичну, циліндричну, ромбоподібну та квадратну. Дослідження виконано на різних витратах води та різних швидкостях повітряного потоку, що обдуває плівку рідини у поперечному напрямку, а також в умовах нерухомого середовища.

2. Отримано емпіричні залежності, що дозволяють обчислити коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях зі сферичними, циліндричними, ромбоподібними та квадратними поглибленнями.

3. Встановлено, що найкращими з точки зору тепловіддачі є поверхні з поглибленнями у вигляді сферичних лунок. Такі зрошувачі можуть бути рекомендовані для впровадження на плівкових градирях.

1. *Дубровский В.В.* Экспериментальное исследование теплообмена пленки жидкости, стекающей по профилированной поверхности, с воздухом / В. В. Дубровский, А.М. Подвысоцкий, А.А. Шрайбер // Проблемы загальної енергетики. – 2009. – № 19. – С. 39–45.
2. *Шрайбер А.А.* Обобщение опытных данных по теплообмену пленки жидкости, стекающей по гладким и профилированным поверхностям, с воздухом / А.А. Шрайбер, В.В. Дубровский, А.М. Подвысоцкий // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 4. – С. 21–27.
3. *Дубровський В.В.* Тепловіддача на профільованих поверхнях промислових плівкових градирень / В.В. Дубровський,

О.М. Підвисоцький, М.С. Гришук, А.П. Неділько // Проблемы загальної енергетики. – 2014. – Вип. 3 (38). – С. 50–56.

4. *Халатов А. А.* Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил, Т. 5: Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков / А.А. Халатов, И.И. Борисов, С.В. Шевцов. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с.

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

*Надійшла до редколегії 10.02.2016*