

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 621.644:502.3

**В.В. ДУБРОВСКИЙ**, канд. техн. наук, **А.М. ПОДВЫСОЦКИЙ**, канд. техн. наук  
Институт общей энергетики НАН Украины, г. Киев

## ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПЛЕНОЧНЫХ ГРАДИРЕН ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОРОСИТЕЛЕЙ С ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*Рассматриваются перспективы использования профилированных поверхностей для охлаждения технологической жидкости в градирнях. Показано, какие факторы и в какой степени влияют на глубину охлаждения. Приведены примеры расчетов интенсивности теплообмена между водой и воздухом для различных конструктивных вариантов поверхностей течения.*

*Ключевые слова:* интенсификация теплообмена, профилированная поверхность, сферические лунки, градирня

Повышение эффективности охлаждения циркуляционной воды в градирнях – весьма актуальная задача, поскольку степень охлаждения играет важную роль в производственном процессе, использующем градирню, и существенно влияет на его технико-экономические показатели. Например, для энергоблока ТЭС мощностью 300 МВт снижение температуры воды перед конденсатором на 1,5 °С приводит к повышению мощности турбины примерно на 0,85 МВт и позволяет сэкономить значительное количество топлива. В пленочных градирнях, которые широко распространены в энергетике и промышленности, применяют различные способы повышения их охлаждающей способности. В первую очередь стремятся обеспечить в градирнях развитую поверхность теплообмена и получить при этом тонкую пленку стекающей жидкости, чтобы за счет этого уменьшить скорость течения и увеличить время контакта фаз вода – воздух. Это может быть достигнуто за счет значительного увеличения количества листов оросителя, что однако влечет за собой рост материалоемкости градирни. С целью улучшения технических и эксплуатационных характеристик градирни пытаются подобрать материалы и форму оросителя, а

также принять меры, снижающие вероятность ручьеобразования на листах.

Целью настоящей работы является анализ возможностей и путей повышения эффективности охлаждения воды в градирнях при использовании оросителей с профилированной поверхностью.

Один из путей интенсификации охлаждающей способности градирни – использование профилированных листов. Как показали проведенные нами экспериментальные исследования по теплообмену воды с окружающим воздухом [1, 2], нанесение на поверхность листов оросителя сферических лунок существенно повышает интенсивность теплоотдачи и соответственно степень охлаждения воды. Сферические лунки существенно (по сравнению с течением по гладкой поверхности) изменяют характер течения пленки воды. Лунки вызывают образование вихрей и бурунов в углублениях, что приводит к интенсивному перемешиванию жидкости с выносом более горячих придонных слоев на поверхность, с которой осуществляется теплообмен. Это приводит к росту реальной разности температур между водой и воздухом. Кроме того, за счет вихрей заметно снижается средняя скорость течения пленки, что, естественно, приводит к значительному увеличению времени контакта

© В.В. ДУБРОВСКИЙ, А.М. ПОДВЫСОЦКИЙ, 2011

фаз вода – воздух по сравнению с течением по гладкой поверхности. Все перечисленные обстоятельства положительно влияют на охлаждение водяной пленки.

В экспериментах были использованы гладкая и профилированные поверхности в виде отбортованных лотков с шириной  $l = 0,18$  м и длиной  $L = 1,7$  м с различными размерами лунок и расстояниями между ними.

Опыты показали, что в зависимости от размеров сферических лунок на поверхности, по которой стекает вода, и гидродинамических режимов течения теплоотдача увеличивается по сравнению с гладкой поверхностью в 1,5 ... 3 раза [1, 2].

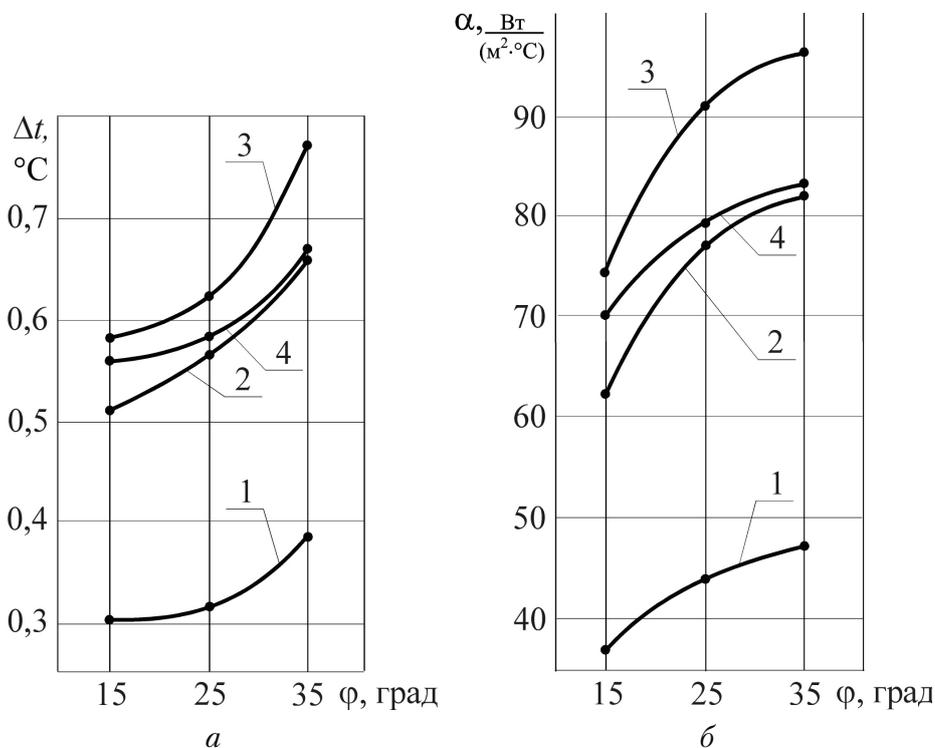
Эксперименты позволили определить влияние различных факторов на коэффициент теплоотдачи от нагретой жидкости к окружающему воздуху и степень охлаждения стекающей пленки воды  $\Delta t$ .

**Влияние угла наклона.** С увеличением угла наклона поверхности, по которой стекает вода, интенсивность теплоотдачи (рис. 1 б) и степень охлаждения жидкости (рис. 1 а), т. е. разность температур в начале и конце потока, увеличиваются. Это связано с тем, что увеличивается относительная скорость контактирующих фаз и турбулизация потока. На профилированных

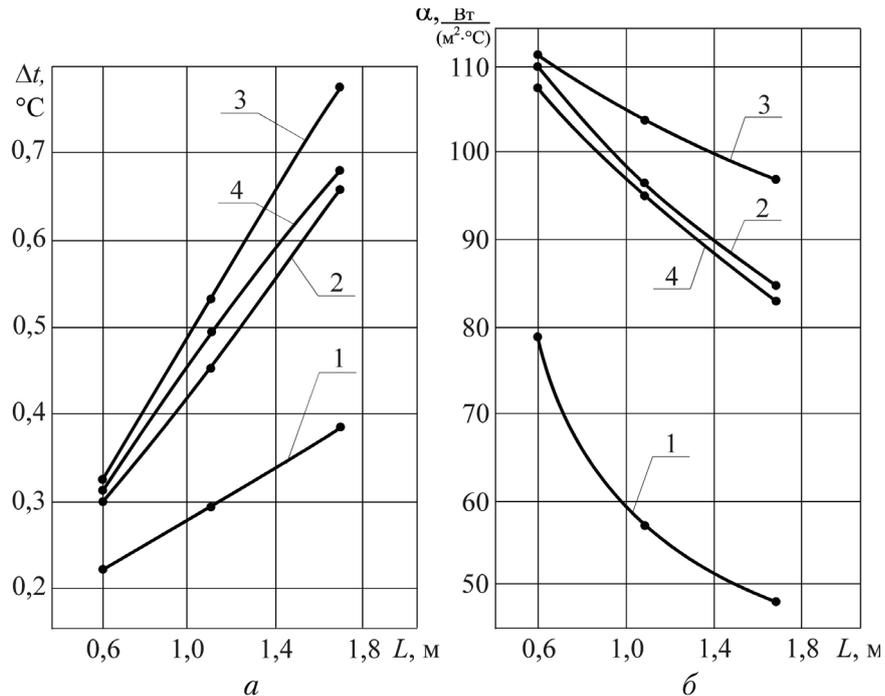
поверхностях рост угла наклона приводит к более интенсивному перемешиванию потока воды, что заметно отражается на интенсификации теплообмена. Из рисунка видно, что на лотках со сферическими лунками (кривые 2 – 4) вода охлаждается эффективнее. Здесь приняты такие же обозначения профилированных лотков, как и в [2], например, лоток Л20/6 имеет диаметр лунок 20 мм и глубину 6 мм.

**Влияние длины потока.** С увеличением длины потока коэффициент теплоотдачи для профилированной поверхности, впрочем, как и для гладкой, уменьшается (рис. 2 б) вследствие возрастания термического сопротивления на границе раздела фаз вода – воздух. Тем не менее, с увеличением длины потока степень охлаждения воды увеличивается за счет роста времени контакта фаз (рис. 2 а), причем более интенсивно на профилированных поверхностях (кривые 2 – 4).

**Влияние расхода жидкости.** Уменьшение расхода приводит к утоньшению стекающей пленки, замедлению скорости течения и соответственно увеличению времени контакта фаз. Все это способствует охлаждению стекающей воды, особенно существенно на лотках со сферическими лунками (рис. 3 а). В то же время



**Рис. 1.** Влияние угла наклона лотка на разность температур воды в начале и в конце лотка (а) и на коэффициент теплоотдачи (б): расход воды  $G = 0,18$  кг/с;  $L = 1,7$  м; 1 – гладкий лоток; 2 – лоток Л13/4; 3 – Л20/6; 4 – Л30/9

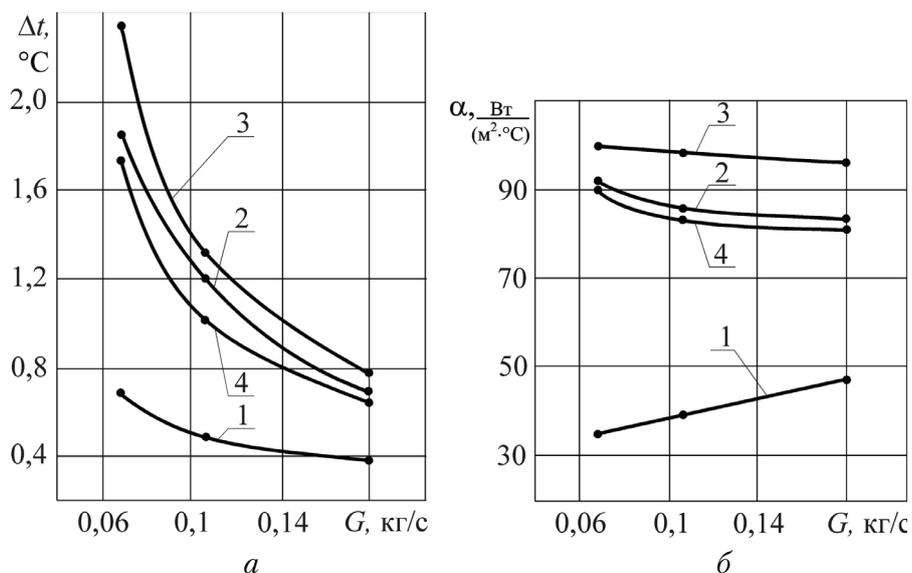


**Рис. 2.** Зависимость разности температур (а) и коэффициента  $\alpha$  (б) от длины потока:  $G = 0,18$  кг/с;  $\varphi = 35$  град; 1 – гладкий лоток; 2 – лоток Л13/4; 3 – Л20/6; 4 – Л30/9

влияние расхода на коэффициент теплоотдачи для гладкой и профилированных поверхностей разное. На гладкой поверхности коэффициент теплоотдачи растет, а на поверхностях с лунками – падает (рис. 3 б).

**Влияние относительной скорости воды и воздуха.** В основном эксперименты со стекающей пленкой воды проводились в покое

воздушной среде, при этом относительная скорость взаимодействующих фаз менялась за счет изменения угла наклона лотка и расхода воды. Для оценки влияния относительной скорости фаз вода – воздух на интенсивность теплообмена “в чистом виде” был организован встречный поток воздуха вдоль стекающей пленки воды. Скорость потока воздуха в опытах не превыша-



**Рис. 3.** Влияние расхода воды на степень охлаждения (а) и коэффициент теплоотдачи (б):  $\varphi = 35$  град;  $L = 1,7$  м; 1 – гладкий лоток; 2 – лоток Л13/4; 3 – Л20/6; 4 – Л30/9

ла 0,8 м/с. Заметим, что степень влияния относительной скорости на коэффициент теплоотдачи и интенсивность охлаждения воды для гладкой и профилированной поверхностей существенно различается (рис. 4). Так, увеличение скорости воздушного потока от нулевого значения в точке 1 до 0,8 м/с в точке 2 приводит для гладкой поверхности лишь к незначительному увеличению коэффициента теплоотдачи и степени охлаждения воды. В то же время для идентичных условий эксперимента при использовании профилированной поверхности коэффициент теплоотдачи и интенсивность охлаждения воды увеличиваются примерно в три раза.

Обращаем внимание на то очевидное обстоятельство, что относительная скорость фаз определяется как сумма скорости воздушного потока и скорости поверхностного слоя стекающей пленки. В экспериментах скорость движения пленки на профилированной поверхности в условиях опыта, представленных на рис. 4, составляла 0,32 м/с, что примерно втрое меньше скорости течения по гладкой поверхности (1,03 м/с).

**Влияние профиля поверхности.** Сложный механизм течения пленки воды по профилированной поверхности вносит свои коррективы в теплоотдачу по сравнению с течением по гладкой поверхности. Размеры сферических лунок на поверхности, по которой стекает вода (их диаметр и глубина), а также их расположение влияют на интенсивность теплоотдачи.

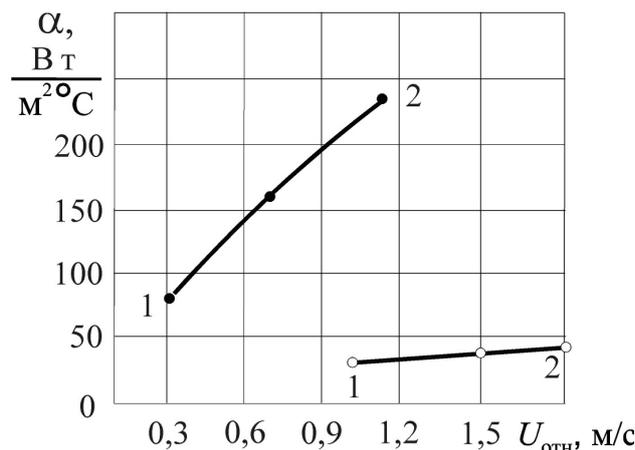
Опыты позволили выявить геометрию поверхности с лунками, которая дает наилучшие результаты по интенсивности охлаждения воды. Для условий экспериментов (расход жидкости  $G = 0,07 \dots 0,18$  кг/с, угол наклона поверхности относительно горизонта  $\varphi = 15 \dots 35$  град) наивысшую теплоотдачу при прочих равных условиях обеспечивает поверхность Л20/6.

**Обработка и обобщение экспериментальных данных.** При обобщении и обработке полученных экспериментальных данных в качестве безразмерного коэффициента теплоотдачи использовалось число Нуссельта  $Nu$ .

В частности, для поверхности Л20/6 была получена эмпирическая формула

$$Nu = 116,2 Re_{nl}^{-0,615} Re_{omn}^{0,818} \varphi^{0,012} \quad (1)$$

при  $1510 \leq Re_{nl} \leq 3980$ ,  $9600 \leq Re_{omn} \leq 63500$ ,  $15 \text{ град} \leq \varphi \leq 35 \text{ град}$ .



**Рис. 4.** Влияние относительной скорости фаз на интенсивность теплообмена: • – профилированная поверхность; ◦ – гладкая поверхность

Для сравнения приведем формулу для гладкого лотка [2], полученную для тех же условий эксперимента

$$Nu_{zl} = 3,178 Re_{nl}^{0,177} Re_{omn}^{0,434} \varphi^{0,042} \quad (2)$$

при  $1510 \leq Re_{nl} \leq 3980$ ;  $38400 \leq Re_{omn} \leq 162100$ ;  $15 \text{ град} \leq \varphi \leq 35 \text{ град}$ .

Число Рейнольдса  $Re_{nl}$ , которое характеризует режим течения пленки, определяется по формуле

$$Re_{nl} = 4\Gamma/v_w, \quad (3)$$

где  $\Gamma = V/\Pi$ , м<sup>2</sup>/с – удельный расход (объемная плотность орошения);  $V$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $\Pi$  – смоченный периметр, м;  $v_w$  – коэффициент кинематической вязкости воды. В проведенных опытах  $\Pi = l + 2\Delta$ , где  $\Delta$  – смоченный участок на бортах лотка (толщина пленки). Поскольку  $\Delta \ll l$ , в качестве смоченного периметра была принята ширина лотка.

Отметим, что, как показали проведенные эксперименты, для обеспечения высокоэффективной теплоотдачи с профилированной поверхности Л20/6 необходимо, чтобы удельный расход воды не превышал величины 0,001 м<sup>2</sup>/с (т.е. расход воды не превышал 0,18 кг/с при ширине поверхности течения 0,18 м). Этим ограничением обеспечивается необходимая толщина пленки на поверхности с данными лунками, при которой происходит интенсивная теплоотдача. Если необходим больший расход, он обеспечивается за счет расширения поверхности течения.

Относительное число Рейнольдса  $Re_{omn}$  рассчитывается как

$$Re_{omn} = U_{omn} L / \nu_a, \quad (4)$$

где  $U_{omn}$  – относительная скорость на границе раздела вода – воздух;  $\nu_a$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Для коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  зависимости (1) и (2) можно представить следующим образом в размерном виде:

$$\alpha = 0,807 U_{omn}^{0,818} G^{-0,615} L^{-0,182} \varphi^{0,012}; \quad (5)$$

$$\alpha_{zl} = 204,7 U_{omn}^{0,434} G^{0,177} L^{-0,566} \varphi^{0,042}. \quad (6)$$

Как видно из зависимости (5), при течении жидкости по профилированному лотку наибольшее влияние на коэффициент теплоотдачи оказывает относительная скорость контактирующих фаз, а наименьшее – угол наклона лотка. Для лотка с гладкой поверхностью наибольшее влияние оказывает длина потока [зависимость (6)].

**Анализ степени охлаждения воды при течении по профилированной поверхности.** Расчет степени охлаждения воды включает следующие этапы. Вначале определяется число  $Nu$  по формуле (1) с использованием (3) и (4). Задаемся расходом воды, углом наклона поверхности, ее длиной. Относительная скорость  $U_{omn} = U_{nl} + U_z$ , где  $U_{nl}$  – скорость движения жидкости на поверхности пленки. Эта величина может быть определена по эмпирической формуле, приведенной в [2]. Скорость газа  $U_z$  создается естественной тягой или вентилятором и также должна быть задана. При значительных скоростях воздушной среды скоростью  $U_{nl}$  можно пренебречь.

Коэффициент теплоотдачи определяется из соотношения

$$Nu = L / \lambda_a, \quad (7)$$

где  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха.

Затем, используя очевидные формулы для определения количества отданной теплоты  $Q$

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

можно найти искомую разность температур между входным и выходным сечениями потока

(степень охлаждения)  $\Delta t$ . Здесь  $F = l \cdot L$  – площадь поверхности пленки, которая контактирует с воздухом;  $t_w$  – средняя температура воды в лотке,  $t_w = (t_{w1} + t_{w2})/2$ ;  $t_{w1}$  – температура воды на входе в лоток;  $t_{w2}$  – температура воды в конце лотка;  $t_a$  – температура окружающего воздуха;  $c$  – удельная теплоемкость воды.

Задавая начальную температуру охлаждаемой воды  $t_{w1}$ , температуру окружающего воздуха  $t_a$ , расход воды  $G$ , площадь поверхности контакта воды с воздухом  $F$  и вычислив коэффициент теплоотдачи по приведенным выше формулам (1) и (7), находим температуру воды в конце лотка  $t_{w2}$  по формуле

$$t_{w2} = (2 c G t_{w1} + 2 \alpha F t_a - \alpha F t_{w1}) / (\alpha F + 2 c G).$$

Таким образом находим степень охлаждения воды  $t$  при течении по лотку.

В табл. 1, 2 приведены некоторые результаты расчетов теплообмена для профилированной поверхности Л20/6 при  $G = 0,1$  кг/с ( $\Gamma = 0,00056$  м<sup>2</sup>/с),  $\varphi = 30$  град. Для данных, приведенных в табл. 1, температура окружающего воздуха по сухому термометру  $t_a = 20$  °С, температура воды во входном сечении потока  $t_{w1} = 40$  °С.

Из табл. 1 видно, что при  $L = 1,7$  м для охлаждения воды на 8 °С необходимо обеспечить достаточно большую ( $U_{omn} = 4$  м/с) относительную скорость воздуха. В то же время близкие результаты ( $\Delta t = 8,9$  °С) можно получить при длине лотка 4 м и вдвое меньшей ( $U_{omn} = 2$  м/с) относительной скорости. Еще большее удлинение потока (до 6 м) позволяет охладить воду до 9,6 °С при меньшей ( $U_{omn} = 1,5$  м/с) относительной скорости. Таким образом, близкие значения  $t$  можно получать за счет увеличения длины потока при одновременном уменьшении относительной скорости фаз (отказываясь от энергозатратных вентиляторов и используя естественную тягу).

Табл. 2 иллюстрирует, как влияет ширина поверхности на степень охлаждения воды при фиксированном расходе, начальной температуре воды 35 °С и воздуха  $t_a = 25$  °С. Здесь фактически сказывается влияние толщины пленки, которая связана с расходом. Так, охлаждение воды примерно на 10 °С можно получить при  $L = 4$  м,  $l = 0,5$  м и  $U_{omn} = 3$  м/с, а также при  $U_{omn} = 2$  м/с,  $L = 6$  м и такой же ширине лотка.

Итак, одни и те же результаты по степени охлаждения жидкости могут быть получены

**Таблица 1**

$L, м$	$l, м$	$F, м^2$	$U_{омп}, м/с$	$\alpha, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	$t_w, ^\circ C$	$Q, Вт$	$\Delta t, ^\circ C$
1,7	0,18	0,306	0,4	103,8	39,3	612	1,5
			1,7	338,9	37,8	1845	4,4
			3	539,3	36,7	2756	6,6
			4	682,3	36	3342	8
4		0,72	0,4	88,8	38,6	1188	2,8
			2	331,2	35,6	3711	8,9
			3	461,5	34,3	4756	11,4
6		1,08	0,4	82,5	38,1	1610	3,8
			1	174,5	36,3	3076	7,4
			1,5	243,2	35,2	3997	9,6
			2	307,7	34,3	4756	11,4

**Таблица 2**

$L, м$	$l, м$	$F, м^2$	$U_{омп}, м/с$	$\alpha, Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	$t_w, ^\circ C$	$Q, Вт$	$\Delta t, ^\circ C$
4	0,18	0,72	3	461,5	32,2	2378	5,7
	0,33	1,32		461,5	30,8	3525	8,4
	0,5	2		461,5	29,8	4388	10,5
6	0,18	1,08	2	307,7	32,2	2378	5,7
	0,33	2		307,7	30,8	3545	8,5
	0,5	3		307,7	29,8	4388	10,5

различными способами, которые определяются предъявляемыми требованиями к конструкции при проектировании градириен.

**ВЫВОДЫ**

1. Расчеты показывают, что степень охлаждения технологической жидкости при пленочном течении может быть существенно повышена за счет использования специальных профилированных поверхностей. При использовании наиболее эффективной по теплоотдаче поверхности со сферическими лунками интенсивность теплообмена может быть повышена по сравнению с гладкой поверхностью в три раза.

2. Определено, что при течении жидкости по профилированному лотку наиболее существенным фактором, влияющим на коэффициент теплоотдачи, является относительная скорость контактирующих фаз, а наименьшим – угол наклона лотка. В то же время результаты проведенных расчетов показывают, что близкие значения по степени охлаждения воды можно получить за счет увеличения длины потока при одновременном уменьшении относительной

скорости фаз (отказываясь от энергозатратных вентиляторов и используя естественную тягу).

3. В зависимости от требований, предъявляемых к конструкции при проектировании градириен, одни и те же результаты по степени охлаждения жидкости могут быть получены различными способами, варьируя ширину потока (толщину пленки жидкости), длину потока (время контакта взаимодействующих фаз) и относительную скорость фаз. Выбор варианта решения определяется в конечном счете экономическими соображениями.

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 // Пром. теплотехника. – 2010. – Т. 32. – № 4. – С. 21–27.

*Надійшла до редколегії: 23.11.2010*