

УДК 536.24

**В. В. ДУБРОВСКИЙ**, канд. техн. наук**А. М. ПОДВЫСОЦКИЙ**, канд. техн. наук**А. А. ШРАЙБЕР**, доктор техн. наук

Институт общей энергетики НАН Украины, Киев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ, СТЕКАЮЩЕЙ ПО ПРОФИЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ, С ВОЗДУХОМ

*Проведены экспериментальные исследования теплообмена с окружающим воздухом пленки воды, стекающей по гладкой поверхности и по поверхности со сферическими лунками. Оценено влияние различных факторов на процесс теплообмена. Установлено, что профилирование поверхности существенно улучшает интенсивность теплообмена.*

Изыскание возможностей интенсифицировать процесс охлаждения циркуляционной воды в градирнях представляет значительный практический интерес, поскольку степень охлаждения воды существенно влияет на технико-экономические показатели энергетических систем и различных производственных процессов. В пленочных градирнях реализуется процесс теплоотдачи от стекающих пленок к восходящему потоку воздуха, и эффективность работы таких градирен зависит от интенсивности теплообмена. Поиск новых форм оросителей, улучшающих охлаждающую способность градирни, является актуальной задачей. Например, в работах [1, 2] приведены результаты многочисленных испытаний оросителей различной конфигурации, предназначенных для пленочных градирен. Оценивается эффективность работы оросителей, выполненных в виде пористых листов, плоских сеток, различных волнистых поверхностей. Отмечается, что в результате возникающей турбулизации жидкости эффект охлаждения повышается.

Вместе с тем следует отметить, что проведенные многими исследователями эксперименты по интенсификации теплообмена жидкости или газа со стенкой канала показали, что различного рода профилированные поверхности заметно улучшают теплообмен [3 – 5]. Одним из видов профилирования поверхностей теплообмена является нанесение на них сферических лунок. Сферические углубления, где формируются вихревые движения текущей жидкости, фактически являются турбулизато-

рами течения и интенсификаторами теплообмена. Подобные работы актуальны и перспективны. В связи с этим значительный интерес представляют исследования влияния профилированных поверхностей на теплообмен текущей жидкости не только с твердой стенкой, но и с окружающей газовой средой: будут ли, например, сферические лунки увеличивать теплоотдачу от стекающей жидкости окружающему воздуху. В доступной литературе авторы не нашли работ, посвященных теплообмену с окружающим воздухом жидкости, текущей по поверхности с углублениями, в частности, со сферическими лунками.

Цель настоящей работы состояла в экспериментальном исследовании влияния сферических углублений на поверхности на интенсивность теплообмена пленки текущей жидкости с окружающей газовой средой, т.е. изучался процесс, аналогичный имеющему место в пленочных градирнях.

### **Экспериментальный стенд, профилированные лотки и методика исследований**

На рис. 1 приведена функциональная схема стенда для изучения теплообмена пленки жидкости с окружающим воздухом при ее течении по различным профилированным поверхностям. Каркас стенда был изготовлен из специальных металлических рам, на которых монтировались циркуляционная система контура горячей воды и устройство для ее подачи на опытные лотки. На поверхности лотков формировалась пленка жидкости, которая сте-

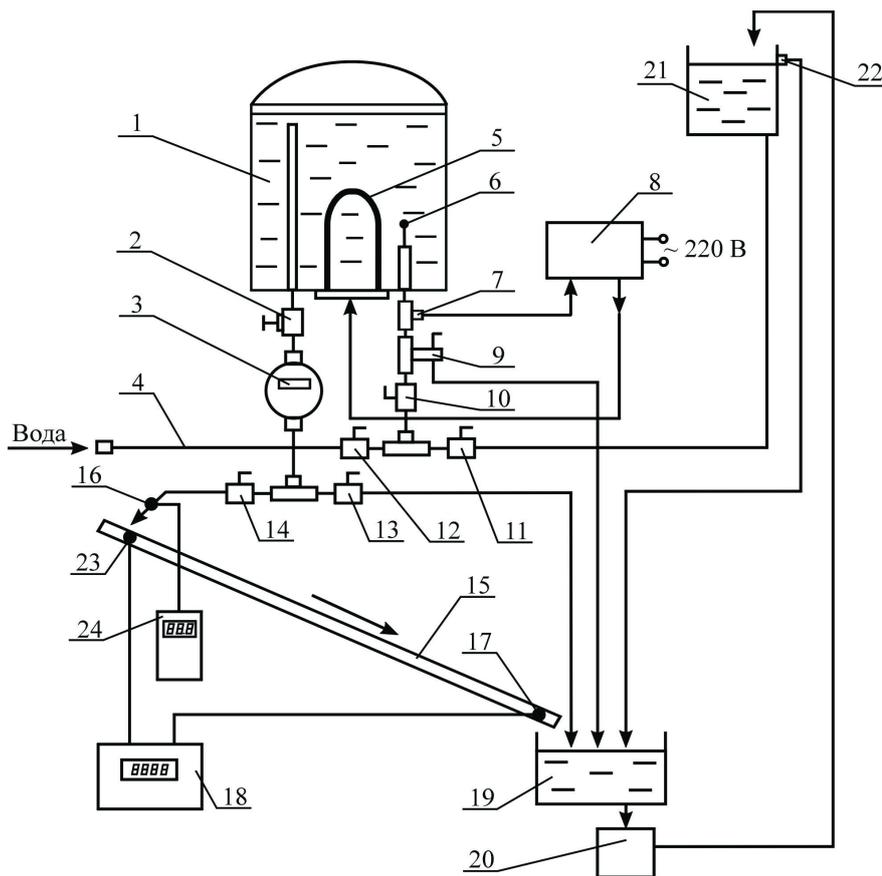


Рис. 1

кала по наклонной поверхности. При этом происходил теплообмен между горячей пленкой и окружающей воздушной средой, за счет чего вода охлаждалась. На стенде обеспечивалась циркуляция воды в замкнутом контуре. В процессе заполнения контура водой шланг 4 подключался к водопроводной магистрали. Далее закрывали краны 13 и 14 и открывали шаровые краны 10, 11 и 12. При этом вода под давлением поступала через предохранительный обратный клапан 9 и тройник 7 в накопительный водонагреватель 1 промышленного изготовления Gorenje TGU 50N, а через кран 11 вода заполняла напорный бак 21. Момент завершения заполнения контура сигнализировался перетеканием воды через переливной штуцер 22. Когда поддон 19 заполнялся приблизительно на одну треть, краном 12 перекрывали подачу воды в систему. Бак 21 обеспечивал определенное статическое давление в водонагревателе 1. Перед проведением опытов включали теплоэлектронагреватель (ТЭН) 5, который подключался к электронному термостабилизатору 8. Собственный терморегулятор водонагревателя Gorenje TGU 50N (позиционного типа) не

отключался, но не работал, так как его регулятор температуры был установлен на максимальное значение  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура, которая поддерживалась электронным термостабилизатором, была всегда ниже  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В качестве датчика температуры 6 использовался терморезистор типа СТ1-19, заведенный вглубь водонагревателя 1 через тройник 7 с уплотнителем. Термостабилизатор имел органы грубого и точного регулирования уровня температуры, которая поддерживалась неизменной. Термостабилизатор имел также индикатор, который сигнализировал о подключении ТЭНа к сети электропитания. Если индикатор начинал периодически включаться-выключаться, то это означало, что температура воды в нагревателе достигла установленного значения. После этого

краном 2 регулировали подачу воды на опытный лоток 15 с целью сформировать на поверхности лотка пленку определенной толщины. Расход горячей воды определялся при помощи счетчика 3 марки КВМ-U. Температуру воды, которая подавалась на лоток, контролировали при помощи цифрового термометра 24, к которому был подключен датчик температуры 16 (резистивный датчик сопротивления, изготовленный из медного провода).

Угол наклона опытных лотков 15 на стенде мог регулироваться при помощи специальных устройств. При этом положение лотков могло изменяться от горизонтального до вертикального, что позволяло регулировать скорость течения пленки жидкости. Нижняя и боковые поверхности лотков были термоизолированы, чтобы свести к минимуму теплопередачу от жидкости через материал, из которого изготовлены лотки. При смене лотков 15 на стенде в процессе опыта закрывали кран 14, а кран 13 открывали. При этом поток воды в контуре направлялся не в лоток, а непосредственно в поддон 19. Это делалось для того, чтобы не нарушать режим непрерывной циркуляции жид-

кости и общий режим термостабилизации температуры воды в контуре.

Стекающая по лотку вода собиралась в поддоне 19, откуда она с помощью центробежного насоса 20 с мокрым ротором перекачивалась в напорный бак 21. Таким образом, обеспечивалась циркуляция воды в контуре стенда.

Для учета влияния температуры и влажности окружающего воздуха на теплообмен с пленкой жидкости, стекающей по лотку, стенд был оборудован гигрометром психрометрическим ВИТ-2.

Перед опытом при помощи системы поддержки постоянной температуры в контуре циркуляции воды устанавливали термостабилизированный режим течения, при котором показание термометра 24 становилось стабильным. После этого проводились измерения степени охлаждения стекающей пленки. Разность температур между точками, которые соответствовали началу течения пленки (в верхней части лотка) и в конце (внизу лотка), измерялась специально изготовленным дифференциальным цифровым термометром 18 при помощи датчиков 23 и 17. В качестве основы для разработки этого прибора был использован высокоточный цифровой термометр промышленного изготовления. Высокая точность измерения температуры в нем обеспечивалась за счет оригинальных схемотехнических решений. В схему прибора были внесены изменения, которые позволили преобразовать его в дифференциальный термометр, способный непосредственно измерять разность температур между двумя точками с точностью  $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне температур  $30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Относительная погрешность измерений при разности температур в опытах  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляла 6%. Случайные ошибки исключались несколькими измерениями температуры на данном режиме течения, при этом повторяемость результатов измерений была весьма высокой.

В опытах использовались модельные поверхности – лотки, по которым стекала пленка жидкости. Лотки изготавливались из оцинкованной стали толщиной  $0,55\text{ мм}$ , шириной  $180\text{ мм}$  и длиной  $1800\text{ мм}$ . Эксперименты проводились с лотком, поверхность которого была гладкой, а также с двумя профилированными лотками, на которых были выштампованы сферические лунки. На одном из лотков было сформировано 77 лунок диаметром  $30\text{ мм}$  и

глубиной  $9\text{ мм}$ , расположенных в шахматном порядке – 31 ряд по 3 и 2 лунки в ряду поочередно (такой лоток условно обозначен Л30/9 и показан на рис. 2), на втором – 481 лунка диаметром  $13\text{ мм}$  и глубиной  $4\text{ мм}$ , также расположенных в шахматном порядке – 74 ряда по 7 и 6 лунок в ряду поочередно (условно обозначен Л13/4). Для получения лунок на поверхности лотков был специально спроектирован и изготовлен штамп, с помощью которого, используя разные пары матрица – пуансон, можно было формировать лунки с разными геометрическими размерами.

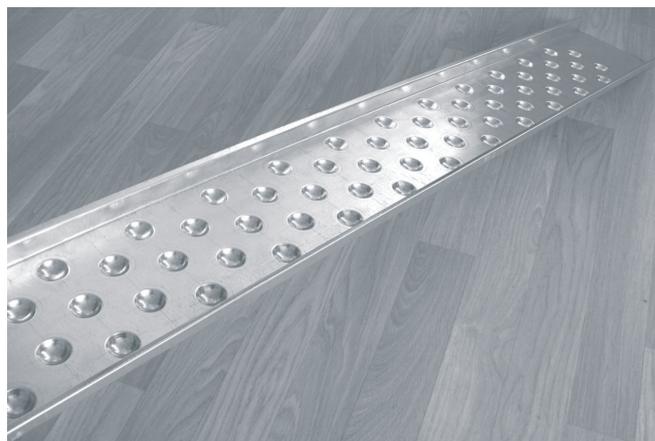


Рис. 2

Изготовленные профилированные лотки подчиняются условиям геометрического подобия. Отношения диаметров лунок, их глубин, и расстояний между центрами лунок, расположенных в углах правильного треугольника, составляют одну и ту же величину –  $2,3$ .

Эксперименты выполнялись по следующей методике. Опытный профилированный лоток устанавливался на стенде в термоизолированном кожухе под определенным углом  $\varphi$  наклона ( $\varphi$  – угол между горизонтом и поверхностью лотка). Вода, циркулирующая в замкнутом контуре стенда, стекала по поверхности лотка, при этом она полностью покрывала поверхность без формирования каких-либо разрывов и струек. При помощи электронагревателя и системы регулирования температуры обеспечивался термостабилизированный режим течения воды в контуре. В процессе опыта при помощи цифрового термометра измерялась температура  $t_1$  воды в начале ее течения по поверхности лотка, а при помощи дифференциального цифрового термометра измерялась разность  $\Delta t$  между температурами воды

в верхней и нижней точках лотка. Для каждого опыта измерялась температура  $t_{\text{возд}}$  воздуха, который окружал лоток. При помощи счетчика измерялся также расход жидкости по лотку. Находилась, кроме того, относительная влажность воздуха с помощью психрометрического гигрометра. Каждая серия экспериментов состояла из нескольких измерений всех необходимых параметров, а затем находились их средние значения. После окончания опыта с профилированным лотком проводилась его замена на гладкий, и аналогичная процедура измерений повторялась. Интервал времени между опытами с профилированным и гладким лотками был небольшой, поэтому условия эксперимента оставались практически идентичными.

После получения экспериментальных данных определялось количество тепла  $Q$ , которое отбиралось от воды при ее течении по лотку:

$$Q = c G \Delta t, \quad (1)$$

где  $c = 4182$  Дж/(кг · °С) – удельная теплоемкость воды;  $G$  – расход жидкости, кг/с.

С другой стороны, количество тепла  $Q$  можно определить как

$$Q = \alpha F (t_{\text{вод}} - t_{\text{возд}}), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи на длине течения пленки,  $F$  – площадь поверхности пленки, которая контактирует с воздухом,  $t_{\text{вод}}$  – средняя температура воды в лотке.

В результате вычислений из (1) и (2) находились средние значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  для профилированного и  $\alpha_{\text{гл}}$  для гладкого лотков.

Приведем некоторые соображения относительно того, насколько правомерно оценивать влияние профиля поверхности на интенсивность охлаждения воды в виде соотношения между коэффициентами теплоотдачи для профилированной и гладкой поверхностей. В условиях большой систематической погрешности эксперимента такое представление влияния формы поверхности на интенсификацию обменных процессов было бы некорректным. Поэтому необходимо оценить возможную систематическую погрешность эксперимента.

Охлаждение воды при ее течении по лотку осуществляется за счет конвективного теплообмена пленки с окружающим воздухом и, кроме того, за счет массообменных процессов – испарения жидкости с поверхности пленки. Несмотря на то, что нижняя и внешние боковые

поверхности лотка были тщательно термоизолированы, все же некоторое количество тепла неминуемо отводилось от пленки через термоизоляцию и боковые поверхности лотка. Эти потери тепла вносят систематическую погрешность при вычислении коэффициента теплоотдачи от пленки к воздуху. Чтобы качественно оценить величину возникающей погрешности, по методике [6, 7] были выполнены расчеты конвективного тепло- и массообмена при обтекании плоской пластины. Для этого по известным эмпирическим формулам были рассчитаны числа Нуссельта ( $Nu = \alpha l / \lambda$ , где  $l$  – длина лотка,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха) и Шервуда ( $Sh = \beta l / D$ , где  $\beta$  – коэффициент массообмена,  $D$  – коэффициент диффузии пара в воздухе). Из чисел  $Nu$  и  $Sh$  находились соответственно коэффициенты тепло- и массопереноса.

Количество тепла  $Q_{\text{кон}}$ , которое отводится от пленки за счет конвективного теплообмена, находилось по формуле (2). Далее вычислялось количество тепла  $Q_{\text{исп}}$ , которое отбиралось от пленки за счет массообмена. Масса испаряющейся жидкости за единицу времени равна  $J = F \beta (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{а}} \psi)$ , где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность сухого насыщенного пара воды при средней температуре пленки,  $\rho_{\text{а}}$  – то же при температуре окружающего воздуха,  $\psi$  – относительная влажность воздуха. При этом тепло, которое отбиралось от пленки,  $Q_{\text{исп}} = J r$ , где  $r$  – скрытая теплота парообразования. Для условий одного из экспериментов было установлено, что  $Q_{\text{исп}}/Q_{\text{кон}} \approx 5,2$ . Другими словами, вклад конвективного теплообмена в охлаждение воды приблизительно в 5 раз меньше, чем вклад массообменных процессов.

Итак, теплоотдача через дно и боковые стенки лотка, которая не может быть учтена при проведении экспериментов, незначительна (с учетом приведенных выше обстоятельств), во-первых, потому, что размеры этих поверхностей невелики по сравнению с поверхностью пленки, а также потому, что эти поверхности принимают участие лишь в конвективном теплообмене. Поэтому систематическая погрешность вычисления  $\alpha$  из полученных экспериментальных данных не является существенной величиной.

Таким образом, на основе приведенных рассуждений можно считать, что величина отношения  $\alpha/\alpha_{\text{гл}}$  корректно отображает повыше-

ние интенсивности охлаждения воды при ее течении по профилированным поверхностям.

Эксперименты проводились на расходах  $G$  жидкости от 0,068 до 0,159 кг/с и углах  $\varphi$  наклона лотков 5, 15, 30, 45 и 60 градусов. Стабилизированная температура  $t_1$  воды в контуре циркуляции составляла 40 и 50 °С.

### Результаты исследований и их обсуждение

Проведенные эксперименты показали, что наличие сферических лунок на поверхности лотка существенно улучшает эффективность охлаждения стекающей жидкости: теплоотдача от пленки к окружающему воздуху на профилированной поверхности заметно интенсивнее по сравнению с гладкой [8]. Можно предположить, что столь существенное увеличение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  связано с интенсивным перемешиванием жидкости при ее течении по профилированной поверхности.

В процессе опытов прежде всего была изучена качественная картина течения воды по лоткам. При стекании пленки воды по гладкой поверхности наблюдались некоторые возмущения поверхности жидкости. При стекании воды по лотку с лунками характер течения жидкости заметно изменялся. Распределение воды по поверхности лотка с лунками было более равномерным, практически не наблюдалось образование ручьев, которое могло иметь место на гладком лотке. В углублениях сферических лунок возникали циркуляционные зоны с образованием вихрей. Режим течения в лунках вносил возмущения в течение воды по гладкой части поверхности лотка (между лунками) как позади сферических углублений, так и в сторону от лунок. При определенных углах наклона профилированных лотков стекающая пленка воды формировала в лунках специфические “бурунчики” разного размера, и течение пленки на некоторых режимах сопровождалось интенсивным образованием брызг. При углах наклона лотка  $\varphi = 45$  град и, в особенности, 60 град образовывалось очень много капель, которые вносили определенные погрешности при определении коэффициента теплоотдачи от пленки. Отметим, что на углах 15 и 30 град брызг при течении воды практически не было. Подобные явления при стекании пленки по гладкой поверхности не наблюдались.

Специально проведенные расчеты показали, что интенсификация теплообмена воды с

воздухом на поверхностях с лунками намного больше, чем увеличение поверхности раздела вода – воздух за счет сферических углублений, т.е. не может быть объяснена лишь увеличением поверхности контакта фаз.

Все приведенные ниже данные и зависимости относятся к следующим условиям эксперимента: стабилизированная температура воды в контуре циркуляции  $t_1 = 40$  °С, длина течения воды по лотку – 1,7 м, площадь поверхности пленки, которая контактировала с воздухом –  $F = 0,306$  м<sup>2</sup>, разность температур между водой и воздухом (среднее значение)  $t_{\text{вод}} - t_{\text{возд}} = 18,6$  °С.

На рис. 3 в качестве примера показано влияние расхода воды, текущей по лотку с углом наклона  $\varphi = 30$  град, на степень охлаждения жидкости для трех типов лотков: 1 – профилированный лоток Л13/4, 2 – Л30/9, 3 – гладкий лоток. Эксперименты показали, что разность  $\Delta t$  между температурами воды в верхней и нижней точках потока значительно больше для лотков со сферическими лунками. С увеличением расхода степень охлаждения воды уменьшается. Отметим, что лоток с большими размерами лунок на больших расходах работает более эффективно.

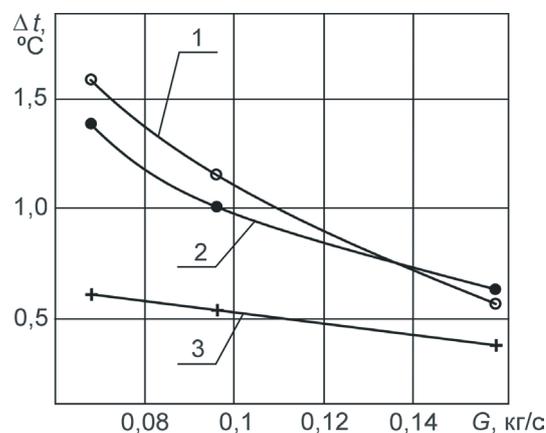


Рис. 3

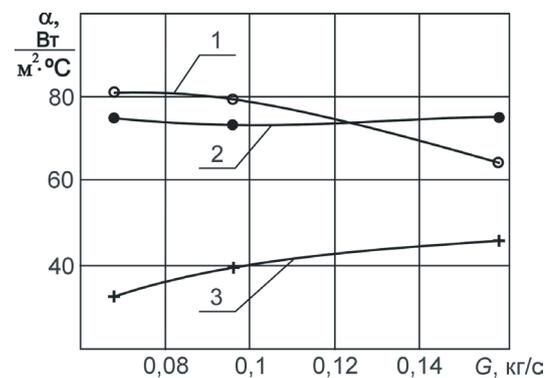


Рис. 4

Рис. 4 ілюструє характер змінення коефіцієнта теплоотдачи  $\alpha$  в залежності від расхода на лотках з різним профілем поверхності (обозначення і умовія експеримента те же, що і на рис. 3). Як видно із отриманих результатів, коефіцієнт  $\alpha$  на профілюваних лотках (криві 1, 2) значно більше по порівнянню з гладким лотком (крива 3). На малих расходах кращі результати забезпечує лоток з меншими лунками (крива 1). При великих расходах, як показали досліди, коефіцієнт теплоотдачи найбільший на лотку з великими лунками (крива 2). Деяке (хоча і невелике) збільшення коефіцієнта  $\alpha$  на лотку з великими лунками і в те же час незначительне його зменшення на лотку з малими лунками з ростом расхода можна пояснити тим, що з збільшенням расхода і, відповідно, ростом товщини плівки лунки малої розміру не здатні забезпечити достатній рівень турбулізації по всій товщині потоку. Тому, ймовірно, вплив малих лунок на інтенсифікацію теплообмінних процесів з повітрям при великих расходах буде малоєфективним.

На основанні отриманих експериментальних даних проаналізовано вплив кута нахилу лотка на коефіцієнт теплоотдачи і ступінь охолодження води (данні приводяться для расходів 0,068 і 0,159 кг/с). На гладкому лотку охолодження води декілька покращується на куті 30 град (по порівнянню з кутом 15 град) і залишається практично незмінним до 45 град. Це невелике збільшення  $\Delta t$  пояснюється збільшенням відносної швидкості води і повітря на великих кутах нахилу лотка. Практична незмінність величини  $\Delta t$  в діапазоні кутів  $\varphi = 30 \div 45$  град, можливо, пояснюється тим, що, незважаючи на збільшення відносної швидкості з ростом кута нахилу, час контакту води з повітрям зменшується, і при цьому ступінь охолодження води не змінюється.

На лотках со сферическими лунками (як з великими Л30/9, так і з малими Л13/4) збільшення кута нахилу завжди приводить до інтенсифікації охолодження води. По-видимому, тут зростає швидкість руху плівки і, відповідно, ступінь турбулентності потоку надає більш сильне вплив на теплообмін, ніж час контакту. Замечено в дослідах з профілюваними лотками більш інтенсивне збільшення коефіцієнта теплоотдачи

при кутах нахилу більш 40 град пояснюється бризообразованием. Естествоно, коефіцієнти  $\alpha$  однозначно визначають змінення температури води  $\Delta t$  в лотку при інших рівних умовіях.

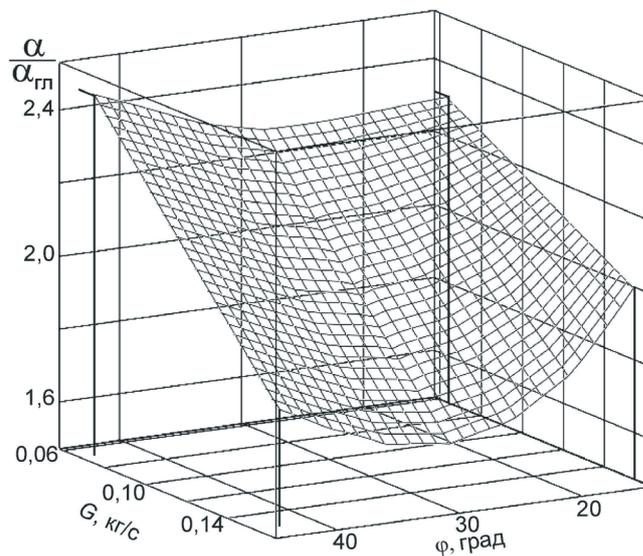


Рис. 5

На рис. 5 показана залежність інтенсивності теплоотдачи від расхода води, текучої по лотку, і кута його нахилу. Для прикладу приведено профілюваний лоток з лунками великого розміру Л30/9. Рисунок ілюструє достатньо складний характер залежності  $\alpha/\alpha_{\text{гл}} = f(G, \varphi)$ . Вплив різних параметрів на теплообмін плівки з повітрям, наприклад, нахил лотка і зв'язана з цим швидкість течії; расход води і зв'язане з ним утворення плівки певної товщини; ступінь турбулентності потоку, яка обумовлена наявністю на поверхні углублень різного розміру, – все це може впливати на коефіцієнт теплоотдачи. Повністю зрозуміло, що чим більше коефіцієнт теплоотдачи, тим краще охолодження рідини. Тим не менше слід відзначити, що не завжди більше значення відношення  $\alpha/\alpha_{\text{гл}}$  відповідає кращим умовіям охолодження. Так, наприклад, для лотка Л30/9 з расходом води  $G = 0,159$  кг/с відношення  $\alpha/\alpha_{\text{гл}}$  при куті нахилу  $\varphi = 15$  град (див. рис. 5) становить 2,01 (коефіцієнти  $\alpha = 62,82$  Вт/(м<sup>2</sup> °С),  $\alpha_{\text{гл}} = 31,27$  Вт/(м<sup>2</sup> °С)), а при куті 30 град – 1,65 (коефіцієнти  $\alpha = 75,28$  Вт/(м<sup>2</sup> °С),  $\alpha_{\text{гл}} = 45,64$  Вт/(м<sup>2</sup> °С)), що помітно менше. І хоча відношення  $\alpha/\alpha_{\text{гл}}$  на куті 30 град менше, ефективність охолодження в цих умовіях вище, оскільки самі коефіцієнти теплоотдачи більші. Максимальне значення відношення  $\alpha/\alpha_{\text{гл}}$ , відповідуючі малому расходу і куту нахилу

45 град, объясняется интенсивным образованием брызг на этом режиме течения. Во всех случаях увеличение расхода воды, стекающей по лотку, приводит к уменьшению отношения коэффициентов теплоотдачи.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что отношение  $\alpha/\alpha_{\text{гд}}$  не-

однозначно характеризует интенсивность охлаждения воды, и этот параметр зависит от определенных условий рабочего процесса. Поэтому для достижения наилучшего охлаждения необходимо в комплексе оценивать влияние всех факторов на рассматриваемый процесс.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований подтверждено предположение о повышении интенсивности теплообмена стекающей пленки воды при использовании профилированных поверхностей с углублениями – сферическими лунками. Выявлен факт существенной интенсификации теплоотдачи от воды к воздуху. Полученные результаты представляют большой интерес для разработки эффективных оросителей пленочных градирен.

2. Получены опытные данные о степени ох-

лаждения воды, стекающей по гладкой и профилированным поверхностям на разных режимах течения, и вычислены соответствующие коэффициенты теплоотдачи от нагретой жидкости к окружающему воздуху.

3. Определено влияние расхода воды и угла наклона лотка на интенсивность охлаждения.

4. Дана оценка влияния формы поверхности на интенсивность охлаждения воды в виде соотношения между коэффициентами теплоотдачи для профилированной и гладкой поверхностей.

1. Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И. Градирни промышленных и энергетических предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
2. Арефьев Ю. И., Беззатеева Л. П. Сетчатые оросители из пластмасс // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 6. – С. 34 – 38.
3. Леонтьев А. И., Олимпиев В. В., Дилевская Е. В., Исаев С. А. Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхности со сферическими выемками // Изв. Росс. акад. наук, Энергетика. – 2002. – № 2. – С. 117 – 135.
4. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Баранов П. А. Моделирование смерчевой интенсификации теплообмена при низкоскоростном движении воздуха в прямоугольном канале с лунками // Теплоэнергетика. – 2007. – № 3. – С. 22 – 28.
5. Халатов А. А., Борисов И. И., Шевцов С. В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил. Т. 5: Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с.
6. Лыков А. В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.
7. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1969. – 440 с.
8. Дубровский В. В., Подвысоцкий А. М., Шрайбер А. А. Теплообмен с воздухом пленки жидкости, стекающей по плоской поверхности со сферическими углублениями // Проблемы загальной энергетики. – 2008. – № 18. – С. 32 – 33.