

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 697.973

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ГРАДИРЕН С ПОМОЩЬЮ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ВОДОСЛИВОВ

**О.Б. МЕЖЕННАЯ**

*Полесский государственный университет,  
г. Пинск, Республика Беларусь, mezennaia-o@mail.ru*

### ВВЕДЕНИЕ

В большинстве случаев на предприятиях для охлаждения оборотной воды используются вентиляторные градирни. На сегодняшний момент существует множество проблем, связанных с использованием таких градирен [1].

Оросители являются основным конструктивным элементом градирни, определяющим ее охлаждающую способность. При использовании существующих конструкций капельных оросителей в проточной части градирни наблюдаются большие аэродинамические сопротивления, что приводит в свою очередь к значительным энергетическим затратам. На эксплуатационные характеристики оросителей влияет и материал, из которого они выполнены [1–4].

Основные проблемы, связанные с эксплуатацией градирен с деревянными оросителями, состоят в замене данных оросителей каждые три года вследствие вымывания из них связывающего вещества – целлюлозы. Этому в значительной мере способствует хлорирование, увеличение рН оборотной воды, некачественная пропитка антисептическими растворами деревянных изделий, а также биологические и химические процессы, происходящие на поверхности древесины, находящейся во влагонасыщенном состоянии.

Недостатком градирни с асбестоцементным оросителем является проблема замены данных оросителей. В результате долгой эксплуатации на поверхности листов происходит нарастание накипи (выделение карбоната кальция), что приводит к уменьшению зазоров между листами оросителя и увеличению его массы. Вследствие этого происходит снижение охлаждающей способности градирни за счет увеличения аэродинамического сопротивления, значительным энергетическим затратам. Крепежные болты ржавеют в результате большой влажности внутри градирни, попеременного увлажнения и высушивания в летнее время, что делает замену оросителя очень трудоемкой [2].

По результатам научных исследований, наиболее высокий эффект охлаждения обеспечивает пленочный ороситель, который обеспечивает меньшее сопротивление движению воздуха, меньшие энергетические затраты, меньший капельный унос по сравнению с капельным оросителем. Однако существующие конструкции таких оросителей чувствительны к наличию в воде нефтепродуктов, взвешенных веществ и других примесей, вызывающих зарастание зазоров между элементами, для его изготовления требуется большой расход материалов [1].

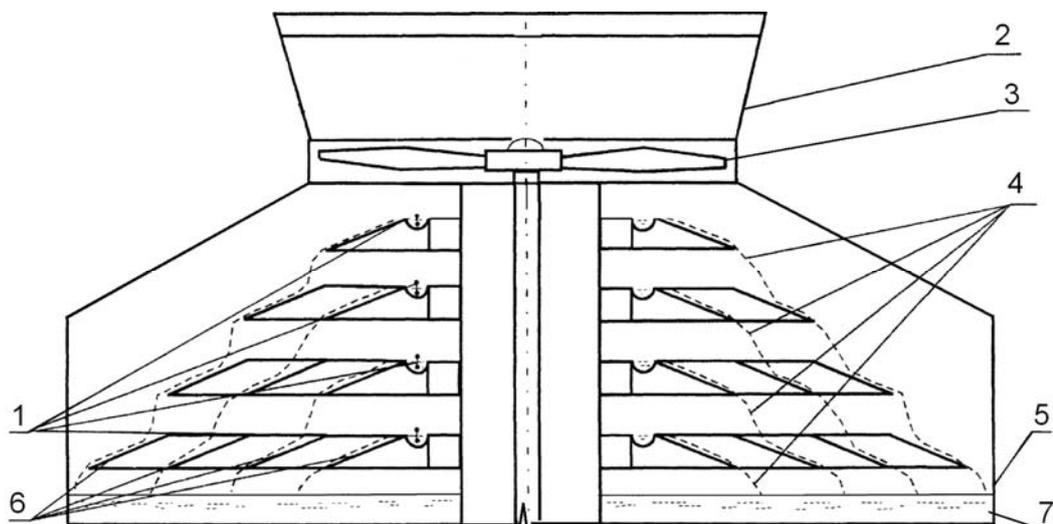
Задача исследований – создать конструкцию струйного аппарата для формирования протяженной куполообразной водяной завесы с большой поверхностью охлаждения для повышения эффективности охлаждения воды в системах оборотного водоснабжения. При этом учитывался ряд показателей – долговечность, изнашиваемость материала, прочность и массу оросителя, легкость установки, доступность ремонтов и осмотров, а также наличие в охлаждаемой воде взвешенных веществ и агрессивных примесей.

В работе исследовалась возможность применения в вентиляторной градирне в качестве оросителя аппарата в виде четырех ярусов водосливов с круглым ребром, способного формировать протяженные куполообразные водяные завесы с толщиной пленки от 1,5 мм до 3 мм [5, 6].

## МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования теплообмена в вентиляторных градирнях с оросителем в виде четырех ярусов водосливов с круглым ребром была реконструирована вентиляторная градирня, представленная на рис. 1. В табл. 1 приведены основные геометрические параметры градирни и оросителя.

Экспериментальная установка состояла из корпуса 5, осевого вентилятора 3, вытяжной башни (диффузора) 2 и пленочного охладителя, включающего четыре яруса, огибающих друг друга водосливов 6, куполообразных водяных завес 4 и водосборного бассейна 7.



1 – термометры; 2 – вытяжная башня; 3 – вентилятор; 4 – куполообразные жидкостные завесы; 5 – корпус градирни; 6 – водосливы; 7 – водосборный бассейн

Рис. 1. Экспериментальная установка градирни

Температура воды контролировалась ртутными термометрами 1, установленными в приемных чашах и на изливе, на уровне бассейна, каждой куполообразной завесы. Для замера температуры воды в водосборном бассейне градирни ртутные термометры помещались в специальную оправу со стаканом в нижней части, позволяющим сохранить показание термометра в момент производства отсчета.

Скорость воздуха над оросителем замерялась крыльчатými анемометрами ТА35, установленными в центре каждой равновеликой площади. Измерение параметров воздуха производилось по двум перпендикулярным диаметрам градирни. Измерение температур воздуха в точках замеров осуществлялось многоканальным прецизионный цифровым термометром Метран–514–ММП, датчики температур были подвешены на высоте 10 м от оросителя. Температура воздуха на входе в градирню была также измерена термометром Метран–514–ММП. Отсчет температур производился с точностью 0,015 °С.

Скорость ветра измерялась электронным анемометром ТА35, барометрическое давление – барометром-анероидом «БАММ–1». Относительная влажность  $\varphi$  была измерена с помощью термогигрометра HI 93640. Расход воды на градирню был непосредственно измерен с помощью расходомера УЗС–1.

Цель данных испытаний:

- оценка охладительного эффекта данного оросителя;
- получение гидротермической характеристики градирни, которая сводится к нахождению коэффициентов теплоотдачи, массоотдачи и гидравлического сопротивления по результатам натуральных испытаний.

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методикой проведения натуральных гидротермических и аэродинамических испытаний градирен испарительного типа [7].

Таблица 1. Основные размеры градирни и оросителя

Наименование	Размеры
Диаметр градирни	31 м
Высота градирни	26 м
Количество ступеней, $N$	4
Угол раскрытия отбойников, $\varphi$	120°
Диаметр стояка	1,0 м
Длина конической образующей водослива	2,3 м
Минимальная толщина куполообразной жидкостной завесы при слиянии с обводным каналом	0,0015 м
Глубина обводного канала, $H_{ок}$	1,2 м
Материал покрытия конических образующих водосливов	ПНД
Высота водосливов	1,15 м
Диаметр верхнего пояса первого водослива	8 м
Диаметр нижнего пояса первого водослива	12 м
Диаметр верхнего пояса водослива второй ступени	12 м
Диаметр нижнего пояса водослива второй ступени	16 м
Диаметр верхнего пояса водослива третьей ступени	16 м
Диаметр нижнего пояса водослива третьей ступени	20 м
Диаметр верхнего пояса водослива четвертой ступени	20 м
Диаметр нижнего пояса водослива четвертой ступени	24 м
Шаг между водосливами	2,55 м

Характеристики градирни определялись путем совместного решения следующих уравнений, описывающих процесс испарительного охлаждения циркуляционной воды:

а) Уравнение теплового баланса градирни:

$$[W(t_1 - t_2) + W_u t_2] c_{жс} = G_v (h_1 - h_2), \quad (1)$$

где левая часть уравнения представляет собой количество тепла, отданного водой в охладителе, а правая – количество тепла, воспринятого воздухом.

Это уравнение может быть записано также в следующем виде:

$$G_v (h_1 - h_2) = \beta_{xv} \Delta h_{cp} V = \frac{1}{k} W \Delta t, \quad (2)$$

где  $k = 1 - \frac{W_u t_2}{G_v (h_1 - h_2)} = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta h} t_2$ .

Количество тепла, воспринятого воздухом путем конвекции:

$$G_v c_v (\theta_1 - \theta_2) = \alpha_v (t - \theta)_{cp} V. \quad (3)$$

б) Уравнение силы тяги:

$$H_d (\rho_1 - \rho_2) = \zeta \frac{\omega^2 \rho_{cp}}{2g}. \quad (4)$$

В приведенных уравнениях принято:

$W$  – расход воды на градирню, кг/ч;

$W_u$  – количество испарившейся воды, кг/ч;

$G_v$  – расход воздуха через ороситель, кг/ч;

$(t - \theta)_{cp} = \frac{t_1 + t_2 - \theta_1 - \theta_2}{2}$  – средняя разность температур воды и воздуха, °С;

$t_1, t_2$  – температура поступающей и охлажденной воды, °С;  
 $\theta_1, h_1$  – температура (°С) и теплосодержание (Дж/кг) наружного воздуха на входе в градирню;  
 $\theta_2, h_2$  – то же на выходе из градирни;  
 $\rho_1, \rho_2$  – плотность воздуха на входе и выходе из градирни, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_{ж}$  – теплоемкость воды, принимаемая равной 4,19 кДж/кг К;  
 $c_{в}$  – теплоемкость влажного воздуха, принимаемая равной 1,05 кДж/кг К;  
 $\beta_{хв}$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к единице объема оросителя, кг/м<sup>3</sup>·ч;  
 $\alpha_v$  – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>3</sup>·К;

Средняя логарифмическая разность теплосодержаний воздуха для противоточного оросителя, Дж/кг:

$$\Delta h_{cp} = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{2,3 \lg \frac{\Delta h_1 - \delta h''}{\Delta h_2 - \delta h''}};$$

где  $\Delta h_1 = h_1'' - h_1$  – разность теплосодержаний воздуха на стороне входа воды в градирню, Дж/кг;

$\Delta h_2 = h_2'' - h_2$  – то же на стороне выхода воды, Дж/кг;

$$\delta h'' = \frac{h_1'' + h_2'' - 2 h_m''}{4} \text{ – Дж/кг,}$$

$h_1'', h_2'', h_m''$  – теплосодержание насыщенного воздуха соответственно при температуре  $t_1, t_2, \frac{t_1 + t_2}{2}$ ,

Дж/кг;

$\Delta x$  – разность влагосодержаний уходящего и наружного воздуха, кг/кг;

$\Delta t = t_1 - t_2$  – перепад температур воды в градирне, °С;

$\zeta$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$\omega$  – средняя скорость воздуха в оросителе, условно отнесенная к его полному сечению, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения тела, м/с<sup>2</sup>;

$\rho_{cp} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{2}$  – средняя плотность воздуха на стороне входа и выхода из градирни, кг/м<sup>3</sup>;

$H_d = H_b + 0,5 H_{op}$  – действующая (с точки зрения создания тяги) высота вытяжной

башни, м;

где  $H_b$  – высота вытяжной башни над оросителем, м;

$H_{op}$  – высота оросителя, м;

$V$  – активный объем оросителя, т.е. объем, заполненный непосредственно оросительным устройством, м<sup>3</sup>.

Для определения теплосодержания, влагосодержания и плотности воздуха использовались формулы:

$$h = c t + x (\tau + c_n t) = 0,24 t + x h'', \quad (5)$$

$$x = 0,622 \frac{\varphi p''}{P_b - \varphi p''}, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{P_b - \varphi p''}{R_g (t + 273,2)} + \varphi \rho'', \quad (7)$$

где  $h$  – теплосодержание влажного воздуха, Дж/кг;

$c$  – теплоемкость сухого воздуха, кДж/кг·К, принимаемая равной 1 кДж/кг К;

$h''$  – теплосодержание водяного пара в воздухе, Дж/кг;

$t$  – температура воздуха, °С;

$\chi$  – влагосодержание воздуха, кг/кг;  
 $\tau$  – скрытая теплота парообразования, кДж/кг, принимаемая равной 2493 кДж/кг;  
 $c_n$  – теплоемкость водяного пара, кДж/кг, принимаемая равной 1,97 кДж/кг;  
 $\phi$  – относительная влажность воздуха, доли от единицы;  
 $p''$  – парциальное давление пара в насыщенном воздухе, Па;  
 $p_b$  – барометрическое давление, Па;  
 $R_b$  – газовая постоянная для сухого воздуха, равная 281,7 кДж/кг·К;  
 $T$  – абсолютная температура, °К;  
 $\rho''$  – плотность насыщенного водяного пара в воздухе, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний

$$\beta_{xv} = \frac{W \Delta t c_{жс}}{k \Delta h_{cp} V}. \quad (8)$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_v = \frac{G_s c_s (\theta_2 - \theta_1)}{(t - \theta)_{cp} V}. \quad (9)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления

$$\zeta = \frac{H_d (\rho_1 - \rho_2) 2g}{\omega \rho_{cp}}. \quad (10)$$

Поскольку количество тепла, отданного водой при охлаждении (как показано выше), может быть выражено с помощью одного только коэффициента массоотдачи, то оценку охладительного эффекта данного типа оросителя можно производить, пользуясь этим коэффициентом. Однако значения  $\beta_{xv}$  действительны только для заданной конкретной градирни (оросителя), работающей в конкретных условиях, поэтому необходимо будет представить экспериментальные данные в виде графика зависимости

$$\frac{\beta_{xv}}{q} = f(\lambda),$$

где  $\lambda$  – отношение массового расхода воздуха к расходу воды, кг/кг.

Этот график в логарифмических координатах представляет собой прямую линию, аналитическое выражение которой

$$\beta_{xv} = A \lambda^m q_{жс},$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент, характеризующий влияние конструктивных особенностей оросителя на его охлаждающую способность, 1/м,

$m$  – показатель степени, характеризующий зависимость объемного коэффициента массоотдачи от измерения массовой скорости воздуха.

Чем выше критерии  $A$  и  $m$ , тем эффективней по охлаждающей способности ороситель.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты натуральных экспериментальных исследований тепло- и массообмена в вентиляторной градирне приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты натуральных экспериментальных исследований  
тепло- и массообмена в вентиляторной градирне**

Наименование параметра	Условные обозначения	Единица измерения	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
Температура воздуха на входе в градирню	$\theta_1$	°С	22,12	22,32	22,2	22,4	21,8
Относительная влажность воздуха на входе в градирню	$\varphi_1$	%	70	72	75	70	75
Влагосодержание наружного воздуха	$x_1$	кг/кг	0,0120	0,0125	0,0130	0,0123	0,0127
Теплосодержание наружного воздуха	$h_1$	кДж/кг	52,71	54,19	55,28	53,63	54,06
Плотность наружного воздуха	$\rho_1$	кг/м <sup>3</sup>	1,150	1,150	1,148	1,148	1,150
Барометрическое давление	$P_b$	кПа	100,1	100,2	100,0	100,0	100,0
Расход воды на градирню	$W$	кг/ч	2980800	2980800	2980800	2980800	2980800
Плотность орошения	$q$	м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> ·ч	3,98	3,98	3,98	3,98	3,98
Температура воды на входе в ороситель (горячей)	$t_1$	°С	35,5	35,4	36,3	35,67	35,2
Температура воды на выходе из градирни (охлажденной)	$t_2$	°С	28,5	30,4	33,3	33,7	34,2
Перепад температур воды	$\Delta t$	°С	7	5	3	2	1
Температура воздуха на выходе из градирни	$\theta_2$	°С	26,3	25,7	24,5	24,2	22,9
Относительная влажность	$\varphi_2$	%	100	100	100	100	100
Влагосодержание	$x_2$	кг/кг	0,0225	0,0216	0,0203	0,0198	0,0183
Теплосодержание	$h_2$	кДж/кг	78,27	74,65	69,30	64,60	60,65
Плотность воздуха на выходе из градирни	$\rho_2$	кг/м <sup>3</sup>	1,127	1,131	1,134	1,136	1,141
Средняя разность температур воды и воздуха	$(t-\theta)_{cp}$	°С	7,8	8,9	11,5	11,4	12,4
Средняя логарифмическая разность теплосодержаний	$\Delta h_{cp}$	кДж/кг	46,01	54,47	67,56	70,29	72,80
Расход воздуха через ороситель	$G_a$	кг/ч	3600000	3240000	2880000	2520000	2160000
Значение коэффициента	$k$	-	0,950	0,942	0,928	0,904	0,877
Объемный коэффициент массоотдачи	$\beta_{xv}$	кг/м <sup>3</sup> ·ч	2389	1454	714	470	234
Объемный коэффициент теплоотдачи	$\alpha_v$	Вт/м <sup>3</sup> ·К	575	366	175	117	58
Отношение коэффициентов	$\frac{\alpha_v}{\beta_{xv}}$	кДж/кг	1,01	1,06	1,03	1,04	1,05
Средняя скорость воздуха в оросителе, условно отнесенная к полному его сечению	$\omega$	м/с	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7
Скорость ветра	$\vartheta$	м/с	2,5	3,0	1,8	2,1	1,7
Коэффициент сопротивления градирни	$\zeta$	-	7,5	6,9	5,7	5,5	4,5
Относительная тепловая нагрузка, $q_f = q \rho_{вод} c_{жс} \Delta t$	$q_f$	кВт/м <sup>2</sup>	32,17	22,98	13,79	9,19	4,60
Коэффициент эффективности работы градирни $\eta = \frac{(t_2 - t_1)}{(t_1 - \tau)}$	$\eta$	-	0,41	0,3	0,17	0,12	0,06

Экспериментальные исследования показали, что при плотности орошения градири 3,98 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч перепад температур составил 7<sup>0</sup>С, относительная тепловая нагрузка на градирию – 32,17 кВт/м<sup>2</sup>, коэффициент эффективности градири – 0,41.

По результатам натурных испытаний получены значения коэффициентов теплоотдачи  $\beta_{xv}=2389$  кг/м<sup>3</sup>ч, массоотдачи  $\alpha_v=575$  Вт/м<sup>3</sup>К и гидравлического сопротивления  $\zeta=7,5$ . Подсчет коэффициента теплоотдачи  $\alpha_v$  произведен с целью определения величины отношения  $\frac{\alpha_v}{\beta_{xv}}$ , которая

обычно для практической области температур и влагосодержаний воздуха составляет около 1,05 кДж/кг, т.е. равна теплоемкости влажного воздуха, что служит контролем правильности произведенных замеров и расчетов.

Получена зависимость объемного коэффициента массоотдачи от средней скорости воздуха в оросителе (рис. 2).

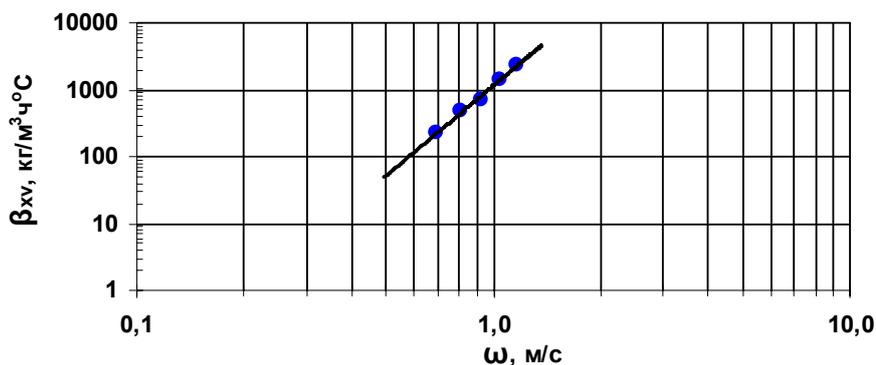


Рис. 2. Экспериментальная зависимость  $\beta_{xv} = f(\omega)$  для четырехъярусного оросителя в виде водосливов с круглым ребром

Из графика видно, что при изменении скорости воздуха от 0,694 до 1,164 м/с коэффициент массоотдачи изменяется от 234 до 2389 кг/м<sup>3</sup>·ч.

Экспериментальные данные представлены в виде графика зависимости  $\frac{\beta_{xv}}{q} = f(\lambda)$  (рис. 3), по которому определены значения  $A=0,245$  1/м,  $m=4,52$  для исследованной конструкции оросителя.

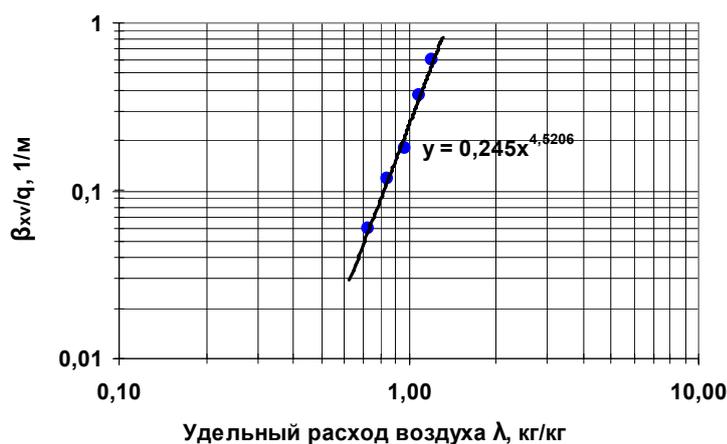


Рис. 3. Экспериментальная зависимость  $\frac{\beta_{xv}}{q} = f(\lambda)$  для четырехъярусного оросителя в виде водосливов с круглым ребром

## ВЫВОДЫ

На основе результатов экспериментальных исследований применения в вентиляторных градирнях в качестве оросителя четырехъярусных водосливов с круглым ребром можно сделать следующие выводы:

1. Испытанный образец оросителя имеет среднюю охлаждающую способность и малое аэродинамическое сопротивление.
2. При применении данного оросителя в конкретной градирне необходимо производить ее аэродинамические и тепловые расчеты с использованием технологических характеристик, приведенных в табл. 2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пономаренко, В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М.: Энергоатомиздат: 1998. – 376 с.
- 5 Абрамов, Н.Н. Водоснабжение: учебник для вузов / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1982. – 440 с.
2. Галустов, В.С. Оптимизация систем оборотного потребления охлажденной воды / В.С. Галустов // Журнал «С.О.К.» [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/193/40>. – Дата доступа: 15.07.2006.
3. Волчек, А.А. Водные ресурсы / А.А. Волчек, И.А. Олесик // Журнал «Природные ресурсы» [Электронный ресурс] – 2003. – Режим доступа: [http://www.ac.by/publications/nature/nr03\\_3.html](http://www.ac.by/publications/nature/nr03_3.html). – Дата доступа: 15.07.2006.
4. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02–84) / Госстрой СССР. – Введ. 25.03.1985. – М.: ГУП ЦПП, 1989. – 189 с.
5. Новиков, В.М. Исследование некоторых закономерностей процесса теплообмена в вентиляторных градирнях новой конструкции с пленочным охлаждением / В.М. Новиков, В.В. Мороз, О.Б. Меженная // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2003. – № 2 (20). – С 52–55.
6. Градирня вентиляторная: пат. 3337 Респ. Беларусь, МПК7 F 28 C 1/00 / В.М. Новиков, О.Б. Меженная; заявитель В.М. Новиков, О.Б. Меженная. – № u 20060509; заявл. 02.08.06; опубл. 28.02.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1(54). – С. 192–193.
7. СО 34.22.303-2005. Методика проведения натурных гидрометрических и аэродинамических испытаний градирен испарительного типа / Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС» – «Фирма ОРГРЭС». – Введ. 03.10.2005. – М.: ЦПТИиТО ОРГРЭС, 2005. – 39 с.

## INCREASE OF AN OVERALL PERFORMANCE VENTILATORY COOLING TOWER BY MEANS OF JET DEVICES

*O.B. MEZHENNAYA*

### *Summary*

6

In given article opportunities of application in ventilatory cooling tower are investigated as a sprinkler of the device which represents four circles of spillways with the round edge, capable to form extended dome-shaped water veils with thickness of a film from 1,5 mm up to 3 mm. Experimental researches have shown, that at density of an irrigation cooling tower  $3,98 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$  difference of temperatures has made  $7^\circ\text{C}$ , relative thermal loading on vcooling tower –  $32,17 \text{ кВт}/\text{m}^2$ , effectiveness ratio cooling tower – 0,41. By results of natural tests values of volumetric coefficient of heat transfer  $\beta_{xv}=2389 \text{ кг}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ , volumetric coefficient of mass transfer  $\alpha_v=575 \text{ Вт}/\text{m}^3\cdot\text{K}$  and coefficient of hydraulic resistance of the given kind of a sprinkler  $\zeta=7,5$  are received. Experimental data are submitted as the schedule of dependence  $\frac{\beta_{xv}}{q} = f(\lambda)$

on which values empirical coefficient  $A=0,245 \text{ 1}/\text{m}$  and exponent  $m=4,52$  are determined, for the investigated design of a sprinkler. The tested sample of a sprinkler has average cooling ability and comprehensible aerodynamic resistance. At application of the given sprinkler in concrete cooling tower it is necessary to make its aerodynamic and thermal calculations with use of technical characteristics on the given sprinkler.

*Поступила в редакцию 21 января 2009 г.*