

УДК 621.565.93

Новиков В.М., Меженная О.Б., Нагурный С.Г.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ВЕНТИЛЯТОРНЫХ ГРАДИРНЯХ С ОРОСИТЕЛЕМ В ВИДЕ ЧЕТЫРЕХ ЯРУСОВ ВОДОСЛИВОВ С КРУГЛЫМ РЕБРОМ

Введение. Учитывая значительные сложности построения математической модели, позволяющей описать закономерности процесса тепло- и массообмена между фазами, и малый опыт эксплуатации градирен нового типа, предлагается рассмотрение теплообмена в этих градирнях с самых общих позиций.

Теплообмен в вентиляторных градирнях нового типа. В результате проведенной работы по изучению тепло- и массообмена в градирне нового типа, при сохранении формы и размеров ограждающей конструкции и размещения энергетического оборудования, установлена возможность наведения в рабочем пространстве градирни четырех куполообразных жидкостных завес (рис. 1) [1, 4, 6].

Уравнение теплового баланса градирни с учетом допущений Меркеля можно представить в следующем виде [2]:

$$\left[G(t_1 - t_2) + G_u t_2 \right] c_{ж} = G_e (h_1 - h_2), \quad (1)$$

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

G – расход воды на градирню, кг/ч;

G_u – количество испарившейся воды, кг/ч;

G_e – расход воздуха, через ороситель, кг/ч;

t_1, t_2 – температура поступающей и охлажденной воды, °С;

h_1 – теплосодержание (Дж/кг) наружного воздуха на входе в градирню;

h_2 – то же на выходе из градирни;

$c_{ж}$ – теплоемкость воды, принимаемая равной 4,19 кДж/кг·К.

Материальный баланс (баланс влаги) определяется равенством между количеством испарившейся жидкости и приращением влагосодержания воздуха [3, 5].

$$G_u = G_e (x_1 - x_2). \quad (2)$$

При тепловом расчете градирни необходимо будет определить параметры t_2, x_2, h_2 , поэтому необходимо составить уравнения, описывающие процесс теплообмена между водой и воздухом в оросителе градирни.

Для элементарного объема оросителя dV с единичной площадью и высотой dh имеем

Новиков Владимир Макарович, к.т.н., профессор кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Брестского государственного технического университета.

Нагурный Сергей Григорьевич, ассистент кафедры оснований, фундаментов, инженерной геологии и геодезии Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Меженная Ольга Борисовна, к.т.н., доцент кафедры экономики Полесского государственного университета.

Беларусь, ПГУ, 211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.

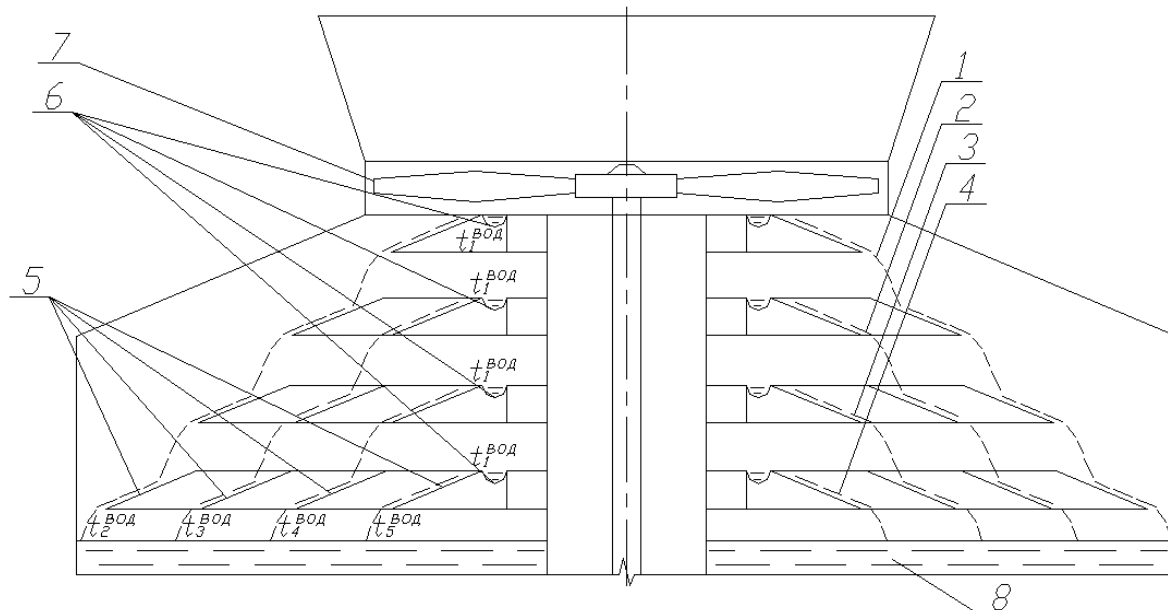


Рис. 1. Расчетная схема градирни

1, 2, 3, 4 – куполообразные водяные завесы; 5 – четырехъярусный ороситель в виде усеченных конусов с круглым ребром, установленных ступенчато и огибающих друг друга; 6 – круговые каналы для распределения воды на каждом ярусе; 7 – вентиляторная установка; 8 – водосборный бассейн

$$dQ = \alpha_v (t - \theta) dV + h''_n \beta_{xv} (x'' - x) dV, \quad (3)$$

где Q – количество тепла, Дж/ч;

α_v – коэффициент теплоотдачи, Вт/м³·К;

t – температура воды, °С;

θ – температура наружного воздуха, °С;

V – активный объем оросителя, м³;

h''_n – теплосодержание пара при температуре t_1 , кДж/кг;

β_{xv} – коэффициент массоотдачи, отнесенный к единице объема оросителя, кг/м³·ч;

x'' – содержание насыщенного воздуха, кг/кг;

x – влагосодержание воздуха, кг/кг.

В уравнении (3) первый член правой части – тепло, передаваемое в элементарном объеме оросителя от воды к воздуху соприкосновением, а второй – тепло, передаваемое испарением.

С учетом соотношения Льюиса $\frac{\alpha_v}{\beta_{xv}} = c_e$ уравнение примет вид

$$dQ = \beta_{xv} [c_e (t - \theta) + i''_n (x'' - x)] dV. \quad (4)$$

Это уравнение, путем ряда преобразований, можно привести к виду

$$dQ = \beta_{xv} (h'' - h) dV, \quad (5)$$

$$Q = \beta_{xv} \int_0^V (h'' - h) dV = \beta_{xv} \Delta h_{cp} V, \quad (6)$$

$$G_e (h_1 - h_2) = \beta_{xv} \Delta h_{cp} V = \frac{1}{k} G \Delta t, \quad (7)$$

где c_e – теплоемкость влажного воздуха, принимаемая равной 1,05 кДж/кг·К;

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

$\Delta h_{cp} = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{2,31 \lg \frac{\Delta h_1 - \delta h''}{\Delta h_2 - \delta h''}}$ – средняя логарифмическая раз-

ность теплосодержаний воздуха для противоточного оросителя, Дж/кг;

$\Delta h_1 = h''_1 - h_1$ – разность теплосодержаний воздуха на стороне входа воды на ороситель, Дж/кг;

$\Delta h_2 = h''_2 - h_2$ – то же на стороне выхода воды, Дж/кг;

$\delta h'' = \frac{h''_1 + h''_2 - 2h''_m}{4}$ – поправка, 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;

$$k = 1 - \frac{G_u t_2}{G_e (h_1 - h_2)} = 1 - \frac{\Delta x}{\Delta h} t_2,$$

Δx – разность влагосодержаний уходящего и наружного воздуха, кг/кг;

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

Из уравнения (5) могут быть получены формулы коэффициента массоотдачи

$$\beta_{xv} = \frac{G \Delta t c_{ж}}{k \Delta h_{cp} V} \quad (8)$$

и коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_v = \frac{G_e c_e \infty (\theta_2 - \theta_1)}{(t - \theta)_{cp} V}, \quad (9)$$

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

θ_1, θ_2 – температура наружного воздуха на входе в градирню и на выходе из градирни, °С.

Подсчет аэродинамического сопротивления оросителя производится по формуле [3]:

$$H_d (\gamma_1 - \gamma_2) = \zeta \frac{\omega^2 \gamma_{cp}}{2g}, \quad (10)$$

где γ_1, γ_2 – удельный вес воздуха на входе и выходе из градирни, кг/м³;

ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления;

Таблица 1. Результаты натуральных экспериментальных исследований тепло- и массообмена в вентиляционной градирне

Наименование параметра	Усл. обозн.	Ед-ца измерения	Номер опыта				
			1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7	8
Температура воздуха на входе в градирню	θ_1	°С	22,120	22,320	22,200	22,400	21,800
Относительная влажность воздуха на входе в градирню	Φ_1	%	70	72	76	70	76
Влагодержание наружного воздуха	x_1	кг/кг	0,0120	0,0124	0,0130	0,0124	0,0128
Теплосодержание наружного воздуха	h_1	кДж/кг	52,7	54,2	55,3	53,6	54,1
Удельный вес наружного воздуха	γ_1	кг/м ³	1,1500	1,1498	1,1478	1,1475	1,1495
Барометрическое давление	P_b	кПа	100,0	100,2	100,0	100,0	100,0
Расход воды на градирню	G	кг/ч	2980800	2980800	2980800	2980800	2980800
Плотность орошения	q	м ³ /м ² ·ч	3,980	3,980	3,980	3,980	3,980
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	Δt	°С	7,0	5,0	3,0	2,0	1,0
Температура воздуха на выходе из градирни	θ_2	°С	26,300	25,689	24,541	24,165	22,921
Относительная влажность	Φ_2	%	100	100	100	100	100
Влагодержание	x_2	кг/кг	0,0225	0,0216	0,0203	0,0198	0,0183
Теплосодержание	h_2	кДж/кг	78,3	74,6	69,3	64,6	60,6
Удельный вес воздуха на выходе из градирни	γ_2	кг/м ³	1,1270	1,1309	1,1339	1,1357	1,1415
Средняя разность температур воды и воздуха	$(t - \theta)_{cp}$	°С	7,8	8,9	11,5	11,4	12,4
Средняя логарифмическая разность теплосодержаний	Δh_{cp}	кДж/кг	46,01	54,47	67,56	70,29	72,80
Расход воздуха через ороситель	G_e	кг/ч	3600000	3240000	2880000	2520000	2160000
Значение коэффициента	k	-	0,950	0,942	0,928	0,904	0,877
Объемный коэффициент массоотдачи	β_{xv}	кг/м ³ ·ч	2389	1454	714	470	234
Объемный коэффициент теплоотдачи	α_v	Вт/м ³ ·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	ω	м/с	1,20	1,05	0,93	0,81	0,69
Скорость ветра	v	м/с	2,5	3,0	1,8	2,1	1,7
Коэффициент сопротивления градирни	ζ	-	7,5	6,9	5,7	5,5	4,5
Относительная тепловая нагрузка, $q_f = q \rho_{вод} c_{ж} \Delta t$	q_f	кВт/м ²	32,17	22,98	13,79	9,19	4,60
Коэффициент эффективности работы градирни $\eta = \frac{(t_2 - t_1)}{(t_1 - \tau)}$	η	-	0,41	0,3	0,17	0,12	0,06

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

g – ускорение свободного падения тела, м/с²;

$\gamma_{cp} = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2}$ – средний удельный вес воздуха на стороне входа и выхода из градирни, кг/м³;

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

H_b – высота вытяжной башни над оросителем, м;

H_{op} – высота оросителя, м.

Из уравнения (10) определен коэффициент аэродинамического сопротивления оросителя градирни:

$$\zeta = \frac{H_d (\gamma_1 - \gamma_2) 2g}{\omega^2 \gamma_{cp}} \quad (11)$$

Для определения теплосодержания, влагодержания и удельного веса воздуха пользовались формулами [2]

$$h = ct + x(\tau + c_n t) = 0,24t + xh'' \quad (12)$$

$$x = 0,622 \frac{\Phi p''}{P_b - \Phi p''} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{P_b - \Phi p''}{R_g (t + 273,2)} + \Phi \gamma'' \quad (14)$$

где h – теплосодержание влажного воздуха, Дж/кг;

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

t – температура воздуха, °С;

x – влагодержание воздуха, кг/кг;

τ – скрытая теплота парообразования, кДж/кг, принимаемая равной 2493 кДж/кг;

c_n – теплоемкость водяного пара, кДж/кг, принимаемая равной 1,97 кДж/кг;

Φ – относительная влажность воздуха в долях от единицы;

p'' – парциальное давление пара в насыщенном воздухе, Па;
 P_b – барометрическое давление, Па;
 R_g – газовая постоянная для сухого воздуха, равная 281,7 кДж/кг·К;
 T – абсолютная температура, °К;
 γ'' – удельный вес насыщенного водяного пара в воздухе, кг/м³.

Поскольку количество тепла, отданного водой при охлаждении (как показано выше), может быть выражено с помощью одного только коэффициента массоотдачи, то оценку охлаждающего эффекта данного типа оросителя можно производить, пользуясь этим коэффициентом. Однако значения β_{xv} действительны только для заданной конкретной градирни (оросителя), работающей в конкретных условиях, поэтому экспериментальные данные представлены в виде графика зависимости $\beta_{xv} = f(\lambda)$, где λ – отношение массового расхода воздуха к расходу воды, кг/кг. Этот график в логарифмических координатах представляет собой прямую линию, аналитическое выражение которой $\beta_{xv} = A\lambda^m q_x$, 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 натурных экспериментальных исследований тепло- и массообмена в вентиляторной градирне приведены в таблице 1.

Экспериментальные исследования показали, что при плотности орошения градирни 3,98 м³/м²·ч перепад температур составил 7°С, относительная тепловая нагрузка на градирню – 32,17 кВт/м², коэффициент эффективности градирни – 0,41.

По результатам натурных испытаний получены значения коэффициентов теплоотдачи $\beta_{xv} = 2389$ кг/м³·ч, массоотдачи $\alpha_v = 575$ Вт/м³·К и гидравлического сопротивления $\zeta = 7,5$. Подсчет коэффициента теплоотдачи α_v произведен с целью определения величины отношения

$\frac{\alpha_v}{\beta_{xv}}$, которая обычно для практической области температур и влажностей 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).

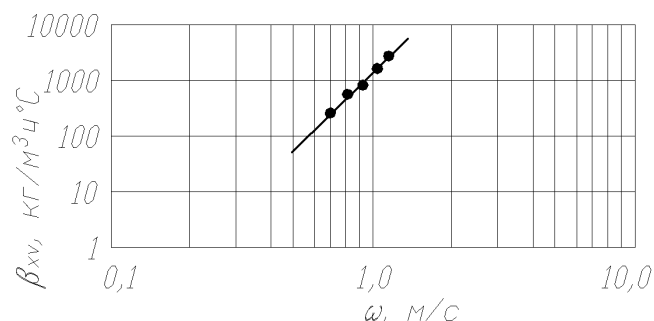


Рис. 2. Экспериментальная зависимость $\beta_{xv} = f(\omega)$ для четырехъярусного оросителя в виде водосливов с круглым ребром

Из графика видно, что при изменении скорости воздуха от 0,694 до 1,164 м/с коэффициент массоотдачи изменяется от 234 до 2389 кг/м³·ч.

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

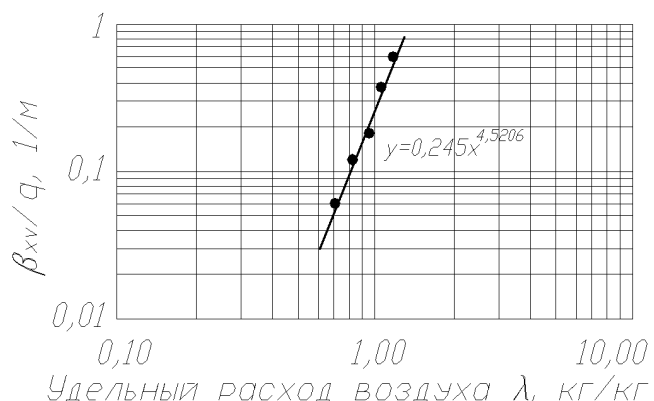


Рис. 3. Экспериментальная зависимость $\beta_{xv} = f(\lambda)$ для четырехъярусного оросителя в виде водосливов с круглым ребром

Таким образом, можно сделать вывод о возможности использования данной градирни в качестве охлаждающего устройства.

Заключение. На основе результатов экспериментальных исследований применения вентиляторных градирен в качестве оросителей четырехъярусных водосливов с круглым ребром можно сделать следующие выводы: испытанный образец оросителя имеет среднюю охлаждающую способность и приемлемое аэродинамическое сопротивление. Экспериментальные исследования показали, что при плотности орошения градирни 3,98 м³/м²·ч перепад температур составил 7°С, относительная тепловая нагрузка на градирню – 32,17 кВт/м², коэффициент эффективности градирни – 0,41. По результатам натурных испытаний получены значения коэффициентов теплоотдачи $\beta_{xv} = 2389$ кг/м³·ч, массоотдачи $\alpha_v = 575$ Вт/м³·К и коэффициента гидравлического сопротивления $\zeta = 7,5$. Экспериментальные данные представлены в виде графика зависимости $\beta_{xv} = f(\lambda)$, по которому определены значения $A=0,245$ 1/м, $m=4,52$ для исследованной конструкции оросителя.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Новиков, В.М. Градирня с пленочным охлаждением воды. Информационный листок / Брест. центр. науч.-техн. информ. – 1989. – №47–89. – 2 с.
- Методика проведения натурных гидрометрических и аэродинамических испытаний градирен испарительного типа: СО 34.22.303 – 2005 / Филиал ОАО «Инженерный центр ЭЭС» – «Фирма ОРГРЭС». Введ. 03.10.2005. – М.: ЦПТИ и ТО ОРГРЭС, 2005. – 39с.
- Пономаренко, В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий / В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев. – М.: Энергоиздат, 1998. – 376 с.
- Градирня вентиляторная. Пат. № 3337 Респ. Беларусь, ПМК F28C1/00 Новиков В.М., Меженная О.Б.; заявитель Брестск. гос. техн. ун-т - №2006059; заявл. 02.08.2006 опубл. 01.11.2006.
- Новиков, В.М. Исследование некоторых закономерностей процесса теплообмена в вентиляторных градирнях новой конструкции / В.М. Новиков, О.Б. Меженная, В.В. Мороз // Вестник Брестского государственного технического университета. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2003. – С. 52–55.

6. Устройство для образования ступенчатой куполообразной жидкостной завесы. Пат. №5496 Респ. Беларусь, МПК В 05В 17/08 / В.М. Новиков, Б.Н. Житенёв, С.Г. Нагурный / Заявитель Брестский

гос. ун-т. – № и 20090090; заявл. 09.02.09; опубл. 30.08.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4(69). – 188 с.

Материал поступил в редакцию 04.03.10

NOVIKOV V.M., MEZENNAJA O.B., NAGURNYJ S.G. Laws of process of heat exchange in fan-driven gradirnia with sprinkler as four circles spillway with a round edge

Regularities of heat-exchange process in the mechanical-draft towers with a sprinkler in the form of four tiers of round-crested weirs

In the paper is presented the heat-exchange in the mechanical-draft towers with a sprinkler in the form of four tiers of round-crested weirs in general outline and the applicability of this graduation tower as a chiller system.