

# Аэродинамический расчет башенных градирен при реконструкции

Арефьев Ю. И., канд. техн. наук, Пономаренко В. С., доктор техн. наук

ГНЦ РФ НИИ ВОДГЕО

В нашей стране на тепловых и атомных электростанциях до настоящего времени эксплуатируются башенные градири, построенные в 1960 – 1975 гг. и ранее по проектам, разработанным ЛОАТЭП совместно с ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Проекты выпущены в виде двух серий, условно названных “новая” и “старая”. Все эти градири испарительные. “Новая” серия градирен – площадью 1100, 1600, 2300 и 3200 м<sup>2</sup>, “старая” серия – 1200, 1600, 2100, 2600, 3200 и 4000 м<sup>2</sup>. Кроме того, запроектировано и построено значительное число типовых градирен площадью орошения 1520 м<sup>2</sup>, которые не вошли в эти серии и не имеют нормативных графиков охлаждения воды как серийные градири [1]. Во всех градириях установлен двухъярусный асбестоцементный ороситель с ярусом высотой 1,2 м, с расстоянием между ярусами 50 мм и с расстоянием между асбестоцементными листами в свету 25 мм.

Наряду с типовыми имеются башенные градири с другими типами оросителей, например, из дерева и брызгальные. Кроме того, при привязке типовых градирен к местным условиям их размеры (высота входных окон, высота башни и других конструктивных элементов) иногда существенно меняются.

Сроки службы всех этих оросителей истекли, вследствие чего они интенсивно разрушаются. Поэтому происходит широкомасштабная реконструкция башенных градирен с заменой износившихся асбестоцементных и других оросителей на современные пластмассовые. Естественно, при этом изменяются технологические характеристики градирен, они становятся несоответствующими норма-

тивным графикам, что обуславливает необходимость производить их тепловые и аэродинамические расчеты для оценки охлаждающей способности в каждом конкретном случае.

В 70-х годах Минэнерго СССР выпустил технические указания [2], в которых аэродинамические расчеты башенных градирен рекомендуется производить по прилагаемым к ним графикам. Графики составлены на основании лабораторных экспериментальных исследований, выполненных Недвигой Ю. С. во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева на клиновых моделях башенных градирен площадью орошения 500 – 3000 м<sup>2</sup>. По графикам определяется общий коэффициент аэродинамического сопротивления градири  $\zeta_{\text{общ}}$ . Графики выражают зависимость коэффициентов сопротивления от площади (высоты) воздухоходных окон и коэффициентов сопротивления оросительного устройства (конструкции оросителя и плотности орошения). На рис. 1 показан один из них для схемы градири, по которой в настоящее время производится реконструкция практически всех башенных градирен.

Опыт применения графиков показал, что получаемые с их помощью  $\zeta_{\text{общ}}$ , используемые в аэродинамических и тепловых расчетах реконструируемых и строящихся градирен, в основном соответствуют действительному сопротивлению. Косвенно об этом можно судить по результатам проводимых обследований и эксплуатационным данным.

Вместе с тем пользование графиками выявило и следующие их недостатки.

1. Невозможность применения ЭВМ для определения  $\zeta_{\text{общ}}$  при проведении технологических расчетов градирен.

2. Трудность определения промежуточных значений между линиями, особенно в нижней части графиков, которая и является в основном рабочей.

3. В графиках учитывается влияние плотности орошения на  $\zeta_{\text{общ}}$  только в зависимости от конструкции оросителя ( $K_{\text{ор}}$ ) и не принимается во внимание сопротивление, оказываемое потоку воздуха в подоросительном пространстве и в зоне расположения водораспределительной системы.

4. Не учитывается сопротивление водоуловителей.

5. В диапазоне площади орошения градирен от 500 до 3000 м<sup>2</sup> не попадают существующие градири площадью орошения 324, 3200 и 4000 м<sup>2</sup>, поэтому при определении  $\zeta_{\text{общ}}$  по графику требуется экстраполяция, что некорректно.

6. В градириях, для которых составлены графики, система водораспределения лотковая. В настоящее время при реконструкции и строительстве градирен применяются, как правило, трубчатые системы водораспределения.

Более поздние лабораторные и теоретические исследования аэродинамики башенных градирен, выполненные во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, во многом подтверждают отмеченные недостатки расчета по ВСН 14-67, но не содержат нормативных рекомендаций [3].

Полное (общее) аэродинамическое сопротивление градири может быть представлено (что практически считается общепринятым) как сумма сопротивлений ее отдельных элементов

$$Z' = (\zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n) \frac{\gamma w^2}{2g}, \quad (1)$$

где  $Z'$  – общее аэродинамическое сопротивление градири, мм вод.ст. (кг/м<sup>2</sup>);  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n$  – коэффициенты сопротивлений элементов градири по пути движения воздуха в ней;  $w$  – средняя скорость движения воздуха в свободном сечении оросителя, м/с;  $\gamma$  – плотность входящего в градирию воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

В уравнении (1) пренебрегается взаимовлияние элементов градири на сопротивление друг друга, что оказалось на практике вполне приемлемым при инженерных расчетах.

В этом случае очень важно так разделить градирию на составные части (элементы), чтобы значение каждого сопротивления в формуле (1) можно было удобно и достоверно измерить. На основании многолетнего опыта аэродинамических исследований применительно к башенным градириям формула (1) может быть представлена в виде

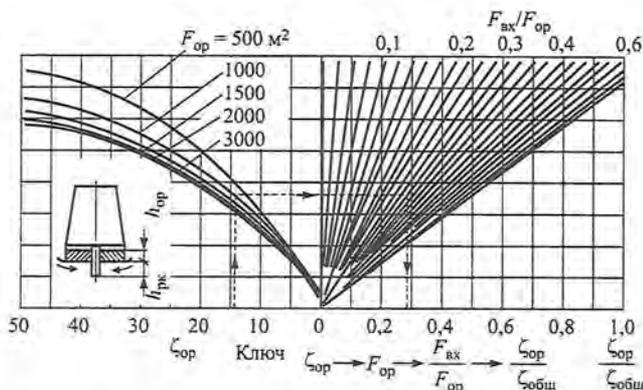


Рис. 1. График для определения  $\zeta_{\text{общ}}$  башенных противоточных градирен с оросительным устройством постоянной высоты и воздухом направляющим козырьком

$$Z' = (\zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{ор}}h + \zeta_{\text{вр}} + \zeta_{\text{вы}} + \zeta_{\text{д}}) \gamma w^2 / 2g. \quad (2)$$

Выражение, стоящее в скобках, представляет собой по терминологии [2] общий коэффициент сопротивления башенной градири, т.е.

$$\zeta_{\text{общ}} = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{ор}}h + \zeta_{\text{вр}} + \zeta_{\text{вы}} + \zeta_{\text{д}}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) коэффициенты местных сопротивлений  $\zeta$  обозначены по аналогии с подобными обозначениями при аэродинамических расчетах вентиляторных градирен [4]. Все они безразмерные, кроме коэффициента  $\zeta_{\text{ор}}$ , который, как принято, имеет размерность 1/м;  $h$  – высота оросителя в метрах. Численные значения  $\zeta$  определяются по данным исследований градирен и их элементов на стендах и на действующих градириях в натуральных условиях.

Коэффициент сопротивления входа в градирию  $\zeta_{\text{вх}}$  может быть определен из формулы

$$\zeta_{\text{вх}} = 6784 e^{-21,7 \frac{F_{\text{вх}}}{F_{\text{ор}}}}. \quad (4)$$

Полученные из формулы (4) значения  $\zeta_{\text{вх}}$  представлены далее.

$F_{\text{вх}}/F_{\text{ор}}$	$\zeta_{\text{вх}}$
0,29	12,5
0,3	10,1
0,31	8,1
0,34	4,2
0,35	3,4
0,39	1,4
0,47	0,25
0,48	0,2
0,49	0,2

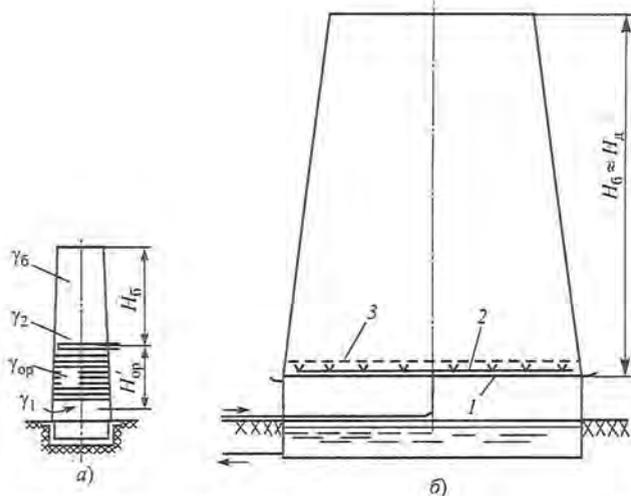


Рис. 2. Схемы башенных градирен к определению силы тяги:

а – градирня устаревшей конструкции по [5]; б – реконструируемая башенная градирня “новой” серии  $F_{ор} = 1600 \text{ м}^2$ ; 1 – ороситель высотой 1 м; 2 – трубчатая водораспределительная система, расположенная непосредственно над оросителем; 3 – водоуловитель, расположенный выше оросителя на 2 м

Значения  $F_{вх}/F_{ор} = F_{ок}/F_{ор}$  для башенных градирен приведены в табл. 1, в которой высота башни определена как расстояние от верха градирни до верхней кромки входных окон.

В тепловых и аэродинамических расчетах башенных градирен высоту башни согласно ВСН 14-67

принимают от верха оросителя до верха градирни. Получается, что высота башни зависит от высоты оросителя. По этому поводу в [5] сказано, что в башенных градирнях для преодоления сопротивления движения воздуха используется сила естественной тяги, возникающая вследствие разности весов столба наружного воздуха и внутри градирни. Но удельный вес воздуха внутри градирни неодинаков по всей ее высоте. При определении силы тяги  $Z$  столб воздуха в градирне разбивается на две части, соответствующие оросителю и вытяжной башне (рис. 2, а), и принимается

$$Z = H\gamma_1 - H'_{ор}\gamma_{ор} - H_б\gamma_б, \quad (5)$$

где условную высоту оросителя  $H'_{ор}$  для противоточных капельных градирен можно принимать от середины высоты воздухораспределителя до уровня подачи воды в желоба, для противоточных пленочных градирен, равной средней высоте щитов оросителя, а для градирен с поперечноточным током, равной приблизительно половине их высоты.

Принимая с достаточной для рассматриваемой цели точностью,

$$\gamma_{ор} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}$$

и  $\gamma_б = \gamma_2$ , после соответствующей замены в уравнении (5) получаем

$$Z = (H_б + 0,5H'_{ор})(\gamma_1 - \gamma_2) = H_д(\gamma_1 - \gamma_2), \quad (6)$$

Т а б л и ц а 1

Геометрические характеристики башенных градирен

$F_{ор}, \text{м}^2$	Серия	$H_{гр}, \text{м}$	$H_{ок}, \text{м}$	$H_б, \text{м}$	$D_f, \text{м}$	$H_{гр}/D_f$	$P_{ок}, \text{м}$	$F_{ок}, \text{м}^2$	$F_{ок}/F_{ор}$	$l, \text{м}$
324	–	34	1,8	32,2	20,3	1,5	63,7	114,7	0,35	5
576	–	40	3,3	36,7	27	1,5	84,8	279,8	0,49	7
725	–	39	3,55	35,45	30,4	1,3	95,5	338,9	0,47	7,5
900	–	43,4	3,3	40,1	33,8	1,3	106,1	350,2	0,39	8,5
1100	Новая	52	4,5	47,5	37,4	1,4	117,4	528,5	0,48	9,5
1200	Старая	48,3	3,3	45,0	39,1	1,2	122,8	405,1	0,34	10
1520	–	55,3	3,3	52,0	44	1,3	138,2	455,9	0,3	11
1600	Старая	53,7	3,3	50,4	45,1	1,2	141,6	467,3	0,29	11,5
	Новая	62	5,5	56,5	45,1	1,4	141,6	778,9	0,49	11,5
2100	Старая	64,8	3,8	61,0	51,7	1,2	162,3	616,9	0,29	13
2300	Новая	75	6,5	68,5	54,1	1,4	169,9	1104,2	0,48	13,5
2600	Старая	71	4,3	66,7	57,5	1,2	180,5	776,4	0,30	14,5
3200	Старая	81	5	76,0	63,8	1,3	200,3	1001,7	0,31	16
	Новая	88	7,5	80,5	63,8	1,4	200,3	1502,2	0,47	16
4000	Железобетонная	90	5,5	84,5	71,3	1,3	223,9	1231,3	0,31	18
	Алюминий	91,5	5,5	86,0	71,3	1,3	223,9	1231,3	0,31	18

П р и м е ч а н и е.  $F_{ор}$  – площадь орошения башенной градирни;  $H_{гр}$  – высота градирни;  $H_{ок}$  – высота входных окон;  $H_б$  – высота башни (строительная),  $H_б = H_{гр} - H_{ок}$ ;  $D_f$  – диаметр градирни, определенный по величине  $F_{ор}$ ,  $D_f = 1,128\sqrt{F_{ор}}$ ;  $P_{ок}$  – периметр входных окон,  $P_{ок} = \pi D_f$ ;  $F_{ок}$  – площадь входных окон, она же  $F_{вх}$ , т.е. площадь входа воздуха,  $F_{ок} = P_{ок}H_{ок}$ ;  $l$  – половина длины воздухораспределителя,  $l = D/4$ .

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – плотность воздуха до и после оросителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $H_6$  – высота вытяжной башни, м;  $H_d = H_6 + 0,5H'_{\text{ор}}$  – действующая (с точки зрения создания тяги) высота градирни, м.

Из изложенного видно, что для градирен старых конструкций указанные соображения о высоте оросителя, башни и входных окон имели существенное значение, когда их величины были сопоставимы, рис. 2, а. В современных градирнях высота оросителя равна примерно 1 м, что в 50 – 60 раз меньше высоты башни и в 4 – 5 раз меньше высоты входных окон. Поэтому принятые в табл. 1 значения  $H_6$ , равные высоте градирни за вычетом высоты входного окна, представляются вполне обоснованными и рациональными. При этом  $H_6$  можно считать равной  $H_d$  (рис. 2, б).

Значения  $\zeta_{\text{ор}}$  и  $\zeta_{\text{ор}}h$  для основных типов оросителей, из числа наиболее широко применяющихся в странах СНГ, приведены в [4].

Значение  $\zeta_{\text{вр}}$  по данным исследований для обычных трубчатых конструкций водораспределителей составляет примерно 0,4.

Значение  $\zeta_{\text{ву}}$  для водоуловителей, разработанных в нашей стране, приведены в [4].

Значения  $\zeta_d$  определяются по формуле

$$\zeta_d = q_{\text{ж}}(0,2l + K_{\text{ор}}h + K_{\text{вр}}h_{\text{вр}})l, \quad (7)$$

где 0,2 – коэффициент сопротивления дождя под оросителем, отнесенный к скорости воздуха в свободном горизонтальном сечении градирни [так же как и все другие коэффициенты сопротивления в

формулах (2) – (4)];  $l$  – половина длины водораспределителя (табл. 1);  $K_{\text{вр}}$  – коэффициент сопротивления дождя в водораспределительном устройстве, принимаемый для трубчатого водораспределителя равным 0,1;  $h_{\text{вр}}$  – высота дождя в водораспределителе принимается в зависимости от типа сопла и направления факела разбрызгивания по [4];  $K_{\text{ор}}$  – коэффициент сопротивления дождя оросителя, принимаемый в соответствии с данными, приведенными в [4];  $l$  – коэффициент размерности для перехода к безразмерному значению  $\zeta_d$  при принятых в данном случае единицах измерения, равный  $1 \text{ ч}/\text{м}^2$ ;  $q_{\text{ж}}$  – плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

Высота направленного в верх факела сопел, применяемых в башенных градирнях,  $h_{\text{ф}} = (0,2 \div 0,6)$  м. Высота водораспределительной системы над оросителем (высота падения воды от нее на ороситель  $h_{\text{п.в}}$ ) в среднем в градирнях принимается равной 1 м. Таким образом,  $h_{\text{вр}} = h_{\text{ф}} + h_{\text{п.в}} = 0,6 + 1,0 = 1,6$  м. Отсюда сопротивление дождя в водораспределительной системе при  $q_{\text{ж}} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и  $K_{\text{вр}} = 0,1$  будет  $q_{\text{ж}}K_{\text{вр}}h_{\text{вр}} = 10 \cdot 0,1 \cdot 1,6 = 1,6$ .

Учитывая незначительные колебания этой величины относительно  $\zeta_{\text{общ}}$  градирни, представлялось целесообразным принять ее в расчетах постоянной и включить в значение  $\zeta_{\text{вр}}$  формулы (3), которое при этом становится равным 2. Формула (7) тогда может быть представлена в виде

$$\zeta_d = q_{\text{ж}}(0,2l + K_{\text{ор}}h)l. \quad (8)$$

Т а б л и ц а 2

Пример аэродинамического расчета башенной градирни площадью орошения  $1600 \text{ м}^2$  с характерными типами оросителей

Ороситель	$q_{\text{ж}}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	$h, \text{м}$	$K_{\text{ор}}$	Коэффициент сопротивления						$\zeta_d = q_{\text{ж}}(0,2l + K_{\text{ор}}h)l$			$\zeta_{\text{общ}}$	По графику рис. 1									
				$\zeta_{\text{вх}}$	$\zeta_{\text{с.о}}$	$\zeta_{\text{с.о}}h$	$\zeta_{\text{вр}}$	$\zeta_{\text{ву}}$	$\Sigma$	0,2l	$K_{\text{ор}}h$	$\zeta_d$		$K_{\text{ор}}h q_{\text{ж}}$	$a = \zeta_{\text{ор}} / \zeta_{\text{общ}}$	$\zeta_{\text{общ}} = \zeta_{\text{ор}} / a$	1,6	28,9	0,55	52,5			
																					$\zeta_{\text{с.о}}h$	$\zeta_{\text{с.о}}h$	
ПР50-2М	4	1,5	0,282	0,2	18,2	27,3	2	5,1	34,6	2,3	0,4	10,8	55,6	1,6	28,9	0,55	52,5						
	8																	21,6	56,2	3,2	30,5	0,57	53,5
	12																	32,4	67	4,8	32,1	0,59	54,4
Асбестоцементный, $a = 25 \text{ мм}$	4	2,4	0,37	0,2	4,36	10,5	2	5,1	17,8	2,3	0,9	12,8	30,6	3,6	14,1	0,38	37,1						
	8																	25,6	43,4	7,2	17,7	0,42	42,1
	12																	38,4	56,2	10,8	21,3	0,45	47,3
Брызгальный со щитами	4	3	0,61	0,2	0,92	2,8	2	5,1	10,1	2,3	1,8	16,4	26,5	7,2	10	0,29	34,5						
	8																	32,8	42,9	14,4	17,2	0,41	41,9
	12																	49,2	59,3	21,6	24,4	0,50	48,8
Брызгальный без щитов	4	3	0,61	0,2	0	0	2	5,1	7,3	2,3	1,8	16,4	23,7	7,2	7,2	0,24	30						
	8																	32,8	40,1	14,4	14,4	0,38	37,9
	12																	49,2	56,5	21,6	21,6	0,46	47,0

Примечание.  $F_{\text{ор}} = 1600 \text{ м}^2$ ;  $F_{\text{вх}}/F_{\text{ор}} = 0,49$ ;  $l = 11,5 \text{ м}$ ;  $\zeta_{\text{с.о}}$  – коэффициент аэродинамического сопротивления сухого оросителя, определяемый экспериментально [4].

Полезно оценить, насколько результаты аэродинамического расчета по предложенным формулам соответствуют действительным сопротивлениям, имеющим место в реконструируемых башенных градирнях, и насколько диапазон изменений  $\zeta_{\text{общ}}$  отражается на температуре охлажденной воды в указанных градирнях.

Рассмотрим параметры работы башенной градирни.

Полное сопротивление башенной градирни согласно формулам (2) и (3) может быть представлено в виде

$$Z' = \zeta_{\text{общ}} \frac{\gamma_w^2}{2g} = \zeta_{\text{общ}} \frac{w^2}{2g} \left( \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \right). \quad (9)$$

В качестве примера возьмем обычные расчетные условия ТЭЦ АО Мосэнерго:

$\vartheta_1 = 25^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_1 = 60\%$ ;  $P_6 = 745$  мм рт. ст.;  $t_1 = 43^\circ\text{C}$ ;  
 $t_2 = 33^\circ\text{C}$ ;  $\vartheta_2 = (t_1 + t_2)/2 = 38^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_2 = 100\%$ ;  
 $\gamma_1 = f(\vartheta_1 \text{ и } \varphi_1) = 1,15$ ;  $\gamma_2 = f(\vartheta_2 \text{ и } \varphi_2) \approx 1,085$ ;

$$\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \frac{1,15 + 1,085}{2} = 1,117 = 1,12.$$

Подставляя принятые расчетные условия в формулу (9) и вводя рекомендуемый ВСН 14-67 "коэффициент перехода"  $K_\zeta = 1,1$ , получим

$$Z' = \zeta_{\text{общ}} \frac{K_\zeta \omega^2}{2g} \left( \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \right). \quad (10)$$

Откуда, задаваясь  $\zeta_{\text{общ}}$ , получаем значения, приведенные далее.

$w, \text{ м/с}$	$\zeta_{\text{общ}}$	$Z', \text{ кг/м}^2$
1	16	1
	32	2
	48	3
	64	4
0,7	32	1
	64	2
	96	3
	128	4

Силу тяги определяем по формуле

$$Z = H_6(\gamma_1 - \gamma_2), \quad (11)$$

где  $(\gamma_1 - \gamma_2) = 1,15 - 1,085 = 0,065$ .

Полученные данные представлены далее.

$F_{\text{оп}}, \text{ м}^2$	$H_6, \text{ м}$	$Z, \text{ кг/м}^2$
324	32,2	2,1
576	36,7	2,4
1600с	50,4	3,3
1600н	56,5	3,7
3200с	76,0	4,9
3200н	80,5	5,2
4000	86,0	5,6

н, с – соответственно "новая" и "старая" серии проектов.

Т а б л и ц а 3

Ороситель	$\zeta_{\text{общ}}$	$w, \text{ м/с}$	$TET2, ^\circ\text{C}$	$T2, ^\circ\text{C}$
ПР50-2М: $H_{\text{оп}} = 1$ м; $A = 1,41$ л/м; $\zeta_{\text{с.о}} = 18,2$ ; $M = 0,54$ ; $K_{\text{оп}} = 0,282$	20	1,44	33,1	25,5
	40	1,10	34,7	27,7
	60	0,94	35,7	28,9
	80	0,84	36,4	29,8
	100	0,77	36,9	30,5
Асбестоцементный: $a = 25$ мм; $H_{\text{оп}} = 2,4$ м; $A = 0,479$ л/м; $\zeta_{\text{с.о}} = 4,36$ ; $M = 0,66$ ; $K_{\text{оп}} = 0,37$	20	1,41	32,7	27,2
	40	1,08	34,0	29,3
	60	0,91	34,9	30,6
	80	0,81	35,4	31,5
	100	0,74	35,9	32,2
Брызгальный со щитами: $H_{\text{оп}} = 3$ м; $A = 0,255$ л/м; $\zeta_{\text{с.о}} = 0,92$ ; $M = 0,29$ ; $K_{\text{оп}} = 0,61$	20	1,35	31,9	29,8
	40	1,04	33,3	31,0
	60	0,89	34,2	31,8
	80	0,80	34,9	32,3
	100	0,73	35,5	32,7
Брызгальный без щитов: $H_{\text{оп}} = 3$ м; $A = 0,136$ л/м; $\zeta_{\text{с.о}} = 0,0$ ; $M = 0,1$ ; $K_{\text{оп}} = 0,61$	20	1,23	30,4	33,8
	40	0,95	31,7	34,3
	60	0,82	32,5	34,7
	80	0,73	33,2	35,0
	100	0,67	33,8	35,2

Примечание. Градирня 1600н; условия охлаждения:  $G_{\text{ж}} = 11\,000$  м<sup>3</sup>/ч,  $TET1 = 24,5^\circ\text{C}$ ,  $TAU1 = 19^\circ\text{C}$ ,  $F1 = 57\%$ ,  $P_6 = 745$  мм рт. ст.,  $F12 = 100\%$ ,  $T1 = 43^\circ\text{C}$ ;  $A$  – эмпирический коэффициент, характеризующий влияние конструктивных особенностей оросителя на его охлаждающую способность;  $M$  – показатель степени в формуле для определения коэффициента теплоемкостдачи.

По предлагаемому методу выполнены примеры аэродинамического расчета некоторых характерных типов башенных градирен. При подборе и составлении примеров подразумевалось, что с их помощью можно оценить влияние на  $\zeta_{\text{общ}}$  площади градирен (576 – 3200 м<sup>2</sup>), высоты входных окон (“старой и “новой” серий), сопротивление оросителя [ $\zeta_{\text{ор}} = (0 \div 18) 1/\text{м}$ ] и плотности орошения [ $q_{\text{ж}} = (4 \div 12) \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ]. Для сопоставления в тех же примерах определены  $\zeta_{\text{общ}}$  по графику ВСН 14-67 (рис. 1). В табл. 2 приведены такие примеры для градирни  $F_{\text{ор}} = 1600 \text{ м}^2$ .

На основании анализа результатов расчетов установлено следующее.

1. Порядок  $\zeta_{\text{общ}}$  по предлагаемому методу и графику рис. 1 вполне сопоставим, однако в структуре и составе сопротивлений имеются существенные различия.

2. При обоих способах определения  $\zeta_{\text{общ}}$  его величина растет с увеличением  $F_{\text{ор}}$ . В расчете это происходит за счет увеличения сопротивления дождя под оросителем: увеличивается длина пути воздуха. По графику это увидеть трудно, так как градирни различной  $F_{\text{ор}}$  подобны друг другу (табл. 1). У градирен площадью орошения 576, 1600 и 3200 отношение  $H_{\text{гр}}/D_{\text{гр}}$  равно соответственно 1,5, 1,4 и 1,4, а отношение  $F_{\text{вх}}/F_{\text{ор}}$  соответственно 0,49, 0,49 и 0,47, т.е. они практически полностью подобны друг другу и согласно теории подобия при прочих равных условиях должны иметь равные  $\zeta_{\text{общ}}$ , т.е.  $\zeta_{\text{общ}}$  не зависит от  $F_{\text{ор}}$  этих градирен.

3. Высота (площадь) входных окон оказывает весьма существенное влияние на  $\zeta_{\text{вх}}$  и соответственно на  $\zeta_{\text{общ}}$ . Однако это влияние значительно снижается с увеличением  $F_{\text{вх}}$ . Закон изменения  $\zeta_{\text{вх}}$  в зависимости от размеров входных окон (площади входа) по данным исследований НИИ ВОДГЕО выражен формулой (4).

4. Доля сопротивления сухого оросителя в общем сопротивлении башенной градирни зависит от  $\zeta_{\text{ор}}$  и сопротивления других компонентов  $\zeta_{\text{общ}}$ . Она может достигать более чем половины в градирнях с оросителем [4]. Характер указанных соотношений можно считать сходным и в предлагаемом методе, и по графику ВСН 14-67.

5. Плотность орошения по предлагаемому методу определения  $\zeta_{\text{общ}}$  значительно влияет на его величину. При изменении  $q_{\text{ж}}$  с 4 до 12 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч)  $\zeta_{\text{общ}}$  может увеличиваться в 1,3 – 2 раза в зависимости от аэродинамических характеристик оросителя и градирни в целом. По графику увеличение  $\zeta_{\text{общ}}$  с увеличением  $q_{\text{ж}}$  относительно невелико и составляет в целом примерно 30%. При этом в градирнях с большим  $\zeta_{\text{общ}}$  оно может не превышать 5% или быть практически незаметным, в брызгальных градирнях – 50%.

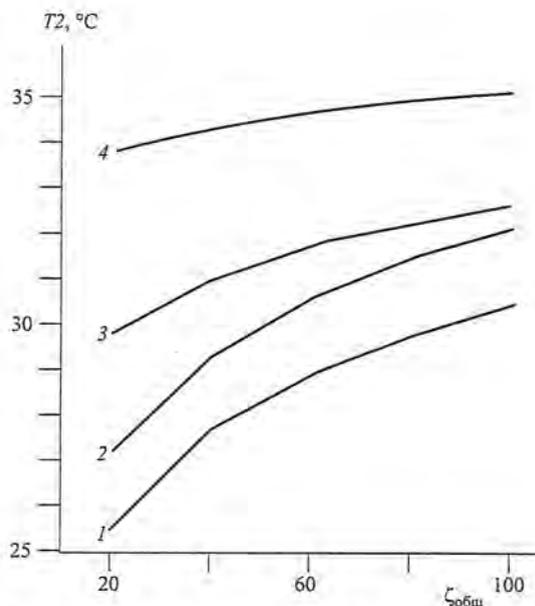


Рис. 3. График зависимости  $T_2 = f(\zeta_{\text{общ}})$  для градирни с оросителями:

1 – ПР50-2М, высотой 1 м; 2 – асбестоцементный ( $a = 25 \text{ мм}$ ), высотой 2,4 м; 3 – брызгальный, высотой 3 м с воздухонаправляющими щитами; 4 – то же без воздухонаправляющих щитов

В табл. 3 приведены примеры расчетов реконструируемой башенной градирни “новой” серии  $F_{\text{ор}} = 1600 \text{ м}^2$  с тремя типами оросителей и без оросителя. Задачей расчетов было определить зависимость температуры охлажденной воды  $t_2(T_2)$ , скорости движения воздуха  $w(W)$  в полном сечении оросителя и температуры выходящего из оросителя воздуха  $\vartheta_2$  (ТЕТ2) от задаваемых значений  $\zeta_{\text{общ}}$  в пределах от 20 до 100. На рис. 3 построен график зависимости  $T_2 = f(\zeta_{\text{общ}})$ , из которого наглядно виден характер изменения значения  $T_2$  в зависимости от величины  $\zeta_{\text{общ}}$ .

Сопоставление данных табл. 3 с реальными параметрами работы башенной градирни показывает, что предлагаемый метод аэродинамического расчета позволяет достаточно полно и точно оценить величину  $\zeta_{\text{общ}}$  в возможных пределах параметров работы башенных градирен в системах обратного водоснабжения ТЭЦ. Полученные при этом результаты  $T_2$  и  $W$  достаточно хорошо коррелируются с материалами натурных измерений на башенных градирнях.

## Выводы

1. Выявлены недостатки аэродинамического расчета башенных градирен по методу, рекомендуемому [2], многие положения которого устарели. Он не отражает тип и состав конструкций, применяемых при модернизации градирен, и не позволяет производить расчеты на ЭВМ.

2. На базе накопленных за последние годы данных натурных исследований, опыта реконструкции и модернизации, а также лабораторных исследований оросителей, водоуловителей и водораспределительных устройств разработана методика определения общего коэффициента сопротивления реконструируемых башенных градирен, которая лежит в основе их аэродинамического расчета. Преимущество разработанной методики в сравнении с ранее применявшейся подтверждено примерами.

3. Предлагаемая методика представляет собой дальнейшее развитие теории расчета охладителей оборотной воды с возможностью применения современной вычислительной техники. Ее целесообразно включить в нормативные материалы по про-

ектированию градирен при подготовке к их назревшему пересмотру и новому изданию.

### Список литературы

1. *Пособие по проектированию градирен* (к СНиП 2.04.02-84 "Водоснабжение. Наружные сети и сооружения") ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.
2. *Технические указания по расчету и проектированию башенных противоточных градирен для тепловых электростанций и промышленных предприятий*. ВСН 14-67 Минэнерго СССР. – "Энергия" ЛО, 1971.
3. *Сухов Е. А.* Гидроаэротермические исследования башенных градирен и их элементов. – Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Гидравлика, часть II, т. 230, 1997.
4. *Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И.* Градирни промышленных и энергетических предприятий. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1998.
5. *Берман Л. Д.* Испарительное охлаждение циркуляционной воды. М.: Госэнергоиздат, 1957.