

Натурные исследования градирен и систем технического водоснабжения

Калатузов В. А., канд. техн. наук

ЗАО «НПК «ИРВИК»», Москва

Обоснована необходимость проведения натурных исследований, расчетов градирен и обеспеченности электростанций и предприятий системами технического водоснабжения. Работы выполняются в соответствии с установленными нормативными документами и регламентами эксплуатации в Российской Федерации. Натурные исследования испарительных градирен важны и необходимы для оценки и проверки качества лабораторных данных и проектных решений (физико-химических характеристик материалов, оборудования и градирен, технологических характеристик градирен) на соответствие условиям эксплуатации. Полученные результаты определяют влияние градирен на мощностные показатели производства, позволяют выявлять причины их ухудшения и способы устранения, а также служат основанием для проектирования, строительства и реконструкции.

Ключевые слова: испарительные градири, натурные исследования, системы технического водоснабжения, расчеты градирен, строительство.

В современных условиях главными критериями любого производственного цикла без снижения мощностных показателей стали экологическая безопасность и сокращение всех видов затрат. Объективная реальность требует при проектировании градирен обеспечивать их совместимость с основным оборудованием производства. В связи с этим одним только гидроаэротермических лабораторных исследований недостаточно. Любая аналитическая или лабораторная работа нуждается в проверке на практике, а учитывая огромное многообразие применяемых и находящихся в эксплуатации конструкций, задача представляется весьма актуальной. Натурные исследования, проведение балансовых испытаний позволяют решить эту задачу [1], получить ценные сведения для технико-экономических расчетов и выбора экономически выгодного варианта инвестиционных затрат и технического перевооружения. Существуют различные методы оценки конструкций и градирен в целом. Для оценки оросителей часто используют эмпирические коэффициенты A и m , которые входят в основном в сертификаты (свидетельства) лабораторных исследований той или иной конструкции. Вот выводы ряда ученых: "... Исследования градирен в натуре дают более надежные результаты о величинах A и m ...", "...Оценку охлаждающей способности градири производят путем сопоставления расчетных температур охлажденной воды с температурами, полученными при натурных испытаниях, а также по коэффициентам массоотдачи. Последний способ является основным" [2, 3].

Следует отметить, что коэффициенты A , m или их аналоги используют в двух основ-

ных формулах объемного коэффициента тепло- и массоотдачи относительно разницы влагосодержания β_{xv} и разницы парциальных давлений β_{pv} .

Из уравнения теплового баланса градири

$$G_{\text{ж}}(t_{1\text{ж}} - t_{2\text{ж}})c_{\text{ж}} = \beta_{xv} kV\Delta h_{\text{ср.в}} \quad (1)$$

определяется объемный коэффициент тепло- и массоотдачи β_{xv} , кг/(м³ · ч):

$$\beta_{xv} = \frac{G_{\text{ж}}(t_{1\text{ж}} - t_{2\text{ж}})c_{\text{ж}}}{k\Delta h_{\text{ср.в}}V} \quad (2)$$

или

$$\beta_{xv} = Aq_{\text{ж}}\lambda^m. \quad (3)$$

При этом уравнение Меркеля

$$\text{Me} = \beta_{xv} \frac{\Delta h_{\text{ср}}}{q_{\text{ж}}} = f\left(\frac{q_{\text{в}}}{q_{\text{ж}}}\right) = AN\lambda^m. \quad (4)$$

В выражениях (1) – (4) приняты обозначения: c — удельная изобарная теплоемкость, кДж/(кг · °С); h — энтальпия, кДж/кг; G — массовый расход, кг/с; q — удельный массовый расход, кг/(м² · с); t — температура, °С или К; $k = 1 - c_{\text{ж}}t_2/r$ — коэффициент; r — удельная теплота парообразования, кДж/кг; V — объем оросителя, м³; H — высота оросителя, м; λ — отношение расхода воздуха к расходу воды, кг/кг; Me — число Меркеля; индексы: в — воздух, ж — вода, ср — среднее значение, 1 — вход, 2 — выход.

Из уравнения (1) видно, что объемный коэффициент теплообмена β_{xv} представляет собой отношение полной теплоотдачи к

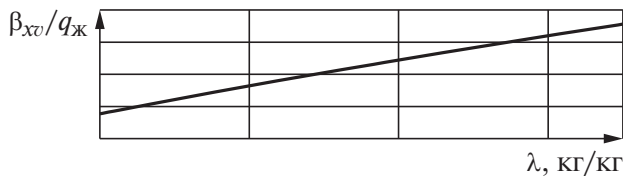


Рис. 1. Зависимость объемного коэффициента теплообмена β_{xv} от относительного расхода воздуха λ

средней разнице теплосодержаний воздуха на входе и выходе оросителя.

По полученным значениям β_{xv} составляют график зависимости $\beta_{xv}/q_{ж} = f(\lambda)$ (рис. 1) и затем определяют эмпирические коэффициенты A и m . При этом коэффициент A пропорционален удельной площади контактной поверхности или насыщенности оросителя элементами его конструкции, коэффициент m характеризует угол наклона полученной прямой [4].

Аналогично данная задача решается через объемный коэффициент массообмена относительно разницы парциальных давлений:

$$\beta_{pv} = A_0 q_{ж}^{1-n} q_{в}^n P_6^{-1,0}, \quad (5)$$

где $A_0 = A/H$ — эмпирический коэффициент; P_6 — барометрическое давление, Па; n — эмпирический коэффициент.

Для относительного сравнения результатов гидротермических исследований, как правило, приводятся коэффициенты вида A и n , получаемые из графиков зависимости числа испарения от удельного расхода воздуха $K = f(\lambda)$ (совершенная аналогия с числом Меркеля):

$$K_{pv} = \beta_{pv} H P_6 / q_{ж} = f(q_{в} / q_{ж}). \quad (6)$$

Оба критерия верны, и между ними существует аналитическая взаимозависимость:

$$\beta_{xv} = 1,61 P_6 \beta_{pv}. \quad (7)$$

В некоторых публикациях утверждается, что формула (7) отражает "...приближенную зависимость между коэффициентами тепло- и массоотдачи. В отличие от коэффициента β_{pv} коэффициент массоотдачи β_{xv} , входящий в уравнение Меркеля, зависит от режима градирни: температуры воды и влажности воздуха. Ошибка при определении значения β_{xv} может достигать 15 % и более. Поэтому методика технологических расчетов градирен и определения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи оросителей в ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева" не использует приближенные уравнения Меркеля, а базируется на строгих уравнениях теплообмена".

Эти утверждения не в полной мере соответствуют действительности и противоречат результатам натурных исследований. Основные положения теплообмена вытекают из закона Дальтона, согласно которому атмосферное давление представляет собой сумму парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара. Парциальное давление определяется из уравнения состояния Клапейрона для идеальных газов. Для атмосферного давления при конкретной температуре удельный вес пара пропорционален его парциальному давлению, а влагосодержание — это отношение веса водяного пара к весу содержащегося в том же объеме сухого воздуха. Исходя из этого и получена формула (7).

С использованием вышеприведенных выражений выявлены существенные расхождения результатов лабораторных исследований, полученных для одной и той же конструкции оросителя двумя методами:

- 1) расчет β_{xv} из выражения (2);
- 2) расчет β_{pv} из выражения (5) с пересчетом в β_{xv} по формуле (7).

В табл. 1 приведены результаты расчетов β_{xv} этими методами с обозначениями (1) и (2) соответственно, которые свидетельствуют о значительных расхождениях значений β_{xv} (здесь ξ — коэффициент сопротивления оро-

Таблица 1

Тип оросителя	Высота оросителя H , м	Вентиляторная градирня $q_{ж} = 7,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $w = 2,2 \text{ м/с}$, $\theta = 24,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 51 \%$, $t_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$							
		A_p	m	t_2	β_{xv} (1)	β_{xv} (2)	ξ , м^{-1}	Δt	
ОДГ 60/40	1,4	0,95	0,40	25,1	5852	≠	6842	—	14,9
ОДГ 45/30	1,4	1,30	0,50	23,6	7159	≠	6418	—	16,4
БОП 3.3-650	2,15	0,87	0,52	25,5	6950	≠	4723	—	14,5

Таблица 2

Тип оросителя	H , м	A_p	ΔA_p , %	ξ , м ⁻¹	$\Delta \xi$, %	m , %	Δm	q_2 , м ³ /(м ² · ч)	Температура (вход/выход), °С	Источник
ОДГ 60/40	1,36	0,86	0,03/ 3,5	10,4	0/0	0,58	0/0	5/10	26,0/30,6	[5]
	1,36	0,89		10,4		0,58		6/9	30,6/33,9	[6]
	0,68	0,53	0,09/ 17,0	5,6	4,9/ 87,5	0,63	—	5/10	28,1/33,0	[5]
	0,7	0,62		10,5		—		6	—	[7]
ОДГ 45/30	1,36	1,42	0,5/ 51	46,9	13,8/ 41,7	0,5	—	5/10	25,4/30,1	[5]
	1,36	1,48		46,9		0,5		6/9	29,5/32,9	-
	1,4	0,98		33,1		—		6	—	[7]

сителя, м⁻¹). Таким образом, методология получения эмпирических коэффициентов в лабораторных исследованиях не соблюдается и не приводится в сертификатах на ороситель. В документах отсутствуют расчетные номограммы охлаждения градирен исследуемой конструкции, численные значения коэффициентов тепломассообмена.

Вместе с тем выявлены существенные разночтения в результатах лабораторных исследований, проведенных одним методом для одной и той же конструкции. В табл. 2 сравниваются результаты лабораторных исследований на примере конкретной конструкции оросителя. Разница в результатах достигает 87,5 % [5 – 7].

Таким образом, существенные расхождения наблюдаются при сравнении лабораторных данных, полученных не только двумя методами, но и одним методом для одной и той же конструкции.

Это подтверждается анализом и сопоставлением результатов лабораторных и натуральных исследований, выполненных разными организациями в период с 1975 г. по настоящее время. Пример сравнения представлен на рис. 2.

Аналогичные и однозначные выводы сделаны НТС Инженерного центра ЕЭС:

“Лабораторные гидротермические исследования оросителей проводятся научно-исследовательскими организациями на различных установках, не всегда обеспечивающих получение достоверных и качественных результатов.

Публикуемые результаты исследований формулируются по различным методическим схемам и часто не согласуются друг с другом.

Многие испытательные стенды не отвечают условиям эффективного моделирования конструкций и градирен. Полученные результаты неоднозначны для одной и той же конструкции, что затрудняет их использование при сравнении различных типов оросителей.

Научно-исследовательские институты в отчетных документах и проектах градирен не предоставляют расчетные номограммы. Такие номограммы должны быть обязательным результатом лабораторных исследований. Без расчетной номограммы градирен лабораторные исследования нельзя считать законченными ...” [8].

Натурные исследования подтверждают приведенные выводы. Погрешности натуральных данных достигают 30 – 40 % [8]. Таким образом, очевидно, что для достижения хорошего качества лабораторных исследований необходимо обеспечение:

единообразия условий проведения исследований и полноты получаемых и публикуемых параметров;

подтверждения результатов лабораторных исследований натурными балансowymi испытаниями в соответствии с требованиями нормативных документов по приемке и эксплуатации башенных градирен [1, 9].

Критериями качества лабораторных исследований, установленными в результате многочисленных натуральных испытаний, при всех равных прочих условиях являются:

соблюдение теории подобия при получении данных (группа подобных явлений должна удовлетворять требованиям теории подобия и характеризоваться одинаковыми значениями коэффициентов подобия);

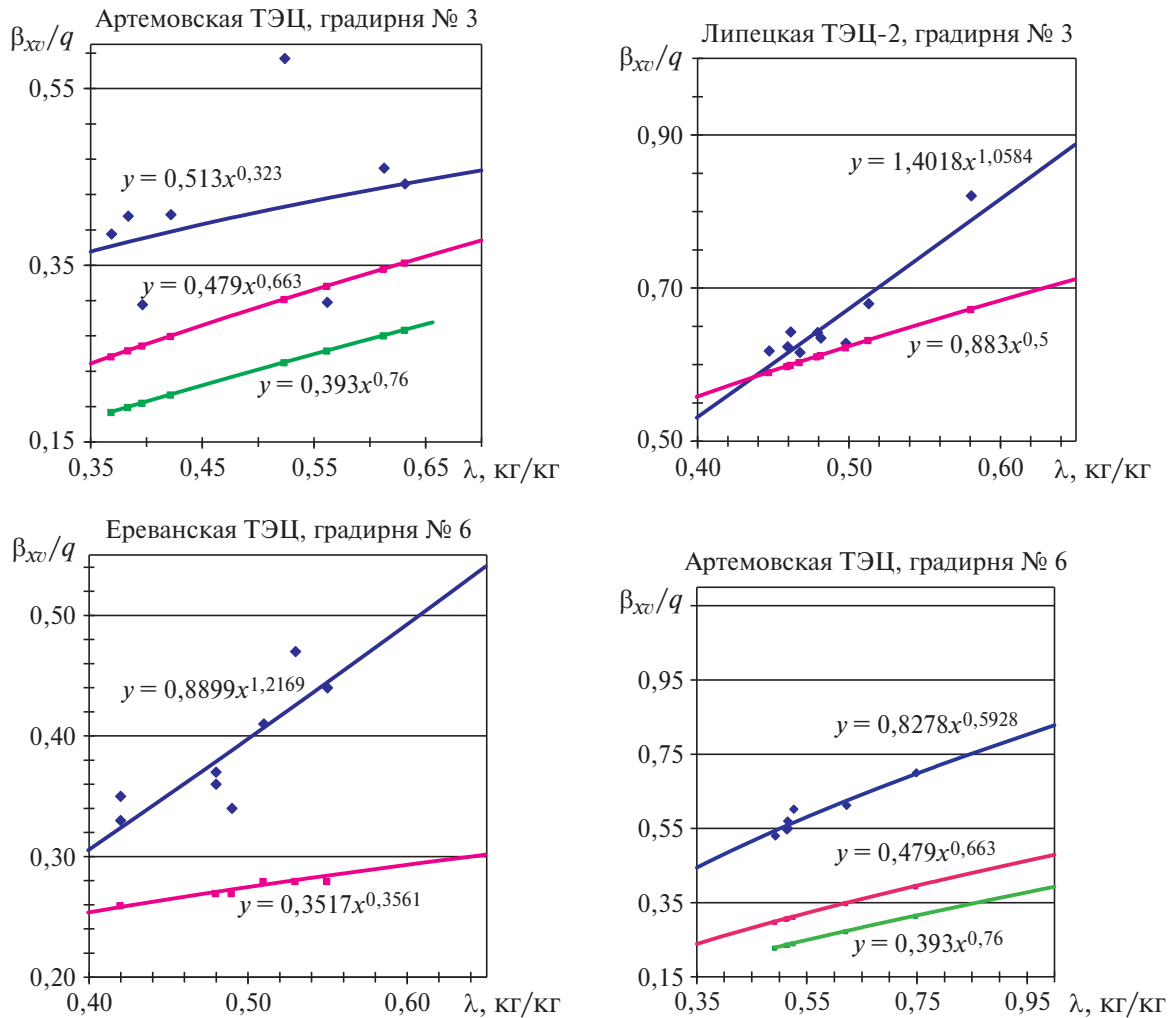


Рис. 2. Зависимости β_{xv} от относительного расхода воздуха λ :

— по данным натуральных исследований; — расчет по данным лабораторных исследований [4]; — расчет по [2]

отношение объемного коэффициента теплообмена по результатам лабораторных исследований к соответствующему коэффициенту по натурным испытаниям [10];

разница температуры охлажденной воды относительно температуры мокрого термометра или степень их сближения. С точки зрения практического применения для эксплуатации оптимальны зависимости температуры охлажденной воды от температуры мокрого термометра при различных значениях тепловой нагрузки (пример показан на рис. 3);

соответствие численных значений коэффициента теплообмена заданным условиям эксплуатации;

соответствие температуры охлажденной воды техническим условиям обеспечения максимальной экономичности работы основного оборудования.

Но самый главный критерий — отсутствие ограничений по мощности и перерасходу

топлива электростанцией в неотапительный период из-за оросителей и градирен в целом.

По всем указанным критериям полноценные ответы и решения дают натурные испытания.

В физике явлений законы сохранения энергии и массы вещества — основополагающие. При решении практических задач улучшение одних параметров происходит за счет ухудшения других. Все изменения должны удовлетворять в целом решению системы уравнений при оптимальных соотношениях значений. Для оросителей это хорошо видно на примере критериев их оценки по эмпирическим коэффициентам A , характеризующим только возможность интенсивности теплообмена, которую необходимо обеспечить и достичь в реальных условиях.

Как было отмечено, коэффициент A пропорционален удельной площади контактной поверхности или насыщенности оросителя

элементами его конструкции [11]. При всех равных прочих условиях рост насыщенности элементами влечет за собой увеличение аэродинамического сопротивления и, как следствие, снижение расхода воздуха. Кроме того, коэффициенты для разных конструкций зачастую находятся в одном диапазоне численных значений, часто отличающихся десятиями, а иногда сотыми долями единиц, и без решения системы уравнений можно сделать неправильные выводы.

Решение системы трех уравнений силы тяги градирни $Z=f(v)$ или электропривода вентилятора, аэродинамического сопротивления $Z'=f(v)$ и теплового баланса позволяет получить полную качественную характеристику оросителя. Решение подобных систем подробно описано в технических указаниях по расчету и проектированию башенных градирен [12]. Результатом решения является температура охлажденной воды t_2 на рис. 4, которая по своим значениям в свою очередь должна удовлетворять тепловому балансу теплообменного оборудования для каждой турбины и всей электростанции в целом. Несответствие температуры охлажденной в градирне воды тепловому балансу приводит к ограничениям по мощности. Они характерны для большей части ТЭС на всем пространстве бывшего СССР. В РФ из-за градирен ограничения составляют в среднем 10 – 15 % установленной мощности, при этом перерасход условного топлива достигает 6 млн т в год, причем ограничения по мощности имеют сезонный характер (рис. 5).

На протяжении десятков лет специалистами ЗАО «НПК «ИРВИК»» проводится большой объем исследований процессов, происходящих в градирнях. Балансовые испытания в натуральных условиях позволяют оценить охлаждающую эффективность градирен, полу-

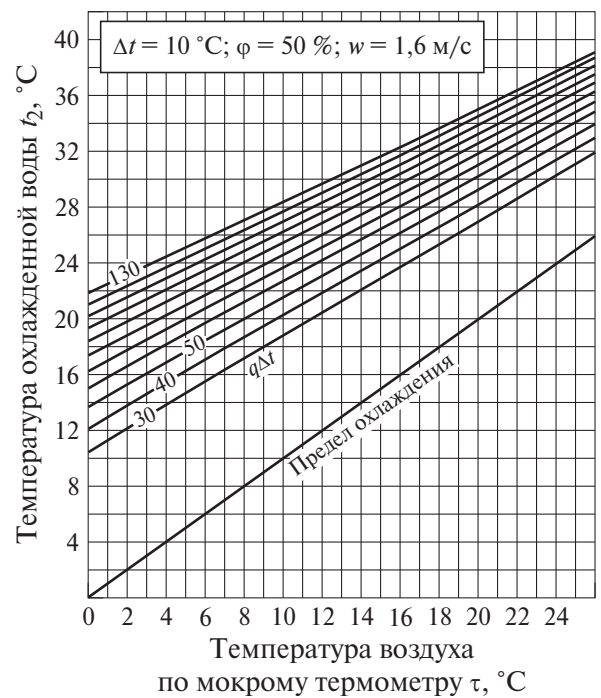


Рис. 3. Зависимости температуры охлажденной воды от температуры мокрого термометра:

ϕ — относительная влажность воздуха, %; w — скорость воздуха в оросителе, м/с

чить соответствующие коэффициенты тепло- и массообмена, значения аэродинамического и гидравлического сопротивлений. Одновременно выявляется взаимозависимость градирен в одной системе, их влияние на тепловую и гидравлическую сбалансированность систем технического водоснабжения в целом, соответствие техническим требованиям, предъявляемым к основному оборудованию предприятия. Получаемые результаты позволяют создавать конструкции, максимально технологически и конструктивно приспособленные к реальным условиям, что крайне важно для Российской Федерации с большим числом дней стояния

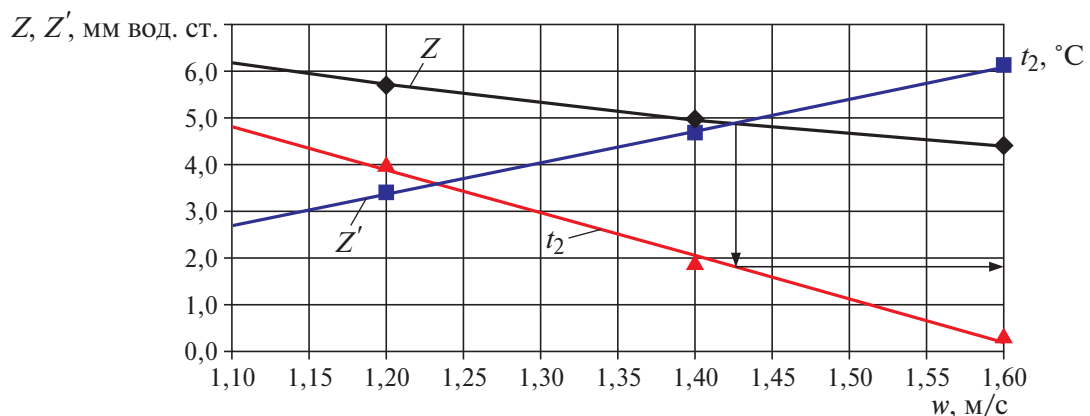


Рис. 4. Графики изменения тяги, сопротивления и температуры охлажденной воды в градирне

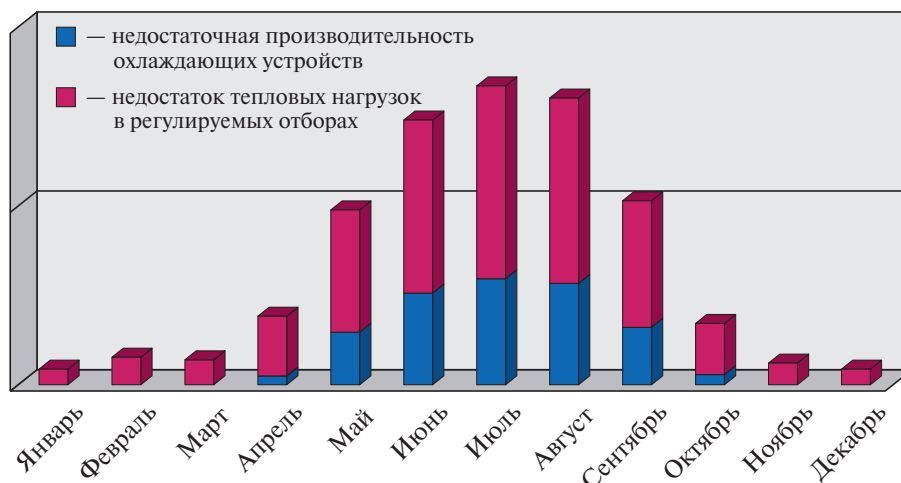


Рис. 5. Диаграмма сезонных ограничений по мощности для циркуляционных систем технического охлаждения воды с градирнями

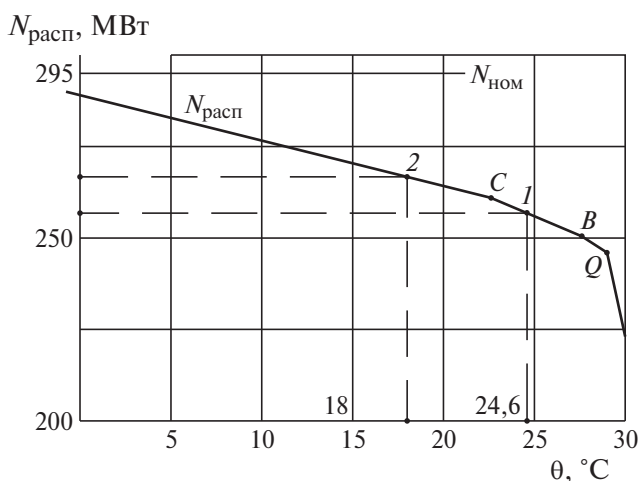


Рис. 6. Зависимость располагаемой мощности ТЭЦ от температуры окружающего воздуха $N_{расп} = f(\theta)$

отрицательных температур атмосферного воздуха.

Знание истории развития любой сферы деятельности является важным условием для создания эффективного оборудования и технологий. Еще в 90-х годах проводились исследования различных комбинаций конструкций оросителей из полимерных сеток с ячейками разных размеров. Полученные результаты стали основой для создания многих применяемых сегодня полимерных конструкций оросителей из пластмассы, а также для последующих исследований. Наиболее эффективны оросители решетчатой конструкции, основная поверхность охлаждения в которых формируется в виде капель (обладают наибольшей поверхностью охлаждения и наименьшим аэродинамическим сопротивлением, а многократное их дробление и слияние увеличивает поверхность охлаждения).

Основные цели проводимых натурных исследований:

1. Формирование единого методического комплекса, позволяющего в реальных условиях оценивать характеристики разных элементов системы технического водоснабжения — СТВ (циркуляционных насосов, теплообменного оборудования, градирен, трубопроводной системы), проводить расчеты ограничений по мощности, определять причины их появления и способы устранения.

2. Устранение ограничений по мощности и повышение эффективности СТВ. Например, на Пермской ТЭЦ-14 реализация изменений в гидравлической схеме системы циркуляционного водоснабжения привела к уменьшению гидравлического сопротивления системы, увеличению подачи циркуляционных насосов и производительности градирен. В результате ограничения сокращены на 50 МВт, расход удельного топлива — на 2–3 г/(кВт·ч) при капитальных затратах на реконструкцию 100 \$/кВт.

3. Создание современных конструкций и технологий.

В результате натурных исследований получены:

расчеты обеспеченности системами технического водоснабжения цехов электростанций по выработке электроэнергии. В конечном виде строится зависимость мощности от температуры воздуха (рис. 6);

зависимость температуры охлажденной воды в градирне (при всех прочих равных условиях) от изменения температуры и относительной влажности атмосферного воздуха;

методика проведения натурных гидро- и аэротермических исследований (испытаний)

градирен и проверки качества предлагаемых проектных решений.

Полученные результаты легли в основу обязательных к применению нормативных документов для эксплуатации ТЭС. Сформулированы основные положения “Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации” (ПТЭ) и Пособия для изучения Правил. Выполняемые натурные исследования обязательны в соответствии с основными критериями по вышеприведенным методологиям и нормативным документам, ориентированы на создание градирен и СТВ, в максимальной степени соответствующих составу и режимам работы основного оборудования в конкретных реальных условиях.

Результаты натурных исследований служат основой для технологических расчетов при выборе наиболее эффективного варианта реконструкции или строительства градирен.

Список литературы

1. **СО 34.22.402–94.** Типовая инструкция по приемке и эксплуатации башенных градирен, 1997.
2. **Гладков В. А., Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С.** Вентиляторные градирни. — М.: Стройиздат, 1976.
3. **Пособие** по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02–84). — М.: ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР, 1985.
4. **Калатузов В. А.** Расчеты теплообменных устройств градирен на практике. — Химическая техника, 2009, № 12.
5. **Свердлин Б. Л., Федоров А. В.** Технические решения для ремонта, реконструкции и строительства градирен. — Химическая техника, 2009, № 3.
6. **ТУ 2291-002-310983323–2001.** Блок оросительного устройства двойного гофрирования ОДГ.
7. **Материалы** научно-практической конференции “Градирни, гидротехнические сооружения в системах техводоснабжения энергетических и промышленных предприятий”. — Санкт-Петербург, 13 – 16 мая, 2008.
8. **Бычков А. М.** Об эффективности систем технического водоснабжения. — Энергетик, 2005, № 10.
9. **СО 153-34.20.501–2003.** Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. — М.: Минэнерго РФ, 2003.
10. **СО 34.22.303–2005.** Методика проведения натуральных гидротермических и аэродинамических испытаний градирен испарительного типа. — М.: Филиал ОАО “Инженерный центр ЕЭС” — Фирма “ОРГРЭС”, 2005.
11. **Пономаренко В. С., Арефьев Ю. И.** Градирни промышленных и энергетических предприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1998.
12. **Фарфоровский Б. С., Фарфоровский В. Б.** Охладители циркуляционной воды тепловых электростанций. — М.: Энергия, 1972.

irvik@irvik.ru