

УДК 621.175

## **РАБОЧАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕНТИЛЯТОРНЫХ И БАШЕННЫХ ГРАДИРЕН**

С.К. Сосновский<sup>1</sup>, В.П. Кравченко<sup>2</sup>

*Научно-производственная фирма “Пластэнерго”<sup>1</sup> — Одесский национальный  
политехнический университет<sup>2</sup>*

Введено понятие рабочей характеристики вентиляторных и башенных градирен с номинальными значениями основных параметров. Разработана методика построения этой рабочей характеристики.

*Ключевые слова:* рабочая характеристика градирен

Основной принцип эксплуатации систем оборотного водоснабжения (СОВ) - использование такого оборудования и таких режимов его работы, которые соответствуют максимальной эффективности всех составляющих элементов. Максимальные же значения КПД насосов, электродвигателей, вентиляторов, турбоустановок и теплообменников находятся при этом в зоне номинальных значений их рабочих характеристик. Однако такие понятия, как индивидуальные рабочие характеристики градирен и коэффициенты их эффективности, сегодня, к сожалению, отсутствуют.

Цель настоящего исследования - введение понятия индивидуальных рабочих характеристик испарительных градирен.

Одновременность протекания аэродинамических и гидравлических, тепловых и массообменных процессов не позволяет дать им адекватное математическое описание. Поэтому наиболее перспективным представляется подход, основанный на учете практического опыта эксплуатации СОВ.

### **Анализ существующих показателей эффективности работы СОВ**

В СНиП 2.04.02.84 “Водоснабжение. Наружные сети и сооружения” и “Пособии по проектированию градирен к СНиП 2.04.02.84” установлены параметры эксплуатации вентиляторных и башенных градирен. Приведенные там нормативные диапазоны перепадов температур не соответствуют нормативным тепловым нагрузкам. Так, для вентиляторных

градирен минимальная тепловая нагрузка, равная  $335 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  [ $80 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ], при разности температур охлаждаемой воды на входе и выходе градирни  $\Delta t = 3 \text{ }^\circ\text{C}$  должна была бы обеспечиваться гидравлической нагрузкой  $26,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , что не соответствует проходному сечению трубопроводов ни одного типового проекта СОВ. Максимальная же гидравлическая нагрузка на башенные градирни [ $10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ] при  $\Delta t = 15^\circ\text{C}$  должна была бы обеспечить удельную тепловую нагрузку  $10 \times 15 \times 4,19 = 629 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  [ $150 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ], что также не соответствует ни нормативному, ни фактически возможному ее значению. Кроме того, охлаждение циркуляционной воды с перепадом температур  $\Delta t$  близким к  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  возможно только до более высоких значений температуры охлажденной воды  $t_2 = \tau + (12-13 \text{ }^\circ\text{C})$ , где  $\tau$  - температура воздуха по смоченному термометру (теоретический предел охлаждения воды в испарительных градирнях) [1].

Важно отметить, что компоновка водоразбрызгивающих сопел рассчитывается по их рабочим характеристикам на конкретный водооборот, значительное уменьшение которого снижает радиус и высоту факела сопла, площадь орошения насадки оросителя и, в конечном итоге, значение теплосъема. Поэтому эксплуатировать такие дорогостоящие сооружения, как вентиляторные и башенные градирни, при малой гидравлической нагрузке и, соответственно, с низким уровнем теплосъема нецелесообразно. Тем не менее, неограниченная регулировка водооборота и необоснованное использование сверхнормативных охлаждающих площадей вместо реконструкции неэффективных градирен являются, по существу, единственным способом воздействия на температуру охлаждаемой в градирнях циркуляционной воды (ЦВ). Нежелательность такой регулировки заключается не только в том, что испарительные градирни эксплуатируются с уровнем теплосъема прудов-охладителей, но и в том, что при этом многократно увеличиваются затраты на перекачку воды и на содержание и эксплуатацию СОВ.

Используемые в настоящее время критерии оценки эффективности работы градирен некорректны. В результате широкомасштабной реконструкции оборудования вентиляторных и башенных градирен их технологические характеристики полностью изменились и перестали соответствовать разработанным во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева и ВНИИВОДГЕО *нормативным графикам охлаждения* [2]. Метод оценки эффективности работы градирен по *коэффициенту массоотдачи* (определяемому по уравнению Меркеля) не дает достоверных результатов даже при использовании различных поправочных коэффициентов, поскольку не позволяет учесть очень сильное влияние на охлаждающую способность градирен степени неравномерности распределения сред и уровня диспергирования воды, которые на опытной

и натурной установках неадекватны [3]. Очевидно, что оценка охлаждающей способности градирни должна производиться не в сравнении с критериями, которые десятилетиями не пересматриваются, а по показателю, легко определяемому до и после реконструкции. С этой точки зрения более подходящими являются следующие *показатели работы градирен* [4, 5]:

$$\eta_i = \Delta t / (\Delta t + \delta);$$

$$\eta_{эф} = (t_{2норм} - \tau) / (t_{2факт} - \tau),$$

где  $\delta = t_2 - \tau$  – недоохлаждение воды до температуры воздуха по смоченному термометру;

$t_{2норм}$ ,  $t_{2факт}$  – нормативная и фактическая температуры охлажденной воды.

Однако оба эти показателя имеют наиболее высокие значения при самой неэффективной работе градирен, когда для обеспечения требуемого теплосъема используются многократные (по сравнению с проектными) гидравлические нагрузки и охладительные площади. Увеличенный в системе водооборот перераспределяется между дополнительными охладителями так, чтобы максимально снизить расход циркуляционной воды на каждую градирню. При этом недоохлаждение воды до температуры воздуха по смоченному термометру  $\delta$  будет стремиться к нулю. Фактическое же значение  $t_2$  максимально приближается к его теоретическому пределу  $\tau$ . Такая глубина охлаждения достигается не за счет эффективного испарительного охлаждения, а в результате прокачки увеличенного объема оборотной воды через сверхнормативные охладительные площади.

### **Определение основной номинальной характеристики градирни**

Более чем тридцатилетний опыт проектирования, реконструкции и эксплуатации различных градирен дает авторам основание утверждать, что полностью исправные градирни, сооруженные по типовым проектам Союзводоканалпроекта, Ленинградского отделения Атомтеплоэлектропроекта, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Проектстальконструкции и многих других организаций, позволяют поддерживать средний уровень удельного теплосъема при расчетных (проектных) погодных условиях не ниже 335 МДж/(м<sup>2</sup> ч) [80 Мкал/(м<sup>2</sup>·ч)], что вполне согласуется с их нормативной тепловой нагрузкой.

Значение удельного теплосъема  $q_{тс}$  должно быть основной номинальной характеристикой градирни, так как является единственным эксплуатационным показателем, определяющим все остальные параметры. Введение понятие удельного теплосъема  $q_{тс}$  в градирне и построение ее рабочей характеристики необходимы для определения допустимых удельных гидравлических нагрузок без снижения проектной удельной тепловой нагрузки  $q$ .

Существующие же сегодня нормативные параметры работы градирен ориентируют производственный персонал на эксплуатацию этих охладителей либо с низким уровнем  $q_{тс}$  при низких значениях  $t_2$ , либо с высоким уровнем  $q_{тс}$  и высокими значениями  $t_2$ . Задача оптимизации работы градирен для получения максимальных уровней теплосъема с минимальной температурой ЦВ  $t_2$  ранее не рассматривалась.

Отсутствие достоверных экспериментальных данных об удельном теплосъеме при проектировании градирен превращает их проектное обоснование в расчет лишь теоретической возможности достижения требуемой глубины охлаждения воды в определенных погодных условиях. Однако вопрос о том, будет ли такая возможность обеспечена конкретным оборудованием градирни, остается открытым. Таким образом, для нормальной эксплуатации градирен необходимо поддержание соотношения  $q_{тс} \geq q$ . К сожалению, на практике оно не соблюдается из-за необоснованной замены стандартизированного оборудования градирен на различные экспериментальные образцы, что приводит к росту  $t_2$  и снижению производительности основного технологического оборудования.

Сравнительно небольшое изменение температур ЦВ позволяет считать ее теплоемкость постоянной и равной  $4,19 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  [ $1 \text{ Мкал}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ]. Следовательно, расчетная удельная тепловая нагрузка  $q$  будет определяться только удельной гидравлической нагрузкой  $g$  и перепадом температур  $\Delta t$ .

На рис. 1 представлены гиперболы постоянной удельной тепловой нагрузки  $q$  в координатах  $\Delta t$ — $g$ . Как видно из этого рисунка, для сохранения постоянной удельной тепловой нагрузки при изменении одного из параметров ( $g$  или  $\Delta t$ ) требуется значительно большее изменение другого. С одной стороны, снижение перепада температур  $\Delta t$  до  $4^\circ\text{C}$  для  $q = 335 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (точка *A*) компенсируется удельной гидравлической нагрузкой  $g = 20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , которая значительно выше пропускной способности любой промышленной градирни. С другой стороны, снижение гидравлической нагрузки до  $4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (точка *B*) компенсируется перепадом температур  $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ . Однако такой перепад температур может соответствовать только существенному увеличению  $t_2$  [1].

Следовательно, оптимальная удельная гидравлическая нагрузка  $g_{\text{опт}}$  однозначно определяется удельной тепловой нагрузкой  $q$ ,  $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , в вершине соответствующей гиперболы, т.е.

$$g_{\text{опт}} = \Delta t = \sqrt{q/4.19}.$$

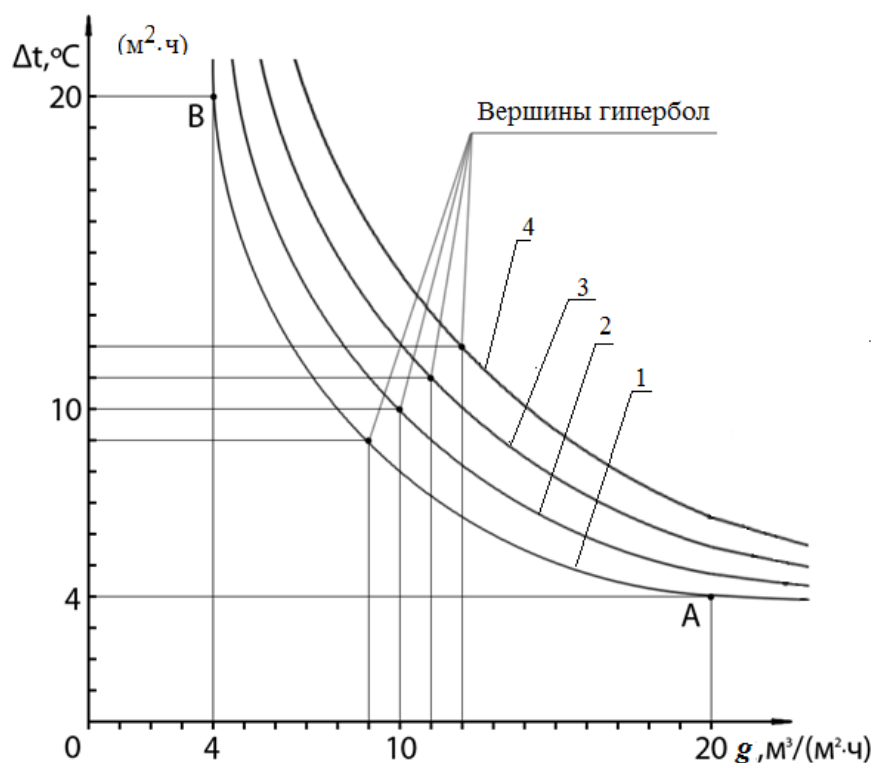


Рис. 1. Гиперболы постоянной удельной тепловой нагрузки  $q$ , МДж/(м<sup>2</sup>·ч):  
1 – 335; 2 – 419; 3 – 502; 4 – 603

Изменение параметров окружающей среды в очень широком диапазоне нивелирует существенные различия в охлаждающей способности различных градирен и не дает возможности своевременного выявления ухудшения их работы. Поэтому оценка эффективности должна производиться в практически одинаковых погодных условиях и при одинаковой тепловой нагрузке по показателю, характеризующему исключительно конструкцию и оборудование градирни.

Многолетние измерения параметров окружающего воздуха в разных регионах Украины показали, что во время одного теплого сезона (с 15 апреля по 15 октября) для каждой СОВ можно найти, как минимум, 20 суток с практически одинаковыми погодными условиями, позволяющими производить балансовые испытания.

### Коэффициент эффективности работы градирен

Тепло, отводимое от ЦВ в градирне, равно разности ее начальной и конечной энтальпий, т.е.  $q = h_{\text{нач}} - h_{\text{кон}}$ . Очевидно, что эффективность работы градирни заключается в том, чтобы при максимально возможном значении  $q$ , при котором затраты на СОВ будут

минимальными, обеспечить минимально допустимый уровень  $h_{\text{кон}}$ , при котором производительность основного оборудования будет максимальной. Поэтому логично определять эффективность работы градирен  $\eta$  как

$$\eta = \frac{q}{h_{\text{кон}}} = \frac{h_{\text{нач}} - h_{\text{кон}}}{h_{\text{кон}}} = \frac{\Delta t}{t_2}.$$

Таким образом, можно утверждать, что наиболее эффективным является использование такого оборудования и таких режимов эксплуатации вентиляторных и башенных градирен, при которых наименьшая температура охлажденной воды  $t_2$  будет достигаться при наибольшем перепаде температур  $\Delta t$ .

Предложенный коэффициент  $\eta$  является интегральным показателем эффективности градирен, с помощью которого учитываются все условия их эксплуатации. Значения  $\eta$  всегда меньше единицы, поскольку в теплое время года перепад температур  $\Delta t$  практически не превышает  $15\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура охлажденной циркуляционной воды  $t_2$  не опускается ниже  $15\text{ }^\circ\text{C}$ .

Интересно, что увеличение перепада температур  $\Delta t$  путем снижения гидравлической нагрузки  $g$  всегда приводит к более значительному росту температуры охлажденной воды  $t_2$ . И наоборот, снижение температуры охлажденной воды  $t_2$  при увеличении гидравлической нагрузки вызывает более быстрое падение  $\Delta t$ . Это свидетельствует о наличии максимума функции  $\eta(\Delta t/t_2) = f(g)$ .

### Построение рабочей характеристики градирни

Авторами были проведены балансовые испытания двухсекционной вентиляторной градирни (охлаждающая площадь  $S_{\text{охл}} = 2 \times 12 \times 16\text{ м}^2$ ) Кременчугской ТЭЦ после ее реконструкции. Деревянные ороситель и водоуловитель были заменены на термо- и фотостабилизированные решетчатые полиэтиленовые блоки (УТУ 38002-04458-002-92), а сопла с чашечным отражателем -- на раструбные водоразбрызгивающие сопла (УТУ 38002-04458-008-93). Измерения параметров работы градирни проводились в течение трех теплых месяцев при условно постоянной тепловой нагрузке на конденсатор энергоблока № 2 с турбоустановкой ПТ-50-12,8 ( $Q = 38 \pm 0,8\text{ МВт}$ ). Отклонения от расчетных погодных условий ( $t_{\text{возд.}} = 24\text{ }^\circ\text{C}$ , относительная влажность  $\phi = 64\%$ , барометрическое давление  $p \approx 100\text{ кПа}$ , скорость воздуха  $v_{\text{возд.}} < 1\text{ м/с}$ ;  $\tau = 19,5\text{ }^\circ\text{C}$ ) составили  $\pm 2\%$ . Результаты наиболее надежных измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры работы градирни при расчетных погодных условиях

Общая гидравлическая нагрузка $G$ , м <sup>3</sup> /ч	Удельная гидравлическая нагрузка $g$ , м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)	Перепад температур $\Delta t$ , °С	Температура охлажденной воды $t_2$ , °С	Удельный теплосъем $q_{тс}$ , МДж/(м <sup>2</sup> ·ч) [Мкал/(м <sup>2</sup> ·ч)]	$\eta$
2750	7,2	11,4	28,5	344 (82,1)	0,400
3000	7,8	11,0	26,5	360 (85,8)	0,415
3200	8,4	10,2	23,5	360 (86,0)	0,434
3400	8,9	9,6	22,4	358 (85,4)	0,429
3650	9,5	9,0	23,4	358 (85,5)	0,385

На рис. 2 представлены зависимости перепада температур  $\Delta t$  и коэффициента эффективности  $\eta$  от удельной гидравлической нагрузки  $g$ .

Принимая в соответствии с технологическими требованиями  $t_2 = \tau + 5 = 19.5 + 5 = 24,5$  °С, на графике функции  $\Delta t = f(g)$  интерполяцией находим точку, соответствующую этому значению  $t_2$ :  $\Delta t = 10,6$  °С и  $g = 8$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) (точка А). С учетом того что удельный теплосъем в градирне не должен быть меньше 335 МДж/(м<sup>2</sup>·ч), аналогично экстраполяцией определяем следующую граничную точку:  $\Delta t = 7,6$  °С и  $g = 10,5$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) (точка В).

Таким образом, полученный график  $\Delta t = f(g)$ , ограниченный найденными точками, является рабочей характеристикой исследуемой градирни при расчетных параметрах окружающего воздуха. Номинальным значением характеристики можно считать соответствующий максимальному коэффициенту эффективности работы удельный теплосъем  $q_{ном} \approx 369$  МДж/(м<sup>2</sup>·ч) [88 Мкал/(м<sup>2</sup>·ч)],  $g_{ном} \approx 8,8$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) (точка С).

### Выводы

В результате проведения балансовых испытаний промышленной градирни определен ее основной номинальный показатель – удельный теплосъем  $q_{тс}$  и предложена методика построения рабочей характеристики градирен.

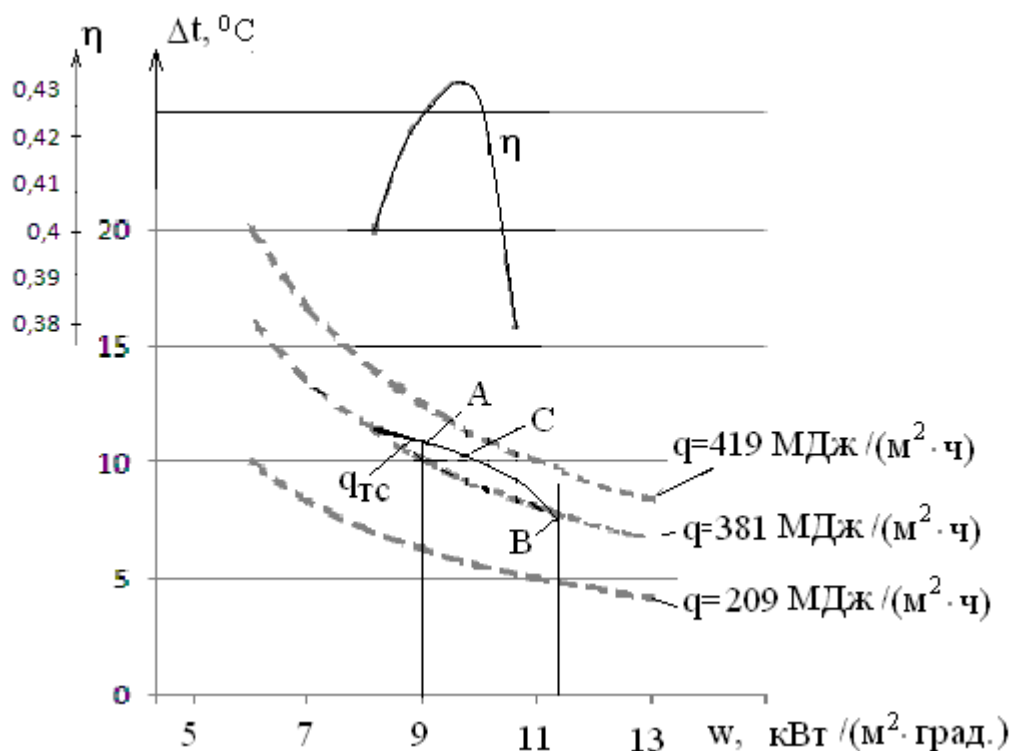


Рис. 2. Зависимости разности температур воды на входе в градирню и на выходе из нее  $\Delta t$  и коэффициента эффективности вентиляторной градирни  $\eta$  ( $S_{\text{охл.}}=2 \times 192 \text{ м}^2$ ) от удельной гидравлической нагрузки для тепловой нагрузки  $q = 335 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

### Список литературы

1. *Руководство по проектированию градирен* / Госстрой СССР. М.: Союзводоканалпроект, 1980.
2. *Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С.* Технологические расчеты башенных градирен // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2000. № 7. С. 17--20.
3. *Гладков В.А., Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С.* Вентиляторные градирни. М.: Стройиздат, 1976.
4. *Маргулова Т.Х.* Атомные электрические станции. М.: ИздАТ, 1994.
5. *Гончаров А.В.* Мероприятия по повышению охлаждающей способности башенных и вентиляторных градирен в системах технического водоснабжения // *Энергетик*. 2003. № 3. С. 18-19.



Введено поняття робочої характеристики вентиляторних та баштових градирень з номінальними значеннями основних параметрів. Розроблена методика побудування цієї робочої характеристики.

*Ключові слова:* робоча характеристика градирень

The performance of chimney-type and mechanical-draft water cooling towers is introduced. The method of its construction is developed.

*Keywords:* performance data of coolers