

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ И БАШЕННЫХ ГРАДИРЕН

С.К. Сосновский, инженер, НПФ «Пластэнерго»
В.П. Кравченко, докт. техн. наук, ОНПУ

Системы оборотного водоснабжения (СОВ) являются важнейшим элементом технологического комплекса предприятий многих отраслей промышленности: теплоэнергетики, нефтехимии, металлургии, машиностроения и др. От качества и эффективности работы СОВ зависят производительность и срок службы оборудования, качество и трудоемкость готовой продукции, удельный расход сырья и энергии [1]. Вместе с тем, рациональное использование водных ресурсов и энергосбережение в самих СОВ, характеризующихся огромными масштабами распространения и объемами капиталовложений, - не менее актуальная задача [2].

Охладители СОВ (в основном вентиляторные и башенные градирни) относятся к объектам длительного срока эксплуатации, и их подавляющее большинство в Украине возводилось еще в советское время. Прошедшая за последние годы широкомасштабная реконструкция морально и физически устаревших градирен, к сожалению, существенно снизила их эффективность. Попытки хаотичной замены оборудования градирен привели к росту затрат на их содержания и эксплуатацию и увеличили энергопотребление в СОВ. Для исправления сложившейся ситуации в дальнейшем реконструировать вентиляторные и башенные градирни необходимо только на основе увеличения термодинамического коэффициента эффективности их работы $K_{эрг}$ [3]:

$$K_{эрг} = \frac{\Delta t}{t_2},$$

где Δt - перепад температур в градирне;

t_2 - температура охлажденной воды, °С, - а также полной ликвидации каплеуноса [4]

Анализ эксплуатации большого количества стандартных градирен («Союзводоканалпроект», Ленинградское отделение «Атомтеплоэлектропроекта», «Проектстальконструкция» и др.) дает нам основание считать, что полностью исправное оборудование вентиляторных и башенных градирен в теплое время года (5-6 месяцев) обеспечивает требуемый уровень охлаждения:

$$t_2 = \tau + 5^\circ \text{C} \quad \text{- для вентиляторных градирен;}$$

$$t_2 = \tau + 8^\circ \text{C} \quad \text{- для башенных градирен;}$$

где τ - температура воздуха по смоченному термометру (теоретический предел охлаждения воды в градирне), °С [5].

Однако сегодня практически невозможно найти ни одной градирни, обеспечивающей такой уровень охлаждения, без многократного (по

сравнению с проектным) увеличения водооборота в СОВ. Очевидно, что при этом не выдерживаются такие важнейшие характеристики градирен, как перепад температур Δt и удельная тепловая нагрузка (теплосъем) q . Для исправных градирен минимальные экономически целесообразные значения этих параметров должны составлять $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $80\text{ Мкал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ соответственно, что практически всегда согласуется с их расчетными значениями [3, 5].

Величина q определяется двумя регулярно измеряемыми параметрами: перепадом температур в градирне Δt и удельной гидравлической нагрузкой $g=G/S$, $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$, где G - общая гидравлическая нагрузка, $\text{м}^3/\text{ч}$, а S - охлаждающая площадь градирни, - по формуле $q = c\cdot g\cdot\Delta t$, где c - теплоемкость воды, $1000\text{ ккал}/(\text{м}^3\cdot\text{град})$.

Важно отметить, что значения Δt и g должны находиться в области вершины гиперболы постоянного удельного теплосъема (рис. 1).

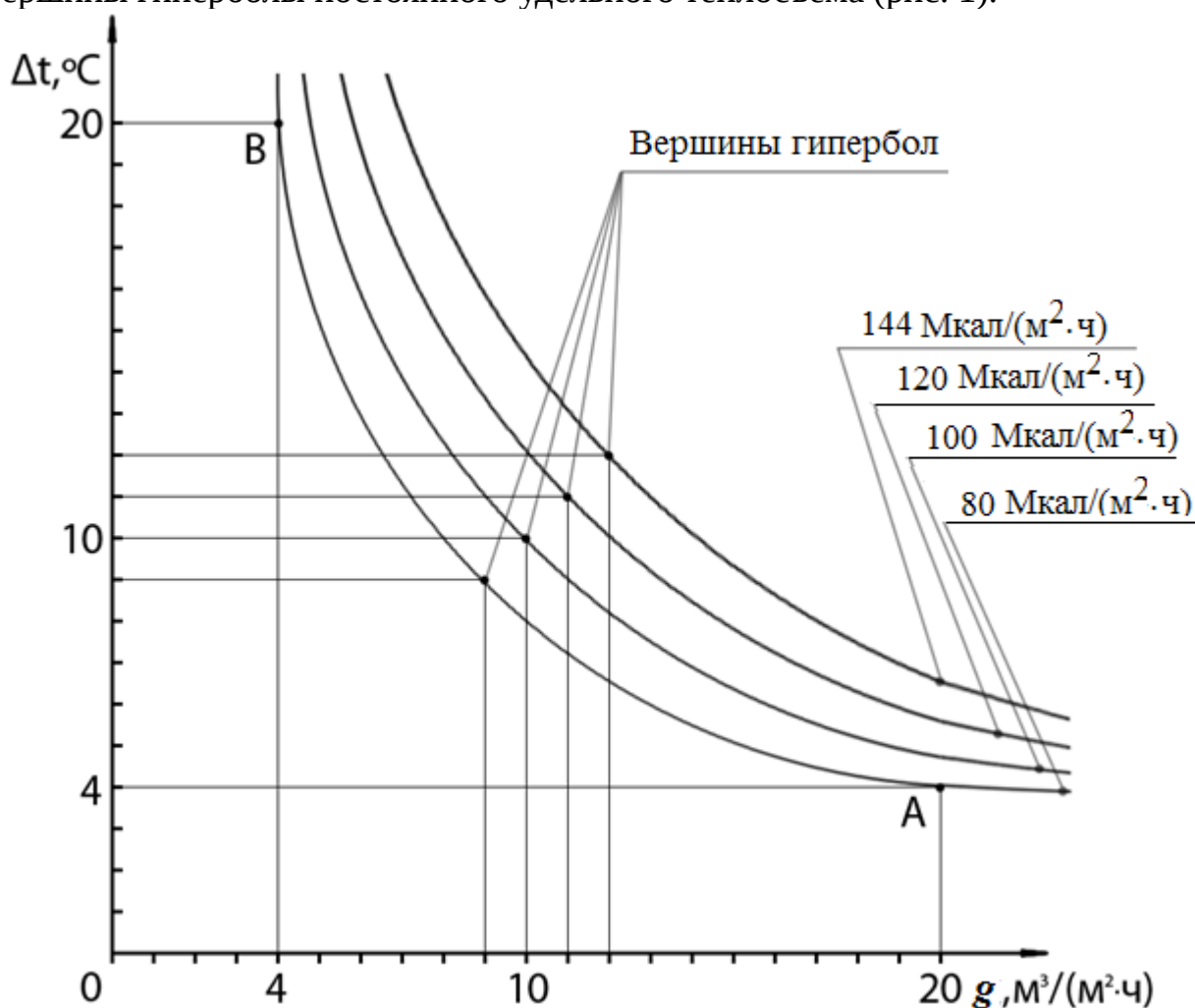


Рис.1. Гиперболы постоянного удельного теплосъема

Из графиков $q = \text{const}$ видно, что отклонение одного из параметров (g или Δt) от вершины гиперболы вызывает значительно большее отклонение другого. Так, снижение перепада температур Δt до $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ для $q = 80\text{ Мкал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ (точка A) компенсируется удельной гидравлической нагрузкой $g = 20\text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$, которая значительно выше пропускной способности любых промышленных градирен. С другой стороны, снижение

гидравлической нагрузки до $4 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (точка В) компенсируется перепадом температур $\Delta t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Однако такой перепад температур может соответствовать только значительному увеличению потенциалов охлажденной и нагретой воды (t_2 и t_1). В обоих вариантах такие отклонения всегда приводят к росту потребности в дополнительных охлаждающих площадях.

Целью настоящего исследования является разработка прямого метода расчёта экономии затрат предприятия при реконструкции вентиляторных и башенных градирен. Сложность подобного расчета заключается в том, что из-за большого количества взаимосвязанных и зачастую противоречивых параметров работы вентиляторных и башенных градирен [3], до сих пор не удавалось увязать их изменения в процессе реконструкции СОВ с конкретными экономическими показателями. Это порождало появление большого количества спекуляций, когда например, вентиляторные и башенные градирни с уровнем теплосъёма брызгальных бассейнов, или с охлаждающей площадью как у радиаторных градирен, выдавались за эффективно работающие охладители.

Рассмотрим пример работы СОВ (рис. 2), проектные параметры которой имеют следующие значения:

1. Охлаждающая площадь градирни (поз. 2) – $S=200 \text{ м}^2$.
2. Общая и удельная тепловые нагрузки –
 $Q=16 \text{ Гкал/ч}$; $q=16000 \text{ Мкал/ч} / 200 \text{ м}^2 = 80 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.
3. Перепад температур при расчетных погодных условиях -
 $\Delta t = t_1 - t_2 = 35 - 26 = 9 \text{ }^\circ\text{C}$.
4. Термодинамический показатель эффективности работы градирен -
 $K_{\text{эрг}} = \Delta t/t_2 = 9/26 = 0,346$.
5. Общая и удельная гидравлические нагрузки –
 $G = 1780 \text{ м}^3 / \text{ч}$; $g = 1780/200 = 8,9 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Предположим, что вследствие неисправности оборудования градирни, удельный теплосъём в ней снижается до $q = 40 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ($Q=8 \text{ Гкал/ч}$) и начинает расти температура охлажденной воды t_2 . Для сохранения прежнего теплосъёма ($Q=16 \text{ Гкал/ч}$) подключается такая же вторая градирня и общая охлаждающая площадь становится 400 м^2 . Однако удельная гидравлическая нагрузка при этом падает в два раза – $g'=1780/400 = 4,45 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Одновременно уменьшаются радиус и высота факела водоразбрызгивающих форсунок, а также снижается уровень диспергирования воды и время контакта её с воздухом. Теплосъём в градирнях опять падает на величину, которая зависит от конкретных погодных условий. В результате этого, вернуться к первоначальному значению температуры t_2 не удастся. Поэтому для возврата к прежней удельной гидравлической нагрузке g объём водооборота увеличивается в два раза – $G'=1780 \cdot 2=3560 \text{ м}^3/\text{ч}$ и общий теплосъём в СОВ восстанавливается.

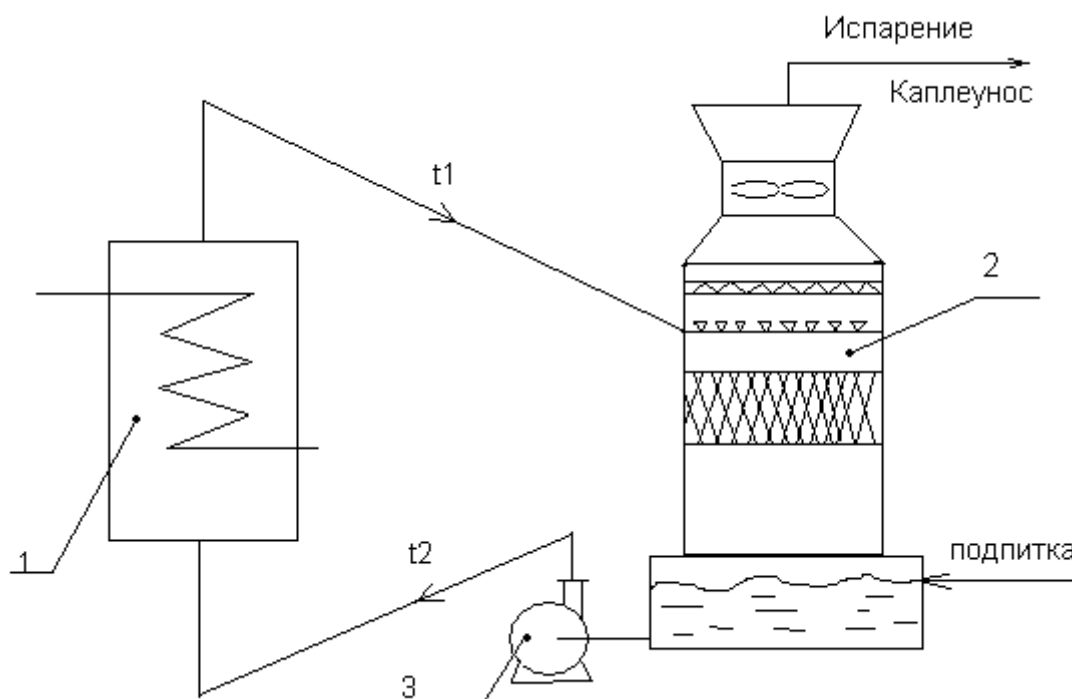


Рис. 2. Схема СОВ: 1 - потребители охлажденной оборотной воды; 2 - градирня; 3- насосная станция

Однако, несмотря на то, что и охлаждающая площадь, и водооборот в СОВ были увеличены в два раза, новая система по своим технологическим параметрам всё же не адекватна исходной. Дело в том, что в полном соответствии с законом сохранения энергии перепад температур в градирнях Δt с восстановлением удельной гидравлической нагрузки [$8,9 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$] уменьшится в два раза:

$$\Delta t' = \frac{q}{c \cdot g} = \frac{40}{1 \cdot 8,9} = 4,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Поступая к потребителям (поз. 3), удвоенное количество охлажденной воды нагревается тем же количеством тепла уже до гораздо меньшей температуры t_1 и, возвращаясь с этой температурой на градирни, опять приводит к снижению в них теплосъёма, поскольку более низкопотенциальное тепло отводится хуже. Температура охлажденной воды поднимается, вызывая рост t_1 после оборудования потребителей. Увеличение температур t_1 и t_2 продолжается до тех пор, пока их уменьшенный вдвое перепад не установится на более высоком потенциальном уровне: например,

$$\Delta t' = 35,5 - 31,0, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Новые параметры работы СОВ примут следующие значения:

1. Охлаждающая площадь - $S' = 200 \cdot 2 = 400 \text{ м}^2$.
2. Общая и удельная тепловые нагрузки -
 $Q' = 16 \text{ Гкал/ч}; q = 16000/400 = 40 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.
3. Перепад температур при тех же погодных условиях –

$$\Delta t' = t_1' - t_2' = 35,5 \text{ }^\circ\text{C} - 31,0 \text{ }^\circ\text{C} = 4,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Термодинамический показатель эффективности работы градирен -

$$K_{\text{эрг}} = \frac{\Delta t'}{t_2'} = \frac{4,5}{31,0} = 0,145$$

5. Общая и удельная гидравлические нагрузки -

$$G' = 3560 \text{ м}^3/\text{ч}; q' = 3560/400 = 8,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Следовательно, при падении удельного теплосъёма в градирне в два раза, ни двукратное увеличение охлаждающей площади (S'), ни двойной водооборот (G') не обеспечивают возврат охлажденной воды на первоначальный потенциальный уровень ($t_2 = 26 \text{ }^\circ\text{C}$). Для того, чтобы снизить t_2' требуются еще дополнительные охлаждающие площади и водооборот. Практически расходы на содержание и эксплуатацию СОВ возрастают при этом многократно.

Единственной разумной альтернативой вышеуказанному регулированию параметров СОВ является поддержание охлаждающей способности вентиляторных и башенных градирен на расчетном (проектном) уровне.

Таким образом, до и после реконструкции градирен требуется проведение следующих расчетов и измерений:

1. Охлаждающая площадь - S , м^2 .
2. Общая и удельная тепловые нагрузки - Q , $\text{Гкал}/\text{ч}$; q , $\text{Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.
3. Перепад температур - $\Delta t = t_1 - t_2$, $^\circ\text{C}$.
4. Термодинамический показатель эффективности работы градирни -

$$K_{\text{эрг}} = \frac{\Delta t}{t_2}$$

5. Общая и удельная гидравлические нагрузки - G , $\text{м}^3/\text{ч}$; g , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.
6. Процент каплеуноса - p , %;
7. Расчётные погодные условия (температура воздуха $t_{\text{сух}}$, $^\circ\text{C}$; относительная влажность φ , %; скорость и направление ветра \bar{v} , $\text{м}/\text{с}$; барометрическое давление P , мм рт. ст.).

Термодинамическая эффективность реконструкции определяется при погодных условиях, близких к расчётным, по формуле:

$$\mathcal{E}_T = \frac{K_{\text{эрг},2} - K_{\text{эрг},1}}{K_{\text{эрг},1}} \cdot 100 \quad (1)$$

где $K_{\text{эрг},1}$ и $K_{\text{эрг},2}$ - показатели эффективности до и после реконструкции.

Отрицательное значение \mathcal{E}_T свидетельствует о снижении термодинамической эффективности в результате реконструкции.

Экономический эффект рассчитывается по разности следующих параметров работы градирни до и после их реконструкции:

1. Экономия/перерасход охладительной площади – $\Delta S = S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}$, м², где $S_{\text{нач}}$ и $S_{\text{кон}}$ – охладительные площади до и после реконструкции; или в сравнении с расчетным значением S_p –

$$\Delta S = S_{\text{факт.}} - S_p = S_{\text{факт.}} - \frac{Q_{\text{факт.}}}{q} = S_{\text{факт.}} - \frac{c \cdot \Delta t_{\text{факт.}} \cdot G_{\text{факт.}}}{q}$$

Окончательно

$$\Delta S = S_{\text{факт.}} \cdot \left(1 - K_1 \cdot \Delta t_{\text{факт.}} \cdot g_{\text{факт.}} \right), \quad (2)$$

где $Q_{\text{факт.}}$, $S_{\text{факт.}}$, $\Delta t_{\text{факт.}}$ и $G_{\text{факт.}}$ – фактические теплосъем, Гкал/ч; площадь, м²; перепад температур, °С, и гидравлическая нагрузка, м³/ч, соответственно.

Величина коэффициента пропорциональности $K_1 = 0,0125$ ч/(м•град) соответствует минимальному расчётному теплосъему в вентиляторных и башенных градирнях и в дальнейшем должна пересматриваться в сторону уменьшения. Отрицательное значение ΔS (перерасход) означает, что имеет место нерациональная загрузка охладительных площадей.

2. Экономия/перерасход водооборота –

$\Delta G = G_{\text{нач.}} - G_{\text{кон.}}$, м³/ч, где $G_{\text{нач.}}$ и $G_{\text{кон.}}$ – общие гидравлические нагрузки до и после реконструкции; или в сравнении с расчетными значениями G_p –

$$\Delta G = G_{\text{факт.}} - G_p = G_{\text{факт.}} - \frac{q \cdot S_p}{c \cdot \Delta t_p} = G_{\text{факт.}} - \frac{q \cdot c \cdot \Delta t_{\text{факт.}} \cdot G_{\text{факт.}}}{q \cdot c \cdot \Delta t_p}$$

Окончательно

$$\Delta G = G_{\text{факт.}} \cdot \left(1 - K_2 \cdot \Delta t_{\text{факт.}} \right). \quad (3)$$

Величина коэффициента пропорциональности $K_2 = 0,111$ соответствует минимальному расчетному перепаду температур в вентиляторных и башенных градирнях (9 °С).

Отрицательное значение ΔG (перерасход) означает, что водооборот в СОВ увеличился.

3. Экономия/перерасход подпиточной воды –

$\Delta p = p_{\text{нач.}} - p_{\text{кон.}}$, %, где $p_{\text{нач.}}$ и $p_{\text{кон.}}$ – проценты каплеуноса (от водооборота) до и после реконструкции. Отрицательное значение Δp свидетельствует об увеличении каплеуноса.

4. Экономия/перерасход сырья, материалов, энергоресурсов и трудозатрат в основном производстве, увеличение производительности оборудования и улучшение качества выпускаемой продукции при дополнительном снижении/увеличении температуры охлажденной t_2 /нагретой t_1 воды –

$\Delta t = t_{\text{нач.}} - t_{\text{кон.}}$, где $t_{\text{нач.}}$ и $t_{\text{кон.}}$ – температуры охлажденной t_2 или нагретой t_1 воды до и после реконструкции градирни.

Расчет экономии /перерасхода в стоимостном выражении:

1. Затраты на 1 м² охладительной площади C_1 определяются на основании локальной сметы на содержание и эксплуатацию СОВ или по годовой норме

амортизации стоимости градирни на момент ее реконструкции А.
Экономия/перерасход –

$$\mathcal{E}_1 = C_1(A) \cdot \Delta S.$$

2. Стоимость 1 м³ оборотной воды C_2 обычно калькулируется на предприятиях. Упрощенно она может быть рассчитана по стоимости электроэнергии, необходимой для перекачки 1 м³/ч оборотной воды насосами установленной мощности. Экономия/перерасход –

$$\mathcal{E}_2 = C_2 \cdot \Delta G \cdot \tau,$$

где τ - годовой фонд рабочего времени градирни, ч.

3. Экономия/перерасход подпиточной воды –

$$\mathcal{E}_3 = C_3 \cdot \Delta p \cdot G_p \cdot \tau / 100,$$

где C_3 – стоимость 1 м³ подпиточной воды.

4. Экономия/перерасход статей затрат основного производства \mathcal{E}_4 определяется на основании их пересчета в связи с изменением температуры оборотной воды. Например, из расчета тепловой схемы конденсационной турбоустановки следует, что при снижении t_1 на 1 °С её мощность вырастет на 0,34 % за счет роста КПД. В этом случае \mathcal{E}_4 приравнивается к стоимости дополнительно выработанной электроэнергии в течение годового фонда рабочего времени турбоустановки.

Экономическая эффективность реконструкции рассчитывается по коэффициенту ε :

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4}{\sum Z},$$

где $\sum Z$ – суммарные затраты на проведение реконструкции.

Срок окупаемости затрат:

$$\tau = \frac{1}{\varepsilon}$$

- составляет в настоящее время, как правило, всего несколько суток, что свидетельствует о высокой эффективности и экономической целесообразности реконструкции вентиляторных и башенных градирен.

Выводы:

1. В результате исследования взаимосвязи основных параметров эксплуатации промышленных вентиляторных и башенных градирен установлено, что снижение их удельного теплосъёма приводит к многократному увеличению охлаждающих площадей и водооборота.
2. Предложены формулы расчета изменения термодинамической эффективности, гидравлической нагрузки и охлаждающей площади при реконструкции градирен.
3. Разработана методика прямого расчета экономической эффективности реконструкции градирен.

Литература

1. Кучеренко Д.И., Гладков В.А. Обратное водоснабжение: (Системы водяного охлаждения). - М.: Стройиздат, 1980. – 168 с.

2. Системы водяного оборотного водоснабжения промышленных предприятий (обзор). /Сост. П.П. Марков, Н.А. Маркова, А.В. Чапковский. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1976. – 71 с.
3. Сосновский С.К., Кравченко В.П. Определение эффективности охлаждения циркуляционной воды в вентиляторных и башенных градирнях // Энергетика и электрификация. – 2008. - № 3. – С.37-41.
4. Сосновский С.К., Кравченко В.П. Капельный унос в вентиляторных градирнях // Энергетика и электрификация. – 2001. - № 9. – С.24-28.
5. Пособие по проектированию градирен к СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения». – М.: ЦИТП. – 1989. -192 с.