

## МЕТОДИКА ПРЯМОГО РАСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ГРАДИРЕН

**С.К. Сосновский,**  
*НПФ «Пластэнерго»*

**В.П. Кравченко,**  
*Одесский национальный политехнический университет*

Рассмотрен механизм поддержания температуры охлажденной воды при ухудшении охлаждающей способности градирен. Предложена методика определения эффективности реконструкции градирен.

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 Кэрг [3]:

$$K_{эрг} = \frac{\Delta t}{t_2},$$

где  $\Delta t$  - перепад температур в градирне;

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

Анализ эксплуатации большого количества стандартных градирен («Союзводоканалпроект», Ленинградское отделение «Атомтепло-электропроекта», «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:

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

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

где  $t$  - 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  $\Delta t$  и удельная тепловая нагрузка (теплосъем)  $q$ . Для исправных градирен минимальные экономически целесообразные значения этих параметров должны составлять 9 °С и 80 Мкал/(м<sup>2</sup>·ч) соответственно, что практически всегда согласуется с их расчетными значениями [3, 5].

Величина  $q$  определяется двумя регулярно измеряемыми параметрами: перепадом температур в градирне  $\Delta t$  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  $\Delta t$  и  $g$  должны находиться в области вершины гиперболы постоянного удельного теплосъема (рис. 1).

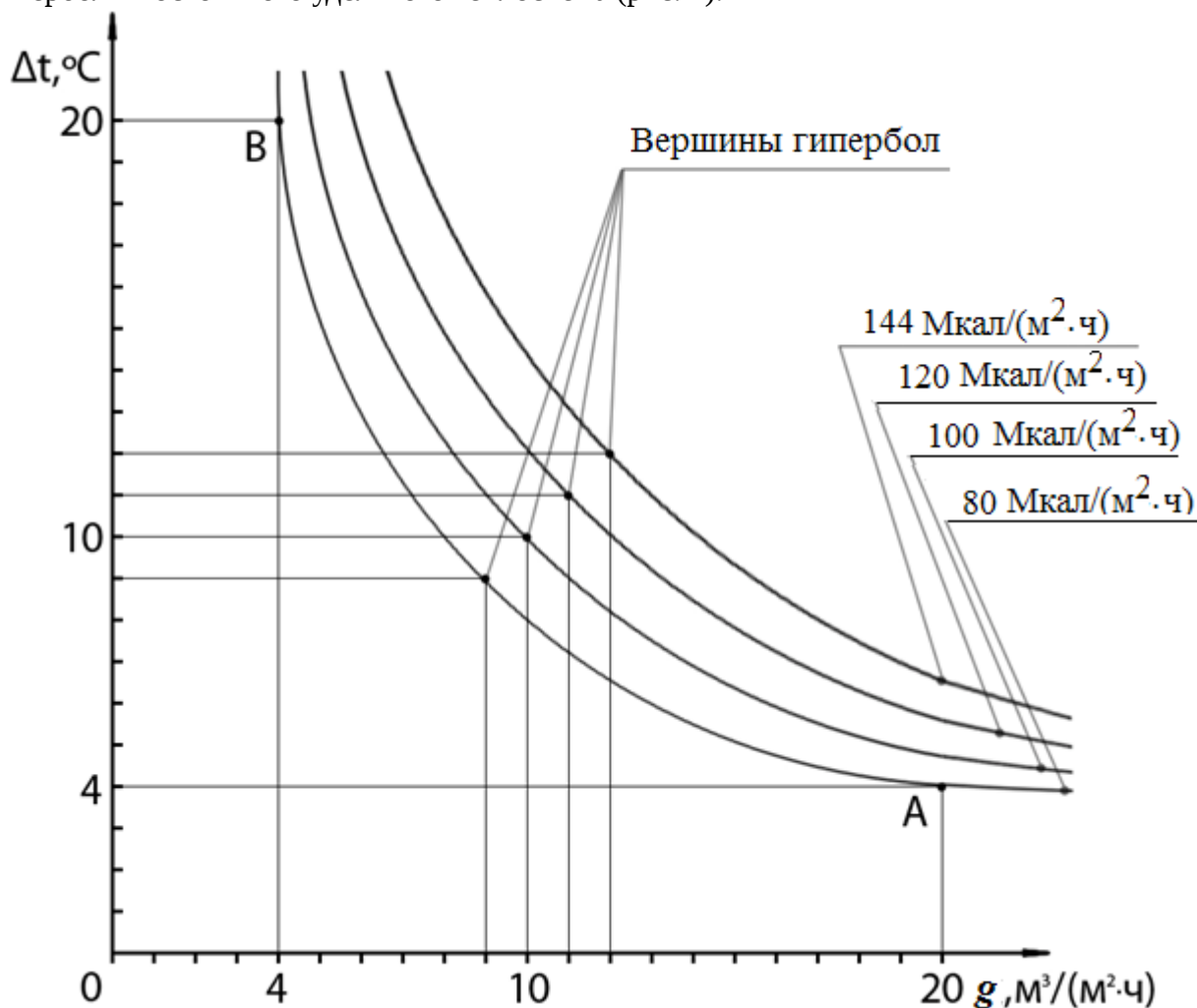


Рис.1. Гиперболы постоянного удельного теплосъема

Из графиков  $q = \text{const}$  видно, что отклонение одного из параметров ( $g$  или  $\Delta t$ ) от вершины гиперболы вызывает значительно большее отклонение другого. Так, снижение перепада температур  $\Delta t$  до  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  для  $q = 80 \text{ Мкал}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  (точка А) 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  $400 \text{ м}^2$ . 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 удаётся. 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.

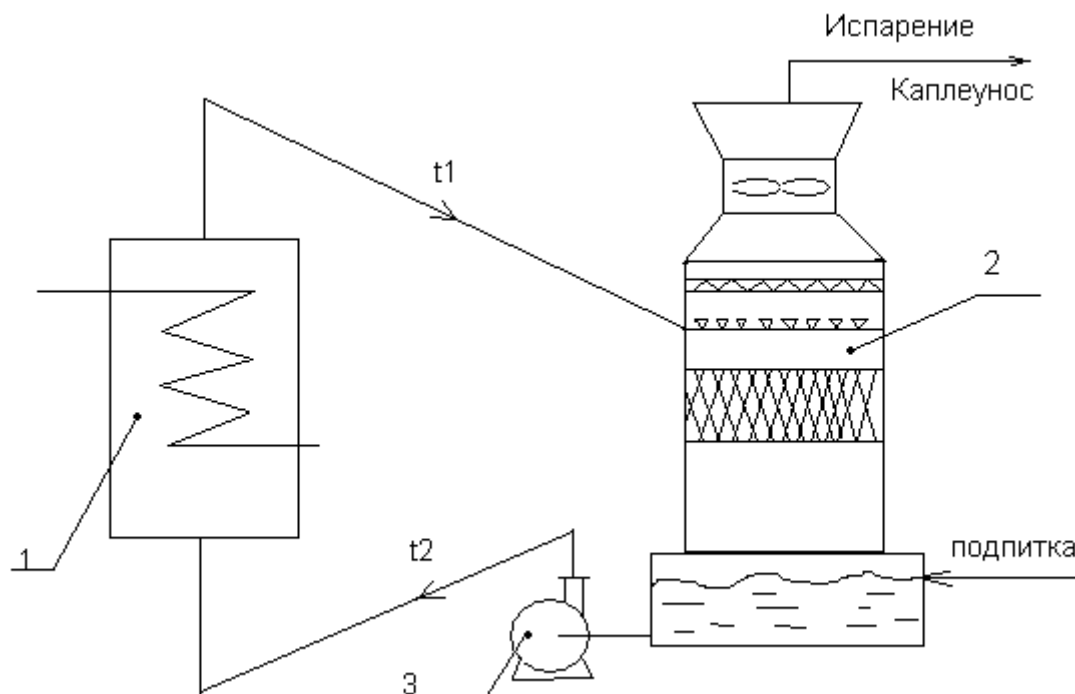


Рис. 2. Схема СОВ: 1 - потребители охлажденной оборотной воды; 2 - градирня; 3- насосная станция

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  $\Delta t$  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 -  $S$ ,  $\text{м}^2$ .
2. Общая и удельная тепловые нагрузки -  $Q$ ,  $\text{Гкал/ч}; q$ ,  $\text{Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$
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  $\varphi$ , %; скорость и направление ветра  $\bar{v}$ ,  $\text{м/с};$  барометрическое давление  $P$ ,  $\text{мм рт. ст.}).$

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 охлаждающей площади –  $\Delta S = S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}$ , м<sup>2</sup>, где  $S_{\text{нач}}$  и  $S_{\text{кон}}$  – охлаждаемые 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, м<sup>2</sup>; перепад температур, °С, и гидравлическая нагрузка, м<sup>3</sup>/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  $\Delta S$  (перерасход) означает, что имеет место нерациональная загрузка охлаждающих площадей.

2. Экономия/перерасход водооборота –

$\Delta G = G_{\text{нач.}} - G_{\text{кон.}}$ , м<sup>3</sup>/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  $\Delta G$  (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  $\Delta p$  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 м<sup>2</sup> охлаждающей площади Ц<sub>1</sub> определяются на основании локальной сметы на содержание и эксплуатацию СОВ или по годовой норме амортизации стоимости градирни на момент ее реконструкции А. Экономия/перерасход –

$$\mathcal{E}_1 = \text{Ц}_1(A) \cdot \Delta S. \quad (4)$$

2. Стоимость 1 м<sup>3</sup> оборотной воды Ц<sub>2</sub> обычно калькулируется на предприятиях. Упрощенно она может быть рассчитана по стоимости электроэнергии, необходимой для перекачки 1 м<sup>3</sup>/ч оборотной воды насосами установленной мощности. Экономия/перерасход –

$$\mathcal{E}_2 = \text{Ц}_2 \cdot \Delta G \cdot \tau, \quad (5)$$

где τ- годовой фонд рабочего времени градирни, ч.

3. Экономия/перерасход подпиточной воды –

$$\mathcal{E}_3 = \text{Ц}_3 \cdot \Delta p \cdot G_p \cdot \tau / 100, \quad (6)$$

где Ц<sub>3</sub> – стоимость 1 м<sup>3</sup> подпиточной воды.

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

Экономическая эффективность реконструкции рассчитывается по коэффициенту ε:

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4}{\sum Z}, \quad (7)$$

где ∑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.

#### Список использованных источников

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.

Аннотации

**МЕТОДИКА ПРЯМОГО РОЗРАХУНКУ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКОНСТРУКЦІЇ ГРАДИРЕН. Сосновський С.К., Кравченко В.П.** Розглянуто механізм підтримки температури охолодженої води при погіршенні здібності градирен до охолодження. Запропонована методика визначення ефективності реконструкції градирен.

**METHODOLOGY OF ECONOMIC EFFICIENCY DIRECT CALCULATION FOR COOLING TOWERS RECONSTRUCTION. Sosnovsky S., Kravchenko V.** The mechanism of temperature maintenance of the chilled water at worsening of cooling ability of cooling towers is considered. Methodology of efficiency determination at reconstruction of cooling towers offers.

**Сосновский Сергей Константинович**

Инженер

Директор Научно производственной фирмы «Пластэнерго»

Т. 050-550-35-52

**Кравченко Владимир Петрович**

Профессор каф. Атомных электростанций Одесского национального политехнического университета

Доктор технических наук

Т. 050-390-17-92

Mail: [vpkrav@rambler.ru](mailto:vpkrav@rambler.ru)