

УДК 621.175

**С.К. Сосновский\***, **В.П. Кравченко\*\***

\* Научно-производственная фирма «Пластэнерго», г. Кременчуг, ул. Чапаева, 23

\*\* Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ И БАШЕННЫХ ГРАДИРЕН

*Уточнены параметры эксплуатации градирен. Приведен критический анализ существующих показателей эффективности работы и введено понятие термодинамического КПД градирен. Приводится инструмент эксплуатационному персоналу для простого определения эффективности работы и технико-экономического обоснования проведения реконструкции градирен. Доказана возможность на практике полностью устранить каплеунос.*

**Ключевые слова:** Градирня - Эффективность охлаждения - Обоснование реконструкции - Каплеунос

**С.К. Сосновський\***, **В.П. Кравченко\*\***

\* Науково-виробнича фірма "Пластенерго", вул. Чапаєва, 23, м. Кременчуг

\*\* Одеський національний політехнічний університет, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВЕНТИЛЯТОРНИХ ТА БАШТОВИХ ГРАДИРЕНЬ

*Уточнено параметри експлуатації градирень. Наведено критичний аналіз існуючих показників ефективності роботи та введено поняття термодинамічного ККД градирень. Наводиться інструмент експлуатаційному персоналу для простого визначення ефективності роботи та техніко-економічного обґрунтування проведення реконструкції градирень. Доведено можливість на практиці повністю усунути каплеунос.*

**Ключові слова:** Градирня - Ефективність охолодження - Обґрунтування реконструкції - Каплеунос

**S.K. Sosnowsky\***, **V.P. Kravchenko\*\***

\* Scientific production firm «Plastenergo», Chapaev str., 23, Kremenchug

\*\* Odessa national polytechnic university, Shevchenko prosp., 1, Odessa, 65044

## WAYS OF EFFICIENCY INCREASE FOR COOLING TOWERS OPERATION

*The parameters of cooling tower exploitation are specified. The walkthrough of existent indexes of functioning efficiency is resulted and the concept of thermodynamics efficiency of cooling towers is entered. An instrument over is brought to the operating personnel for simple determination of work efficiency and feasibility study of lead through the cooling tower reconstruction. The practical possibility of droplet carryover entirely removing is proven.*

**Keywords:** Cooling tower - Cooling efficiency - Ground of reconstruction - Taking away of drops

### I. ВВЕДЕНИЕ

Системы оборотного водоснабжения (СОВ) являются важнейшим элементом технологического комплекса предприятий многих отраслей промышленности. 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 не менее актуальная задача.

Самым крупным потребителем воды является теплоэнергетика. Будучи наиболее водоемкой от-

раслью, она на цели охлаждения использует до 98 % расходуемой ею воды. Рациональное использование циркуляционной воды позволит в значительной мере сдерживать тенденцию к росту общего потребления воды промышленностью [2].

Снижение общего водооборота в СОВ уменьшает не только безвозвратные потери циркуляционной воды в градирне, но и затраты на ее перекачку. Повышение эффективности охлаждения воды в градирнях необходимо и для увеличения производительности технологических установок. Например, снижение потенциала циркуляционной воды на 1°C по расчетам схем турбоустановок дает увеличение мощности турбин, работаю-

щих в конденсационном режиме, в среднем на 0,34 %, причем исключительно за счет роста КПД (т.е. без дополнительных затрат).

В настоящее время большинство СОВ находится в плохом состоянии. На некоторых предприятиях проводятся работы по реконструкции оборудования, однако часто после этого эффективность работы только ухудшается. Причиной часто становится не только высокая сложность проходящих в градирне процессов, но и сложность методов обоснования проведения, а также оценки результатов работ по реконструкции.

Поэтому целью настоящей статьи является определение путей повышения эффективности работы СОВ, совершенствование методов обоснования и оценки результатов реконструкции оборудования.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГРАДИРЕН

СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» и «Пособие по проектированию градирен к СНиП 2.04.02-84» устанавливают основные технологические параметры эксплуатации охладителей (таблица 1).

Как видно, вентиляторные градирни допускают более высокие тепловые нагрузки и глубину охлаждения воды, то есть большее приближение температуры охлажденной воды к теоретическому пределу охлаждения (температуре атмосферного воздуха по смоченному термометру  $\tau$ ).

**Таблица 1** - Нормативные параметры эксплуатации градирен

Тип градирни	$Q_{уд}$ , тыс. ккал/(м <sup>2</sup> ·ч)	$\Delta t = t_1 - t_2$ , °C	$G_{уд}$ , м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)	$\delta = t_2 - \tau$ , °C
1. Вент.	80-100	3-20	6-12	4-5
2. Башенн.	60-100	5-15	5-10	8-10

Однако приведенные в табл. 1 нормативные диапазоны перепадов температур не соответствуют нормативным тепловым нагрузкам, которые жестко связаны друг с другом. Например, для вентиляторных градирен минимальная тепловая нагрузка (80 тыс. ккал/м<sup>2</sup>·ч) при  $\Delta t = 3$  °C соответствует гидравлической нагрузке  $G_{уд} = 80000$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч)/[1000 ккал/(м<sup>3</sup>·град)·3 град.] = 26,7 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч), что значительно превышает ее проектную величину. Аналогично, максимальная гидравлическая нагрузка на башенную градирню (10 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч) при  $\Delta t = 15$  °C должна была бы обеспечить удельную тепловую нагрузку  $Q_{уд} = 1000$  ккал/м<sup>3</sup>·град · 10 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч · 15 град. = 150000 ккал/м<sup>2</sup>·ч, что также не соответствует ни нормативному, ни фактически возможному ее значению.

Кроме того, нецелесообразно использовать такие дорогостоящие сооружения, как градирни, для низких уровней теплосъема. Поэтому, учиты-

вая постоянно растущие требования к эффективности СОВ, а также с учетом опыта использования нового полимерного оборудования для градирен (оросители, водоуловители, водоразбрызгиватели и лопасти вентагрегатов), нормативные параметры работы градирен в теплое время года (приблизительно 5-6 месяцев) должны быть уточнены (таблица 2).

**Таблица 2** - Уточненные параметры эксплуатации градирен

Тип градирни	$Q_{уд}$ , тыс. ккал/(м <sup>2</sup> ·ч)	$\Delta t = t_1 - t_2$ , °C	$G_{уд}$ , м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)	$\Delta = t_2 - \tau$ , °C
1. Вент.	80-180	8-15	10-12	4-5
2. Башенн.	60-100	7-10	8-10	6-8

Сужение диапазонов гидравлической нагрузки на градирни имеет принципиальное значение, так как компоновка водоразбрызгивающих сопел рассчитывается по их характеристикам на конкретный водооборот, значительное уменьшение которого снижает радиус и высоту факела сопла, площадь орошения насадки оросителя и, в конечном счете, величину теплосъема. Тем не менее, на практике неограниченная регулировка водооборота является, по существу, единственным действенным способом оперативного воздействия на температуру охлаждаемой в градирнях циркуляционной воды. Особенно нежелательные формы такая регулировка приобретает при работе СОВ с неисправными градирнями. Для поддержания низких температур, в системе многократно увеличивают кратность водооборота (вместо реконструкции неэффективных градирен). При этом происходит пропорциональное снижение перепада температур в градирнях за счет небольшого уменьшения температуры нагретой воды и более сильного увеличения температуры охлажденной (поскольку большее количество воды с меньшим потенциалом охлаждается медленнее). Для того, чтобы предотвратить рост температуры охлажденной воды, резко снижают удельную гидравлическую нагрузку на градирню, а увеличенный водооборот перераспределяется между дополнительными охладителями, которые не используются вследствие неполной загрузки мощностей предприятия (например, нефтеперерабатывающего завода). Нежелательность такой регулировки заключается не только в том, что теплосъем в градирнях многократно падает, но и в том, что в геометрической прогрессии увеличиваются затраты на перекачку сверхнормативной циркуляционной воды и на содержание и эксплуатацию дополнительных охладителей.

Кроме того, именно гидравлические нагрузки в приведенных в табл. 2 диапазонах соответствуют оптимальным скоростям циркуляционной воды в напорных трубопроводах типовых СОВ (1,5-2,0 м/с) и в подавляющем большинстве проектов градирен обеспечивают остаточный напор перед соплами не менее 2 м вод. ст.

С другой стороны, значительное снижение водооборота в СОВ хоть и приводит к росту перепада температур в градирне, однако делает постоянное поддержание температуры охлажденной циркуляционной воды на низком уровне невозможным (главным образом из-за уменьшения инерционности системы).

Важно также отметить, что широко распространенное мнение о задании перепада температур в градирнях теплообменниками основного производства верно лишь отчасти. Действительно, в стационарном режиме (при постоянных водообороте и тепловой нагрузке) абсолютные величины  $\Delta t$  в градирне и в теплообменнике равны, однако потенциальный уровень этого перепада зависит исключительно от эффективности работы градирни (чем она выше, тем ниже его уровень).

Таким образом, максимальный эффект при эксплуатации СОВ достигается при поддержании нормативных значений параметров работы градирен.

Однако при реконструкции охладителей (которая почти всегда экономически более целесообразна, чем новое строительство) вместо одновременного использования в большой степени противоречивых параметров требуется иметь один критерий определения эффективности охлаждения циркуляционной воды в СОВ.

Рассмотрим основные критерии оценки эффективности работы градирен (ЭРГ), используемые в настоящее время.

#### 1. Нормативные графики охлаждения.

Разработанные на основании лабораторных исследований графики охлаждения в настоящее время не являются корректными, так как в связи с истечением сроков службы оросителей, водоразбрызгивателей, вентагрегатов и водоуловителей в Украине произошла широкомасштабная реконструкция существующих промышленных охладителей. В результате замены морально и физически устаревшего оборудования градирен полностью изменились их технологические характеристики, которые перестали соответствовать нормативным графикам охлаждения [3].

#### 2. Коэффициент массоотдачи.

Охлаждающая способность градирен может оцениваться путем сравнения рассчитанного коэффициента массоотдачи  $\beta_{xv}$  (определяемого из уравнения Меркеля) и его нормативного значения, получаемого на опытных установках. Метод не дает достоверных результатов даже при использовании различных поправочных коэффициентов, поскольку не позволяет учесть очень сильное влияние на охлаждающую способность градирни степеней равномерности распределения сред и диспергирования воды, которые на опытной и натурной установках неадекватны [4].

Очевидно, что оценка ЭРГ должна производиться не в сравнении с нормативными критериями (которые десятилетиями не пересматриваются),

а по показателю, легко определяемому до и после реконструкции.

Поэтому более удачными, с этой точки зрения, являются следующие показатели:

#### 3. Термический КПД градирни [5]:

$$\eta_T = \Delta t / (\Delta t + \delta),$$

где  $\Delta t$  – перепад температур в градирне, °С;  $\delta$  – разность температуры охлажденной воды и температуры воздуха по смоченному термометру, °С.

#### 4. Коэффициент эффективности [6]:

$$\eta_{эф} = (t_{2н} - \tau) / (t_{2ф} - \tau),$$

где  $t_{2н}$  и  $t_{2ф}$  – нормативное и фактически измеренное значения температуры охлажденной воды, °С;

$\tau$  – температура воздуха по смоченному термометру, °С.

Оба приведенных коэффициента оценивают ЭРГ с учетом относительной влажности атмосферного воздуха (первый коэффициент в меньшей степени, а второй – в большей), что, на наш взгляд, искажает ее объективную оценку. Поэтому предлагается новый критерий определения ЭРГ.

Теплота, отводимая от циркуляционной воды в градирне, равна разности ее начальной и конечной энтальпий  $Q = H_{нач} - H_{кон}$ . Термодинамический эффект работы градирни заключается в том, чтобы при максимально возможном значении  $Q$ , при котором затраты в СОВ будут минимальными, обеспечить минимально допустимый уровень  $H_{кон}$ . При этом производительность оборудования основного производства будет максимальной. Поэтому вполне логично определять термодинамический КПД градирни как отношение  $Q$  к  $H_{кон}$ , то есть

$$\eta = \Delta t / t_2,$$

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

$t_2$  – температура охлажденной воды, °С.

Следовательно, можно утверждать, что наиболее эффективным является использование такого оборудования и таких режимов эксплуатации вентиляторных и башенных градирен, при которых наименьшая температура охлажденной воды будет достигаться при наибольшей тепловой нагрузке.

На протяжении 15 лет были проведены исследования вентиляторных и башенных градирен ряда крупнейших промышленных предприятий Украины. Для иллюстрации вышеприведенных показателей ЭРГ, параметры работы некоторых градирен приведены в табл.3. Проанализируем приведенные данные.

Если градирню с высокоэффективным полимерным оросителем после реконструкции (поз.1) сравнить с полуразрушенной градирней без оросителя и вентилятора (поз.2), то все показатели ЭРГ ( $\eta_T$ ,  $\eta_{эф}$  и  $\eta$ ) определяют их охлаждающую способность в соответствии с техническим состоянием. Однако для градирни с высокими параметрами эксплуатации (поз.1) и других градирен, обеспечивающих меньшие тепловую и гидравлическую нагрузки (поз. 7 и поз. 8), показатель  $\eta_{эф}$  имеет близкие значения, а для градирни ЮУАЭС,

Таблица 3 - Параметры эксплуатации градирен некоторых промышленных предприятий Украины

Охладитель/время	$\Delta t = t_1 - t_2, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	$\phi, \%$	$\delta = t_2 - \tau, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{уд}}, \text{ тыс. ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$	$G_{\text{уд}}, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	$\eta_{\text{г}}$	$\eta_{\text{эф}}$	$\eta$	Примечание
1. Вентиляторная градирня №3, секция 1А (192 м <sup>2</sup> ) Кременчугской ТЭЦ/ 12.05.94 г., 11-00	29-15,6 = 13,4	15,1	72	15,6-12,5= 3,1	112	8,33	0,81	1,6	0,86	после реконструкции
2. Вентиляторная градирня, 5 секций (320 м <sup>2</sup> ) Крюковского сталелитейного завода/ 05.05.07 г., 11-20	42,7-38 = 4,7	24,9	70	38-21,1= 16,9	18,8	4,00	0,22	0,3	0,12	перед реконструкцией
3. Башенная градирня (10000 м <sup>2</sup> ) Ровенской АЭС/ 26.08.03 г., 11-00	35,6-25,8= 9,8	19,5	54	25,8-14,4= 11,4	84,7	8,64	0,46	0,88	0,38	после реконструкции
4. Башенная градирня №2 (1280 м <sup>2</sup> ) Кременчугской ТЭЦ/29.09.04 г., 12-00	31,8-26 = 5,8	19,5	44	26-13,2= 12,8	40	6,90	0,31	0,78	0,22	ненапорная (лотковая) система водораспр.
5. Вентиляторная градирня №2, секция №4 (144 м <sup>2</sup> ) Одесского припортового завода/30.05.96 г., 09-00	43-31,9= 11,1	23	60	31,9-18,2= 13,7	86,6	7,80	0,45	0,36	0,35	перед реконструкцией
6. Вентиляторная градирня №2, секция №4 (144 м <sup>2</sup> ) Одесского припортового завода/01.08.98 г., 16-40	46-32,1= 13,9	35,1	56	32,1-27,9= 4,2	139,0	10,00	0,77	1,19	0,43	после реконструкции
7. Вентиляторная градирня В9 БОВ-4 (192 м <sup>2</sup> ) АО «Укртатнафта» / 20.08.03 г., 12-50	27-23=4	24	66	23-19,8=3,2	8,88	2,22	0,56	1,56	0,17	перед реконструкцией
8. Вентиляторная градирня В9 БОВ-1 (192 м <sup>2</sup> ) АО «Укртатнафта» (аналогичная поз.7) / 20.08.03 г., 10-10	24,1-21,6= 2,5	21,5	70	21,6-18= 3,6	3,38	1,35	0,41	1,39	0,12	после реконструкции
9. Вентиляторная градирня, блок №2, 2-я система (216 м <sup>2</sup> ×3) ЮУАЭС/ 22.08.01 г., 14-00	24,6-20,6= 4,0	23,9	54	20,6-18,1= 2,5	17,6	4,4	0,62	2,0	0,19	перед реконструкцией

работавшей без вентилятора вследствие неисправности водоуловителей (поз. 9),  $\eta_{\text{эф}}$ , вообще, достигает максимального значения.

При оценке эффективности двух башенных градирен (поз.3 и поз.4) показатели  $\eta_{\text{г}}$  и  $\eta_{\text{эф}}$  в недостаточной степени отражают их существенные отличия по всем эксплуатационным параметрам. Проектная температура охлажденной воды в вентиляционной градирне Одесского припортового завода (поз. 5 и поз. 6) составляет 28 °С. Снижение температуры  $t_2$  может приводить к кристаллизации полупродукта в семи основных теплообменниках цеха по производству карбамида. Вместо байпасирования части нагретой в этих теплообменниках воды и тем самым уменьшения ее расхода через них, температура всей охлажденной на заводе воды и в теплое и в холодное время года поддерживается на уровне 28±4 °С, несмотря на то, что для остального оборудования завода требуется гораздо более охлажденная вода. Эксплуатация же градирни (поз. 6) при более низких температурах окружающего воздуха дает значительно большее недоохлаждение циркуляционной воды до температуры смоченного термометра ( $\delta=t_2-\tau$ ). Поэтому показатели  $\eta_{\text{г}}$  и  $\eta_{\text{эф}}$  для градирни Одесского припортового завода (поз. 5 и поз. 6) преувеличивают рост ее эффективности после реконструкции. С другой стороны, показатель  $\eta_{\text{г}}$  для градирен ОПЗ (поз. 6) и КТЭЦ (поз. 1) почти одинаков, хотя потенциалы отводимого в них тепла значительно отличаются. В действительности, вентиляционная градирня ОПЗ (проект Белорусского отделения ЦНИИ «Проектстальконструкция») имеет высоту башни на два метра ниже, чем вентиляционная градирня КТЭЦ (проект института «Союзводоканалпроект»), и при совершенно одинаковом оборудовании и прочих равных условиях - значительно меньшую охлаждающую способность. Повышение же гидравлической нагрузки на градирню КТЭЦ (поз. 1) для увеличения факела водоразбрызгивающих сопел невозможно из-за недостаточной пропускной способности ее отводящих водоводов.

В отличие от  $\eta_{\text{г}}$  и  $\eta_{\text{эф}}$ , термодинамический КПД  $\eta$  является интегральным показателем ЭРГ, учитывающим все условия эксплуатации вентиляционных и башенных градирен. Значение  $\eta$  всегда меньше единицы, поскольку перепад температур в вентиляционных и башенных градирнях практически не превышает 15 °С, а температура охлажденной в теплое время года циркуляционной воды не опускается ниже 15 °С. Для того, чтобы определять точное изменение ЭРГ после реконструкции градирен, необходимо производить вычисления  $\eta$  на основании очень близких параметров натуральных испытаний ( $\tau$ ,  $\phi$ ,  $Q$ , и  $G$ ). Этого можно легко добиваться, производя измерения в различных погодных условиях сначала до реконструкции градирен, а затем в аналогичных условиях – после. Подобный подход при реконструкции одинаковых градирен позволит избежать принятия технических

решений, значительно снижающих ЭРГ (поз. 7 и поз. 8).

Таким образом, необходимо подчеркнуть, что ЭРГ следует определять с учетом как энерго-сберегающей, так и природоохранной составляющих. Модернизация СОВ в Украине должна производиться исключительно на основе увеличения термодинамического КПД  $\eta$ , ликвидации ненормативно очищенных продувок и максимального снижения каплеуноса.

### III. УСТРАНЕНИЕ КАПЕЛЬНОГО УНОСА

Охлаждение воды в вентиляционных градирнях всегда сопровождается ее потерями из-за испарения и уноса капельной влаги. Их величина может быть установлена только экспериментально [7], а обычно принимается в размере 0,2 - 0,5 % от расхода циркуляционной воды (СН и П П -31 —74).

Рост стоимости циркуляционной воды в результате постоянного повышения требований к ее качеству делает сокращение ее безвозвратных потерь из-за капельного уноса  $q_{\text{к}}$  особенно актуальным. Следует учесть также вредное воздействие примесей, имеющихся в каплях, на окружающую среду.

Достоверную величину капельного уноса через водоуловитель градирни можно определить с помощью специального прибора по методике, разработанной НИИ ВОДГЕО, г. Москва [8]. Однако очень часто значительный капельный унос происходит не только через водоуловитель, но и через воздухоходные окна, обшивку и переливной водовод бассейна.

Использование полимерных водоуловителей различной конструкции позволяет снизить  $q_{\text{к}}$  до 0,03 % [8]. За рубежом, появились публикации о применении полимерных водоуловителей (главным образом, решетчатых конструкций), обеспечивающих при очень низком аэродинамическом сопротивлении полное каплеулавливание (по данным Burger Associates, Inc.).

НПФ «Пластэнерго» при научном сопровождении кафедры АЭС ОНПУ является производителем полимерных решетчатых элементов для градирен по ТУ 38 Украины 00204458-002-92. Была поставлена задача научиться модернизировать вентиляционные градирни с полным устранением капельного уноса.

Проанализируем составляющие потерь из-за капельного уноса.

#### Капельный унос через обшивку градирни

При полной герметичности обшивки вентиляционной градирни капельный унос через нее не происходит. Примером такой градирни может служить трехсекционная ( $S=12 \times 18$  м) вентиляционная градирня конструкции Ленинградского отделения ГПИ «Теплоэлектропроект» с обшивкой из железобетонных блоков.

Через обшивку же из асбоцементных<sup>1</sup>, стеклопластиковых или металлических профилированных листов практически всегда происходит каплеунос. Как правило, это бывает в тех случаях, когда циркуляционная вода из крайних водоразбрызгивающих

сопел заливаєт обшивку градири. Такое локальное орошение даже герметичной обшивки приводит при отрицательных температурах воздуха к возникновению в ней дополнительных температурных напряжений, нарушению герметичности и, в результате, к капельному уносу.

Обычно, во избежание попадания воды на обшивку градири крайние ряды сопел рекомендуется устанавливать под углом к вертикали 30 - 45 ° внутрь градири [9]. Однако при данном диапазоне углов наклона не учитывается ни гидравлическая характеристика водоразбрызги-вающего сопла, ни расстояние крайнего ряда сопел до обшивки градири. Опыт показывает, что последнее необходимо обязательно принимать во внимание. Так при реконструкции двух че-тырехсекционных градирен (5=12x12 м) Одесского припортового завода, возведенных по проекту Белорусского отделения ЦНИИ «Проктстальконструкция», оказалось, что крайние продольные водораспределительные трубы расположены на различном расстоянии от обшивки градири (от 570 до 1100 мм). Для расчета угла наклона крайних сопел  $\alpha$  использовалась полученная нами формула:

$$\alpha = \arctg[(R_{\phi} - L) / H_{\phi}],$$

где  $R_{\phi}$  и  $H_{\phi}$  — радиус и высота факела при максимальной гидравлической нагрузке;  $L$  — расстояние крайнего ряда сопел до обшивки градири.

Рассчитанные по этой формуле углы наклона крайних раструбных сопел (ТУ 38 Украины 00204458-008-98) при гидравлических нагрузках от 10 до 10,6 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) находились в диапазоне 10 - 30 °, что существенно отличается от значений в вышеупомянутой рекомендации.

В результате проведенной реконструкции крайних сопел попадание воды на обшивку градири было устранено.

Отсутствие достаточной герметичности межсекционных перегородок приводит, помимо неравномерного воздухораспределения, к капельному уносу, который при проведении остановочных очистных или ремонтных работ в смежных с работающей секциях может быть причиной безвозвратных потерь циркуляционной воды. Для предотвращения капельного уноса через межсекционные перегородки монтаж примыкающего к ним ряда сопел следует производить аналогично вышеуказанному.

#### Капельный унос через воздухоходные окна

Кроме устранения орошения водой обшивки градири, для ликвидации капельного уноса через воздухоходные окна необходимо добиться полной герметичности ветровых перегородок для воздушных потоков. Это условие выполнялось нами при монтаже ветровых перегородок без проемов и просветов, что на большинстве промышленных предприятий встречается крайне редко.

#### Капельный унос через водоуловитель

К водоуловителям предъявляются требования максимально возможного снижения выноса капель из градири с потоком воздуха при их минимальном аэродинамическом сопротивлении [9].

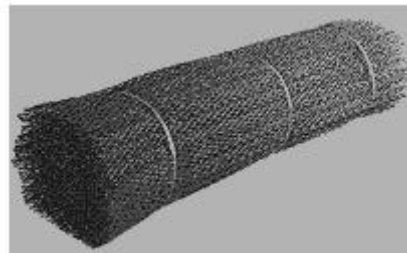
Невозможно визуально определить величину капельного уноса через водоуловитель [8]. Его отсутствие после реконструкции подтверждалось тем, что верхняя поверхность водоуловителя в теплое время года при максимальной гидравлической нагрузке оставалась абсолютно сухой. В зимний период вода из влажного потока воздуха конденсируется на водоуловителе, хотя каплеунос при этом и отсутствует.

Производство различных типоразмеров блоков и разных профилей из полиэтилена низкого давления (преимущественно марок 276-73 и 273-79) позволяет подбирать конструкцию водоуловителя, имеющую при  $q_{кв}=0$  минимальное аэродинамическое сопротивление.

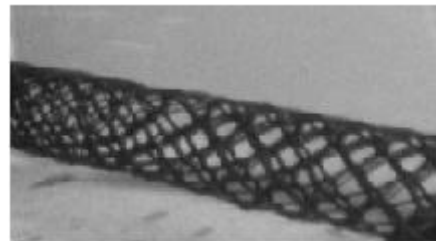
Отметим, что при замене двух- и трехрядных деревянных и полимерных гофрированных водоуловителей на решетчатые, скорость воздуха внутри секции не только не уменьшилась, но даже возросла на 2 - 5 %. Измерения проводились в практически одинаковых условиях (влажность и температура воздуха, скорость и направление ветра) при неизменных углах атаки лопастей вентиляторов.

Вероятно, полученный результат можно объяснить не только очень низким аэродинамическим сопротивлением решетчатых водоуловителей, но и значительной загрязненностью и неравномерностью укладки старых водоуловителей.

Блоки производимого решетчатого водоуловителя представляют собой снопы определенного диаметра, в которых плотно связаны капроновым шпагатом решетчатые элементы заданного профиля (рис. 1). Монтаж водоуловителей производится в два слоя по высоте, причем оси снопов в каждом слое взаимно перпендикулярны. Укладка снопов в каждом ряду одного слоя осуществляется с обязательным зацеплением со снопами смежных рядов.



а



б

Рисунок 1 – Блок оросителя/водоуловителя (а), собранный из решетчатых элементов (б)

При необходимости крайние ряды блоков прикрепляются к опорным конструкциям градири нержавеющей проволокой. Снопы верхнего слоя

монтируются со смещением  $S=d/2$  («перевязкой») по отношению к краям снопов нижнего слоя; где  $d$  - диаметр снопа. Блоки водоуловителя укладываются по всей площади градирни без проемов и просветов (за исключением одного монтажного люка, закрываемого металлической крышкой), для чего снопы с элементами подрезаются до необходимой длины.

Такая технология монтажа насадки позволяет успешно использовать решетчатые блоки в градирнях различных типов.

#### Капельный унос через переливной водовод бассейна

Часто в вентиляторных градирнях заметный каплеунос происходит через переливные водоводы, соединенные с канализацией.

Оросительная площадь, занимаемая водоводом с воронкой, для секции площадью  $144 \text{ м}^2$  и более составляет не менее  $0,1 \text{ м}^2$ . При удельной гидравлической нагрузке  $Q=10 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  безвозвратные потери воды через каждый переливной водовод достигает  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Для предотвращения этих потерь переливные водоводы должны быть обязательно оборудованы защитными зонтами.

Модернизацией вентиляторных градирен удалось полностью устранить каплеунос в четырех секциях ( $12 \times 16 \text{ м}$ ) градирен Кременчугской ТЭЦ, восьми секциях ( $12 \times 12 \text{ м}$ ) градирен Одесского припортового завода, двух секциях ( $12 \times 16 \text{ м}$ ) АО «Укртатнафта».

Вместе с тем нельзя не отметить, что существенным недостатком выполняемых работ является отсутствие подтверждения фактического снижения объема подпитки в водооборотных циклах после модернизации градирен. Использование оборотной воды на технологические и хозяйственно-бытовые нужды предприятий, отсутствие или нехватка исправных расходомеров, необоснованные продувки, частые переливы воды в бассейнах делают получение подобных данных невозможным.

#### IV. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕКОНСТРУКЦИИ ГРАДИРЕН

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  $K_{\text{пр}}$ , а также полной ликвидации каплеуноса.

Анализ эксплуатации большого количества стандартных градирен («Союзводоканалпроект», Ленинградское отделение «Атомтеплоэлектропроект», «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:

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

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

где  $\tau$  - температура воздуха по смоченному термометру (теоретический предел охлаждения воды в градирне),  $^\circ\text{C}$  [9].

Однако сегодня практически невозможно найти ни одной градирни, обеспечивающей такой уровень охлаждения без многократного (по сравнению с проектным) увеличения водооборота в СОВ. 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  $9 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $80 \text{ Мкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  соответственно, что практически всегда согласуется с их расчетными значениями.

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  $S$  - охладительная 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. 2).

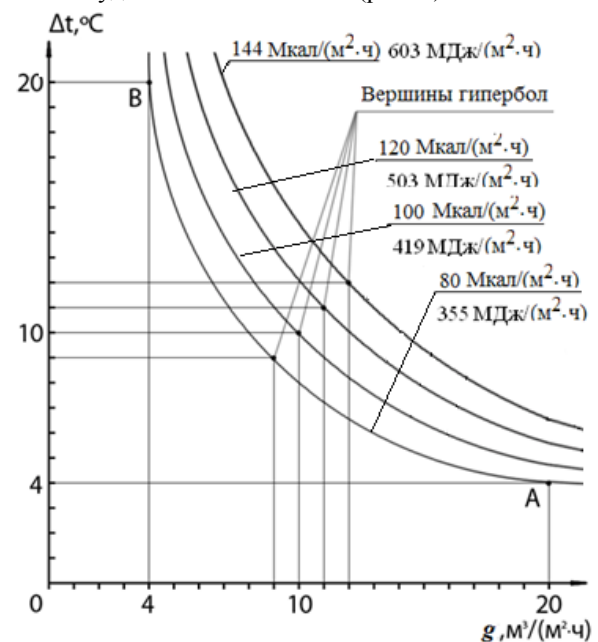


Рисунок 2 – Гиперболы постоянного удельного теплосъема

Из графиков  $q = \text{const}$  видно, что отклонение одного из параметров ( $g$  или  $\Delta t$ ) от вершины гиперболы вызывает значительно большее отклоне-



ние другого. Так, снижение перепада температур  $\Delta t$  до 4 °С для  $q=80$  Мкал/(м<sup>2</sup>·ч) (точка А) компенсируется удельной гидравлической нагрузкой  $g=20$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч), которая значительно выше пропускной способности любых промышленных градирен. С другой стороны, снижение гидравлической нагрузки до 4 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) (точка В) компенсируется перепадом температур  $\Delta t = 20$  °С. 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.

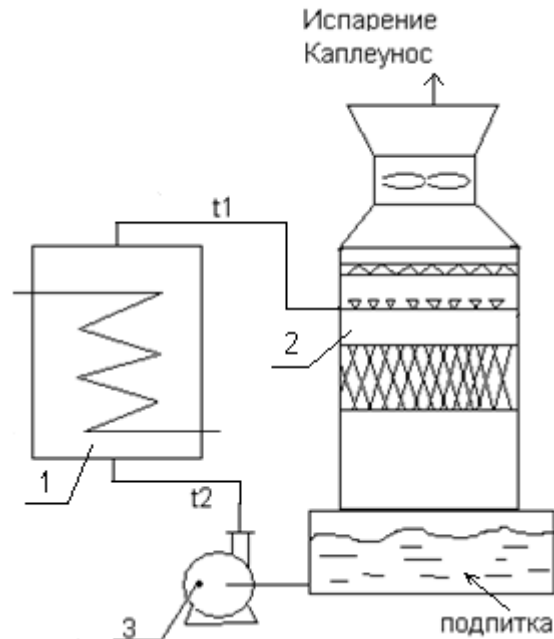
Целью исследования является разработка прямого метода расчёта экономии затрат предприятия при реконструкции вентиляторных и башенных градирен. Сложность подобного расчета заключается в том, что из-за большого количества взаимосвязанных и зачастую противоречивых параметров работы вентиляторных и башенных градирен, 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. 3), проектные параметры которой имеют следующие значения:

1. Охлаждающая площадь градирни (поз. 2) –  $S=200$  м<sup>2</sup>.
2. Общая и удельная тепловые нагрузки:  $Q=16$  Гкал/ч;  $q=16000$  Мкал/ч /  $200$  м<sup>2</sup>= $80$  Мкал/(м<sup>2</sup>·ч).
3. Перепад температур при расчетных погодных условиях:  $\Delta t = t_1 - t_2 = 35 - 26 = 9$  °С.
4. Термодинамический КПД градирен:  $\eta = \Delta t / t_2 = 9/26 = 0,346$ .
5. Общая и удельная гидравлические нагрузки –  $G = 1780$  м<sup>3</sup>/ч;  $g = 1780/200 = 8,9$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

Предположим, что вследствие неисправности оборудования градирни, удельный теплосъём в ней снижается до  $q = 40$  Мкал/(м<sup>2</sup>·ч) ( $Q=8$  Гкал/ч) и начинает расти температура охлажденной воды  $t_2$ . Для сохранения прежнего теплосъёма ( $Q=16$  Гкал/ч) подключается такая же вторая градирня и общая охлаждающая площадь становится 400 м<sup>2</sup>. Однако удельная гидравлическая нагрузка при этом падает в два раза –  $g' = 1780/400 = 4,45$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·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 –  $G' = 1780 \cdot 2 = 3560$  м<sup>3</sup>/ч и общий теплосъём в СОВ восстанавливается.



**Рисунок 3** – 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 [ $8,9$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч)] уменьшится в два раза:

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

Поступая к потребителям (поз. 1), 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,

$$\Delta t' = 35,5 - 31,0 \text{ , °С.}$$

Новые параметры работы СОВ примут следующие значения:

1. Охлаждающая площадь -  $S' = 200 \cdot 2 = 400$  м<sup>2</sup>.
2. Общая и удельная тепловые нагрузки -  $Q' = 16$  Гкал/ч;  $q' = 16000/400 = 40$  Мкал/(м<sup>2</sup>·ч).
3. Перепад температур при тех же погодных условиях:  $\Delta t' = t_1' - t_2' = 35,5 - 31,0 = 4,5$  °С.
4. Термодинамический КПД градирен:  $\eta = \Delta t' / t_2' = 4,5/31 = 0,145$ .



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 –  $\Delta t = t_1 - t_2, \text{ }^\circ\text{C}.$
4. Термодинамический КПД градирни –  
 $\eta = \Delta t / t_2.$
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. Расчетные погодные условия (температура воздуха  $t_{\text{сух}}, \text{ }^\circ\text{C}$ ; 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 расчетным, по формуле:

$$\mathcal{E}_T = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $\eta_1$  и  $\eta_2$  – 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 –  $\Delta S = S_{\text{нач}} - S_{\text{кон}}, \text{ м}^2$ , где  $S_{\text{нач}}$  и  $S_{\text{кон}}$  – охлаждающие площади до и после реконструкции; или в сравнении с расчетным значением  $S_p$  –

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

Окончательно

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

где  $Q_{\text{факт.}}, S_{\text{факт.}}, \Delta t_{\text{факт.}}$  и  $G_{\text{факт.}}$  – фактические теплосъём, Гкал/ч; площадь,  $\text{м}^2$ ; перепад темпера-

тур,  $^\circ\text{C}$ , и гидравлическая нагрузка,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , соответственно.

Величина коэффициента пропорциональности  $K_1 = 0,0125 \text{ ч}/(\text{м} \cdot \text{град})$  соответствует минимальному расчетному теплосъёму 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 –

$\Delta G = G_{\text{нач.}} - G_{\text{кон.}}, \text{ м}^3/\text{ч}$ , где  $G_{\text{нач.}}$  и  $G_{\text{кон.}}$  – общие гидравлические нагрузки до и после реконструкции; или в сравнении с расчетными значениями  $G_p$  –

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

Окончательно

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

Величина коэффициента пропорциональности  $K_2 = 0,111$  соответствует минимальному расчетному перепаду температур в вентиляторных и башенных градирнях ( $9 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

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  $1 \text{ м}^2$  охлаждающей площади  $\Pi_1$  определяются на основании локальной сметы на содержание и эксплуатацию СОВ или по годовой норме амортизации стоимости градирни на момент ее реконструкции  $A$ . Экономия/перерасход –

$$\mathcal{E}_1 = \Pi_1(A) \cdot \Delta S.$$

2. Стоимость  $1 \text{ м}^3$  оборотной воды  $\Pi_2$  обычно калькулируется на предприятиях. Упрощенно она может быть рассчитана по стоимости электроэнергии, необходимой для перекачки  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  оборотной воды насосами установленной мощности. Экономия/перерасход –

$$\mathcal{E}_2 = \Pi_2 \cdot \Delta G \cdot \tau,$$

где  $\tau$  - годовой фонд рабочего времени градирни, ч.

3. Экономия/перерасход подпиточной воды  
 $-\Delta_3 = C_3 \cdot \Delta p \cdot G_p \cdot \tau / 100$ ,

где  $C_3$  - стоимость 1 м<sup>3</sup> подпиточной воды.

4. Экономия/перерасход статей затрат основного производства  $\Delta_4$  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  $\Delta_4$  приравнивается к стоимости дополнительно выработанной электроэнергии в течение годового фонда рабочего времени турбоустановки.

Экономическая эффективность реконструкции рассчитывается по коэффициенту  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4) / \sum Z,$$

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

Срок окупаемости затрат:  $\tau = 1/\varepsilon$  - составляет в настоящее время, как правило, всего несколько суток, что свидетельствует о высокой эффективности и экономической целесообразности реконструкции вентиляторных и башенных градирен.

## ВЫВОДЫ

1. Уточнены нормативные параметры эксплуатации вентиляторных и башенных градирен.
2. Предложен термодинамический КПД работы градирен  $\eta$ , позволяющий легко определять охлаждающую способность градирен до и после реконструкции.
3. 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.
4. Предложены формулы расчета изменения термодинамической эффективности, гидравлической нагрузки и охлаждающей площади при реконструкции градирен.
5. 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 обратного водоснабжения промышленных предприятий (обзор) / Сост. П.П. Марков, Н.А. Маркова, А.В. Чапковский. - М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1976. - 71 с.
3. Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С. Технологические расчеты башенных градирен / Водоснабжение и санитарная техника. — 2000. — № 7. — С. 17-20.

снабжение и санитарная техника. — 2000. — № 7. — С. 17-20.

4. Гладков В.А., Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С. Вентиляторные градирни. - М.: Стройиздат, 1976. - 276 с.
5. Маргулова Т.Х. Атомные электростанции. - М.: Высшая школа, 1974. - 359 с.
6. Гончаров А.В. Мероприятия по повышению охлаждающей способности башенных и вентиляторных градирен в системах технического водоснабжения / Энергетик. - 2003. - № 3. - С. 18-19.
7. Руководство по проектированию градирен / Госстрой СССР и др. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1980. - 142 с.
8. Пономаренко В.С. Вопросы модернизации градирен // Водоснабжение и санитарная техника. - 1995. - № 8. - С. 11-13.
9. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02—84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. - М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. - 190 с.

## REFERENCES

1. Kycherenko D.I., Gladkov V.A. Oborotnoe vodosnabzhenie: (Systemy vodyanoho okhlazhdeniya). - M.: Stroyizdat, 1980. - 168 s.
2. Systemy vodyanoho oborotnoho vodosnabzheniya promyshlennykh predpriyaty / Sost. P.P. Markov, N.A. Markova, A.V. Chapkovsky. - M.: TSINIS Gosstroya SSSR, 1976. - 71 s.
3. Arefev Yu.I., Ponomarenko V.S. Tehnologicheskie raschety bashennykh gradiren / Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. — 2000. — № 7. — S. 17-20.
4. Gladkov V.A., Arefev Yu.I., Ponomarenko V.S. Ventilyatornye hradirni. — M.: Stroyizdat, 1976. — 276 s.
5. Margulova T.Kh. Atomnye elektrostantsii — M.: Vysshaya shkola, 1974. — 359 s.
6. Goncharov A.V. Meropriyatiya po povysheniyu okhlazhdayushchey sposobnosti bashennykh i ventilyatornykh hradiren v sistemakh tehnikeskoho vodosnabzheniya / Energetik. — 2003. — № 3. — S. 18-19.
7. Rukovodstvo po proektirovaniyu hradiren / Hosstroy SSSR i dr. — M.: TSITP Hosstroya SSSR, 1980. - 142 s.
8. Ponomarenko V.S. Voprosy modernizatsii hradiren // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. - 1995. - № 8. - S. 11-13.
9. Posobie po proektirovaniyu hradiren (k SNiP 2.04.02—84 Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya / VNIИ VODGEO Hosstroya SSSR. - M.: TSITP Hosstroya SSSR, 1989. - 190 s.

Получена в редакции 01.08.2013, принята к печати 04.09.2013