

# СОПОСТАВЛЕНИЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АСБЕСТО-ЦЕМЕНТНОГО И СЕТЧАТОГО ОРОСИТЕЛЯ БАШЕННЫХ ГРАДИРЕН

**В. П. Кравченко**

Доктор технических наук, доцент, профессор\*

Контактный тел.: 050-390-17-92

E-mail: vpkrav@rambler.ru

**Е. Н. Морозов**

Слесарь ОП «Южно-Украинская АЭС»

г. Южноукраинск

Контактный тел.: 096-738-61-88

E-mail: eugenie@rambler.ru

**М. П. Галацан**

Аспирант\*

\*Кафедра атомных электростанций

Контактный тел.: 099-634-91-69

E-mail: maric@i.ua

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

*Проведено технологичний розрахунок баштової градирні зі зрошувачем з застарілим азбестоцементним та сучасним сітчастим зрошувачем з поліетилену. Отримані результати дозволяють провести техніко-економічне обґрунтування реконструкції з заміною зрошувача на сучасну конструкцію*

*Ключові слова: баштова градирня, швидкість повітря, температура охолодженої води*

*Проведен технологический расчёт башенной градирни с оросителем из устаревшего азбестоцементного и современного сетчатого оросителя из полиэтилена. Полученные результаты позволяют провести технико-экономическое обоснование реконструкции градирни с заменой оросителя на современную конструкцию*

*Ключевые слова: башенная градирня, скорость воздуха, температура охлажденной воды*

*The technological calculation of a cooling tower with a pass checker from the asbestos-cement and modern reticulated checker from a polyethylene is executed. Got results, allow executing the feasibility study of reconstruction of cooling tower with pass checker substituting by a modern construction*

*Keywords: cooling tower, speed of air, temperature of cooled water*

## 1. Введение

В настоящее время повсеместно проводится реконструкция градирен с заменой физически и морально устаревшего оросителя из азбестоцементных листов на ороситель из решетчатых элементов, выполненных из полиэтилена. Примером последнего может служить ПР50 (призматический решетчатый со стороной призмы 50 мм). Кроме призматических элементов встречаются также и цилиндрические. Целью реконструкции является не только замена устаревшего оборудования, но и повышение охлаждающей способности градирни – главной характеристики ее работы. Под охлаждающей способностью понимается температура охлажденной воды  $t_2$ . Проведение соответствующих расчетов достаточно сложная задача. Методика расчета в [1, 2] излагается не четко, использует устаревшие единицы измерения и одинаковые обозначения разных величин.

## 2. Методика и особенности расчета

Основные зависимости для расчёта градирен [1, 2]:

$$\beta_{xv} = \frac{G_{ж} \cdot \Delta t \cdot c_{ж}}{k \cdot V \cdot \Delta i_{cp}}, \quad (1)$$

$$\beta_{xv} = A \cdot \lambda^m \cdot q_{ж}, \quad (2)$$

$$Me = \frac{\beta_{xv} \cdot h}{q_{ж}} = \frac{\Delta t \cdot c_{ж}}{k \cdot \Delta i} = A \cdot h \cdot \lambda^m, \quad (3)$$

где  $\beta_{xv}$  – объёмный коэффициент массоотдачи, отнесённый к разности влагосодержаний, кг/(м<sup>3</sup> · ч);

$G_{ж}$  – гидравлическая нагрузка на градирню, кг/ч;

$\Delta t$  – перепад температур воды, °С;

$c_{ж}$  – теплоемкость воды, кДж/(кг · °С);

$k$  – коэффициент уравнения (равный в среднем 0,96);

$V$  – объём оросителя градирни м<sup>3</sup>;

$\Delta i_{cp}$  – средняя разность энтальпий воздуха, кДж/кг;

$A$  – эмпирический коэффициент, характеризующий охлаждающую способность оросителя на его, 1/м;

$\lambda$  – удельный расход воздуха, кг/кг;

$m$  – показатель степени, характеризующий зависимость объёмного коэффициента массоотдачи от изменения массовой скорости воздуха;

где  $Me$  - безразмерный критерий Меркеля;  
 $h$  - высота оросителя градирни.

Величины  $A$  и  $m$  - технологические характеристики оросителя. Они получают экспериментально в результате обработки данных испытаний.

Значение величины  $m$  изменяется в пределах от 0,1 до 0,75, в зависимости от конструкции оросителя. Величина  $m$  характеризует степень использования воздуха в данном оросителе.

Итак, величины  $A$  и  $m$  приводятся в справочной литературе, однако не дают физического представления о свойствах оросителя.

В аэродинамическом расчете при учете сопротивления дождя под водораспределителем учитывается высота дождя. Для пояснения определения этой величины приведен рис. 1, из которого ясно, что при реконструкции градирен, заключающейся в замене оросителя, высота дождя над полиэтиленовым оросителем определится так

- для асбестоцементного оросителя

$$h_{вр} = h_{ф} + h_{п.в.} = 0,6 + 1 = 1,6 \text{ м};$$

где  $h_{ф}$  - высота факела при соплах факелами вниз;  
 $h_{п.в.}$  - высота падения воды.

- для полиэтиленового оросителя, установленного на той же опоре

$$h_{вр} = h_{ф} + (3,4 \cdot H_{ор}), \text{ м}$$

Целью работы является определение температуры охлажденной воды после градирни в случае, если ее ороситель будет состоять из решетчатого элемента ПР50 и сопоставление результата с охлаждением в оросителе из асбестоцементных щитов.

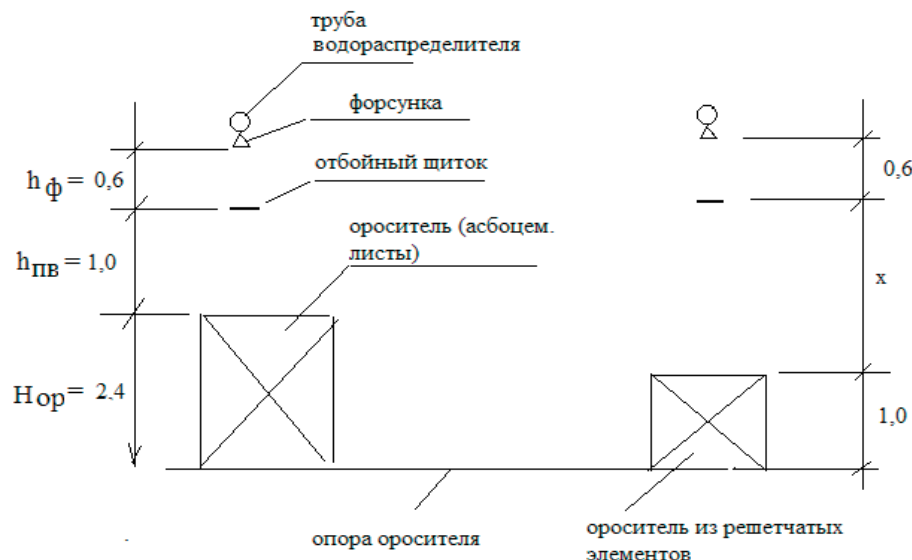


Рис. 1. Пояснение к определению высоты дождя в оросителе

### 3. Расчет башенной градирни

Анализ проводится на примере башенной градирни, установленной на Ровенской АЭС. Методика расчета заключается в следующем. Задавшись температурой воздуха на выходе градирни, определяем

самотягу. Из равенства самотяги и аэродинамического сопротивления градирни находится скорость и, соответственно, расход воздуха. Тепловой расчет позволяет итеративно определить температуру воды и воздуха на выходе из градирни. Полученные значения сопоставляются с принятыми. Результаты расчета приводятся в табл. 1.

Исходные данные:

Площадь оросителя  $F_{ор} = 10000 \text{ м}^2$ ; высота градирни  $H_{гр} = 150 \text{ м}$ ; высота воздухоподводящих окон  $H_{ок} = 10 \text{ м}$ ; отношение площади окон к площади оросителя  $F_{ок}/F_{ор} = 0,354$ ; температура воздуха  $\vartheta_1 = 19,5^\circ\text{C}$ ; температура охлаждаемой воды  $t_1 = 35,6^\circ\text{C}$ ; относительная влажность воздуха  $\varphi_1 = 0,54$ ; барометрическое давление  $P_6 = 745 \text{ мм рт.ст} = 10128,71 \text{ кгс/м}^2 = 99,085 \text{ кПа}$ ; гидравлическая нагрузка  $q_{ж} = 8,96 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ; расход воды  $G_{ж} = 89600 \cdot 103 \text{ кг/ч}$ .

**Расчёт**

Диаметр градирни в оросительной части:

$$D_i = 1,128 \cdot \sqrt{F_{ор}} = 1,128 \cdot \sqrt{10000} = 112,8 \text{ м}.$$

Половина длины воздухораспределителя:  
 $l = D_i / 4 = 112,8 / 4 = 28,2 \text{ м}.$

Плотность воздуха, начальная,  $\text{кг/м}^3$ :

$$\rho_1 = \frac{P_6 - \varphi_1 \cdot P''_{\vartheta_1}}{R_v \cdot (\vartheta_1 + 273,2)} + \varphi_1 \cdot \rho''_{\vartheta_1} = \frac{10128,71 - 0,54 \cdot 231,26}{29,27 \cdot (19,5 + 273,15)} + 0,54 \cdot 0,0168 = 1,1769$$

### Выводы

Проведен расчет башенной градирни с асбестоцементным и полиэтиленовым оросителем. В результате сопоставления результатов расчета получено, что полиэтиленовый ороситель типа ПР50 высотой 1 м более эффективен и позволяет охладить воду на  $2^\circ\text{C}$  больше, чем асбестоцементный при одинаковых параметрах воздуха.

С увеличением высоты сетчатого оросителя, несмотря на увеличение сопротивления и уменьшение расхода воздуха через градирню, его эффективность растет.

При высоте оросителя 1,5 м температура воды на выходе снижается до  $26,0^\circ\text{C}$  (на  $1^\circ\text{C}$  меньше, чем при высоте оросителя 1 м), а при

высоте 2 м – до  $25,35^\circ\text{C}$  (на  $0,65^\circ\text{C}$  меньше, чем при высоте оросителя 1,5 м).

Полученная зависимость охлаждающей способности градирни от высоты оросителя позволяет оптимизировать затраты на реконструкцию оросителя.

Таблица 1

Результаты расчета башенной градирни Ровенской АЭС с асбестоцементным оросителем (1) и оросителем из решетчатых элементов ПР50 (2)

| Наименование величины   | 1                      | 2                      |
|---|------------------------|------------------------|
| 1   | 2                      | 3                      |
| Высота оросителя, Н <sub>ор</sub> , м   | 2,4                    | 1                      |
| Высота башни градирни: Н <sub>б</sub> = Н <sub>гр</sub> - Н <sub>ок</sub> - Н <sub>ор</sub>   | 137,6                  | 139                    |
| Принятая температура воздуха на выходе, ϑ <sub>2</sub> , °С   | 25,7                   | 26,35                  |
| Плотность воздуха, конечная ρ <sub>2</sub> =f(ϑ <sub>2</sub> , φ <sub>2</sub> =1), кг/м <sup>3</sup>  | 1,143                  | 1,140                  |
| Парциальное давление насыщенных водяных паров, определяется при ϑ <sub>1</sub> : p'' <sub>ϑ1</sub> , кгс/м <sup>2</sup>   | 231,26                 | 231,26                 |
| Парциальное давление насыщенных водяных паров при ϑ <sub>2</sub> , p'' <sub>ϑ2</sub> кгс/м <sup>2</sup>   | 336,98                 | 350,2                  |
| Плотность насыщенных водяных паров<br>- при ϑ <sub>1</sub> ρ'' <sub>ϑ1</sub> , кг/м <sup>3</sup><br>- при ϑ <sub>2</sub> ρ'' <sub>ϑ2</sub> , кг/м <sup>3</sup>                                | 0,0168<br>0,0240       | 0,0168<br>0,0249       |
| Коэффициент сопротивления входа в градирню:<br>ξ <sub>вх</sub> = 6784 · e <sup>-21,7F<sub>вх</sub>/E<sub>ор</sub></sup> = 6748 · e <sup>-21,7·0,354</sup>                                     | 3,115                  | 3,115                  |
| Коэффициент сопротивления оросителя   | 4,36                   | 18,2                   |
| Коэффициент сопротивления водоуловителя<br>- деревянного над асбестоцементным оросителем<br>- полиэтиленового из ПР50: ξ <sub>вв</sub> · h <sub>вв</sub> = 18,2·0,15                          | 4,7                    | 2,73                   |
| Коэффициент сопротивления водораспределителя  | 0,4                    | 0,4                    |
| Коэффициент сопротивления дождя<br>ξ <sub>д</sub> = q <sub>ж</sub> · (0,2 · l + K <sub>ор</sub> · Н <sub>ор</sub> + K <sub>вр</sub> · h <sub>вр</sub> )                                       | 59,92                  | 55,75                  |
| Коэффициент распределения дождя в водораспределительном устройстве, К <sub>вр</sub>   | 0,1                    | 0,1                    |
| Высота дождя в водораспределителе:<br>- для асбестоцементного оросителя h <sub>вр</sub><br>- для ПР50 h <sub>вр</sub> = h <sub>ф</sub> + (3,4 · Н <sub>ор</sub> )                             | 1,6                    | 3                      |
| Высота факела при расположении вниз: h <sub>ф</sub> = 0,6 м.  | 0,6                    | 0,6                    |
| Высота падения воды: h <sub>п.в.</sub> = 1 м.   | 1,0                    | 2,4                    |
| Коэффициент сопротивления дождя в оросителе: К <sub>ор</sub>  | 0,37                   | 0,282                  |
| Примем скорость воздуха, ω, м/с   | 0,95                   | 0,989                  |
| Коэфф. трения поверхности башни градирни:<br>ξ <sub>гр</sub> = 0,11(Δ/d <sub>г</sub> + 68/Re) <sup>0,25</sup>   | 0,00677                | 0,00673                |
| Число Рейнольдса: Re = (ω · d <sub>г</sub> ) / ν  | 6,846·10 <sup>6</sup>  | 7,105·10 <sup>6</sup>  |
| Коэффициент кинематической вязкости, м <sup>2</sup> /с  | 15,63·10 <sup>-6</sup> | 15,72·10 <sup>-6</sup> |
| Общий коэффициент сопротивления градирни:<br>ξ <sub>общ</sub> = (ξ <sub>вх</sub> + ξ <sub>ор</sub> · Н <sub>ор</sub> + ξ <sub>вр</sub> + ξ <sub>вв</sub> + ξ <sub>д</sub> + ξ <sub>гр</sub> ) | 78,61                  | 80,2                   |
| Самотяга градирни, Па: ΔP = Н <sub>д</sub> · g · (ρ <sub>1</sub> - ρ <sub>2</sub> )   | 45,62                  | 50,03                  |
| Скорость воздуха в свободном сечении градирни:<br>ω = √(2 · ΔP / (ξ <sub>общ</sub> · ρ <sub>ср</sub> · К <sub>ξ</sub> ))  | 0,954                  | 0,989                  |
| Средняя плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup> : ρ <sub>ср</sub> = (ρ <sub>1</sub> + ρ <sub>2</sub> ) / 2<br>К <sub>ξ</sub> = 1,1   | 1,16                   | 1,159                  |
| Расход воздуха, кг/ч  | 40,408·10 <sup>6</sup> | 41,92·10 <sup>6</sup>  |
| Удельный расход воздуха: λ = G <sub>в</sub> / G <sub>ж</sub>  | 0,45                   | 0,55                   |
| Темпер. воздуха по смоченному термометру, τ, °С   | 14,4                   | 14,4                   |
| Характеристики оросителя: А<br>м  | 0,479<br>0,66          | 1,41<br>0,54           |
| Теплоемкость воды, С <sub>ж</sub> , кДж/(кг·К)  | 4,19                   | 4,19                   |
| Газовая постоянная для воздуха, R <sub>в</sub> , кгс·м / (кг·°С)  | 29,27                  | 29,27                  |

Окончание таблицы 1

| 1  | 2                                  | 3                                   |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|
| Теплота парообразования, г, кДж/кг   | 2493                               | 2393                                |
| Принимаем температуру воды на выходе, $t_2, ^\circ\text{C}$  | 29,1                               | 27,1                                |
| Вспомогательный коэффициент: $k = 1 - \frac{t_2 \cdot c_{ж}}{r}$   | 0,953                              | 0,954                               |
| Плотность воздуха при $\vartheta_1$ : $\rho_{\vartheta_1}$   | 1,177                              | 1,1769                              |
| Давление насыщ. и плотность пара при $t_1 = 35,6 ^\circ\text{C}$<br>$p''_{t_1}, \text{кгс/м}^2$<br>$\rho''_{t_1}, \text{кг/м}^3$   | 593,33<br>0,0409                   | 593,33<br>0,0409                    |
| Давление насыщ. и плотность пара при $t_2=25,8 ^\circ\text{C}$<br>$p''_{t_2}, \text{кгс/м}^2$<br>$\rho''_{t_2}, \text{кг/м}^3$   | 411,20<br>0,02896                  | 366,0<br>0,0259                     |
| Средняя температура воды, $^{\circ}\text{C}$ , $t_m = t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}$  | 32,35                              | 31,35                               |
| Давление и плотность насыщ. пара при $t_2=25,8 ^\circ\text{C}$<br>$p''_m, \text{кгс/м}^2$<br>$\rho''_m, \text{кг/м}^3$   | 495,04<br>0,0345                   | 467,79<br>0,0327                    |
| Разность температур воды в градирне $\Delta t = t_1 - t_2, ^\circ\text{C}$   | 6,5                                | 8,5                                 |
| Величины удельных энтальпий воздуха, кДж/кг<br>$i''_1 = f(t_1, \varphi=1, P_6)$ :<br>$i''_1 = t_1 + \frac{\varphi \cdot \rho_{t_1} \cdot R_2 \cdot (t_1 + 273,15)}{P_1 - \varphi \cdot p_{t_1}} \cdot (r + 1,9693 \cdot t_1)$<br>$i''_2 = f(t_2, \varphi=1, P_6)$<br>$i_1 = f(\vartheta_1, \varphi_1=0,54, P_6)$<br>$i''_m = f(t_m, \varphi=1, P_6)$ | 132,25<br>94,89<br>39,16<br>112,21 | 135,22<br>86,72<br>39,465<br>108,61 |
| Поправка к энтальпии $\delta i'' = \frac{i''_1 + i''_2 - 2i''_m}{4}$   | 0,683                              | 1,179                               |
| Энтальпия воды на выходе, $i_2 = i_1 + \frac{c_{ж} \cdot \Delta t}{k \cdot \lambda}$   | 102,537                            | 107,22                              |
| Средняя разность энтальпий, кДж/кг $\Delta i_{cp} = \frac{[(i''_1 - i_2) - (i''_2 - i_1)]}{\ln \left( \frac{i''_1 - i_2 - \delta i''}{i''_2 - i_1 - \delta i''} \right)}$  | 40,66                              | 35,58                               |
| Температура охлажденной воды $t_2 = t_1 - \frac{A \cdot \lambda^m \cdot h \cdot k \cdot \Delta i_{cp}}{c_{ж}}$   | 29,31                              | 27,318                              |
| Погрешность между принятой и полученной величинами $\delta = \left  \frac{t_2 - t_2}{t_2} \right $   | 0,007                              | 0,008                               |
| Объёмный коэффициент массоотдачи, отнесённый к разности влагосодержаний, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}) \beta_{xv} = A \cdot \lambda^m \cdot q_{ж}$  | 2,537                              | 9,153                               |
| Безразмерный критерий Меркеля $Me = \frac{\beta_{xv} \cdot h}{q_{ж}} = \frac{\Delta t \cdot c_{ж}}{k \cdot \Delta i} = A \cdot h \cdot \lambda^m$  | 0,680                              | 1,021                               |

Литература

1. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения») / ВНИИ ВОД-ГЕО Госстроя СССР от 20 марта 1985 г. № 27.
2. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Технологические расчёты башенных градирен // Водоснабжение и санитарная техника. - 2000. - № 7. - С. 17-20.