



К ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИЙ

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ВОДЫ НА ТЕПЛООБМЕН В ГРАДИРНЕ

Д.т.н., проф., Волков А.В.¹, д.т.н., проф. Селезнев Л.И.¹, асп. Наумов А.В.¹ (ФГБОУ ВПО НИУ «МЭИ»)

АННОТАЦИЯ. Проведен анализ влияния дисперсности воды на теплообмен в башенных градирнях. Получена зависимость теплового потока от диаметров капель, проведен численный эксперимент с помощью пакета FLOW VISION. Сделаны выводы об интенсификации теплообменных процессов в градирне путем увеличения дисперсности капель.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системы водоснабжения, теплообмен, градирня, поверхностно-активные вещества.

Одной из причин недовыработки электроэнергии на ТЭС и снижения мощности и КПД энергоблоков является недостаточная степень охлаждения воды, циркулирующей в системе оборотного водоснабжения (СОВС), основным элементом которой является градирня [1].

На ТЭС Российской Федерации в эксплуатации находится более 365 градирен площадью орошения 650 000 м², единичной производительностью от 2000 до 36000 м³/ч и общей производительностью 4 550 000 м³/ч или 39 млрд. 312млн. м³/год.

Одна из наиболее важных проблем при эксплуатации градирен заключается в недостаточной интенсивности теплообменных процессов, протекающих внутри нее.

Важным фактором, влияющим на интенсивность теплообменных процессов в градирне, является степень диспергирования воды. Для упрощенной модели теплообмена воздуха и потока охлаждаемой воды в виде потока капель, падающих вертикально с некоторой высоты h при сферической форме капель и не учета испарения, расход охлаждаемой воды в результате диспергирования может быть представлен в виде [2]:

$$G = n \frac{\pi D^3}{6} \rho_{ж}, \quad (1)$$

где G – расход охлаждаемой воды, кг/с;

D – средний диаметр капель, м;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости кг/м³;

n – количество капель, ед/с;

Общее количество обмениваемой теплоты за время теплообмена τ [2]:

$$Q = \frac{6G\alpha\Delta t}{\rho_{ж}} \frac{\tau}{D}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² град)

В (2) от дисперсности могут зависеть две величины: коэффициент теплоотдачи α и время теплообмена τ , т.к. изменение диаметра капель приводит к изменению поверхности теплообмена и аэродинамического сопротивления потока.

Коэффициент теплоотдачи определялся, исходя из экспериментальной зависимости [3]:

$$Nu = 2 + 0,33 Pr^{0,33} Re^{0,54} + 0,35 Pr^{0,36} Re^{0,58}, \quad (3)$$

$$\text{где } Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_a}, Pr = \frac{\nu}{a}, Re = \frac{UD}{\nu};$$

λ_a – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с;

U – скорость обтекания капли воздухом, м/с;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

Тогда:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\lambda_a}{D} \left(2 + 0,33 \cdot Pr^{0,33} Re^{0,54} + 0,35 \cdot Pr^{0,36} Re^{0,58} \right) = \\ &= \frac{\lambda_a}{D} \left[2 + 0,33 \cdot Pr^{0,33} \left(\frac{UD}{\nu} \right)^{0,54} + 0,35 \cdot Pr^{0,36} \left(\frac{UD}{\nu} \right)^{0,58} \right] \approx \\ &\approx \frac{\lambda_a}{D} \left[2 + 0,68 Pr^{0,34} \left(\frac{UD}{\nu} \right)^{0,56} \right] \approx \\ &\approx \frac{2\lambda_a}{D} + \left(0,68 Pr^{0,34} \frac{\lambda_a}{\nu^{0,56}} \right) \frac{U^{0,56}}{D^{0,44}} \approx \\ &\approx \frac{2\lambda_a}{D} + \left(0,68 Pr^{0,34} \frac{\lambda_a}{\nu^{0,56}} \right) \sqrt{\frac{U}{D}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для оценки влияния степени дисперсности воды на время теплообмена τ было принято, что движение капли строго перпендикулярно к поверхности земли и определяется только воздействием сил тя-

¹ 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14

жести и аэродинамического сопротивления [4]:

$$\frac{dU}{dt} = -g + 18 \frac{\rho_a}{\rho_{жс}} \frac{v|U|}{D^2}, \quad (5)$$

где t – время, с;
 ρ_a – плотность воздуха, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 Частным решением (5) является выражение:

$$U(t) = \frac{g}{18} \frac{\rho_{жс}}{\rho_a} \frac{D^2}{v} \left[-1 + \exp\left(-18 \frac{\rho_a}{\rho_{жс}} \frac{v}{D^2} t\right) \right], \quad (6)$$

Зависимость времени падения капли от высоты h определяется интегралом от (6):

$$h = \int_0^\tau \frac{g}{18} \frac{\rho_{жс}}{\rho_a} \frac{D^2}{v} \left[-1 + \exp\left(-18 \frac{\rho_a}{\rho_{жс}} \frac{v}{D^2} t\right) \right] dt =$$

$$= g \left(\frac{1}{18} \frac{\rho_{жс}}{\rho_a} \frac{D^2}{v} \right)^2 \left[1 - 18 \frac{\rho_a}{\rho_{жс}} \frac{v}{D^2} \tau - \exp\left(-18 \frac{\rho_a}{\rho_{жс}} \frac{v}{D^2} \tau\right) \right] \quad (7)$$

Из рис.1 следует, что время теплообмена между каплями охлаждаемой воды и воздухом почти не зависит от диаметров капель. Тогда выражение (2) с учётом (4) примет вид:

$$Q = \frac{6G\Delta t}{\rho_{жс}} \frac{\tau}{D} \left[\frac{2\lambda_a}{D} + \left(0.68 Pr^{0.34} \frac{\lambda_a}{v^{0.56}} \right) \sqrt{\frac{U}{D}} \right], \quad (8)$$

С целью определения влияния диаметра капель воды на интенсивность теплообменных процессов в башенной градирне выполнен расчетный эксперимент с использованием пакета Flow Vision. В качестве характерной области теплообмена рассматривалась струйка тока воздуха, расположен-

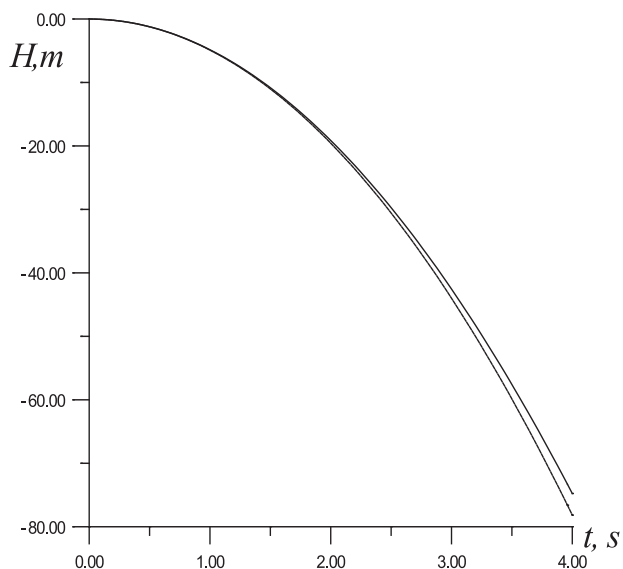
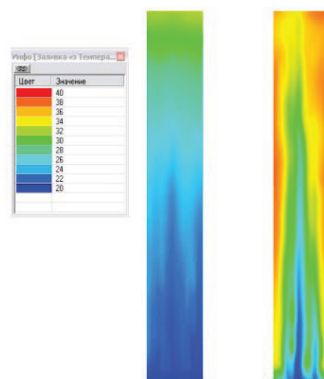
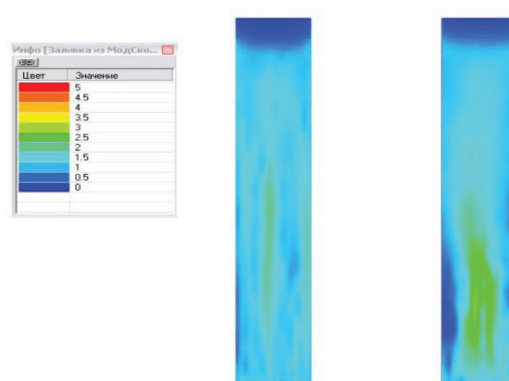


Рис. 1. Зависимость времени падения капли от высоты брызгальных устройств для диаметров капель 1 мм (сплошная линия) и 3 мм (пунктирная линия).



Диаметр капель $d_1=3$ мм Диаметр капель $d_2=1$ мм

Рис. 2. Распределение температуры воздуха для расчетной области, °С.



Диаметр капель $d_1=3$ мм Диаметр капель $d_2=1$ мм

Рис. 3. Распределение скорости воздуха для расчетной области, м/с.

ная ниже брызгальных устройств (рис. 2). Форма данной области принята цилиндрической с вертикально направленной осью. Высота цилиндра $H=3$ м, диаметр $D=0,5$ м. На нижнем торце цилиндра задана скорость восходящего воздушного потока, равная $V=1$ м/с, влажность воздуха $\phi=50\%$, температура воздуха $t^*_1=20^\circ\text{C}$. Стенки цилиндра приняты непроницаемыми.

На верхнем торце расчетной цилиндрической области задавалось равномерное распределение капель воды, входящих в данную область и падающих вниз под действием силы тяжести. Массовый расход капель (жидкой фазы) $G=1$ кг/с, температура капель на входе $t^*_1=40^\circ\text{C}$. Форма капель принята сферической с одинаковым для всех капель диаметром. Исследование производилось для двух вариантов диаметра капель воды $d_1=3$ мм и $d_2=1$ мм, сравнение которых позволило сделать выводы о влиянии дисперсности воды на теплообменные процессы в градирне. Их обтекание воздухом рассматривалось в соответствии со стандартной $k-\epsilon$ моделью турбулентности для слабосжимаемой среды (учитывалась зависимость плотности воздуха от температуры). Использовалась стандартная модель тепломассообмена пакета Flow Vision, учитывающая как конвективную, так и испаритель-

ную составляющие охлаждения капель воды. она описывается следующим основными уравнениями: уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \bar{V} \cdot (\rho_g V_g) = Q_{mass}^p \quad (9)$$

уравнением сохранения энергии для слабосжимаемой среды:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_g h_g(T_g))}{\partial t} + \bar{V} \cdot (\rho_g V_g h_g(T_g)) = \\ = \bar{V} \cdot \left[- \left(- \left(\frac{\lambda_g}{Cp_g} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \bar{V} h_g(T_g) \right) \right] + Q_{enth}^p \end{aligned} \quad (10)$$

уравнением температуры капли:

$$\frac{dT_p}{dt} = \left(\dot{q} - \dot{m} h_{lat}(T_p) \right) \frac{6}{d \rho_p C p_p} \quad (11)$$

$$\dot{q} = Nu \frac{\lambda_g}{d} (T_g - T_p), \quad (12)$$

где $\rho_{g,p}$ – плотности воздуха и капель соответственно, кг/м³;

V – скорость воздуха, м/с;

Q_{mass}^p – масса капель, кг/(с·м³);

Q_{enth}^p – энергия капель, Вт/м³;

$T_{g,p}$ – температура воздуха и капель соответственно, К;

λ_g – коэффициент теплопроводности воздуха, кг/(м·с);

h_g – энтальпия воздуха, Дж/кг;

h_{lat} – скрытая теплота испарения (или сублимации), Дж/кг;

$Cp_{g,p}$ – теплоемкость воздуха и капель соответственно, Дж/(кг·К);

d – диаметр капли, м;

\dot{m} – поток испарения с единицы поверхности капли, кг/(м²·с);

В расчете учитывается также уменьшение диаметра капель и объема воды по мере ее испарения.

Граничные условия рассматриваемой задачи максимально соответствуют реальным процессам теплообмена в башенных градирнях. Принятые допущения относительно форм расчетной области и капель воды относятся в одинаковой степени к двум размерам капель и не оказывают существенного влияния на результаты расчета, представленные на рисунках 2 и 3.

Из рис. 2 видно, что большая дисперсность воды приводит к более значительному и быстрому нагреву воздуха, а, следовательно, и к лучшему охлаждению оборотной воды. По результатам расчетных исследований средняя температура воздуха на выходе из расчетной области составила $t_2^r = 26,4^\circ\text{C}$ при диаметре капель $d_1 = 3$ мм и

$t_3^r = 35,8^\circ\text{C}$ при диаметре капель $d_2 = 1$ мм. Средняя температура капель после прохождения расчетной области составила $t_2^* = 28,3^\circ\text{C}$ при диаметре капель $d_1 = 3$ мм и $t_3^* = 26,6^\circ\text{C}$ при диаметре капель $d_2 = 1$ мм [5].

Результаты исследований в целом доказывают интенсификацию теплообменных процессов в градирне путем увеличения дисперсности капель, которую предлагается достичь за счет изменения силы поверхностного натяжения (σ) охлаждаемой воды. Наблюдается более глубокое охлаждение воды, что весьма актуально в условиях летней эксплуатации градирен.

Уменьшение диаметра капель интенсифицирует теплообменные процессы и может быть достигнуто без изменения конструкции брызгальных устройств.

Перспективным способом увеличения степени дисперсности воды без переоборудования градирен является применения ПАВ-технологии. В [6] проведены исследования по влиянию концентрации ПАВ на коэффициент поверхностного натяжения воды (σ).

Помимо способности снижать гидравлические сопротивления труб и других трактов перемещения воды и воздуха, ПАВ обладают свойством уменьшать коэффициент поверхностного натяжения воды. Однако при этом необходимо учитывать то, что уменьшение диаметра капель имеет граничное значение. Во-первых, диспергирование может привести к увеличению уноса оборотной воды, и, тем самым, к дополнительным затратам на подпитку контура. Во-вторых, существует вероятность того, что слишком высокая дисперсность будет приводить не к охлаждению воды, а к охлаждению воздуха за счет полного испарения капель воды, т.е. к превращению градирни в оросительную камеру.

Литература

1. Клименко А.В., Зорин В.М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. 3-е издание, издательство МЭИ, 2004 г., кн.4., 632 с.
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Теплообмен. Учебное пособие для студентов. – 3-е изд., – М.: Издательство МЭИ, 2006 г., 550 с.
3. Катателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. государственное энергетическое издательство, 1958, 414с.
4. Стрелков С. П. Механика. 3-е издание, издательство Наука, 1975 г., 554с.
5. Волков А.В., Наумов А.В. Анализ основных проблем эксплуатации башенных градирен с помощью пакета Flow Vision и способы их решения. Радиозлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. восемнадцатой Междунар. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М., 2012. – Т.2. С.465
6. Об использовании октадециламина в теплоэнергетике. / А.В. Куршаков, И.Я. Дубровский, Л.Н. Баталина и др. // Вестник МЭИ. – 2000. – №2. С 79–82.