

УДК 621.573

Моделирование теплообмена в воздушно-испарительном охладителе при воздействии электростатического поля

Канд. техн. наук В.В.КИРЕЕВ
ОАО «Мясокомбинат «Тулунский»

The use of electrostatic field (ESP) in the cooling of heat carriers in an air-evaporative chiller allows to increase the heat transfer coefficient and reduce consumption of water.

The offered calculation algorithm as obtained on the basis of the analysis of the constraint equations of the surface energy, the intensity of the ESP, radius of drops and their electric and thermophysical characteristics can be used as the basis of engineering principles of refrigerating systems construction.

Применение электростатического поля (ЭСП) при охлаждении теплоносителей в воздушно-испарительном охладителе позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи и сократить расход воды. Струя диспергированной жидкости (СДЖ) в ЭСП может двигаться при определенной разности потенциалов в присутствии электродов в зоне охлаждения. Диспергирование жидкости в ЭСП происходит более эффективно [1,2]. Большие капли, попадая в ЭСП, «взрываются» с образованием мелких, которые приобретают электрический заряд. При этом увеличивается напряженность поля, уменьшаются внутреннее давление капель и соответственно поверхностное натяжение.

С уменьшением внутреннего давления капель увеличивается эффективность воздействия аэродинамических сил, что резко повышает силу «взрыва» капель.

Малые капли, несущие электрический заряд, более устойчивы к испарению и могут существовать в ненасыщенном потоке воздуха [3]. Это важно учитывать, так как при движении капли к охлаждаемой поверхности температура потока возрастает, что приводит к более интенсивному испарению.

Наличие ЭСП, с одной стороны, будет приводить к росту скорости капель, а с другой – к деформации поля скоростей полидисперсной системы капель, вследствие чего усиливается возмущающее воздействие капель на поверхность пленки жидкости, стекающей по трубе, и интенсифицируется процесс теплоотдачи [1, 2, 4]. Благодаря воздействию ЭСП на режим охлаждения изменяется поверхностная энергия капель, что может привести к их охлаждению [8].

Для аппроксимации экспериментальных данных по псевдоламинарному режиму течения пленки предложена степенная зависимость [7]:

$$\text{Nu} = C \text{Re}_x^l \text{We}^m \text{Fr}^n \text{Ga}_R^p \text{Ga}_x^q \text{Pr}^r (\text{Pr}_{(к)} / \text{Pr}_c)^{0.25}, \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

We – число Вебера;

Fr – число Фруда;

Ga – число Галилея;

Pr – число Прандтля.

$$\text{Re} = \omega_{\text{пл}} d / v_{\infty}. \quad (2)$$

Скорость стекающей пленки определяется как

$$\omega_{\text{пл}} = G_{\phi} / \pi \rho_{\infty} \sigma_{\text{пл}} (2d_{\text{тр}} + \delta_{\text{пл}}), \quad (3)$$

где $\delta_{\text{пл}}$ – толщина стекаемой пленки.

$$\text{We} = j_x^{-2} \sigma_q \rho / R_{\text{o3}}, \quad (4)$$

где j_x – плотность орошения, кг/(см²·с);

x – определяющий размер;

σ_q – коэффициент поверхностного натяжения заряженной капли;

R_{o3} – радиус заряженной капли.

Для псевдотурбулентного режима [7]

$$\text{Nu} = C \text{Re}^{0.5} \text{We}^{0.22} \text{Fr}^{0.75 \cos \phi} \text{Ga}_R^{0.17} \text{Ga}_x^{0.17} \text{Pr}^{0.5} \times \\ \times (\text{Pr}_{(к)} / \text{Pr}_c)^{0.25}, \quad (5)$$

где $C = 5,1$ при $\phi = 90^\circ$; $C = 1,5$ при $\phi = 65^\circ$.

Зависимость (5) справедлива для условий:

$$10 \leq \text{Re} \leq 545; 1,5 \cdot 10^7 \leq \text{We} \leq 2,6 \cdot 10^5;$$

$$4,13 \cdot 10^4 \leq \text{Fr} \leq 11,8 \cdot 10^4; 21 \leq \text{Ga}_R \leq 53;$$

$$4,6 \cdot 10^8 \leq \text{Ga}_x \leq 9,22 \cdot 10^{11}.$$

Значение коэффициентов ϕ , C , Re , m , n для псевдоламинарного режима течения пленки в уравнении (5) приведены в таблице; $l = -0,25$; $P = 0,33$; $r = 0,5$; $q = 0,17$.

ϕ	Re_{min}	Re_{max}	C	m	n
90°	10	220 – 230	$3,36 \cdot 10^{-8}$	1,36	0
65°	10	165 – 360	$5,1 \cdot 10^{-5}$	0,83	0,327
15°	44	425	$4,3 \cdot 10^{-10}$	0,15	0,725

Радиус распыливаемых капель в зависимости от потенциала, который подводится к штуцеру распылителя, при известной напряженности определяется по уравнению

$$R_{o3} = R_o [1 - (R_o/4 \sigma_q) \varepsilon \varepsilon_o E^2]. \quad (6)$$

Анализ моделей и принятых в них допущений дает основание предположить, что характер теплообмена в ЭСП будет подобным, если в качестве допущения принять, что процессы электролиза в стекающей пленке жидкости практически не влияют на теплообмен и гидродинамику течения. В этом случае ЭСП будет воздействовать только на гидродинамику течения СДЖ и стекающей пленки жидкости.

Охлаждение пучка труб СДЖ, помещенного в ЭСП, позволяет интенсифицировать теплообмен за счет включения механизма электростатического взаимодействия капель жидкости между собой и охлаждаемой стенкой. В качестве исходных предпосылок, дополняющих модель процесса, описанную выше, принимаются следующие:

1. Наличие ЭСП увеличивает деформацию поля скоростей капель СДЖ, что следует из уравнения

$$W_{ek} = \varepsilon_o \{R_{o3} E^2 [1 + 2(\varepsilon - 1/\varepsilon + 2)]\} / 6\pi \mu_r, \quad (7)$$

где W_{ek} – скорость капель без струи в ЭСП;

E – напряженность поля;

ε – диэлектрическая постоянная жидкости;

μ_r – коэффициент динамической вязкости газа, из которого видно, что с ростом R_{o3} капли ее скорость в ЭСП увеличивается, т.е. крупные капли будут еще быстрее «обгонять» мелкие.

2. Одноименный заряд капель снижает эффективность коагуляции и способствует диспергированию крупных капель [5].

3. Вектор напряженности ЭСП направлен по нормали к поверхности охлаждения. В этом случае скорость капель определяется достаточно просто по уравнению

$$W_k = (W_c^2 + W_{ek}^2 + 2W_c W_{ek} \cos\phi)^{0.5}, \quad (8)$$

где W_k – скорость капель;

W_c – скорость капель, результирующая в струе без ЭСП;

ϕ – угол, образованный осью струи и вектором напряженности ЭСП.

4. Рассматривается одномерная модель течения СДЖ с допущением асимметричности струи.

Наличие ЭСП будет способствовать уменьшению уноса капель жидкости за поверхность охлаждения, поэтому вводим коэффициент

$$\eta_{(y)} = j_{(x)} / j_{o(x)}. \quad (9)$$

Плотность орошения при отсутствии ЭСП определяется как

$$j_{o(x)} = G_\phi / F_x, \quad (10)$$

где G_ϕ – массовый расход воды через форсунку;

F_x – орошаемая поверхность.

Зависимость плотности орошения в ЭСП $j_{(x)}$ будет

иметь более сложный вид и зависеть от напряженности электростатического поля:

$$E = U_o / R_1 \ln (R_2 / R_1), \quad (11)$$

где U – приложенное напряжение;

R_1 – радиус электрода;

R_2 – радиус трубы.

Задаваясь в первом приближении значением $\eta = 1,2 \dots 1,5$, в дальнейшем уточним его величины, используя экспериментальные данные. Тогда плотность орошения в ЭСП будет определяться как

$$j_{(x)} = j_{o(x)} \eta_{(y)}. \quad (12)$$

Для определения режима стекания пленки (псевдотропинарного или псевдотурбулентного) вычисляется критическое число Рейнольдса [6]:

$$Re_{kpit} = KWe^{0.73 \cdot 10^{-7}}, \quad (13)$$

где $K = 0,31$ при $\phi = 90^\circ$; $K = 0,22$ при $\phi = 65^\circ$ и значение координаты X_{kp} , соответствующее переходной границе,

$$X_{kp} = \mu Re_{kp} / j_{(x)}. \quad (14)$$

Для проведения комплекса исследований по разработанным моделям процесса охлаждения нами создана программа для ЭВМ. Алгоритм расчетов построен таким образом, что позволяет проводить многовариантные расчеты (численное моделирование) путем задания определенного набора исходных данных и ограничений.

Влияние ЭСП на интенсивность теплоотдачи неоднозначно. Как показывает анализ полученной нами системы уравнений, критерии Фруда, Вебера и Галилея, входящие в уравнение (1) и (5), имеют различный ха-

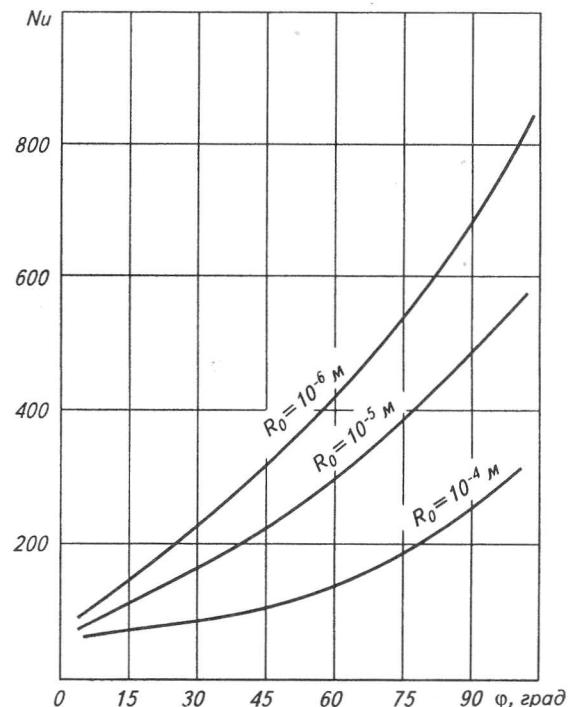


Рис. 1. Зависимость критерия Нуссельта от угла распыла охлаждающей жидкости

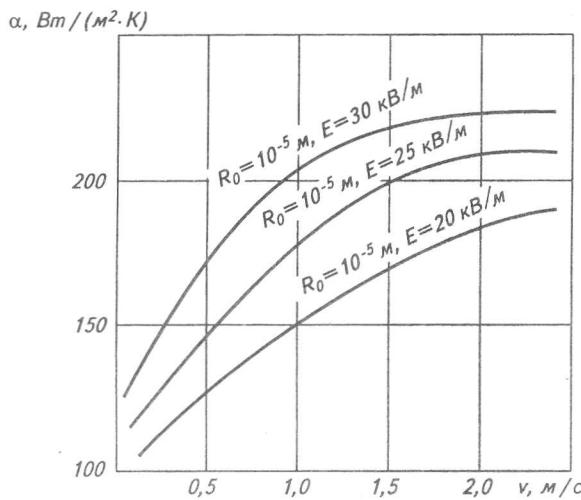


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха, напряженности поля и размера капель

рактер зависимости от напряженности ЭСП и первоначального диаметра распыливаемых капель. Как и следовало ожидать, наиболее «чувствительны» к действиюю ЭСП мелкие капли радиусом менее 10^{-5} м. С ростом напряженности ЭСП в большей степени начинают проявляться эффекты электростатического диспергирования [8], связанные с уменьшением сил поверхностного натяжения жидкости.

На рис. 1 представлены зависимости критерия Нуссельта от радиуса капель R_o и угла ϕ . Наибольшее влияние размера капель оказывается на больших углах атаки. Так, при $\phi = 60\ldots 90^\circ$ и уменьшении радиуса от $R_o = 10^{-4}$ до $R_o = 10^{-5}$ м критерий Нуссельта возрастает более чем в 2 раза. При меньших значениях ϕ ,

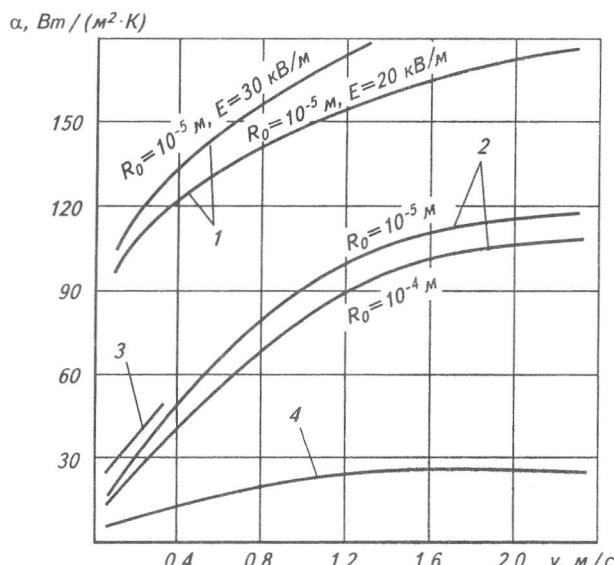


Рис. 3. Зависимость изменения коэффициента теплоотдачи с поверхности пучка труб от скорости охлаждающей среды при поперечном обтекании:
1 – в ЭСП; 2 – испарительное охлаждение;
3 – водой; 4 – воздухом

т.е. когда ось струи становится параллельной оси трубы, изменение радиуса капель практически слабо влияет на эффективность теплоотдачи. Это можно объяснить тем, что при «атаке» струи по нормали к поверхности капли оказывают существенное возмущающее воздействие на поверхность стекающей пленки, увеличивая эффективность теплоотдачи.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости охлаждающей среды и напряженности электрического поля. Наибольшего значения α достигает при скорости охлаждающей среды $v = 1,6\ldots 1,8$ м/с и напряженности поля $E = 30$ кВ/м.

На рис. 3 представлены результаты теоретического исследования зависимостей коэффициентов теплоотдачи от скорости воздуха для различных методов охлаждения.

Из приведенных зависимостей видно, что α достигает наибольшего значения при испарительном охлаждении в ЭСП. ЭСП интенсифицирует процесс охлаждения благодаря ускорению движения капель, дроблению крупных капель на более мелкие, равномерному покрытию пучка труб охлаждающей средой по всему объему аппарата.

Предложенный алгоритм расчета может быть применен: при разработке и конструировании конденсаторов испарительного охлаждения; в оросительных камерах систем кондиционирования воздуха; в градирнях охлаждения оборотной воды.

Список литературы

1. Абросимов Ю.Г., Исаченко В.П., Соловьев А.П. Об устойчивости поверхности жидкости в электрическом поле // Труды МЭИ. 1971. Вып. 81.
2. Абросимов Ю.Г., Исаченко В.П., Соловьев А.П. Неустойчивость поверхности жидкости в электрическом поле // Докл. научно-техн. конф. по итогам НИР за 1968–1969 гг., МЭИ, 1969.
3. Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. – М.: Химия, 1972.
4. Бабакин Б.С. Электротехнология в холодильной промышленности. – М.: Агропромиздат, 1990.
5. Бейтуганов М.Н., Белгородков Л.Г. Изучение взаимодействия капель в электрическом поле // Атмосферное электричество: Тр. III Всесоюз. симпозиума. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
6. Гогонин И.И., Дорохов А.Р., Пирогова О.Ю. Теплообмен на струях в пространстве между трубами горизонтального пучка конденсатора // Тепломассообмен – ММФ-96. Т. 4, ч. 2. – Минск, 1996.
7. Исаченко В.П. и др. Струйное охлаждение. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Пажиц Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыления жидкостей. – М.: Химия, 1984.