



УДК 66.021.3/4

В.Л. ФЕДЯЕВ, докт. техн. наук, с.н.с., заведующий лабораторией,

И.В. МОРЕНКО, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, **Е.М. ВЛАСОВ**, научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт механики и машиностроения

Казанского научного центра Российской академии наук» (ИММ КазНЦ РАН), г. Казань, Российская Федерация

Р.Ф. ГАЙНУЛЛИН, технический директор

FANS-Восток, г. Казань, Российская Федерация

ОХЛАЖДЕНИЕ ВОДЫ В ПЛЕНОЧНО-КАПЕЛЬНЫХ ОРОСИТЕЛЯХ ГРАДИРЕН

Рассмотрено охлаждение атмосферным воздухом оборотной воды в виде пленок, стекающих по вертикально расположенным пластинам оросителя градирен, и капель, падающих в зазорах между ними. Представлено математическое описание соответствующих гидроаэродинамических и тепловых процессов. В результате упрощения и решения исходных краевых задач получены соотношения для определения температурного перепада охлаждаемой воды в зависимости от параметров, характеризующих устройство оросителя, теплофизических свойств теплоносителей, режима работы градирни и метеорологических факторов. Проанализировано влияние указанных параметров на глубину охлаждения воды.

Ключевые слова: оросители градирен, тепломассообмен пленок и капель воды, охлаждение воды, соотношения для температурного перепада.

Согласно существующей классификации оросителей градирен они делятся (в зависимости от устройства и особенностей работы) на пленочные, капельно-пленочные, капельные и брызгальные [1]. Рассматриваемые оросители состоят из расположенных вертикально пластин, в которых вода охлаждается атмосферным воздухом как при течении по поверхности пластин, так и при падении в виде капель, и занимают, по нашему мнению, промежуточное положение между пленочными и капельно-пленочными оросителями, поэтому их можно назвать пленочно-капельными.

Исследованиям течения пленок, полета капель жидкости, обдуваемых газом, тепломассообмена на поверхности контакта жидкости и газа посвящено много работ, основные результаты которых приведены в [2–7] и др. В отличие от расчетных схем, представленных в этих публикациях и работах [8–13], с целью максимального учета особенностей охлаждения воды в данных оросителях предполагаем, что течение пленок, падение капель и процессы тепломассообмена взаимосвязаны, а восходящий охлаждающий атмосферный воздух представляет собой поток парогазокапельной среды.

Для математического описания гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов в объеме рассматриваемого оросителя выделим ячейку периодичности, состоящую из поверхности вертикальной пластины высотой h_{op} , слоя стекающей по ней пленки воды тол-

щиной δ , восходящего парогазокапельного потока между пленкой воды и плоскостью симметрии зазора, а также падающих вертикально капель воды. Расчетная область изображена на рис. 1, где δ_0 и δ_1 – толщина пленки воды на входе и выходе из этой области, m ; u_{10} , u_{21} , u_{30} – соответственно скорость пленки воды, парогазокапельного потока и падающих капель воды на входе в расчетную область, m/c ; l , $l_s = const$ – расстояния между каплями в вертикальном и горизонтальном направлениях, m ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 .

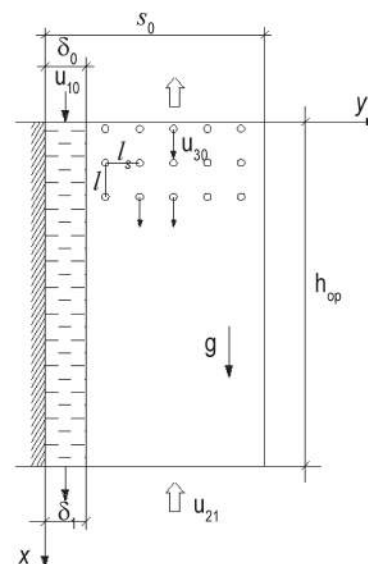


Рисунок 1 – Расчетная область

Известно, что неблагоприятными для работы промышленных градирен являются атмосферные условия в теплый период года, когда температура воздуха t_a по сухому термометру доходит до 20–25 °С, относительная влажность составляет $\varphi_a \approx 0,5-0,7$, барометрическое давление – $p_a \approx 99,32$ кПа. Практика эксплуатации градирен показывает, что для указанных параметров воздуха при температуре воды на входе в градирню $t_{10} \approx 30-40$ °С температурный перепад воды равен $\Delta t \approx 10$ °С. В пленочно-капельных оросителях обычно $h_{ог} \approx 0,50-4,0$ м, толщина пластин составляет $2s = 0,003-0,015$ м, ширина зазора между пластинами – $2s_0 = 0,01-0,07$ м, плотность орошения – $q_x = 0,001-0,005$ м³/(м²·с), средняя скорость парагазокапельной среды на входе в зазор между пластинами – $\bar{u}_{21} \approx q_B = 1,0-3,0$ м/с ($q_B = G_B/F_{op}$ – средняя скорость воздуха в градирне в области оросителя, где G_B – объемный расход воздуха, м³/с; F_{op} – площадь орошения градирни, м²); радиус падающих капель на входе в зазор между пластинами – $r_{30} = 0,002-0,003$ м. При средних значениях данных параметров и объемной концентрации увлекаемых воздушными потоками мелких капель воды, много меньшей единицы, средняя скорость воды на входе в пленку $\bar{u}_{10} = 0,042$ м/с, средняя толщина пленки $\bar{\delta} = 0,12 \cdot 10^{-3}$ м, плотность парагазокапельной среды $\rho_2 = 1,2$ кг/м³. Числа Рейнольдса течения пленки и турбулентного движения парагазокапельной среды равны ~ 30 и $\sim 2 \cdot 10^3$ соответственно.

Обозначим нижним индексом 1 величины, относящиеся к пленке воды, а нижними индексами 2 и 3 – величины, относящиеся соответственно к парагазокапельному потоку (это смесь воздуха и пара, увлекающая за собой мелкие капли воды) и падающим каплям воды. Запишем уравнения сохранения импульса, массы и энергии для пленки воды

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} = -\rho_1^{-1} \frac{\partial p_1}{\partial x} + \nu_1 \Delta u_1 + g; \rho_1 \int_0^{\delta} u_1 dy = \rho_1 g_1 + G_1^*, \quad (1)$$

$$u_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = a_1 \Delta T_1. \quad (2)$$

Здесь ρ_1 – плотность воды, кг/м³; p_1 – давление, Па; ν_1 – кинематическая вязкость воды, м²/с; $\Delta = d^2/dx^2 + d^2/dy^2$ – оператор Лапласа; g_1 – расход

воды в пленке, м³/с; $G_1^* = \rho_1 \int_0^{\delta} v_1^* dx$ – количество воды,

испарившейся с поверхности пленки на участке 0–х, кг/(м·с); $v_1^* = -\beta_1 \cdot [\gamma''(t_1^*) - \varphi_2 \gamma''(t_2^*)]$ – скорость испарения воды, м/с; β_1 – коэффициент массоотдачи на поверхности пленки и парагазокапельной среды, м⁴/(кг·с); $\gamma''(t)$ – зависимость плотности насыщенного водяного пара от температуры, кг/м³; t_1^* , t_2^* – соответственно тем-

пературы поверхности пленки и парагазокапельного потока, °С; φ_2 – относительная влажность парагазокапельного потока; a_1 – коэффициент температуропроводности воды, м²/с; T_1 – температура воды в пленке, К.

В входном сечении пленки $u_{10} = 3\bar{u}_{10}y \cdot (\delta_0 - 0,5y)/\delta_0^2$, $p_1 = p_{10}$, $T_1 = T_{10}$. На поверхности пластины $u_1 = 0$, $\partial T_1/\partial y = 0$. На выходе из расчетной области $\partial u_1/\partial x = 0$, $\partial T_1/\partial x = 0$. На поверхности раздела фаз $\mu_1 \partial u_1/\partial y = \mu_2 \partial u_2/\partial y$, $p_1 = p_2 - 2\mu_2 \partial v_2/\partial y - \sigma R_8^{-1}$, $T_1 = T_2$, $-\lambda_1 \partial T_1/\partial y = \alpha_{12} \cdot (T_1 - \bar{T}_2) - \rho_1 \hat{v}_1$, где μ_1 – динамическая вязкость воды, кг/(м·с); μ_2 – эффективная вязкость парагазокапельного потока, кг/(м·с); v_2 – поперечная скорость парагазокапельного потока, м/с; σ – поверхностное натяжение, Н/м; R_8 – радиус кривизны поверхности пленки, м; T_1^* – температура поверхности пленки воды, К; λ_1 – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α_{12} – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности пленки, Вт/(м²·К); \bar{T}_2 – средняя по сечению температура парагазокапельного потока, К; \hat{v} – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Аэродинамика и нагрев восходящего парагазокапельного потока описываются уравнениями

$$u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} = -\rho_2^{-1} \frac{\partial p_2}{\partial x} + \bar{\nu}_2 \Delta u_2 + g - \frac{\bar{f}_3}{\rho_2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \bar{a}_2 \Delta T_2 + \frac{\bar{q}_3}{\rho_2 c_2}, \quad (5)$$

где $\bar{\nu}_2 = \nu_2 + \nu_T$ и $\bar{a}_2 = a_2 + a_T$ – соответственно коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности, учитывающие эффективную турбулентную вязкость ν_T , м²/с, и температуропроводность a_T , м²/с; \bar{f}_3 и \bar{q}_3 – источниковые члены, характеризующие механическое и тепловое воздействия падающих капель воды на парагазокапельный поток; c_2 – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Уравнение водного баланса, составленное в предположении, что поступающий со стороны пленки водяной пар распространяется в поперечном сечении мгновенно и равномерно, при условии переноса пара только в продольном направлении имеет вид

$$\frac{\partial(\rho_n u_2)}{\partial x} + \frac{4\pi r_3^2}{l_s^2} \rho_1 v_3^* + (s_0 - \delta)^{-1} \rho_1 v_1^* = 0, \quad (6)$$

где $\rho_n = \varphi_2 \gamma''(t_2^*)$ – плотность водяного пара, кг/м³; $v_3^* = -\beta_3 \cdot (p_3^* - p_n)$ – скорость испарения воды с поверхности капель, м/с; β_3 – коэффициент массоотдачи на поверхности капель, м⁴/(кг·с); $p_3^* = \gamma''(t_3^*)$, t_3^* – температура поверхности капли, °С.



На входе в расчетную область

$$(s_0 - \delta_1)^{-1} \int_{\delta_1}^{s_0} u_2 dy = -\bar{u}_{21}, \quad p_2 = p_{21}, \quad T_2 = T_{21}, \quad p_n = p_{n1},$$

где $p_{21} = p_a - \Delta p_a$, Па; Δp_a – потери напора в градирне до входа в ороситель; $T_{21} = T_a + \Delta T_a$, ΔT_a – температура атмосферного воздуха, характеризующая его нагрев в подорожительном пространстве ($\Delta T_a \sim 0K$); $p_{n1} = \Phi_{21} \gamma''(t_{21})$, $\Phi_{21} \approx \Phi_a$.

В плоскости симметрии парогазокапельного потока $\partial u_2 / \partial y = 0$, $\partial T_2 / \partial y = 0$. На выходе из расчетной области $\partial u_2 / \partial x = 0$, $\partial T_2 / \partial x = 0$. На поверхности раздела фаз $T_2 = T_1^*$, $-\bar{\lambda}_2 \partial T_2 / \partial y = \alpha_{12} \cdot (T_1^* - \bar{T}_2) - \rho_1 \hat{r} u_1^*$, $\bar{\lambda}_2 = \lambda_2 + \lambda_T$.

Полет и охлаждение падающих капель воды описываются уравнениями

$$u_3 \frac{du_3}{dx} = g \cdot \left(1.0 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) + \frac{4,5 \bar{\mu}_2 \cdot (u_2 - u_3)}{\rho_1 r_3^2}, \quad (7)$$

$$u_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \frac{\bar{a}_3}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_3}{\partial r} \right), \quad (8)$$

где $\bar{\mu}_2 = \mu_2 + \mu_T$, кг/(м·с); \bar{a}_3 – эффективный коэффициент температуропроводности, учитывающий циркуляцию воды в капле, м²/с; r – радиальная координата в капле, м.

На входе в расчетную область $u_3 = u_{30} = 3I_0 I_0^2 q_{ж} / 4\pi r_{30}^3$, $T_3 = T_{30} = T_{10}$. В центре капли воды $r^2 \partial T_3 / \partial r = 0$. На поверхности капли $T_3 = T_3^*$, $-\bar{\lambda}_3 \partial T_3 / \partial r = \alpha_{23} \cdot (T_3^* - \bar{T}_2) - \rho_1 \hat{r} u_3^*$, где $\bar{\lambda}_3$ – эффективный коэффициент теплопроводности воды в капле, Вт/(м·К); α_{23} – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхности капли, Вт/(м²·К).

Для упрощения и решения приведенных задач гидродинамики и теплообмена выделяют характерные масштабы и осуществляют переход к безразмерным величинам [14]. После ряда преобразований и упрощений полученных аналитических зависимостей для теплогидродинамических характеристик оросителя найдем соотношение для температурного перепада воды $\Delta t = t_1 - t_2$ (t_1 , t_2 – температура воды соответственно на входе и выходе из градирни, °С)

$$\Delta t = k \cdot \left[k_0 \bar{G}_1 \Delta t_1 + (1.0 - k_0 + k_0 \bar{G}_3) \cdot \Delta t_3 \right], \quad (9)$$

Здесь $\bar{G}_1 = G_1 / G_{ж}$, $\bar{G}_3 = G_3 / G_{ж}$; $G_{ж}$, G_1 и G_3 – соответственно гидравлическая нагрузка на градирню, объемные расходы воды в пленках и каплях, м³/с. Поправочный коэффициент $k = 1,58$ определяется при названных выше технологических параметрах и климатических факторах с использованием нормативных характеристик башенной градирни БГ–1200, оборудованной двухъярусным асбестоцементным пластинчатым

оросителем высотой $h_{op} = 2,45$ м. Коэффициент $k_0 = (1,4 + 360 q_{ж}) \cdot (1,15 - 0,05(2,8 - q_B)^2)$ характеризует осаждение на поверхности пленки воды части падающих в зазор между пластинами капель. Температурный перепад охлажденной воды в пленках

$$\Delta t_1 = 4,15 (\bar{r} q_B / \rho_1 c_1) \cdot (v_1 h_{op}^3 D_2^3 / g s^8 q_{ж}^8)^{1/8} \times [\gamma''(\bar{T}_1) - \bar{\varphi}_2 \gamma''(\bar{T}_2)], \quad (10)$$

где \bar{T}_1 , \bar{T}_2 – средние по высоте оросителя температуры по смоченному и сухому термометру; $\bar{\varphi}_2$ – относительная влажность парогазокапельной среды; D_2 – коэффициент диффузии водяного пара, м²/с. Температурный перепад охлажденной в каплях воды

$$\Delta t_3 = 1,85 (\bar{r} h_{op} D_2 / \rho_1 c_1) \cdot (g s^5 h_k a_1)^{-1/3} \times (1,0 + q_B / 3(gh_k)^{1/2}) \cdot [\gamma''(\bar{T}_3) - \bar{\varphi}_2 \gamma''(\bar{T}_2)]. \quad (11)$$

Для сопел, направленных факелом вверх, $h_k = h_c + h_\phi$, где h_c – расстояние от верхней кромки оросителя до среза выходного отверстия сопла, м; $h_\phi = k_\phi H_c$ – высота факела, м; k_ϕ – поправочный коэффициент, определяемый из справочной литературы; H_c – гидравлический напор при подходе потока воды к соплу, м. Для сопел, направленных факелом вниз, расстояние $h_k = 2\mu_c H_c$, где μ_c – коэффициент расхода. Предполагается, что температура $\bar{T}_3 = \bar{T}_1$.

Найденные соотношения могут быть распространены на трубчатые оросители с вертикально расположенными трубками, при этом $s_0 \approx 0,43 I_T^2 / p_T$, где I_T – расстояние между трубками, м; p_T – периметр сечения трубок, м. Возможен также учет волнистости поверхностей пластин и трубок.

Сопоставление рассчитанного по формуле (9) температурного перепада воды Δt с данными, полученными как с помощью нормативных характеристик башенных градирен БГ–2100, БГ–2600 и БГ–3200, оборудованных двухъярусным асбестоцементным пластинчатым оросителем высотой $h_{op} = 2,45$ м, так и путем проведения натурных испытаний вентиляторной градирни СК–1200 с трубчатым оросителем из витых гофротруб высотой $h_{op} = 1,4$ м при названных характерных параметрах эксплуатации градирен в теплое время года, показало, что в первом случае средняя относительная невязка равна 0,7 %, во втором – 6 %.

Формулы (9)–(11) позволяют выявить определенные закономерности. Так, при увеличении высоты оросителя температурный перепад Δt_1 возрастает пропорционально $h_{op}^{1/2}$, а Δt_3 – пропорционально h_{op} ; с ростом толщины пластин $2s$ перепад Δt_1 уменьшается в $s^{-1/2}$ раз.

При увеличении плотности орошения перепад Δt_1 уменьшается в $q_{\text{ж}}^{4/3}$ раз, а при возрастании скорости воздуха $q_{\text{в}}$ он увеличивается. При этом необходимо иметь в виду следующее: поскольку эффективность охлаждения определяется теплосъемом, характеризующим величиной $\rho_1 c_1 \Delta t_1 q_{\text{ж}}$, этот показатель при увеличении $q_{\text{ж}}$ уменьшается всего лишь в $q_{\text{ж}}^{1/3}$ раз. С ростом $q_{\text{ж}}$ вода в каплях охлаждается хуже, но в меньшей степени, чем в пленках ($\Delta t_{\text{ж}} \propto 1/q_{\text{ж}}^{2/3}$). При увеличении $q_{\text{в}}$ перепад Δt_3 увеличивается незначительно, поскольку величина $1/3 \cdot (gh_k)^{1/2}$. С увеличением коэффициента вязкости ν_1 перепад Δt_1 возрастает пропорционально $\nu_1^{1/6}$, т.е. сравнительно слабо. Гораздо в большей степени перепады Δt_1 и Δt_3 зависят от произведения $\rho_1 c_1$ и коэффициента диффузии D_2 , причем Δt_1 прямо пропорционален $D_2^{1/2}$ и обратно пропорционален $\rho_1 c_1$, а Δt_3 – пропорционален D_2 и $(\rho_1 c_1)^{2/3}$.

ВЫВОДЫ

С помощью полученных соотношений для оценки температурного перепада воды, охлаждаемой атмосферным воздухом при стекании ее по поверхности пластин оросителя, падении в зазор между пластинами в виде капель, а также общего температурного перепада пластинчатого пленочно-капельного оросителя установлены закономерности изменения глубины охлаждения воды в зависимости от конструктивных параметров этих оросителей, режимов работы градирен, теплофизических характеристик теплоносителей.

Применение данных соотношений при разработке либо модернизации оросителей градирен и определении рациональных режимов эксплуатации позволит обеспечить снижение потерь воды, экономию материальных и энергетических ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий : справ. пособие / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев ; под общ. ред. В. С. Пономаренко. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
2. Сполдинг Д. Б. Конвективный массоперенос / Д. Б. Сполдинг. – М. : Энергия, 1965. – 384 с.
3. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 538 с.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. Ч. II. – М. : Наука, 1987. – 360 с.
5. Холпанов Л. П. Гидродинамика и теплообмен с поверхностью раздела / Л. П. Холпанов, В. Я. Шкадов. – М. : Наука, 1990. – 271 с.
6. Математическое моделирование нелинейных термогазодинамических процессов в многокомпонентных струйных течениях / Л. П. Холпанов, Е. П. Запорожец, Г. К. Зиберт, Ю. А. Кащичкий. – М. : Наука, 1998. – 320 с.
7. Лаптев А. Г. Модели пограничного слоя и расчет тепло-массообменных процессов / А. Г. Лаптев. – Казань : Изд-во КГУ, 2007. – 500 с.
8. Петручик А. И. Математическое моделирование испарительного охлаждения пленок воды в градирнях / А. И. Петручик, С. П. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 1999. – Т. 72, № 1. – С. 43–49.
9. Петручик А. И. Двумерный расчет параметров паровоздушной смеси в пленочном теплообменном аппарате / А. И. Петручик, С. П. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76, № 5. – С. 81–86.
10. Петручик А. И. Испарительное охлаждение воды в пленочных оросителях сложной конфигурации / А. И. Петручик, А. Д. Солодухин, С. П. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 1. – С. 171–175.
11. Петручик А. И. Математическое моделирование охлаждения капельных и пленочных течений воды в башенных испарительных градирнях / А. И. Петручик, А. Д. Солодухин, С. П. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74, № 1. – С. 45–49.
12. Нестационарный тепло- и массоперенос при испарительном охлаждении стекающих пленок жидкости / Г. В. Дашков, Е. Ф. Ноготов, Н. В. Павлюкевич, В. Д. Тютюма // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 1. – С. 3–10.
13. Мазо А. Б. Теплообмен с испарением при падении капель в восходящем потоке воздуха / А. Б. Мазо // Исследования по прикладной математике. – Казань : КМО, 1997. – Вып. 22. – С. 91–106.
14. Федяев В. Л. Моделирование и расчет характеристик пленочно-капельных оросителей градирен / В. Л. Федяев, Е. М. Власов // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011» : материалы докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – Т. 2. – С. 589–595.

Поступила в редакцию 02.04.2014

Розглянуто охолодження атмосферним повітрям оборотної води у вигляді плівок, що стікають по вертикальній розташованим пластинам зрошувача градирень,

One be examined cooling by air of reverse water in form of films flowing over vertical plates of cooling tower spray, and drops falling into opening between them. Mathematic



і крапель, що падають в щілинах між ними. Надано математичний опис відповідних гідроаеродинамічних і теплових процесів. У результаті спрощення та рішення вихідних крайових задач отримано співвідношення для визначення температурного перепаду охолодження вальної води залежно від параметрів, що характеризують пристрій зрошувача, теплофізичних властивостей теплоносія, режиму роботи градирні та метеорологічних факторів. Проаналізовано вплив зазначених параметрів на глибину охолодження води.

description of corresponding aerohydrodynamic and heat processes was provided. As results of simplification and solution of initial boundary problems one be obtained ration to define temperature drop of cooled water depending to parameters of spray, thermophysical properties of heat carriers, operation mode of cooling towers and meteorological factors. Influence of indicated parameters on cooling degree of water was analyzed.