

В. В. Дударев, доц., канд. техн. наук;
Г. С. Маршалова, ст. преп., канд. техн. наук;
А. Б. Сухоцкий, доц., канд. техн. наук;
В. Н. Фарафонов, доц., канд. техн. наук;
Д.В. Островская, студ. 4 к. спец. ЭТЭМ
(БГТУ, г. Минск)

ТЕПЛОТДАЧА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ШАХТЫ АППАРАТА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Использование воды в качестве охлаждающего агента в различных отраслях промышленности ощутимо влияет на экологическую обстановку региона расположения предприятия. Снижение технологического водопотребления стало возможным благодаря внедрению в промышленности аппаратов воздушного охлаждения (АВО), позволяющего использовать в качестве охлаждающего агента, более дешевый и доступный воздух.

При проектировании АВО расчет необходимой площади теплообменной поверхности ведется по средней для региона температуре воздуха в 13 часов наиболее жаркого месяца, поэтому большую часть времени АВО работают с существенным запасом по теплонапряженности, при этом вентиляторы, как правило, эксплуатируются в номинальном режиме. Для снижения основных эксплуатационных затрат, приходящихся на затраты электроэнергии, потребляемой электродвигателями вентиляторов, практикуют периодическое выключение вентиляторов при достаточно низких температурах воздуха (ниже -25°C), [1]. При оснащении АВО дополнительными устройствами, усиливающими тягу, их теплопроизводительность может быть сохранена и при более высоких температурах окружающего воздуха без потребления электроэнергии приводом вентилятора [1]. Одним из таких устройств, интенсифицирующих теплообмен, является устанавливаемая над теплообменным пучком вытяжная шахта.

В настоящее время в справочной научно-технической литературе отсутствуют расчетные уравнения по смешанно-конвективному теплообмену для АВО. Авторам известны немногочисленные публикации, посвященные исследованиям этого вопроса [2,3]. Данные исследования подтверждают эффективность использования вытяжной шахты. Однако, их результатов недостаточно для проведения удовлетворительного теплового расчета АВО, работающего в режиме смешанной конвекции.

Создание надежной методики расчетов АВО в режиме смешанной конвекции невозможно без решения задачи о теплоотдаче между

поток воздуха, подымающимся с оребренной поверхности АВО, и внутренней стенкой шахты. Авторами разработана теоретическая модель для ламинарного пограничного слоя, учитывающая совместное влияние на теплоотдачу вынужденного движения основного потока и естественной конвекции в пограничном слое. Получено уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи.

Формулировка данной задачи базируется на интегральных уравнениях движения и энергии, выведенных из системы дифференциальных уравнений движения, неразрывности, энергии, записанных для пограничного слоя и уравнения Бернулли для основного потока, с учетом следующих граничных условий

$$\begin{cases} y=0: u=0, v=0, T=T_w, \theta=\theta_w = T_w - T_\infty \\ y=\delta: u=u_\infty - \max \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, T=T_\infty, \theta=\theta_\infty = T_\infty - T_\infty = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где u – скорость основного потока воздуха, совпадает с направлением оси x , расположенной параллельно высоте внутренней поверхности стенки шахты, с началом координат в нижней точке; v – скорость вдоль оси y , нормальной к поверхности шахты; T – температура по толщине пограничного слоя δ (T_w, T_∞ – на поверхности шахты и на внешней границе пограничного слоя); и допущений: $\partial p / \partial y = 0$ – давление изменяется только по оси x ; границы теплового и гидродинамического пограничного слоя для воздуха ($\delta_g / \delta_t = \sqrt[3]{Pr} = \sqrt[3]{0,7} = 0,89$) совпадают $\delta_g \approx \delta_t \equiv \delta = 5,64 \sqrt{\nu x / u_\infty}$ (по Блаузиусу); теплофизические свойства воздуха постоянны, за исключением члена, учитывающего подъемную силу в уравнении движения $(\rho - \rho_\infty) / \rho = \beta_t (T - T_\infty) = -\beta_t \theta$ ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с, ρ – плотность воздуха по толщине пограничного слоя, β_t – коэффициент температурного расширения.

Интегральные уравнения движения и энергии для ламинарного пограничного слоя в условиях смешанной конвекции имеют вид

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \int_0^\delta [(u_\infty - u)\rho u dy] + \frac{du_\infty}{dx} \int_0^\delta [\rho_\infty u_\infty - \rho u] dy = \\ = -g_x \int_0^\delta (\rho - \rho_\infty) dy + \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_w + \rho_w v_w u_\infty, \\ \frac{d}{dx} \int_0^\delta u \theta dy = -a \left. \frac{\partial \theta}{\partial y} \right|_w \end{cases}, \quad (2)$$

где μ – динамическая вязкость Па·с; a – температуропроводность, м²/с воздуха. В соответствии с условиями задачи вторые члены в левой и правой части первого уравнения (2) можно положить равными нулю.

Для решения уравнений (2) использовались экспериментально обоснованные зависимости распределения скорости $u(y)$ и температуры $\theta(y)$ по толщине пограничного слоя δ

$$\frac{u}{u_\infty} = \frac{2\eta_0}{1+\eta_0^2} - \frac{u_0}{u_\infty} \eta_0 (1-\eta_0)^2; u_0 = u_\infty \left(\frac{\theta_w}{\theta_B} \right)^{0,5}; \theta_B = T_\infty - T_B \quad (3.1)$$

$$\frac{\theta}{\theta_w} = \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_w} = 1 - \frac{2\eta_0}{1+\eta_0^2} \quad (3.2)$$

где $\eta_0 = y/\delta$ – безразмерное расстояние от стенки, T_B – температура воздуха за пределами шахты. Уравнение (3.1) представляет собой суперпозицию распределения ламинарного вынужденного обтекания пластины (первая часть) и естественной конвекции, обусловленной распределением температур по толщине пограничного слоя (вторая часть). Знак «минус» учитывает разнонаправленность этих распределений. Принималось, что изменение скорости ядра потока u_∞ и толщины пограничного слоя δ вдоль оси x происходит по степенному закону

$$u_\infty = c_u x^m; \delta = c_\delta x^n \quad (3.3)$$

С учетом (3.1-3.3) из решения системы уравнений (2) следует

$$\begin{cases} u_\infty = c_u x^m = a \left[a^2 f_1 - a \nu f_2 f_3 \right]^{-0,5} \left[0,3069 \beta_t g_x \theta_w \right]^{0,5} \cdot x^{0,5} \\ \delta = c_\delta x^n = \left[a^2 f_1 f_2^{-2} - a \nu f_3 f_3^{-1} \right]^{0,25} \left[0,3069 \beta_t g_x \theta_w \right]^{-0,25} \cdot x^{0,25} \end{cases}, \quad (4)$$

где f_1, f_2, f_3 – функции от $\Theta = \theta_w/\theta_B$, определяемые по соотношениям

$$\begin{cases} f_1 = 0,1529 + 0,0279\Theta^{0,5} - 0,0119\Theta \\ f_2 = 0,0459 - 0,0114\Theta^{0,5} \\ f_3 = 2 - \Theta^{0,5} \end{cases} \quad (5)$$

Локальный коэффициент теплоотдачи выражаем из уравнения граничных условий III рода

$$\alpha \theta_w = \frac{\lambda}{\delta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta_0} \Big|_w = \frac{\lambda}{\delta} (2\theta_w) \quad (6)$$

В безразмерном виде выражения для числа Нуссельта

$$Nu_x = \frac{\alpha x}{\lambda} = 1,4886 \left[Gr_x Pr \Psi(Pr, \Theta) \right]^{0,25} \quad (7.1)$$

$$\Psi(Pr, \Theta) = Pr f_2^2 (f_1 - Pr f_2 f_3)^{-1} \quad (7.2)$$

где $Gr_x = \frac{\beta_l g_x \theta_w x^3}{\nu^2}$ – число Грасгофа; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля.

Интегрирование (7) дает среднее по высоте шахты l значение числа Нуссельта

$$Nu = \frac{1}{l} \int_0^{\delta} Nu_x dx = 0,8506 [Gr Pr \Psi(Pr, \Theta)]^{0,25}. \quad (8)$$

Высота l является характерным размером при расчете числа Грасгофа.

Для условий работы АВО можно принять $Pr = 0,7$, тогда уравнение (8) примет вид

$$Nu = 0,7117 (Gr \Psi(\Theta))^{0,25} \quad (9)$$

$$0 < \Theta < 1: \quad 0,359 > \Psi(\Theta)^{0,25} > 0,275$$

Подход, примененный при решении данной задачи, может быть использован для ее решения, но уже с турбулентным пограничным слоем. В заключении следует отметить, что к достоинствам аппаратов с вытяжной шахтой можно отнести: снижение годового потребления электроэнергии, повышение срока службы вентиляторов с приводами, исключение рециркуляции воздуха, облегчение условий труда для обслуживающего персонала. Также стоит отметить, что регулирование работы АВО достаточно легко автоматизируется в различных режимах работы, что создает благоприятные условия для их использования в различных отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппарат воздушного охлаждения: пат. 9446 Респ. Беларусь, МПК 7 F 24 F 3/00, F 28 D 1/00 / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. Ш. Миннигалеев, В. П. Мулин; заявитель Учреждение образования «Белорусский Государственный Технологический Университет». № u 20130091, заявл. 31.01.2013; опубл. 30.08.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2013. № 9. С. 70.
2. Мильман, О.О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О.О. Мильман // Теплоэнергетика, 2005. – № 5. – С. 16 – 19.
3. Сухоцкий, А.Б. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над оребренным пучком / А.Б. Сухоцкий, Г.С. Сидорик // Тепловые процессы в технике, 2018. - №1-2 (Т.10).- С.62-70.