

3. Зинченко В. И., Ефимов К. Н., Якимов А. С. Расчет характеристик сопряженного теплообмена при пространственном обтекании затупленного тела с использованием системы комбинированной тепловой защиты // ТВТ. 2011. Т. 49, № 1. С. 81–91.
 4. Керножицкий В. А., Колычев А. В., Охочинский Д. М. Термоэмиссионный способ защиты частей летательного аппарата при их аэродинамическом нагреве. А. с. № 2009140802/11 РФ // Б.И. 2010. № 32. 7 с.
 5. Керножицкий В. А., Колычев В. А., Макаренко А. В. Разработка методики расчета многоэлементной термоэмиссионной тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. Вып. 75. С. 1–21.
 6. Hanquist K. M., Hanquist H. A., Boyd I. D. Evaluation of computational modeling of electron transpiration cooling at high enthalpies // J. of Thermo-Physics and Heat Transfer. 2017. Vol. 31, No. 2, P. 283–293.
 7. Ушаков Б. А., Никитин В. Д., Емельянов И. Я. Основы термоэмиссионного преобразования энергии. М.: Атомиздат, 1974. – 288 с.
 8. Синявский В. В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих сборок. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 375 с.
 9. Зимин В. П., Ефимов К. Н., Колычев А. В., Керножицкий В. А., Овчинников В. А., Якимов А. С. Моделирование термоэмиссионной тепловой защиты при конвективном нагреве составной оболочки // Космическая техника и технологии. 2019. № 1. С. 23–34.
 10. Землянский Б. А., Степанов Г. И. О расчёте теплообмена при пространственном обтекании тонких затупленных конусов гиперзвуковым потоком воздуха // Изв. АН СССР. МЖГ. 1981. № 5. С. 173–178.
 11. Лунев В. В., Магомедов К. М., Павлов В. Г. Гиперзвуковое обтекание притупленных конусов с учетом равновесных физико-химических превращений. М.: ВЦ АН СССР, 1968. – 203 с.
 12. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник. М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
-

УДК 536.24:66.045

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В КОЛЬЦЕВОМ СЛОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТЫХ РЕБРИСТЫХ ТРУБ

Т. Б. Карлович¹, Г. С. Маршалова², Е. С. Данильчик²

¹Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск

Оребрение труб используется в различных видах теплообменников для увеличения площади теплоотдающей поверхности и отведения максимального количества теплоты от охлаждаемой жидкости. Основной характеристикой теплообменного аппарата является коэффициент теплопередачи, который может меняться в течение всего времени эксплуатации теплообменника и имеет тенденцию к снижению из-за всевозможного рода загрязнений межреберного пространства. Так, в аппаратах воздушного охлаждения (АВО), широко применяемых в химической и нефтегазовой промышленности, вместо охлаждающей жидкости используется атмосферный воздух. АВО, находящиеся на открытом воздухе, с течением

времени загрязняются пылью, пыльцой растений, пухом, насекомыми и др., что приводит к увеличению потребления электрической энергии на привод вентилятора и снижению экономичности работы АВО. На сегодняшний день существует ряд методик, учитывающих степень загрязнения межреберного пространства [1–4]. В некоторых из них используется модель равномерного тонкого слоя загрязнения по всей ребристой поверхности теплообменника, что не соответствует реальному распределению загрязнения в межреберном пространстве. В методике [4] рассматривается кольцевой слой загрязнения, прилегающий к поверхности оребренной трубы, и равномерный тонкий слой загрязнения на остальной оребренной поверхности. Однако в этой методике теплопроводность материала ребер предполагается бесконечной величиной, вследствие чего температура остается постоянной на всей поверхности ребра. В многочисленных экспериментальных исследованиях обтекания воздухом как одиночных труб [5–7], так и трубных пучков [8–10] было показано, что температура у основания ребристой трубы и на вершине ребер может значительно отличаться. Это связано, по крайней мере, с двумя причинами: уменьшением температуры вследствие конечной теплопроводности материала ребер и разной скоростью течения воздуха в межреберном пространстве. Скорость воздуха между ребрами зависит не только от расположения трубного пучка (горизонтальный, вертикальный или наклонный), но и от расстояния между ребрами. В случае свободной конвекции и тесного расположения ребер пограничный слой воздуха будет препятствовать нарастанию скорости потока. Поэтому температура поверхности ребра будет резко изменяться только на вершинах ребер. В то же время для разреженных ребер нарастание скорости воздушного потока будет происходить более плавно из-за более равномерного течения воздуха в межреберном пространстве.

Для расчета коэффициента теплопередачи воспользуемся методикой [4], основанной на применении электротепловой аналогии для тепловых потоков, проходящих через многослойную поверхность. При этом учитывается равномерный тонкий слой загрязнения внутри трубы и цилиндрический слой загрязнения конечной толщины, прилегающий снаружи к основанию трубы вместе с тонким равномерным слоем загрязнения на всей оставшейся поверхности оребренной трубы.

Согласно методике [4] для нахождения коэффициента теплопередачи k необходимо рассчитать среднюю безразмерную температуру на поверхности цилиндрического слоя загрязнителя, которая, в свою очередь, определяется на основании температурного распределения внутри слоя загрязнения t . В качестве граничного условия для температуры слоя загрязнения, прилегающего к поверхности ребер, будем использовать линейное приближение. Также будем предполагать, что ребра представляют собой круглые диски с достаточно большими расстояниями между ними для свободного прохода охлаждающего воздуха.

Температурное распределение в кольцевом слое загрязнителя удовлетворяет стационарному уравнению теплопроводности, записанному в цилиндрических координатах r (радиальная координата) и z (осевая координата):

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Граничные условия для полого ограниченного цилиндра с нулевой температурой на поверхности трубы в межреберном пространстве имеют вид

$$t = -\kappa(r - r_0) \text{ при } z = 0, r_0 \leq r \leq r_1, \quad (2)$$

$$t = -\kappa(r - r_0) \text{ при } z = z_1, r_0 \leq r \leq r_1, \quad (3)$$

$$t = 0 \text{ при } r = r_0, 0 \leq z \leq z_1, \quad (4)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r} = \alpha_2 (t + t_{f1} - t_2) \text{ при } r = r_1, \quad 0 \leq z \leq z_1, \quad (5)$$

где κ – коэффициент линейной зависимости температуры вдоль поверхности ребра, °C/м; z_1 – максимальное значение осевой координаты, м; r_0, r_1 – минимальное и максимальное значения радиальной координаты соответственно, м; t_{f1} – температура основания трубы, °C; t_2 – температура окружающего воздуха.

Убывающее линейное температурное распределение по высоте ребра выбрано для упрощения записи граничных условий (2) и (3). В общем случае оно определяется из модели для разреженных чистых ребер, описанной в [11].

Решение задачи (1)–(5) можно искать в виде неоднородного периодического ряда по координате z с неоднородностью, повторяющей температурное распределение вдоль поверхности ребра:

$$t(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi z}{z_1} \varphi_n(r) - \kappa(r - r_0), \quad (6)$$

где суммирование осуществляется только по нечетным n . В этом случае граничные условия (2) и (3) выполняются автоматически. Подставляя разложение (6) в уравнение (1), получаем неоднородное уравнение для функции $\varphi_n(r)$:

$$\varphi_n''(r) + \frac{1}{r} \varphi_n'(r) - \left(\frac{n\pi}{z_1} \right)^2 \varphi_n(r) - \frac{4\kappa}{n\pi} \frac{1}{r} = 0. \quad (7)$$

Замена переменной и функции

$$r = \frac{z_1}{n\pi} i\xi, \quad \varphi_n = \frac{4i\kappa z_1}{(n\pi)^2} y_n \quad (8)$$

позволяет записать уравнение (7) в виде неоднородного уравнения Бесселя:

$$\frac{d^2 y_n}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{dy_n}{d\xi} + y_n = \frac{1}{\xi}. \quad (9)$$

Частным решением уравнения (9) является функция Ломмеля нулевого порядка $s_{0,0}(\xi)$ [12]. С учетом введенных обозначений (8) общее решение уравнения (7) может быть представлено в виде

$$\varphi_n(r) = \frac{4i\kappa}{A_n} \frac{z_1}{(n\pi)^2} \left[s_{0,0} \left(-i \frac{n\pi}{z_1} r \right) + C_{1n} I_0 \left(\frac{n\pi}{z_1} r \right) + C_{2n} K_0 \left(\frac{n\pi}{z_1} r \right) \right], \quad (10)$$

где C_{1n} и C_{2n} – произвольные мнимые постоянные; I_0 и K_0 – линейно независимые модифицированные функции Бесселя.

Постоянные C_{1n} и C_{2n} определяются из граничных условий (4) и (5) и удовлетворяют матричному соотношению

$$\begin{bmatrix} C_{1n} \\ C_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11n} & b_{12n} \\ b_{21n} & b_{22n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_{1n} \\ d_{2n} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где введены следующие обозначения для коэффициентов матрицы

$$b_{11n} = I_0 \left(\frac{n\pi}{z_1} r_0 \right), \quad b_{12n} = K_0 \left(\frac{n\pi}{z_1} r_0 \right),$$

$$b_{21n} = \frac{iz_1 \alpha_2}{n\pi \lambda_2} I_0 \left(\frac{n\pi}{z_1} r_1 \right) + iI_1 \left(\frac{n\pi}{z_1} r_1 \right), \quad b_{22n} = \frac{iz_1 \alpha_2}{n\pi \lambda_2} K_0 \left(\frac{n\pi}{z_1} r_1 \right) - iK_1 \left(\frac{n\pi}{z_1} r_1 \right), \quad (12)$$

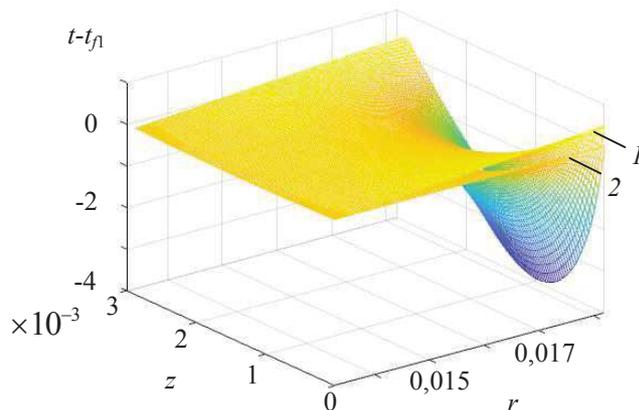
$$d_{1n} = -s_{0,0} \left(-i \frac{n\pi}{z_1} r_0 \right), \quad d_{2n} = -\frac{iz_1 \alpha_2}{n\pi \lambda_2} s_{0,0} \left(-i \frac{n\pi}{z_1} r_1 \right) + s_{-1,1} \left(-i \frac{n\pi}{z_1} r_1 \right) + \frac{\alpha_2}{\lambda_2 \kappa} (t_2 - t_{f1}) + \frac{\alpha_2}{\lambda_2} (r_1 - r_0) + 1.$$

Средняя температура на поверхности загрязнения t_{f2} находится путем интегрирования по осевой координате z температурного распределения (6):

$$t_{f2} = \frac{1}{z_1} \int_0^{z_1} t(r=r_1, z) dz = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} \varphi_n(r_1) - \kappa(r_1 - r_0). \quad (13)$$

Таким образом, решение задачи теплопроводности в цилиндрическом слое загрязнения в случае линейного убывания температуры вдоль поверхности ребра может быть получено в аналитическом виде с использованием функций Ломмеля и модифицированных функций Бесселя. В случае нелинейного распределения температуры по высоте ребра формально температурное распределение можно разложить в ряд по степеням r и получить неоднородное уравнение Бесселя, частными решениями которого будут функции Ломмеля высших порядков.

На рисунке представлена зависимость температуры от радиальной и осевой координаты для случая постоянной температуры и линейно убывающей температуры вдоль поверхности ребра. Видно, что снижение температуры по высоте ребра влечет за собой уменьшение минимальной температуры, достигаемой на поверхности между ребрами, равноудаленной от соседних ребер.



Распределение температуры в цилиндрическом слое загрязнения 1 – без учета температурного распределения вдоль ребра, 2 – с учетом температурного распределения вдоль ребра. $\kappa = 100$; $r_0 = 0,013$ м; $r_1 = 0,018$ м; $z_1 = 0,003$ м; $\alpha_2 = 10$ Вт/(м²·К); $\lambda_2 = 0,05$ Вт/(м·К)

В заключение отметим, что в работе получено аналитическое решение для задачи теплопроводности в кольцевом слое загрязнения для ребристых труб в случае редкого расположения ребер. В случае тесного расположения ребер потребуются дополнительный гидродинамический расчет для определения толщины пограничного слоя воздуха, прилегающего к поверхности ребер, и оценка зависимости коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха от геометрических характеристик реберной поверхности.

Литература

1. Müller-Steinhagen H. Heat Exchanger Fouling. Mitigation and Cleaning Technologies. Essen: PUBLICO Publications, 2000. 382 p.
 2. Сухоцкий А. Б. [и др.]. Дифференцированный учет термического сопротивления внешнего загрязнителя оребрения труб шахматных пучков в тепловом расчете воздухоохлаждаемых теплообменников // ММФ–2016: XV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ. 23–26 мая 2016 г. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 2016. Т. 3. С. 424–426.
 3. Кунтыш В. Б. [и др.]. Исследование теплопроводности внешних загрязнителей теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения // Химическая техника. 2013. № 11. С. 40–43.
 4. Карлович Т. Б. Теплопередача круглых ребристых труб при неравномерном эксплуатационном загрязнении межреберного пространства // ИФЖ. 2018. Т. 91, № 5. С. 1278–1286.
 5. Kayansayan N. Thermal characteristics of fin-and-tube heat exchanger // Exp. Therm. Fluid Sci. 1993. Vol. 7. P. 177–188.
 6. Hahne E., Zhu D. Natural convection heat transfer on finned tubes in air // Int. J. Heat Mass Transf. 1994. Vol. 37. P. 59–63.
 7. Chen H.-T., Hsu W.-L. Estimation of heat transfer coefficient on the fin of annular-finned tube heat exchangers in natural convection for various fin spacing // Int. J. Heat Mass Transf. 2007. Vol. 50. P. 1750–1761.
 8. Katsuki R. et. al. Study on free convection heat transfer in a finned tube array // Int. J. Air-Condition. Refrig. 2015. Vol. 23. P. 1–9.
 9. Unger S., Krepper E., Hampel U. Numerical analysis of heat exchanger designs for passive spent fuel pool cooling to ambient air // Nucl. Eng. Des. 2018. Vol. 333. P. 224–234.
 10. Володин В. И. [и др.]. Влияние внешнего загрязнения на эффективность теплообменных аппаратов воздушного охлаждения // ММФ–2012: XIV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщ. 10–13 сент. 2012 г. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 2012. Т. 3. С. 315–317.
 11. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977. – 464 с.
 12. Ватсон Г. Н. Теория Бесселевых функций. В 2 ч. М.: ИЛ, 1949. Ч. I. – 798 с.
-

УДК 621.396.6.019:536.5.001.24

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА НА ВСЕХ ЭТАПАХ ПЕРЕВОДА С «МОКРОГО» НА «СУХОЕ» КОНТЕЙНЕРНОЕ ХРАНЕНИЕ

Ю. Е. Карякин, А. А. Плетнев, Е. Д. Федорович

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия*

На всех атомных электростанциях мира отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) после относительно кратковременной (порядка одного года) выдержки в приреакторных водных бассейнах помещают в так называемые "мокрые" хранилища (ХОЯТ) промежуточного хранения, которое продолжается обычно в течение ряда десятилетий. Эти ХОЯТ располагаются