

Колесниченко Виктор Александрович,
обучающийся, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: victor.kolesnichenko8@gmail.com

Щербин Сергей Анатольевич,
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

МЕТОДИКИ ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Kolesnichenko V.A., Shcherbin S.A.

METHODS OF THERMAL CALCULATION OF AIR COOLING APPARATUS

Аннотация. Рассмотрены методики расчета коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи в аппаратах воздушного охлаждения. Выполнено сравнение двух методов расчета коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности оребренных труб к атмосферному воздуху на примере аппарата воздушного охлаждения.

Ключевые слова: теплообмен, теплопередача, теплоотдача, аппарат воздушного охлаждения, коэффициент оребрения.

Abstract. The methods of calculating the heat transfer coefficient in air cooling devices are considered. A comparison of two methods for calculating the heat transfer coefficient from the outer surface of finned pipes to atmospheric air is performed using the example of air cooling apparatus.

Keywords: heat exchange, heat transfer, air cooling apparatus, coefficient of finning.

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) используются на нефтеперерабатывающих, нефтехимических, химических и смежных с ними производствах для конденсации паров и охлаждения высокотемпературных жидких сред. Они получили распространение на пожаро- и взрывоопасных производствах, поскольку существенная доля теплоты в этих аппаратах отводится посредством естественной конвекции атмосферного воздуха, что является существенным фактором при аварийных ситуациях.

Площадь теплопередающей поверхности теплообменных аппаратов рассчитывается из основного уравнения теплопередачи:

$$F = Q / (K \Delta t_{cp}), \quad (1)$$

где Q – мощность теплового потока в аппарате, Вт; Δt_{cp} – средняя разность температур теплоносителей по всей поверхности теплообмена, К; K – коэффициент теплопередачи для пучка оребренных труб, Вт/(м²К).

При проектировании новых и реконструкции существующих АВО одним из важных факторов является выбор обоснованной методики расчета коэффициента теплопередачи. Очевидно, что неточность расчета K приводит или к завышению F и увеличению размеров, металлоемкости и стоимости оборудования, либо к уменьшению F и недостаточной эффективности охлаждения.

В литературе приведены различные методики расчета коэффициента теплопередачи для оребренных биметаллических труб, наиболее часто применяющихся в теплообменных секциях АВО.

Расчет по методике [1] осуществляется по формуле:

$$K = (\psi/\alpha_1 + R_3\varphi d_0/d_{cp} + 1/\alpha_{пр})^{-1}, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя в трубном пространстве, Вт/(м²·К); $\psi = \varphi d_0/d_1$ – коэффициент увеличения площади поверхности теплообмена; φ – коэффициент оребрения трубы; d_0 – наружный диаметр алюминиевой трубы по основанию ребра, м; d_1 – внутренний диаметр стальной трубы, м; R_3 – эквивалентное термическое сопротивление труб, м²·К/Вт; d_{cp} – средний диаметр внутренней трубы, м; $\alpha_{пр}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности труб к воздуху, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплопередачи может быть вычислен также по формуле, приведенной в [2]:

$$K = \left[\varphi d_0/(\alpha_1 d_1) + \delta_{ст}\varphi d_0/(\lambda_{ст} d_1) + R_{31}\varphi d_0/d_1 + \right. \\ \left. + R_k\varphi d_0/d_k + \delta_a\varphi d_0/(\lambda_a d_k) + 1/\alpha_{пр} + R_{32} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $\delta_{ст}$ – толщина стенки внутренней трубы, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала внутренней трубы, Вт/(м·К); R_{31} и R_{32} – термические сопротивления загрязнений на внутренней и наружной поверхностях трубы, м²·К/Вт; R_k – контактное термическое сопротивление, м²·К/Вт; d_k – наружный диаметр стальной трубы, м; δ_a – толщина стенки наружной алюминиевой трубы, м; λ_a – коэффициент теплопроводности материала наружной трубы, Вт/(м·К).

Применяют также формулу для расчета коэффициента теплопередачи через плоскую стенку, отнесенного к наружной поверхности условно неоребреной трубы диаметром d_0 [3]:

$$K = [1/\alpha_1 + R_{31} + \delta_{ст}/\lambda_{ст} + R_{32} + 1/(\alpha_{пр}\varphi)]^{-1}. \quad (4)$$

Результаты сравнения методик расчета [1-3] показали [4], что наименьшее значение коэффициента теплопередачи получается при расчете по формуле (3). Использование формулы (2) приводит к незначительному увеличению K (не более чем на 3,5%). Значение коэффициента теплопередачи, полученное по формуле (4), на 20–30% больше по сравнению с рассчитанным по формуле (3). Поэтому применение методики, изложенной в [3], при проектировании АВО, может привести к завышению величины коэффициента теплопередачи, недостаточному охлаждению горячего теплоносителя и нарушению технологического процесса.

Поскольку коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубного пучка к воздуху существенно меньше коэффициента теплоотдачи от обрабатываемой среды к внутренней поверхности труб, его значение оказывает значительное влияние на величину K . Для расчета $\alpha_{пр}$ также предложены разные подходы. В настоящей работе приведены результаты сравнения методик расчета коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности оребренных труб к атмосферному воздуху.

В методике, приведенной в [3] и рассмотренной в [5], приведенный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пр}$ от наружной поверхности условно неоребранных труб к воздуху рассчитывается в следующей последовательности:

– Скорость воздуха W_B по наименьшей площади сечения межтрубного пространства:

$$f_{MT} = z_c b (L - 2\delta_p) f_c, \quad (5)$$

где z_c – число параллельных секций, через которые проходит воздух; b – рабочая ширина просвета в секции, м; L – длина труб в секции, м; δ_p – толщина трубной решетки, м; f_c – относительное свободное сечение секции.

– Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности труб к воздуху:

$$\alpha_B = C_2 \lambda_B (W_B \rho_B / \mu_B)^{0,65} Pr^{0,35}, \quad (6)$$

где $0,45 \leq C_2 \leq 0,5$ – коэффициент, принимаемый в зависимости от значения φ ; λ_B , ρ_B , μ_B , Pr – соответственно коэффициент теплопроводности, плотность, коэффициент динамической вязкости и критерий Прандтля для воздуха при средней температуре. Начальную расчетную температуру воздуха принимают на 2-3 °С выше средней июльской температуры, конечную – в зависимости от температуры охлаждаемой жидкости, но не более 60 °С.

– Приведенный коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности условно неоребранных труб к воздуху:

$$\alpha_{пр} = C_1 \alpha_B, \quad (7)$$

где $0,44 \leq C_1 \leq 0,83$ – коэффициент, принимаемый в зависимости от φ .

Наряду с описанным подходом в литературе [1, 6] приводятся эмпирические зависимости, учитывающие материальное исполнение аппаратов воздушного охлаждения и величину коэффициента оребрения (таблица 1).

Таблица 1

Эмпирические зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи

Материальное исполнение труб	Коэффициент оребрения	Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)
Б1, Б2	9	$\alpha_B = 61,6 \lg W_B - 0,035 t_B - 5,81$
	14,6	$\alpha_B = 56,4 \lg W_B - 0,035 t_B - 5,93$
Примечания. Материальное исполнение Б1 – материал внутренней трубы сталь 20, Б2 – материал внутренней трубы сталь 08Х18Н10Т или сталь 12Х18Н10Т. В приведенных формулах t_B – средняя температура охлаждающего воздуха, °С, W_B – скорость воздуха между оребренными трубами.		

Представляет практический интерес выполнение сравнительного анализа методик теплового расчета аппаратов воздушного охлаждения, а именно, методик расчета коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности оребренных труб к атмосферному воздуху.

В качестве объекта для расчета был выбран АВО, предназначенный для конденсации пропана на установке ГФУ-1 цеха 17/19 АО "АНХК". Условное обо-

значение аппарата АВГ-9-Ж-2,5-Б1-В3/8-8-4 означает: аппарат воздушного охлаждения с горизонтальным расположением теплообменных секций; с коэффициентом оребрения труб 9,0; с жалюзи; рассчитанный на условное давление 2,5 МПа; с материальным исполнением секций Б1; с двигателем типа В3; с числом рядов труб 8; с числом ходов по трубам в секции 8 и длиной труб 4 м.

Сравнение полученных результатов расчетов представлено в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи к воздуху

Материальное исполнение труб	Коэффициент оребрения	Расчетное значение коэффициента, Вт/(м ² ·К)	
		$\alpha_{пр}$ по формуле (7)	$\alpha_{в}$ по формулам таблицы 1
Б1	9	60	59,2
	14,6	48,4	52,6

Таким образом, сравнительный анализ методик теплового расчета аппаратов воздушного охлаждения показывает, что их использование приводит к близким по значению результатам – расчетные значения коэффициентов теплоотдачи для $\varphi = 9$ отличаются на 1,4%, а при $\varphi = 14,6$ – на 8,7%.

Учитывая, что применение методики, основанной на применении эмпирических формул и описанной в [6], требует меньших трудозатрат, этот подход можно рекомендовать в случаях расчета аппаратов соответствующего материального исполнения. Тепловой расчет аппаратов, для материального исполнения которых отсутствуют формулы в [6], следует применять методику теплового расчета, описанную в [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика теплового и аэродинамического расчета аппаратов воздушного охлаждения. М.: ВНИИнефтемаш, 1982.
2. **Кунтыш, В.Б.** Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В.Б. Кунтыш, Н.М. Кузнецов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 278 с.
3. **Доманский, И.В.** Машины и аппараты химических производств / И.В. Доманский и др. Под общей редакцией В.Н. Соколова. – Л.: Машиностроение, 1982. – 188 с.
- 4 **Кунтыш, В.Б.** Анализ методик расчета теплопередачи аппаратов воздушного охлаждения / В.Б. Кунтыш, А.Б. Сухоцкий, А.Ю. Жданович, А.Э. Пиир. // Химическая техника. – 2015. – № 4. – С. 14-18.
5. **Щербин, С.А.** Оптимальный коэффициент оребрения трубного пучка воздушного конденсатора паров бензина / С.А. Щербин, И.А. Никитина И.А. // Сборник научных трудов АНГТУ. – 2019. – С. 157-161.
6. **Сидягин, А.А.** Расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения / А.А. Сидягин, В.М. Косырев. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2009. – 91 с.