

УДК 536.24

Маг. Данильчик Е.С.

Науч. рук. канд. техн. наук, доцент Сухоцкий А.Б.
(кафедра энергосбережения, гидравлики и теплотехники, БГТУ)

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПО
ОБОБЩЕННЫМ И ЧАСТНЫМ УРАВНЕНИЯМ ПОДОБИЯ
ТЕПЛОАЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В работе анализируются конструкционные особенности горизонтального двухсекционного аппарата воздушного охлаждения природного газа 2АВГ–75, состоящего из трех теплообменных секций ($z_c = 3$) с длиной БРТ в секции 12 м. Вентиляторный блок включает в себя два осевых вентилятора «Торнадо» Т–50–4 [1] с диаметром колеса 5 м и установленной мощностью двигателя 37 кВт. Частота вращения вала электродвигателя составляет $4,2 \text{ с}^{-1}$ (250 мин^{-1}).

Объектом расчетно-аналитического исследования являются теплообменные секции, состоящие из труб с накатными спиральными алюминиевыми ребрами следующих геометрических размеров, мм: $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 55,85 \times 25,85 \times 15,0 \times 2,56 \times 0,75$, где d , d_0 , h , s , Δ – соответственно наружный диаметр ребра; диаметр по основанию ребра; высота, шаг и средняя толщина ребра. Коэффициент оребрения трубы $\phi = 19,9$. Несущая оребренная труба наружного диаметра $d_n = 25$ мм с толщиной стенки $\delta = 2$ мм выполнена из углеродистой стали. Шахматная компоновка труб в решетках – равносторонняя с шагом $S_1 = S'_2 = 70$ мм, $S_2 = 0,866 \cdot S_1 = 60,6$ мм, при коридорной компоновке труб – $S_1 = 70$ мм, $S_2 = 60,6$ мм, где S_1 , S_2 , S'_2 – поперечный, продольный и диагональный шаг.

Данный аппарат охлаждает природный газ от температуры $t'_1 = 75^\circ\text{C}$ до температуры $t''_1 = 45^\circ\text{C}$, обеспечивая тепловую нагрузку $Q = 3629$ кВт с расходом охлаждаемого природного газа $G_1 = 45$ кг/с. Температура охлаждающего воздуха на входе в аппарат при использовании вынужденной конвекции составляет $t'_2 = 30^\circ\text{C}$.

Целью настоящей работы является проверка достоверности методов расчета при проектировании АВО и выбор эффективной компоновки трубного пучка из двух вариантов – шахматной или коридорной компоновок.

Для режима поставленной задачи выполнялись 4 варианта расчета 2АВГ–75 по общепринятой методике [2] с соответствующими дополнениями. На основе уравнения теплопередачи определялись площади поверхности F_p теплообмена аппарата для отвода заданного теплового по-

тока Q , при этом коэффициент запаса площади k_3 выдерживался во всех вариантах практически одинаковым, чтобы исключить его влияние на сравнительное сопоставление полученных результатов и соответствующие выводы. Также вычислялись затраты мощности вентилятора.

При шахматной компоновке БРТ для вычисления конвективного коэффициента теплоотдачи по воздушной стороне использовалось обобщенное уравнение подобия АГТУ [2]

$$\text{Nu}_2 = 0,132 C_z C_\gamma C_\psi \left(\frac{S_1 - d_0}{S_2 - d_0} \right)^m \left(\frac{d_0}{s} \right)^{-0,54} \left(\frac{h}{s} \right)^{-0,14} \text{Re}_s^{0,73}, \quad (1)$$

где $\text{Re}_s = w s / \nu$ – число Рейнольдса, $\text{Nu}_s = \alpha_k s / \lambda$ – число Нуссельта; α_k – конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной площади оребрения; $m = (0,53 - 0,019) \varphi$ – показатель степени; w – скорость воздуха в сжатом поперечном сечении пучка секции при рабочих условиях, м/с; λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м К); ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; $C_z = f(z)$ – поправочный коэффициент на число поперечных рядов z в пучке; C_γ – поправочный коэффициент на угол подъема винтовой линии спирального ребра; C_ψ – поправочный коэффициент на угол атаки ψ потоком воздуха пучка труб.

Для рассматриваемого аппарата $C_z = 1,0$; $C_\gamma = 1,0$; $C_\psi = 1,0$.

При коридорной компоновке БРТ использовалось обобщенное уравнение подобия ЦКТИ им. И. И. Ползунова [3]

$$\alpha_{\kappa 2} = 0,174 (\lambda_2 / l) C_z C_s \text{Re}_l^n \varphi^{-0,7} \quad (2)$$

где $\text{Re}_l = w l / \nu$; l – определяющий размер оребренной трубы, м; $F_{\text{тр}}$ – площадь поверхности трубы, не занятая ребрами (площадь межреберных участков на диаметре d_0), м²; F_p – площадь поверхности ребер, м²; F – полная площадь поверхности оребренной трубы, м²; C_s – коэффициент формы пучка; $n = 0,65 \varphi^{-0,07}$. При $C_s = S_2 / d_0 \geq 2$ значение $C_s = 1,0$; если $C_s < 2$, то $C_s < 1,0$ и в интервале $C_s = 1,4 - 2,0$ изменяется в диапазоне $0,86 - 1,0$.

При расчете потерь давления перпендикулярно обтекаемым воздухом пучков из БРТ нами применены обобщенные уравнения ЦКТИ им. И. И. Ползунова [3]:

Для шахматных пучков в интервале $\text{Re}_l = 2 \cdot 10^3 - 1,8 \cdot 10^5$ и $l / d_3 = 0,15 - 6,5$

$$Eu_6 = 2,7C'_z \left(\frac{l}{d_3} \right)^{0,3} Re_l^{-0,25}, \quad (3)$$

для коридорных пучков при изменении параметров $Re_l = 4 \cdot 10^3 - 1,6 \cdot 10^5$, $l/d_3 = 0,8 - 11,5$ и $(S_2 - d_0)/(S_1 - d_0) = 0,5 - 2,0$

$$Eu_8 = 0,26zC'_z \left(\frac{S_2 - d_0}{S_1 - d_0} \right)^{0,68} \left(\frac{l}{d_3} \right)^{0,3} Re_l^{-0,08}, \quad (4)$$

где $Eu = \Delta P / (\rho w^2)$ – число Эйлера, ΔP – перепад давления воздуха, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; d_y – эквивалентный диаметр, сжатого поперечного сечения пучка, м; $C'_z = f(z)$ – поправочный коэффициент на число поперечных рядов z в пучке. Для рассчитываемого аппарата $C'_z = 1,0$. Погрешность расчета ΔP по (4) составляет около 12%.

Частные уравнения подобия для теплоотдачи и сопротивления шахматного и коридорного пучка с принятыми для разработки АВО параметрами S_1 , S_2 и типоразмером БРТ взяты нами из экспериментального исследования [5], их погрешность не превышает 4,4%.

Расчет АВО для заданного теплового потока Q выполнялся по методике [2]. Расход охлаждающего воздуха при нормальных условиях находился в результате определения точки совместной работы вентилятора с теплообменной секцией. Для этого на напорной характеристике вентилятора строилась кривая зависимости потерь давления воздуха в теплообменной секции по одному из уравнений вида $Eu = f(Re)$ обобщенному или индивидуальному (частному). Скорость воздуха в сжатом сечении пучка теплообменной секции выбиралась $w = 3, 5, 7$ и 9 м/с. Точка пересечения $\Delta P = f(V)$ теплообменной секции с характеристикой $H = f(V)$ вентилятора Т-50-4 для конкретного угла $\beta = \text{const}$ установки лопасти определяла расчетный расход воздуха V при нормальных условиях. По расчетному расходу вычислялся рабочий расход воздуха для эксплуатационного режима. Предварительным расчетом по укрупненным показателям устанавливалось, что требуемый расход воздуха обеспечивается при $\beta = 5^\circ$.

Первый вариант расчета базировался на применении для вычисления теплоотдачи и потери давления воздуха частных уравнений подобия [5]; во втором варианте теплоотдача определялась по обобщенному уравнению, а потери давления по частному; в третьем варианте теплоотдача вычислялась по частному уравнению, а потери давления по обобщенному

уравнению; в четвертом варианте теплоотдача и потери давления рассчитывались по обобщенным уравнениям.

Таким образом, при расчете АВО были применены все возможные сочетания уравнений, включенных в оба метода проектирования. Независимо от варианта расчета тепловой поток отводится при шахматном расположении труб шестирядными ($z = 6$ рядов) секциями, а при коридорной компоновке семирядными ($z = 7$ рядов). При этом потребляемая вентилятором мощность возрастает на 6,1%. Следовательно, переход на коридорную компоновку БРТ сопровождается возросшими электропотреблением и металлоемкостью трубного пучка в $7 / 6 = 1,17$ раза. В реальности металлоемкость увеличивается еще больше.

В шахматной шестирядной секции количество труб $n_c = 162$ шт., а в аппарате $n = z_c n_c = 468$ шт. Установленная площадь поверхности теплопередачи $F_y = \pi d_0 \varphi L n_a = 9425 \text{ м}^2$.

При коридорной компоновке в семирядной секции количество труб $n_c = 216$ шт., а в аппарате $n = z_c n_c = 648$ шт. Установленная площадь поверхности теплопередачи $F_y = 11\,000 \text{ м}^2$.

Расчетная площадь поверхности F_p теплопередачи вычисляется из уравнения теплопередачи, а при расчете коэффициента теплопередачи значение термического контактного сопротивления между оболочкой и основанием трубы принимается равным $R_k = 1,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ К} / \text{Вт}$. Коэффициент запаса площади $k_3 = F_y / F_p$.

Для удобства анализа результаты расчетов сведены в нижеследующую таблицу 1.

Таблица 1 – Сводные результаты расчетов АВО

Параметры	Варианты							
	Первый		Второй		Третий		Четвертый	
	Ш	К	Ш	К	Ш	К	Ш	К
Коэффициент теплоотдачи природного газа α_1 , Вт/(м ² К)	1426	1254	1426	1254	1426	1254	1426	1254
Приведенный коэффициент теплоотдачи от оребрения к воздуху $\alpha_{пр}$, Вт/(м ² К)	41,96	31,33	46,76	35,00	41,55	31,33	46,25	35,58
Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м ² К)	20,28	16,73	21,34	17,72	20,18	16,78	21,23	17,95

Продолжение таблицы 1

Коэффициент запаса площади k_3	1,098	1,093	1,16	1,16	1,09	1,10	1,15	1,18
Потеря давления охлаждающего воздуха Δp , Па	133,7	103,7	133,7	103,7	138,3	101,8	138,3	101,8
Потребляемая мощность одним вентилятором N_v , кВт	33,45	35,56	33,45	35,56	33,86	35,10	33,86	35,07

Примечание: Ш – шахматное, К – коридорное.

Из таблицы видно, что при одинаковом тепловом потоке $Q = \text{idem}$ шахматная компоновка БРТ в АВО в сравнении с коридорной является ресурсосберегающей (требуется меньшее количество труб) и потребляет меньше количество электроэнергии на привод вентилятора. Расчет АВО по индивидуальным уравнениям подобия (первый вариант) полностью согласуется с данными третьего варианта, в котором для вычисления теплоотдачи используется индивидуальное уравнение, а потери давления воздуха вычисляются по обобщенному уравнению подобия.

Заключение. При конструировании АВО следует применять шахматное расположение БРТ в теплообменных секциях. Для вычисления потерь давления воздуха необходимо использовать обобщенное уравнение при отсутствии индивидуального уравнения, так как конечные показатели АВО хорошо согласуются с расчетами по точным уравнениям подобия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник; / Под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
2. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников / В. Б. Кунтыш [и др.]. СПб.: Недра, 2000. 300 с.
3. Юдин В. Ф. Теплообмен поперечнооробренных труб. Л.: Машиностроение, 1982. 189 с.
4. Шмеркович В. М. Применение аппаратов воздушного охлаждения при проектировании нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. М.: ЦННИТЭнефтехим, 1971. 112 с.
5. Кунтыш В. Б., Стенин Н. Н. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление поперечно-обтекаемых переходных коридорно-шахматных пучков из оребренных труб // Теплоэнергетика. 1993. №2. С. 41–45.