

ПРИНЦИПЫ И ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС И ТЕПЛОВЕНТИЛЯТОРОВ С ВОДЯНЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРА C_K

Для расчета тепловых параметров теплообменников принято применять или метод средних разностей температур, или метод NTU. Оба этих метода требуют использования достаточно сложного математического аппарата, специального программного обеспечения и обычно оправданы лишь при разработке и конструировании теплообменников на специализированных предприятиях [1]. По этой причине использование упомянутых методов практически невозможно проектировщиками и инженерами тепловых сетей для пересчета тепловых параметров имеющихся конкретных водяных теплообменников воздушных завес или воздухообогревателей. В частности, когда требуется пересчитать тепловую мощность и температуры воды и воздуха на выходе теплообменника для заданных условий работы теплообменника на объекте (расходе воды через теплообменник и температуре воды и воздуха на входе теплообменника). Такой пересчет тепловых параметров можно произвести, используя C_K -метод и таблицы значений тепловой мощности при эталонных температурах, обычно указываемых производителями завес или воздухообогревателей в технической документации к оборудованию [2]. В данной статье будут изложены основные принципы и некоторые подходы C_K -метода применительно к работе воздушных завес и воздухообогревателей с фиксированной скоростью обдува, то есть при постоянном расходе воздуха через теплообменник. (Особенности применения C_K -метода для работы теплообменника при переменном расходе воздуха рассматриваются, в частности, в статьях, опубликованных в № 80 и № 82 журнала «Мир климата» [3], [4].) Материалы о C_K -методе можно посмотреть также в разделе «Методики и расчеты» на сайте www.antar.ru)



С. А. Лысцев, ЗАО «Антарес ПРО»

Параметр C_K и «упрощенный» подход к расчету тепловых параметров

Исходя из уравнения теплового баланса, если известны расходы и входные и выходные температуры воды и воздуха, тепловую мощность воздушной завесы или тепловентилятора с водяным теплообменником можно посчитать как через расход и разность средних температур воды, так и через расход и разность средних температур воздуха:

$$Q = c_w \times G \times (T_r - T_x) = c_a \times G_a \times (T_b - T_o). \quad (1)$$

Здесь Q — тепловая мощность воздушной завесы или тепловентилятора в кВт; $c_w = 4,2$ кДж/

(кг × град) — теплоемкость воды; G — расход воды через теплообменник в кг/с; T_r и T_x — температуры воды на входе и выходе теплообменника; $c_a = 1$ кДж / (кг×град) — теплоемкость воздуха; G_a — расход воздуха через теплообменник в кг/с; T_o и T_b — температуры воздуха на входе и выходе теплообменника.

Обычно через разные участки теплообменника воздух проходит с различной скоростью. Температура воздушного потока с меньшей скоростью будет выше, чем у воздушного потока с большей скоростью, даже если нагрев теплообменника будет равномерным. Простое усреднение температур даст заниженное значение для средней температуры воздуха на выходе теплообменника. Поэтому для получения корректного значения средней температуры воздуха на выходе теплообменника следует производить усреднение с учетом значений скоростей воздуха в точках замера температур. На практике получить среднюю температуру воздуха на выходе теплообменника с хорошей степенью точности (доли градуса) непросто. К тому же в воздушных завесах теплообменник часто установлен перед вентилятором, и замеры оказываются возможным проводить не непосредственно после теплообменника, а только после того, как воздух пройдет через вентилятор. Что касается измерений средних температур воды, то погружные датчики могут обеспечить приемлемую степень точности замера средних температур воды на выходе и входе теплообменника. Поэтому обычно тепловую мощность теплообменника завесы или тепловентилятора получают по известным расходу воды и разности температур воды на входе и выходе теплообменника с помощью уравнения теплового баланса для воды:

$$Q = 4,2 \times G \times (T_r - T_x), \quad (2)$$

а среднюю температуру воздуха на выходе завесы или тепловентилятора определяют из рассчитанной по воде тепловой мощности, расходу воздуха и температуре воздуха на входе теплообменника, то есть температуре окружающего воздуха. В дальнейшем при описании тепловых процессов в теплообменнике мы будем рассматривать только три температуры: температуру воды на входе теплообменника T_r , температуру воды на выходе теплообменника T_x и температуру окружающего воздуха T_o (температуру воздуха на входе теплообменника).

Предлагаемая методика расчета с помощью параметра C_k [5] основывается на двух основных принципах. В качестве первого принципа можно определить неизменность отношения разностей температур при неизменных расходах теплоносителей через теплообменник. Так, если при некотором определенном расходе воды через теплообменник и при работе завесы или тепловентилятора на некоторой фиксированной скорости вентилятора (здесь и в дальнейшем везде мы будем подразумевать, что скорость вентилятора неизменна и значения полученных констант относятся к работе вентилятора

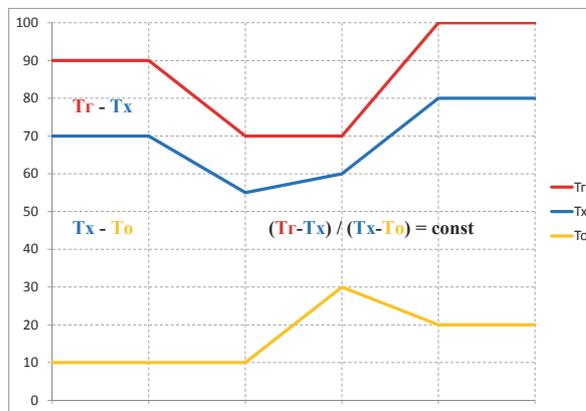


Рис. Постоянство соотношения разностей температур при неизменном расходе воды.

завесы или тепловентилятора именно на этой фиксированной скорости) мы будем изменять температуру воды на входе теплообменника или температуру воздуха на входе теплообменника (температуру окружающего воздуха), то отношение любых разностей температур T_r , T_x и T_o , например $(T_r - T_x)$ и $(T_x - T_o)$, будет постоянным:

$$\frac{T_r - T_x}{T_x - T_o} = const \quad \text{при } G = const \text{ и } G_a = const. \quad (3)$$

Неизменность отношений температур при неизменных расходах воды и воздуха вытекает из практической независимости в имеющихся реальных условиях теплового сопротивления между теплоносителями от температуры и неоднократно подтверждалась при замерах тепловых характеристик завес.

Второй принцип, который используется в методике расчета тепловых параметров, — это слабая зависимость величины C_k от расхода воды при малых расходах и почти постоянство ее при средних и больших расходах воды (при фиксированном расходе воздуха). Величина C_k определяется как произведение расхода воды на упомянутое ранее отношение температур:

$$C_k = G \times \frac{T_r - T_x}{T_x - T_o}. \quad (4)$$

В большинстве случаев, когда рассматривается средний или большой расход воды ($G > C_k$) и если большая точность в расчетах тепловых параметров завесы или тепловентилятора не требуется, то можно использовать «упрощенный» подход к расчету тепловых параметров завес или тепловентиляторов с водяными теплообменниками. То есть рассматривать C_k как некоторую константу C_{ko} , которая определяет основные тепловые параметры воздушной завесы или тепловентилятора с водяным теплообменником при работе на некоторой фиксированной скорости вентилятора. Тогда, определив и усреднив значения C_{ko} при нескольких известных наборах входных параметров (значениях расхода воды, температур воды на входе и выходе теплообменника и температуры окружающего воздуха), можно через эту полученную среднюю C_{ko} затем приближенно

рассчитать для завесы или тепловентилятора расход воды, тепловую мощность и температуру воды на выходе теплообменника для имеющихся на объекте других входных параметров по формулам:

$$G(T_x) = C_{\text{к0}} \times \frac{T_x - T_0}{T_r - T_x}; \quad (5)$$

$$Q(T_x) = 4,2 \times C_{\text{к0}} \times (T_x - T_0); \quad (6)$$

$$Q(G) = 4,2 \times \frac{G \times C_{\text{к0}}}{G + C_{\text{к0}}} \times (T_r - T_0); \quad (7)$$

$$T_x(G) = \frac{G \times T_r + C_{\text{к0}} \times T_0}{G + C_{\text{к0}}}. \quad (8)$$

Эти формулы получены с использованием уравнения теплового баланса по воде (2).

Физический смысл параметра $C_{\text{к0}}$ заключается в следующем. Параметр $C_{\text{к0}}$ примерно равен расходу воды через теплообменник, когда значение температуры воды на выходе теплообменника оказывается посередине между значениями входных температур воды и воздуха.

В области средних и больших расходов воды, при $G > C_{\text{к}}$, то есть в рабочей области большинства завес и тепловентиляторов, величина $C_{\text{к}}$ практически не меняется и переходит в константу. Для турбулентного течения воды при малых расходах воды по мере уменьшения расхода, когда $G < C_{\text{к}}$, величина $C_{\text{к}}$ перестает быть независимой от расхода и начинает расти. При этом тепловая мощность завесы или тепловентилятора, рассчитанная при малых расходах воды с помощью $C_{\text{к0}}$ как константы, оказывается заниженной по сравнению с реальной тепловой мощностью прибора. Ошибка в значении мощности может достигать 10% и более. Если же рассматриваемые малые расходы воды попадают в область перехода течения из турбулентного в ламинарное, то по мере уменьшения расхода значение $C_{\text{к}}$ вместо роста может начать снижаться.

Формулы (5) — (8), в которые входит $C_{\text{к}} = C_{\text{к0}}$, будут справедливы даже с учетом имеющейся слабой зависимости $C_{\text{к}}$ от расхода воды G :

$$G = C_{\text{к}}(G) \times \frac{T_x - T_0}{T_r - T_x}; \quad (9)$$

$$Q = 4,2 \times C_{\text{к}}(G) \times (T_x - T_0); \quad (10)$$

$$T_x = \frac{G \times T_r + C_{\text{к}}(G) \times T_0}{G + C_{\text{к}}(G)}; \quad (11)$$

$$Q = 4,2 \times \frac{G \times C_{\text{к}}(G)}{G + C_{\text{к}}(G)} \times (T_r - T_0). \quad (12)$$

В сущности, выражение (12) можно рассматривать как формулу Ньютона — Рихмана применительно к теплообменникам. В ней разность входных температур $(T_r - T_0)$ представляет температурный напор между средами, а выражение

$$4,2 \times \frac{G \times C_{\text{к}}(G)}{G + C_{\text{к}}(G)}$$

определяет коэффициент теплоотдачи теплообменника и его зависимость от расхода воды через теплообменник. Для теплообменников отсутствует пропорциональная зависимость мощности теплообменника от площади теплообменника: мощность теплообменника изменяется непропорционально удлинению или укорочению длины трубок теплообменника. Зависимость мощности теплообменника от реальной площади теплообменника «спрятана» в коэффициенте $C_{\text{к}}$, характеризующем тепловые свойства теплообменника.

Приведем еще несколько выражений с $C_{\text{к}}(G)$, которые могут быть полезны:

$$(T_r - T_x) = \frac{C_{\text{к}}(G)}{G + C_{\text{к}}(G)} \times (T_r - T_0); \quad (13)$$

$$(T_x - T_0) = \frac{G}{G + C_{\text{к}}(G)} \times (T_r - T_0); \quad (14)$$

$$\frac{T_r - T_x}{T_x - T_0} = \frac{C_{\text{к}}(G)}{G}. \quad (15)$$

«Температурный» подход к определению зависимости $C_{\text{к}}$ от расхода воды

Если все же требуется большая точность при расчете тепловых параметров завесы или тепловентилятора с водяным теплообменником, то следует учитывать имеющуюся слабую зависимость $C_{\text{к}}$ от расхода воды. Алексей Пухов из компании «Тропик» предложил учитывать эту зависимость через замену в выражении (6) части величины T_x на величину T_r и введя вместо $C_{\text{к0}}$ две новые константы — C и α [6] (условно назовем такой подход «температурным»):

$$Q(T_x) = 4,2 \times C \times [\alpha \times T_r + (1 - \alpha) \times T_x - T_0] = 4,2 \times C \times [(T_x - T_0) + \alpha \times (T_r - T_x)], \quad (16)$$

где C и α — некоторые константы, характеризующие тепловые свойства теплообменника завесы или тепловентилятора при работе их на некоторой скорости вентилятора.

Выражение (16) существенно лучше, чем использующее константу $C_{\text{к0}}$ выражение (6), может описывать тепловую мощность теплообменника при малых расходах воды через теплообменник почти до расхода $G = \alpha \times C$. Сравнение выражений (6) и (16) показывает, что фактически роль $C_{\text{к}}$ при «температурном» подходе выполняет выражение:

$$C_{\text{к}}(T_x) = C \times \left(1 + \alpha \times \frac{T_r - T_x}{T_x - T_0}\right). \quad (17)$$

Эта зависимость $C_{\text{к}}$ от расхода воды G неявная, через температуру воды на выходе теплообменника T_x . Приравняв выражения (4) и (17), можно получить, что

$$T_x(G) = \frac{T_r \times (G - \alpha \times C) + T_0 \times C}{(G - \alpha \times C) + C}. \quad (18)$$

Тогда

$$T_x - T_0 = \frac{(G - \alpha \times C)}{(G - \alpha \times C) + C} \times (T_r - T_0); \quad (19)$$

$$T_r - T_x = \frac{C}{(G - \alpha \times C) + C} \times (T_r - T_o); \quad (20)$$

$$\frac{T_r - T_x}{T_x - T_o} = \frac{C}{(G - \alpha \times C)}; \quad (21)$$

$$Q(G) = 4,2 \times \frac{C \times G}{(G - \alpha \times C) + C} \times (T_r - T_o); \quad (22)$$

$$G(T_x) = C \times \left(\alpha + \frac{T_x - T_o}{T_r - T_x} \right); \quad (23)$$

$$C_k(G) = \frac{C \times G}{G - \alpha \times C}, \text{ или} \quad (24)$$

$$C_k(G) = C \times \left(1 + \frac{\alpha \times C}{G - \alpha \times C} \right). \quad (25)$$

При больших расходах воды, когда $G \gg \alpha \times C$, C_k переходит в константу, равную C .

Из выражения (19) следует, что при таком расходе воды, когда $G < \alpha \times C$, разность температур ($T_x - T_o$) становится отрицательной, что не может иметь место в реальности, так как если температура воды на входе теплообменника выше температуры окружающего воздуха, то температура воды на выходе теплообменника не может быть ниже температуры окружающего воздуха. Таким образом, при очень малых расходах воды через теплообменник уже нельзя рассматривать C как величину, не зависящую от расхода воды G . Следует, однако, отметить, что в реальности обычно имеют дело с расходами $G \gg \alpha \times C$. При расходах, меньших C (или $C_{к0}$), тепловая мощность завес и тепловентиляторов резко падает и их использование становится неоправданным.

Рассчитать значения параметров C и α для конкретного теплообменника можно по координатам двух точек — ($G_1, C_{к1}$) и ($G_2, C_{к2}$), — через которые должна проходить аппроксимационная кривая (24), с помощью следующих формул:

$$C = \frac{C_{к1} \times C_{к2} \times (G_2 - G_1)}{C_{к1} \times G_2 - C_{к2} \times G_1}; \quad (26)$$

$$\alpha = \frac{G_1 \times G_2 \times (C_{к1} - C_{к2})}{C_{к1} \times C_{к2} \times (G_2 - G_1)} \quad (27)$$

**«Расходовой» подход
к определению зависимости
 C_k от расхода
воды**

Избежать недостатка «температурной» аппроксимации (17), когда температура воды на выходе теплообменника при очень малых расходах оказывается ниже температуры окружающего воздуха, можно, если задать слабую зависимость C_k от G , например, в следующем виде («расходовой» подход):

$$C_k(G) = C \times \left(1 + \frac{m}{G + n} \right), \quad (28)$$

Здесь константа C остается той же, что и при «температурном» подходе в выражении (25), но константа α в знаменателе дроби меняет знак и для определенности заменяется на константу n , а произведение констант $\alpha \times C$ в числителе дроби выражения (25) заменяется новой константой m . Благодаря этому можно для конкретного теплообменника по экспериментальным данным предлагать более точную аппроксимацию зависимости от расхода воды параметра C_k и других параметров теплообменника даже при малых расходах воды и в районе перехода течения из турбулентного в ламинарный. В качестве недостатка можно отметить, что в отличие от «температурного» подхода при «расходоном» подходе выражения для тепловой мощности Q и параметра C_k имеют более сложный вид, в случае когда в качестве переменной выступает температура воздуха на выходе теплообменника T_x . Хотя при расчете параметров с помощью компьютера это не должно быть большим препятствием.

Расчет значений параметров C , m и n можно произвести по координатам трех точек — ($G_1, C_{к1}$), ($G_2, C_{к2}$) и ($G_3, C_{к3}$), — через которые должна пройти аппроксимационная кривая (28), с помощью следующих формул:

$$n = \frac{P_{23} \times G_3 - P_{12} \times G_1}{P_{12} - P_{23}}; \quad (29)$$

$$C = C_{к1} - \frac{P}{G_1 + n}; \quad (30)$$

$$m = \frac{P}{C}; \quad (31)$$

где

$$P_{12} = \frac{C_{к1} - C_{к2}}{G_2 - G_1}; \quad P_{23} = \frac{C_{к2} - C_{к3}}{G_3 - G_2}$$

$$P = P_{12} \times (G_1 + n) \times (G_2 + n)$$

Ниже приводятся формулы для представленных трех подходов к расчету основных тепловых параметров завес и тепловентиляторов с водяными теплообменниками.

**«Упрощенный»
подход**

$$C_k = C_{к0} = const;$$

$$Q(T_x) = 4,2 \times C_{к0} \times (T_x - T_o); \quad (32)$$

$$Q(G) = 4,2 \times \frac{G \times C_{к0}}{G + C_{к0}} \times (T_r - T_o); \quad (33)$$

$$T_x(G) = \frac{G \times T_r + C_{к0} \times T_o}{G + C_{к0}}; \quad (34)$$

$$G(T_x) = C_{к0} \times \frac{T_x - T_o}{T_r - T_x}. \quad (35)$$

«Температурный» подход

$$C_k(T_x) = C \times \left(1 + \alpha \times \frac{T_r - T_x}{T_x - T_o}\right); \quad (36)$$

$$C_k(G) = \frac{C \times G}{G - \alpha \times C} = C \times \left(1 + \frac{\alpha \times C}{G - \alpha \times C}\right); \quad (37)$$

$$Q(T_x) = 4,2 \times C \times [(T_x - T_o) + \alpha \times (T_r - T_x)]; \quad (38)$$

$$Q(G) = 4,2 \times \frac{C \times G}{(G - \alpha \times C) + C} \times (T_r - T_o); \quad (39)$$

$$T_x(G) = \frac{T_r \times (G - \alpha \times C) + T_o \times C}{(G - \alpha \times C) + C}; \quad (40)$$

$$G(T_x) = C \times \left(\alpha + \frac{T_x - T_o}{T_r - T_x}\right). \quad (41)$$

«Расходоный» подход

$$C_k(G) = C \times \left(1 + \frac{m}{G + n}\right); \quad (42)$$

$$Q(G) = 4,2 \times \frac{G \times C \times (m + G + n)}{G \times (G + n) + C \times (m + G + n)} \times (T_r - T_o); \quad (43)$$

$$T_x(G) = \frac{G \times (G + n) \times T_r + C \times (m + G + n) \times T_o}{G \times (G + n) + C \times (m + G + n)}; \quad (44)$$

$$G(T_x) = \frac{1}{2} \times (C \times p - n) + \sqrt{\frac{1}{4} \times (C \times p - n)^2 + C \times p \times (m + n)}, \quad (45)$$

$$\text{где } p = \frac{T_x - T_o}{T_r - T_x}.$$

Литература

1. Бялый Б.И. Тепломассообменное оборудование воздухообрабатывающих установок ООО «ВЕ-ЗА». Москва, 2005.
2. Лыцев С.А. Расчет тепловых характеристик водяных воздухоподогревателей. Журнал «Инженерные системы АВОК Северо-Запад» № 4, 2013.
3. Пухов А.В. Мощность тепловой завесы при произвольных расходах теплоносителя и воздуха. Журнал «Мир климата» № 80.
4. А.В. Пухов, Мощность тепловой завесы при произвольных расходах теплоносителя и воздуха. (Инварианты процесса теплопередачи в воздушных завесах.) Журнал «Мир климата» № 82.
5. Лыцев С.А., Азин А.В. Методика оценочного расчета тепловых параметров водяных завес. Журнал «Мир климата» № 76.
6. Пухов А.В. Мощность тепловой завесы с жидким теплоносителем в общем случае. Журнал «Мир климата» № 78.

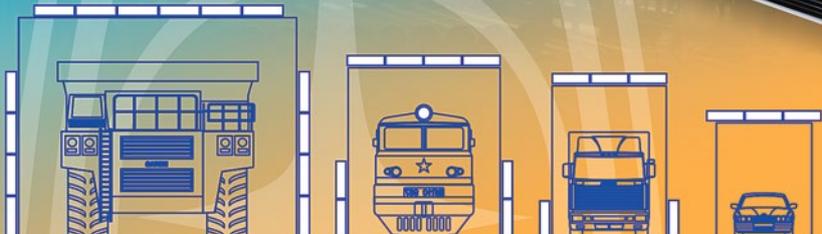
С. А. Лыцев,
ЗАО «Антарес ПРО»

ВОЗДУШНЫЕ ЗАВЕСЫ АНТАРЕС®

НАДЕЖНАЯ ЗАЩИТА ВОРОТ

- КОМПАКТНОСТЬ
- ВЫСОКАЯ СКОРОСТЬ ПОТОКА
- ВЫСОКАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ






www.antar.ru