

МОЩНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ЗАВЕСЫ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ РАСХОДАХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ВОЗДУХА

(Инварианты процесса теплопередачи в воздушных завесах)

В статье «Мощность тепловой завесы при произвольных расходах теплоносителя и воздуха. Интерпретация опытных данных» («Мир климата» № 80) мощности тепловых завес для двух различных воздушных расходов выражались в виде:

$$W=C_1(T_x-T_0+\alpha_1\Delta T_w), \text{ при } g=g_1 \quad (1)$$

$$W=C_2(T_x-T_0+\alpha_2\Delta T_w), \text{ при } g=g_2 \quad (2)$$

Здесь g_1 и g_2 — воздушные расходы (кг/с), C_1 и C_2 — некоторые коэффициенты теплообмена размерности кВт/К, α_1 и α_2 — безразмерные коэффициенты. Для определенности всегда будем считать $g_1 > g_2$. T_x , T_0 и $\Delta T_w = T_r - T_x$ — соответственно, температуры холодной (обратной) воды, воздушного окружения завесы и перепад температур воды в теплообменнике воздушной завесы. Температуры будем измерять в градусах по шкале Цельсия (так как во все формулы данной статьи температуры входят только в виде одной или нескольких температурных разностей, не будет ошибкой измерять их и в градусах Кельвина). Формулы (1) и (2) подразумевают, что расход теплоносителя G (кг/с) воздушной завесы, который не входит в эти формулы явно, учитывается в них через соотношения температур и может изменяться в широких пределах рабочих областей. Важно лишь, чтобы он оставался за пределами очень малых расходов [1]. Математически это условие можно выразить соотношениями:

$$G \geq 3Ca/c_w \quad (3)$$

для каждого из значений воздушного расхода, где c_w — это теплоемкость воды 4,2 кДж/кгК. Это ограничение не является существенным при описании воздушных завес, поскольку оно перестает выполняться для воздушных завес лишь для расходов, значительно ниже расчетных. Подробнее этот вопрос будет обсуждаться в заключительной статье этого цикла, которая также будет опубликована в одном из следующих номеров журнала. Остановимся и на физическом смысле коэффициентов C и α . Если придерживаться определений, принятых в работах [2] и [3], то C можно интерпретировать как усредненный по всей поверхности теплообмена коэффициент теплопередачи, а значение α вводится так, что выражения в скобках (1) и (2) это и есть эффективные разности температур теплообмена [1]. Структу-



*Алексей Пухов, технический директор
компании «ТРОПИК»*

ра выражений (1) и (2) показывает, как изменяются эффективные разности температур при изменении воздушного расхода и расхода теплоносителя. Заметим, что в работах [2] и [3] явный вид выражений для указанной здесь температурной разности не приводился.

Набор значений C_1 , C_2 , α_1 и α_2 для некоторых значений воздушных расходов g_1 и g_2 оказывается уникальным для каждой испытанной воздушной завесы. К тому же, для всех завес выполняется условие «насыщения» теплопередачи — коэффициент C растет медленнее, чем g : $C_1 g_2 < C_2 g_1$ [1]. Для произвольного воздушного расхода g мощность некоторой воздушной завесы может быть представлена в виде:

$$W=C_g(T_x-T_0+\alpha_g\Delta T_w), \quad (4)$$

где коэффициенты C_g и α_g в точности равны C_1 и α_1 при $g=g_1$ и C_2 и α_2 при $g=g_2$, а при других значениях расхода принимают, возможно, некоторые промежуточные значения. Представление явного вида для этих коэффициентов для любой рассматриваемой тепловой завесы позволило бы выразить мощность этой завесы для любых внешних условий, любых расходов теплоносителя и воздуха и любых температур теплоносителя, что является одной из основных декларируемых задач этого цикла статей.

Выражения (1) и (2), взятые вместе, видимо, несут в себе всю информацию о поведении тепловой завесы при любых возможных условиях ее использования (таким образом, определяя общее число «степеней свободы» для мощности теплообмена, не превышающее 4-х). Возможно, они определяют важные инварианты теплообмена для каждой конкретной завесы, то есть такие величины, которые уже не зависят от произвольно выбранных точек воздушного расхода g_1 и g_2 . Для проверки этого предположения попытаемся привести выражения (1) и (2) к более общему виду, из которого можно будет получить эти инварианты.

В качестве некоторой аналогии можно привести процесс построения теоретической механики, которая по сути своей не выходит за рамки уравнения динамики материальной точки ($F = ma$), дополненного некоторым отношением симметрии взаимодействия ($F_{ik} = -F_{ki}$) в различных по виду внешних силовых полях и при наложении определенных связей. Важно то, что эти два закона и составляют всю смысловую часть механики. В рамках этой аналогии уравнения (1) и (2) или в общем случае (4) можно рассматривать как «закон динамики» изучаемых нами здесь теплообменных систем, а (3) — как условие его применимости. Хотя приведенную аналогию и не следует воспринимать буквально, дальнейшее рассмотрение продемонстрирует ее оправданность и в том, что касается дополнения «закона динамики» определенным отношением симметрии.

Сначала попытаемся преобразовать (1) таким образом (смысл этого станет ясен из дальнейшего), чтобы в нем явно присутствовала и разность температур воздуха, проходящего через теплообменник работающей завесы: $\Delta T = T - T_0$, здесь T — среднemasсовая температура воздуха на выходе из сопла воздушной завесы. А именно, представим (1) в виде:

$$W = B_1 (T_x - T_0 + \alpha_1 \Delta T_w - \beta \Delta T), g = g_1, \quad (5)$$

где B_1 — величина такой же размерности, как и C (кВт/К), а β — некоторая безразмерная величина. Покажем, что для фиксированного расхода g_1 это можно сделать всегда, причем β можно выбрать любым наперед заданным числом, меньшим числа cg_1/C_1 (c — величина теплоемкости воздуха, равная приблизительно 1,005 кДж/кгК для условий, реализующихся при работе тепловых завес). Действительно, если представить B_1 как функцию от β в виде:

$$B_1 = C_1 / (1 - \beta C_1 / cg_1), \quad (6)$$

то при $g = g_1$, то есть всегда, когда справедливо (1), оно может быть представлено в виде (5) для любого расхода теплоносителя G , любого $\beta < cg_1/C_1$ и для любого совместимого с данным расходом G набора температур ($T_x, T_0, \Delta T_w, \Delta T$) или же, что полностью этому эквивалентно, для любого совместимого набора (T_x, T, T_0). Аналогичным образом можно преобразовать и выражение (2), справедливое для другого фиксированного расхода воздуха g_2 :

$$W = B_2 (T_x - T_0 + \alpha_2 \Delta T_w - \beta \Delta T), g = g_2, \quad (7)$$

$$\text{где } B_2 = C_2 / (1 - \beta C_2 / cg_2), \beta < cg_2 / C_2 \quad (8)$$

В выражениях (6) и (8) β может быть любым фиксированным числом, меньшим cg_2/C_2 . При $\beta < cg_2/C_2$ выражение (6) также будет иметь смысл, поскольку при росте g коэффициент C растет медленнее, чем g . Теперь зафиксируем значение β равное числу β_0 :

$$\beta_0 = (C_1 - C_2) cg_1 g_2 / (C_1 C_2 (g_1 - g_2)). \quad (9)$$

Используя неравенство $C_1 g_2 < C_2 g_1$ легко показать, что $\beta_0 < cg_2/C_2$. При таком выборе числа β величины B_1 из (6) и B_2 из (8) станут равными, и их значение будет составлять величину:

$$B_0 = B_1 = B_2 = C_1 C_2 (g_1 - g_2) / (C_2 g_1 - C_1 g_2). \quad (10)$$

Как следует из физического смысла выражений для мощности (5) и (7), коэффициенты B_1 и B_2 всегда положительны. Из выражения (10) следует, что B_0 положителен тогда и только тогда, когда коэффициент C растет медленнее, чем расход g ($C_1 g_2 < C_2 g_1$). Это означает, что получено непротиворечивое обобщение для выражений (1) и (2) в виде:

$$W = B_0 (T_x - T_0 + \alpha \Delta T_w - \beta_0 \Delta T), \quad (11)$$

где B_0 , которое больше нуля, и β_0 выражаются соотношениями (9) и (10). Это выражение справедливо для всевозможных расходов теплоносителя при обоих фиксированных значениях воздушного расхода, а единственный переменный коэффициент α принимает для двух вышеуказанных расходов воздуха значения α_1 и α_2 . Используя выражение для мощности $\Delta T = W/cg$, можно привести (11) к следующему виду:

$$W = B_0 (T_x - T_0 + \alpha \Delta T_w) / (1 + \beta_0 B_0 / cg). \quad (12)$$

Можно и несколько другим способом произвести преобразования выражения (11), а именно используя соотношения для мощности $W = \Delta T cg$ и $W = \Delta T_w c_w G$:

$$W = (T_x - T_0) / (1/B_0 - \alpha/Gc_w + \beta_0/gc). \quad (13)$$

В знаменателях дробей с числителями α и β_0 стоят тепловые эквиваленты теплоносителя и воздуха соответственно. Разные знаки этих дробей свидетельствуют о том, что теплота передается от одного носителя другому. И в заключение рассмотрения этого интуитивного подхода выскажем предположение, что величины B_0 и β_0 являются инвариантами процесса теплопередачи и важными характеристиками воздушных завес. То есть эти величины однозначно определяются самой воздушной завесой, а не условиями ее использования. Физический смысл B_0 можно определить как максимально возможное теоретическое значение усредненного коэффициента теплопередачи C (∞), то есть C при «бесконечно большом» воздушном расходе. Этот факт является следствием соотношений (6) и (8). Соответственно формула (4) для этого предельного случая примет вид:

$$W=C(\infty)(T_x-T_0+\alpha(\infty)\Delta T_w), \quad (14)$$

где $C(\infty)=B_0$.

Если в ней, к тому же, произвести предельный переход и к бесконечно большому водяному расходу в виде $T_x \rightarrow T_g$, то получим:

$$W=C(\infty)(T_g-T_0), \quad (15)$$

где $C(\infty)=B_0$.

Смысл этой последней формулы достаточно прост: при бесконечно больших расходах, как теплоносителя, так и воздуха, первый, проходя через теплообменник, не успевает хоть сколько-нибудь охладиться, а второй — нагреться, даже при передаче некоторой конечной величины мощности. Соответственно, эффективной разностью температур теплообмена станет в точности разность температурами горячей воды и холодного воздуха, а $C(\infty)=B_0$ — это усредненный коэффициент теплообмена для этих условий. Большую мощность тепловая завеса передать не в состоянии даже теоретически. Для завес 1, 2, 3 и 4, рассмотренных в [1], с помощью формулы (10) получим значения B_0 : 0,311 кВт/К, 0,842 кВт/К, 1,100 кВт/К и 2,180 кВт/К соответственно. Еще одно интересное замечание заключается в том, что B_0 — это возможный инвариант, характеристика лишь *материалов и геометрии* воздушной завесы (главным образом ее теплообменника). Она не зависит ни от мощности насосов, прокачивающих теплоноситель, ни от мощности двигателя завесы, обеспечивающего воздушный поток через завесу. Следует также отметить, что хотя по своему физическому смыслу B_0 выражает гипотетическую теплопередачу при невозпроизводимом бесконечном расходе воздуха, этот коэффициент является основным для теплопередачи именно в рабочих диапазонах завесы. Это следует из формулы (11), которая приводит к точным значениям мощности теплопередачи для двух вышеуказанных значений расхода воздуха. Можно поинтересоваться смыслом приведения (1) и (2) к виду (11) с использованием коэффициента B_0 . Ведь в результате этих преобразований не последовало явного упрощения выражения для теплопередачи. Ответ заключается в том, что все коэффициенты (11), за исключением α , не зависят от величины расхода воздуха во всем рабочем диапазоне параметров воздушной завесы, а не только для двух фиксированных воздушных расходов. Этот факт будет доказан с помощью строгого рассмотрения в дальнейшем.

Если для двух значительно различающихся воздушных расходов значения чисел α_1 и α_2 достаточно близки по абсолютной величине, то оба эти значения можно будет приблизить некоторым средним α_0 , и формула (12) станет универсальной для обоих воздушных расходов g_1 и g_2 :

$$W \approx B_0 (T_x-T_0+\alpha_0\Delta T_w) / (1+\beta_0 B_0/cg). \quad (16)$$

Если же кроме этих фиксированных воздушных расходов можно будет установить еще и некоторый промежуточный расход воздуха, то можно предположить, что (16) будет с хорошей степенью точности приближать мощность и при этом (в общем случае плавно изменяемом) расходе.

На этом завершим интуитивное рассмотрение, приведенное здесь для простого наглядного объяснения закономерностей теплообмена, и перейдем к строгому теоретическому подходу, который, во-первых, позволит доказать все высказанные выше предположения, а во-вторых, приведет к дополнительным интересным соотношениям. Единственный недостаток этого подхода заключается в большом объеме вычислительной работы.

Сначала попробуем дополнить наш аналог «уравнений динамики» в виде (1) и (2) или в общем случае (4) искомым отношением симметрии. Пусть имеем две среды 1 и 2, которые обмениваются теплом через поверхность обычного рекуперативного теплообменника. Обозначим через G_1 и G_2 секундные массовые расходы этих сред, T_1^0 и T_1 — начальную и конечную температуры первой среды и c_1 — ее теплоемкость, а через T_2^0 и T_2 и c_2 — соответственно, то же для второй среды. Тогда выражение для мощности теплообмена (4) в этих обозначениях, если среду 1 считать теплоносителем (водой), а среду 2 воздухом, примет вид:

$$W=F(G_2)(T_1-T_2^0+f(G_2)(T_1^0-T_1)), \quad (17)$$

где F и f — некоторые неизвестные пока функции, а области по G_1 и G_2 применимости (17) по аналогии с (3) определяются выражением:

$$G_1 \geq 3F(G_2, \max) f(G_2, \max) / c_1, \quad (18)$$

где значения F и f взяты именно при максимальном расходе G_2 , так как первая из функций растет быстрее, чем вторая падает [1]. Заметим, что изначально индексы 1 и 2 были выбраны произвольно, вследствие чего их можно поменять местами. Более того, можно предположить, что (17) и (18) — это общие соотношения, справедливые для любых двух взаимодействующих сред в обычном рекуперативном теплообменнике, независимо от того, рассматривать ли воду как среду 1 или 2. Тогда при перестановке индексов вид соотношений (17) и (18) останется прежним, за исключением того, что аргумент функций F и f будет представлен с точностью до теплоемкостей сред или же некоторого соотношения двух теплоемкостей. Итак, учитывая все вышеуказанные соображения, для нашего частного случая полностью «симметричный» аналог формулы (4), которую можно считать основной для определения мощности воздушной завесы, примет вид:

$$W=D'_G(T_g-T+\delta'_G\Delta T), \quad (19)$$

где D'_G и δ'_G — некоторые функции водяного расхода. Для большего удобства последнюю формулу

можно с помощью несложных преобразований привести к виду:

$$W = D_G (T_x - T_0 - \delta_G \Delta T), \quad (20)$$

где D_G и δ_G — также функции водяного расхода (некоторые аналоги тех же размерностей, как и C_g и α_g соответственно), явный вид которых нас пока не интересует. Зависимость (19) была приведена к виду (20) для того, чтобы, во-первых, исключить из этого выражения T в явном виде (это самая сложноизмеримая из всех величин при тепловых измерениях воздушных завес), а во-вторых, чтобы сохранить главную «опорную разность» $T_x - T_0$, которая уже встречалась в (4) в неизменном виде.

Предположение, что для воздушных тепловых завес с высокой точностью выполняется соотношение (20), было выведено здесь теоретически, исходя из предположения симметрии соотношений теплообмена (17) при взаимной перестановке местами индексов обменивающихся теплом сред. Так как (20) наряду с (4) сыграет важную роль в дальнейших преобразованиях, естественно найти прямое опытное подтверждение этой формуле. К сожалению, опубликованные данные измерений для воздушных завес не могут предоставить материал для проверки этой формулы по следующей причине: необходимы данные измеренной мощности для фиксированного расхода теплоносителя G на множестве различ-

ных воздушных расходов (желательно большем, чем 3 расхода). Обычно данные публикуются лишь для 2 воздушных расходов, как, например, те, что были использованы автором в [1]. Однако даже если эти данные были бы приведены для четырех или более воздушных расходов, то их все равно нельзя было бы использовать для обоснования (20). Дело в том, что обычно все данные приводятся для некоторого набора температур (T_g , T_x , T_0). При различных воздушных расходах и сохранении этих трех температур неизменными изменяется и значение расхода теплоносителя G , постоянство которого необходимо для расчета коэффициентов в (20). И все же (20) удается подтвердить непосредственно.

(Продолжение этой статьи в следующем выпуске журнала «Мир климата»)

Использованная литература

1. Пухов А. В. *Мощность тепловой завесы при произвольных расходах теплоносителя и воздуха. Интерпретация опытных данных.* — М.: Мир климата № 80, 2013.
2. Кейс В. М., Лондон А. Л. *Компактные теплообменники.* — М.: Энергия, 1967.
3. Уонг Х. *Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров.* — М.: Атомиздат, 1979.

Алексей Пухов, компания «Тропик»



АССОЦИАЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ
ИНДУСТРИИ КЛИМАТА

СТАНЬ ПРОФЕССИОНАЛОМ!

ОБУЧЕНИЕ И ТРУДОУСТРОЙСТВО В КЛИМАТИЧЕСКОМ БИЗНЕСЕ

ПРОГРАММЫ ОБУЧЕНИЯ:

- Менеджер по продажам климатического оборудования;
- Монтажник систем вентиляции и кондиционирования;
- Руководитель сервисного центра;
- Основы проектирования систем вентиляции и кондиционирования;
- Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования;
- Специалист по сервису и ремонту.









125499, г. Москва,
Кронштадтский бульвар, д.35Б,

тел. (495) 225-22-42,
www.hvac-school.ru school@apic.ru