

МОЩНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ЗАВЕСЫ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ РАСХОДАХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ВОЗДУХА

Программа верификации воздушных завес на базе АПИК инициировала множество исследований, касающихся как процесса теплопередачи, так и поведения воздушных струй. И если основная цель верификации состоит в сравнении завес разных классов и производителей, то другим важным вопросом является определение характеристик уже исследованной завесы при некоторых заданных условиях ее использования. Эта статья открывает цикл публикаций, в котором будет представлено исследование мощности тепловой завесы с жидким теплоносителем в зависимости от значений произвольно выбранных параметров, включая воздушный расход.

Идея проведения этого исследования возникла у автора после состоявшегося на выставке «Мир Климата-2013» обсуждения возможностей обобщения подхода, предложенного в работе [1], для различных расходов воздуха. По мнению генерального директора ЗАО «Антарес ПРО» Сергея Анатольевича Лысцева, это должно было привести к получению новых закономерностей для тепловой мощности. В работах [1] и [2] тепловая мощность воздушных завес с жидким теплоносителем выражалась в виде функций всевозможных изменяющихся параметров. Исключением стал воздушный расход: для всех рассматриваемых воздушных завес было принято его максимальное значение. В данном исследовании автор будет придерживаться формы описания [2], где мощность воздушной завесы в наиболее общем виде выражается следующим образом:

$$W=4,2 (\alpha T_2 + (1-\alpha) T_x - T_0) C. \quad (1)$$

Здесь C и α — уникальные для каждой воздушной завесы константы, которые выражают ее мощность в расчетных пределах изменения температурных параметров в широком диапазоне значений расхода теплоносителя завесы. T_0 — температура воздушного окружения воздушной завесы, T_t и T_x — температуры поступающей и обратной воды тепловой завесы. При этом предположения и выводы работы [1] являются частными случаями более общих предположений и выводов работы [2] при выполнении предельного перехода $\alpha \rightarrow 0$, подразумевающего пренебрежение влиянием значений температуры прямой (горячей) воды T_t на процессы теплопередачи в воздушной завесе.

Излагаемый здесь специализированный подход вводит полуэмпирические зависимости, хорошо согласующиеся с опытными данными и позволяющие достаточно простым путем проводить точные расчеты параметров воздушных завес всех основных используемых типов. Так, введен-



Алексей Пухов, технический директор компании «ТРОПИК»

ный параметр C , очень слабо зависящий от расхода теплоносителя, фактически представляет собой общий усредненный по всей поверхности теплообмена коэффициент теплопередачи. Параметр же α , по сути, вводит применяемое при общем теоретическом подходе эффективное

усредненное значение разности температур между жидкостью и газом и коррелирует с общей эффективностью теплообменника.

Преобразуем выражение (1), используя обозначение для перепада значений температуры воды, проходящей через завесу $\Delta T_w = T_g - T_x$, и опустив везде далее размерный множитель 4,2 кДж/кгК, определяющий теплоемкость воды, учитывая его в C , что позволит переписать (1) в виде:

$$W = C (T_x - T_0 + \alpha \Delta T_w), \quad (2)$$

где C — константа размерности кВт/К, уникальная характеристика каждой воздушной завесы для максимального расхода воздуха, а α — некоторая безразмерная постоянная, которая обычно намного меньше единицы и характеризует воздушную завесу при максимальном расходе воздуха. Расход теплоносителя явно не присутствует в (2), но учитывается данным выражением через соотношения температур. Более того, на значения расхода G накладывается ограничение, которое можно получить непосредственно из (2). Для этого преобразуем (2), представив тепловую мощность в левой части в виде $c_w G \Delta T_w$, где c_w — теплоемкость воды, а правую часть — как комбинацию двух слагаемых, получим:

$$c_w G \Delta T_w = C (T_x - T_0) + \alpha \Delta T_w. \quad (3)$$

Рассмотрим поведение соотношения (3) при $G \rightarrow 0$. Учитывая, что при этом $T_x \rightarrow T_0$, получим для температурных выражений, входящих в (3), $\Delta T_w \rightarrow (T_g - T_0) \neq 0$, $(T_x - T_0) \rightarrow 0$. То есть левая часть (3), как и первое слагаемое его правой части, стремятся к нулю. Из этого следует, что и произведение $C\alpha$ при малых расходах не может оставаться постоянным и обязано стремиться к нулю. Из (3) можно оценить область изменения расхода теплоносителя, в которой применимы выражения для мощности (2) как $G \gg C\alpha/c_w$. На практике это условие сводится к следующему: по результатам испытаний при фиксированном воздушном расходе и двух расходах

теплоносителя определяются значения C и α , затем производится проверка, что оба эти расхода теплоносителя удовлетворяют условиям:

$$G_{1,2} \geq 3C\alpha/c_w. \quad (4)$$

При выполнении условия (4) можно считать, что точки для измерения характеристик завесы подобраны корректно, и с помощью (2) можно с высокой точностью выражать мощность завесы для фиксированного воздушного расхода и расходов теплоносителя, начиная от $G = 3C\alpha/c_w$. Если же значения расходов теплоносителя, для которых по (2) производится расчет, оказываются ниже $3C\alpha/c_w$, то формула (2) начинает давать завышенный по сравнению с реальностью результат. Большой проблемы это ограничение обычно не представляет — при таких низких расходах даже это завышенное значение, полученное по формуле (2), становится малым из-за близости T_x к T_0 , поэтому эти расходы выходят за рамки расчетных рабочих областей воздушных завес. Как уже было подробно рассмотрено в [2], выражение (1) и его аналог (2) удовлетворяют критерию подобия температурных полей при фиксированных расходах воздуха и теплоносителя [5]. Уравнение для мощности (2) также линейно по отношению к любым изменениям отдельных температур. Заметим, что, изменив любую из температур процесса теплопередачи в (2), мы уже не сможем применить принцип температурного подобия к измененным условиям теплопередачи, поскольку не будет наблюдаться эквивалентности всех расходов. Если на основе испытаний вычислить коэффициенты C и α для двух различных воздушных завес при максимальных воздушных расходах каждой из них, то эти завесы можно будет сравнить между собой по теплопроизводительности при одних и тех же условиях T_g , T_x и T_0 . Причем основным критерием сравнения будет выступать соотноше-

ние коэффициентов C , определяющих абсолютные величины теплопередачи при определенной температурной разности и способных изменяться для различных завес в очень широких пределах. Соотношение же величин α для воздушных завес может быть использовано для сравнения мощностей теплопередачи только при близких значениях C , и в целом влияние параметра α на величины передаваемой мощности значительно ниже, чем обусловленное коэффициентом C .

Что можно ожидать от закономерностей поведения воздушной завесы при изменении воздушного расхода? Из общих предположений следует, что коэффициенты C и α станут некоторыми функциями воздушного расхода, а сам вид выражения (2) при этом не изменится. Если воздушный расход завесы обозначить символом g (по аналогии с обозначением расхода теплоносителя G), то выражение (2) для случая произвольных величин не только расходов теплоносителя, но и воздуха, будет иметь вид:

$$W = C(g) (T_x - T_0 + \alpha(g) \Delta T_w), \quad (5)$$

где размерный коэффициент $C(g)$ и безразмерный $\alpha(g)$ есть некоторые функции воздушного расхода g . В самом простом случае двух фиксированных воздушных расходов g_1 и g_2 (будем считать, что $g_1 > g_2$), применяя обозначения $C(g_1) = C_1$, $C(g_2) = C_2$, $\alpha(g_1) = \alpha_1$ и $\alpha(g_2) = \alpha_2$, перепишем (3) в виде:

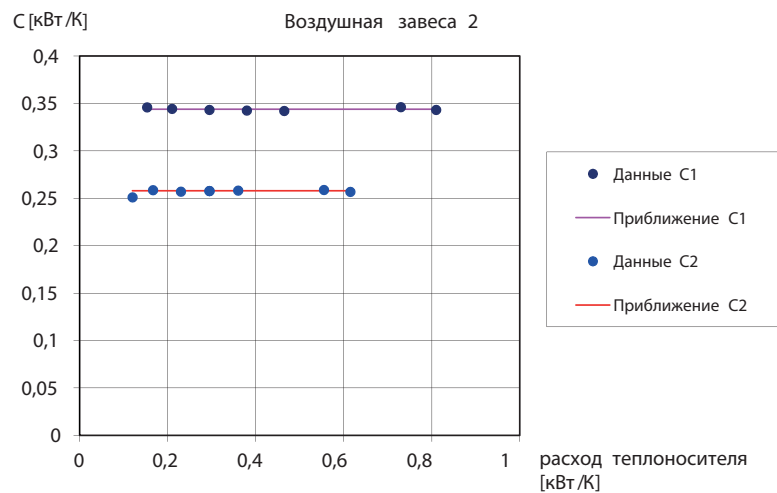
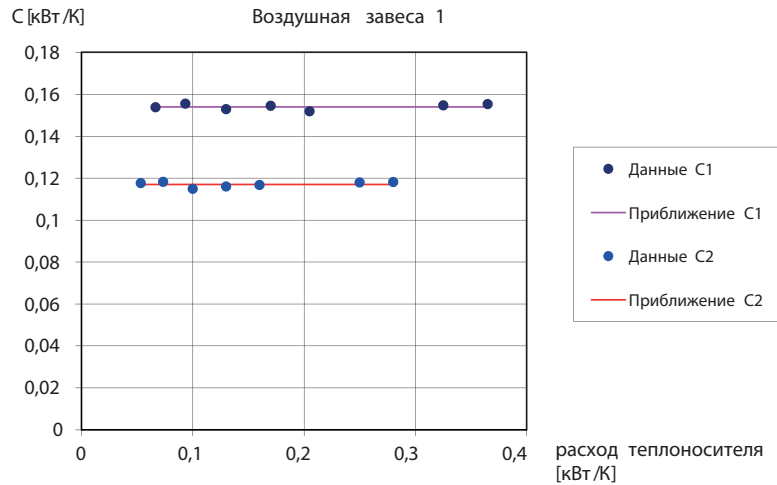
$$W = C_1 (T_x - T_0 + \alpha_1 \Delta T_w), \text{ при } g = g_1 \quad (6)$$

$$W = C_2 (T_x - T_0 + \alpha_2 \Delta T_w), \text{ при } g = g_2 \quad (7)$$

Если представить $g_1 = k g_2$, где $k > 1$, то можно ожидать, что $C_1 < k C_2$, что отражает факт насыщения теплопередачи при увеличении воздушного расхода, это условие также можно представить в виде: $C_2 g_1 > C_1 g_2$. Данный факт подтверждается опытными данными (часть из которых приводится ниже) для всех рассмотренных воздушных завес и является основным ограничением на коэффициенты теплопередачи воздушной завесы при переменном расходе воздуха завесы.

Итак, приступим к изложению опытных данных, из которых следует подтверждение закономерностей (6) и (7) для воздушных завес.

Вначале несколько слов о выборе экспериментального материала. Во-первых, автор почитал необходимым использовать опубликованные данные измерений мощностей, которые приведены для большого числа точек расхода теплоносителя и как минимум для двух различных расходов воздуха воздушных завес. К тому же во избежание субъективной окраски изложения автор умышленно не использовал здесь данные завес фирмы «Тропик», хотя они полностью подтверждают приведенные выше закономерности. Также не были использованы и опубликованные в каталогах данные, которые не выдерживают проверку на точность измерений. Принципиальная возможность такой проверки упоминалась в [2]. Более подробно можно указать, что необходимыми критериями точности приведенных данных являются непрерывность, гладкость и монотонное убывание введенного в работе [1] параметра S_k , рассчитанного по данным производителя, в зависимости от расхода теплоносителя при фиксированном расходе воздуха. Разрывность S_k (для не слишком значительно различающихся наборов температур теплоносителя), а именно заметно различные его значения для одного и того же расхода, вступает в прямое противоре-

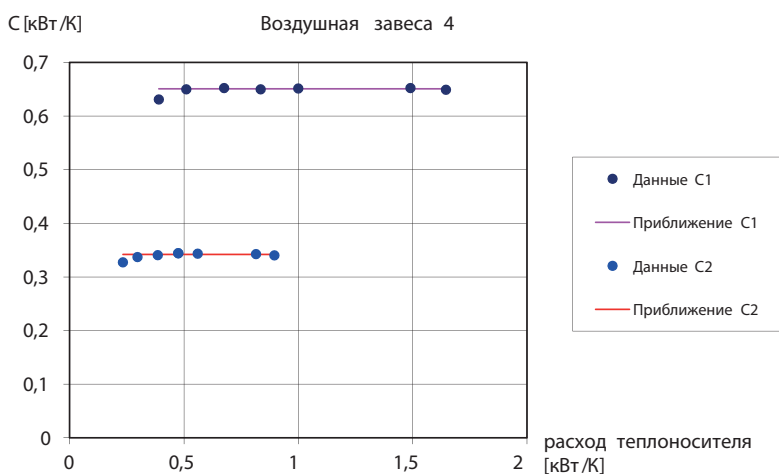
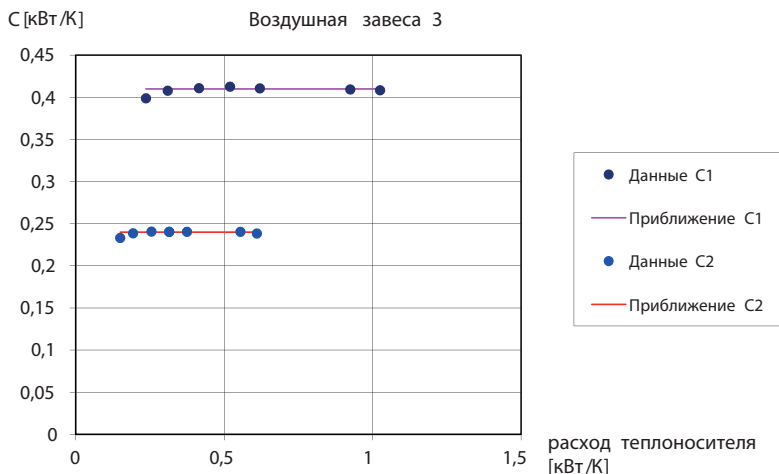


чие с принципом подобия температурных полей, реализующихся при фиксированных расходах теплоносителя и воздуха завесы. Согласно вышеуказанным причинам выберем данные, приведенные производителем воздушных завес, компанией Frisco, которые были представлены в России в каталогах фирмы [6]. Выпишем

представленные данные в виде таблицы, в которой воздушные завесы обозначены индексами от 1 до 4 (читатель легко самостоятельно сможет найти оригинальное название модели.), и для различных воздушных расходов представим значения мощностей, приведенных производителем. Воздушные расходы рассчитаем по приве-

Воздушные завесы			1		2		3		4	
$T_g, ^\circ\text{C}$	$T_x, ^\circ\text{C}$	$T_o, ^\circ\text{C}$	g_1	g_2	g_1	g_2	g_1	g_2	g_1	g_2
			0,413	0,254	0,699	0,447	0,575	0,270	0,810	0,354
80	60	15	7,3	5,6	16,2	12,3	20,5	12,2	32,9	17,9
80	60	20	6,5	5,0	14,6	11,1	18,5	11,1	29,8	16,3
60	40	15	4,1	3,2	9,3	7,2	12,4	7,5	20,0	11,2
60	40	20	3,4	2,7	7,7	5,9	10,4	6,3	16,9	9,5
55	35	15	3,3	2,6	7,6	5,9	10,3	6,3	16,7	9,5
55	35	20	2,6	2,0	5,9	4,6	8,3	5,1	13,5	7,7
60	30	15	2,8	2,2	6,3	5,0	9,3	5,8	15,3	8,9
60	30	20	2,0	1,6	4,6	3,6	7,1	4,5	11,7	7,0

Таблица. Мощности (кВт) при воздушных расходах (кг/с) и значениях T



денным значениям изменений воздушных температур (в таблицу последние не включены).

Модели воздушных завес 1 и 2, как будет видно из дальнейшего рассмотрения, имеют некоторое отличие от моделей 3 и 4. В [2] было высказано предположение, что, несмотря на малость α для всех рассмотренных в той статье завес, в принципе возможно существование моделей со значительно большими значениями α . Так вот, модели 3 и 4 как раз являются представителями воздушных завес со значительно большими значениями α . Исследование всего спектра возможностей позволит отыскать наиболее общие закономерности в поведении тепловых параметров воздушных завес. Как мы увидим ниже, для завес с большими абсолютными значениями α для самых малых табличных расходов может незначительно нарушаться условие (4) и реальные значения теплопередачи будут несколько ниже, чем рассчитанные по формулам

(6) и (7). Для нахождения C и α при каждом воздушном расходе для каждой из завес необходимо всего две точки измерений. Выберем данные точки произвольным образом при выполнении условия (4), учитывая, что произвол в выборе будет сказываться на изменении значений C с точностью до единиц процентов.

Заметим, что количество значащих цифр в исходных табличных данных, рассматриваемых здесь, не подразумевает исключительной точности. Если измерения выполнены с очень высокой точностью и количество измерений для расчета C и α , удовлетворяющих условию (4), больше двух, то для точной оценки C и α можно, например, воспользоваться программой их расчета по методу наименьшего среднеквадратичного отклонения.

Во всех нижеприведенных графиках ось абсцисс обозначает величину абсолютного массового расхода

теплоносителя (в нашем случае — воды), умноженного на его теплоемкость. Этот параметр, который также называют водяным эквивалентом, имеет размерность кВт/К.

Для приведенных в таблице расходов воздуха получим значения параметров C и α для этой завесы:

$C_1=0,154$ кВт/К, $C_2=0,117$ кВт/К, $\alpha_1=0,1$ и $\alpha_2=0,12$.

Для завесы 2 получим значения: $C_1=0,344$ кВт/К, $C_2=0,258$ кВт/К, $\alpha_1=0,11$ и $\alpha_2=0,145$.

Для завесы 3 получим значения: $C_1=0,410$ кВт/К, $C_2=0,240$ кВт/К, $\alpha_1=0,26$ и $\alpha_2=0,31$.

Для завесы 4 получим значения: $C_1=0,651$ кВт/К, $C_2=0,342$ кВт/К, $\alpha_1=0,285$ и $\alpha_2=0,38$.

Как мы видим, воздушные завесы 3 и 4 отличаются относительно большими значениями α . Вообще, такие воздушные завесы распространены значительно меньше, чем воздушные завесы с малыми α . Напомним, что данный параметр отражает степень влияния на теплопередачу в воздушной завесе температуры прямой (горячей) воды по сравнению с температурой обратной (холодной). При внимательном рассмотрении графиков завес 3 и 4 видно, что при малых расходах теплоносителя реальная теплопередача оказывается несколько ниже прогнозируемой. Этот факт выражается в нарушении соотношения (4) при достаточно малых расходах теплоносителя. Читателю предлагается самостоятельно найти минимальные расходы теплоносителя для двух воздушных расходов каждой из представленных воздушных завес, при которых соотношение (4) еще выполняется.

Как мы видим, приведенные графики демонстрируют для завес и с малыми и с большими значениями α полное соответствие гипотезам, выдвинутым в настоящей работе. То есть соотношения, предложенные в [2] для максимального расхода воздуха, подходят и для случая переменного расхода воздуха, только в этом случае величины C и α изменяются в зависимости от значения воздушного расхода завесы. Для всех рассмотренных нами завес были получены некоторые важные параметры, которые характеризуют мощность теплопере-

дачи, выражающуюся достаточно простыми формулами (6) и (7) для каждой из этих воздушных завес.

Внешне законченное и непротиворечивое проведенное рассмотрение в действительности оставляет неразрешенными множество вопросов. Выражения (6) и (7) задают значения тепловой мощности воздушной завесы лишь для двух фиксированных воздушных расходов. (Вообще, проведение данных измерений достаточно трудоемко даже для случая двух различных воздушных расходов.) При возможности реализации конструкцией воздушной завесы также и некоторого третьего воздушного расхода g_3 можно предположить необходимость дальнейших измерений для дополнения выражений (6) и (7) третьим аналогичным выражением с коэффициентами C_3 и α_3 , характеризующим воздушную завесу именно при этом расходе. Попытки получения аналитического вида для этих коэффициентов без дополнительных измерений привели автора к постановке большого количества задач, некоторые из них будут приведены ниже. (Будем считать, что расход теплоносителя при любых рассматриваемых здесь воздушных расходах может изменяться в широких пределах расчетной области.) Итак, перечислим возникающие существенные вопросы:

1. Является ли рассмотрение, при котором получены значения C_1 , C_2 , α_1 , α_2 , полным? То есть достаточно ли этих данных для полного описания всех свойств теплового поведения воздушной завесы при любых расчетных расходах теплоносителя и воздуха через воздушную завесу? Если же нет, то какие еще недостающие испытания воздушной завесы необходимо будет провести?
2. Как ведут себя величины $C(g)$ и $\alpha(g)$ из (5) в качестве функций воздушного расхода завесы? Существует ли какое-либо ограничение на поведение параметра α при изменении воздушного расхода завесы, аналогичное, например, по своему виду ограничению на параметр C в виде: $C_2 g_1 > C_1 g_2$, отражающему факт насыщения теплопередачи при росте воздушного расхода?
3. Допустим, что существует некоторый предел C_∞ величины C , то есть степени теплопередачи воздушной завесы при очень больших теоретических воздушных расходах завесы. Существует ли в этом случае связь между параметрами C_1 и α_1 , измеренными при максимальном реальном расходе, а именно как численное значение α_1 влияет на степень насыщения теплопередачи C_1/C_∞ ?
4. В формуле (2) слагаемое $\alpha \Delta T_w$ подразумевает влияние разности температур теплоносителя на входе в завесу и выходе из нее на мощность воздушной завесы. Можно ли формулу для тепловой мощности дополнить некоторым аналогичным слагаемым $\beta \Delta T$, где ΔT есть разность температур проходящего через завесу воздуха, при этом оставаясь в рамках логики выражений (6) и (7)? Данное слагаемое смогло бы отразить факт некоторой симметрии вода — воздух, реализующейся при теплопередаче в воздушной завесе.
5. Если на вопрос 4 имеется утвердительный ответ и существует некоторый коэффициент β (безразмерный по аналогии с α), который возможно вычислить исходя лишь из значений C_1 , C_2 , α_1 , α_2 , то сразу возникает следующий вопрос. Инвариантно ли значение этого коэффициента β , то есть является ли он характеристикой воздушной завесы, а не точек расходов или температур, используемых для испытаний данной воздушной завесы? Ведь значения коэффициента α не инвариантны, а являются функциями воздушного расхода завесы.
6. Можно ли предложить некоторый, симметричный относительно воды и воздуха, аналог формулы (5), например, в виде:

$$W = D(G)(T_x - T_0 - \delta(G)\Delta T), \quad (7)$$
 который с достаточной точностью представит зависимость мощности воздушной завесы уже для случая фиксированного расхода теплоносителя и произвольного воздушного расхода? А именно зависимость для всей рабочей области температур и расходов теплоносителя и воздуха от разности воздушных температур на выходе из завесы и входе в нее: $\Delta T = T - T_0$, а также от коэффициентов D_G и δ_G , являющихся уже функциями только расходов теплоносителя?
7. Если на вопрос 6 существует утвердительный ответ, то как связаны функции $D(G)$ и $C(g)$ из внешне схожих выражений (7) и (5)?
8. Существуют ли некоторые инвариантные значения расходов G_0 и g_0 , не зависящие от произвола выбора g_1 и g_2 , а являющиеся только характеристиками воздушной завесы? Наличие некоторого определенного значения g_0 автоматически означало бы наличие и определенных инвариантных значений C_0 и α_0 . Я попытаюсь ответить на эти вопросы в следующей части этой работы: «Инварианты процесса теплопередачи в воздушных завесах», которая будет опубликована в одном из следующих номеров журнала. Эти ответы в значительной степени смогут облегчить понимание сути процессов теплопередачи в воздушных завесах и представят множество интересных и нетривиальных соотношений параметров этой теплопередачи.

Алексей Пухов,
технический директор
компании «ТРОПИК»

Литература

1. «Методика оценочного расчета тепловых параметров водяных завес». Лысцев С. А., Азин А. В., журнал «Мир климата» № 76. 2012.
2. «Мощность тепловой завесы с жидким теплоносителем в общем случае». Пухов А., журнал «Мир климата» № 78. 2013
3. «Компактные теплообменники», Кейс В. М., Лондон А. Л., Москва, «Энергия», 1967
4. «Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров», Уонг Х., Москва, «Атомиздат», 1979.
5. «Основы теплопередачи». Михеев М. А., Издательство «Энергия», 1997.
6. Каталоги продукции FRICO (или www.frico-sales.ru).