

МОЩНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ ЗАВЕСЫ С ЖИДКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ

В данной статье, являющейся изложением доклада, прочитанного в рамках выставки «Мир Климата-2013», предлагается уточненный метод определения тепловой мощности воздушных завес с жидким теплоносителем. Этот эмпирический подход существенно повышает точность процедуры во всем рабочем диапазоне воздушных завес и является обобщением метода расчета, предложенного в статье «Методика оценочного расчета тепловых параметров водяных завес», опубликованной в журнале «Мир климата» № 76.

Предположим, что мощность, приходящаяся на конвекцию и излучение с поверхности корпуса работающей завесы, пренебрежимо мала по сравнению с мощностью, приходящейся на нагрев воздушной струи ($W_c + W_r \ll W$).

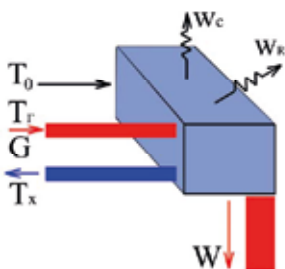


Рис. 1

В этом случае полезной мощностью воздушной завесы можно считать мощность охлаждения водяного потока, проходящего через теплообменник завесы: $W = 4,2(T_r - T_x)G$, (1) где T_r — температура поступающей воды, T_x — обратной, G — массовый расход воды, а множитель $4,2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{°C}$ — ее теплоемкость. Собственно, формула (1) выражает мощность не только воздушной завесы, но и любой теплообменной системы. Однако ниже будет показано, насколько может вводить в заблуждение механическое использование данного выражения, хотя само оно и не может быть подвергнуто сомнению. Выражение (1) к тому же не позволяет производить пересчеты мощности W при изменении температурных параметров даже в небольших окрестностях около некоторых условных начальных значений.

Рассмотрим воздушную завесу как черный ящик, входными параметрами которого являются G , T_r , T_x



Алексей Пухов, технический директор компании «ТРОПИК»

и T_0 (T_0 — воздушная температура окружающей среды), при этом $T_r > T_x > T_0$. Единственным выходным параметром «черного ящика» является W .

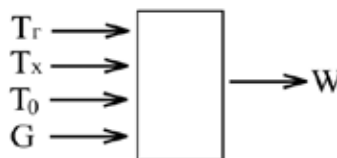


Рис. 2

Формулу (1) можно переписать в виде: $W = 4,2(T_r - T_x)G$, (при T_0). (2)

Выражение (2) означает, что мощность W производится данным «черным ящиком» при соответствующих входных параметрах T_r , T_x , G и T_0 . Будем считать воздушный поток завесы постоянным. Рассмотрим теперь, как данный ящик будет отвечать на поочередное изменение всех входных параметров.

Для начала, зафиксировав T_r и T_0 , попробуем уменьшить значение T_x , что приведет к увеличению разности $(T_r - T_x)$. Однако при фиксированных T_r и T_0 уменьшить T_x можно, лишь уменьшив расход G . Опыт показывает, что, несмотря на то что раз-

ность $(T_r - T_x)$ возрастет, G уменьшится еще более значительно для любых воздушных завес при любых начальных условиях и мощность W снизится.

Теперь зафиксируем T_r , T_x и уменьшим окружающую температуру до значения $T_0' < T_0$. Что произойдет с формулой (2)? Она перестанет работать в предельном выше виде и сможет быть записана как:

$$W' = 4,2(T_c - T_x)G', \quad (\text{при } T_0'), \quad (3)$$

где новые значения расхода G' и мощности W' будут больше своих начальных значений. И в этом случае очень мало практической пользы от выражений (1) или (2), так как нет никакой ясности в поведении функции $G'(T_0')$.

Наконец, зафиксировав значения T_x и T_0 , будем увеличивать T_r . Интуитивно мы будем ожидать увеличения мощности W в (2), однако опыт показывает, что она будет оставаться практически постоянной для всех воздушных завес, что явно противоречит здравому смыслу. Лишь при большом увеличении температуры прямой воды будет наблюдаться незначительное увеличение тепловой мощности W .

Приведенные опытные данные свидетельствуют, что наш «черный ящик» накладывает некоторые связи на свои входные параметры, и без понимания вида данных связей невозможно представить явную зависимость мощности от этих параметров. Формула (2) позволяет лишь снимать характеристики воздушных завес при некоторых условиях и предлагать их в виде таблиц со стандартными наборами температур.

Следует отметить еще одно интересное свойство этого «черного ящика». Оно является прямым следствием линейности уравнений теплопроводности (и вынужденной конвекции [2]) относительно температуры и заключается в существовании подобных температурных полей при фиксированном расходе. Поясним данные рассуждения. Пусть в (2) G постоянен. Изменим любые две температуры из T_r , T_x , T_0 произвольным образом, но так, чтобы вода сохраняла свое агрегатное состояние. Пусть, например, T_r' и T_0' — это некоторые новые значения двух температур. Тогда при значении третьей температур:

$$T_x' = T_0' + k(T_x - T_0), \quad \text{где } k = \frac{(T_c - T_0')}{(T_c - T_0)}, \quad (4)$$

очевидно, будет выполняться пропорциональность:

$$\frac{T_x' - T_0'}{T_x - T_0} = \frac{T_c - T_0'}{T_c - T_0} = \frac{T_c - T_x'}{T_c - T_x} = k, \quad (5)$$

и формулу (2) можно представить в виде:

$$W' = 4,2 k (T_c - T_x)G, \quad (\text{при } T_0'), \quad (6)$$

то есть мощность W' увеличится в k раз по сравнению с мощностью W начального состояния (2). При граничных условиях, определенных (5), температурные градиенты в каждой точке теплообменника увеличатся в k раз, и равенство (6) не вызывает сомнений. Это свойство температурного подобия может быть использовано как при измерениях характеристик воздушных завес, так и в качестве необходимого проверочного критерия для любых эмпирических и теоретических соотношений. Заметим, что в про-

цессах теплопередачи, где существенна роль свободной конвекции или излучения, например в радиаторах отопления, использовать подобие в виде (5) невозможно по причине нелинейности данных процессов.

Принцип температурного подобия также может являться независимым критерием оценки точности приведения табличных расходов и мощностей тепловых завес производителями.

Некоторое время назад специалистами компании ЗАО «Антарес ПРО» была предложена закономерность для мощности тепловой завесы в виде:

$$W \approx 4,2(T_x - T_0)C_k, \quad (7)$$

основанная на результатах измерений, где C_k — некоторая определяющая тепловую завесу константа. Несмотря на свой приближенный характер, формула (7) в отличие от (2) производит пересчет тепловой мощности при изменении одного или нескольких входных параметров нашего «черного ящика». Действительно, за скобками выражения (7) остался расход теплоносителя G , который может служить свободным параметром при изменениях T_0 , T_x и T_r (само T_r явно в выражение (7) не входит, показывая, что зависимость $W(T_r)$ слабая). Заметим, что (7) не противоречит критериям температурного подобия (5) и (6). Данное условие не может быть выполнено наперед для «любого» заданного закона, например, гипотетические представления $W \approx 4,2(T_x - T_0)C_k / (1 + T_0/T_r)$ или $W \approx 4,2C_k / (T_0 - T_x)$ не удовлетворяют (5) и (6) и вследствие этого опровергаются априори до этапа экспериментального подтверждения.

Из совместного решения (7) и (2) можно получить искомого связь между входными параметрами «черного ящика» в виде:

$$G \approx C_k \frac{(T_x - T_0)}{(T_c - T_x)}. \quad (8)$$

Данное выражение позволяет объяснить неочевидный на первый взгляд характер поведения мощности W в (2) при рассмотренных выше изменениях температур. Однако выражение (7), являясь производением C_k и некоторого температурного коэффициента, вводит еще и понятие относительно расхода G/C_k . Один и тот же расход теплоносителя для некоторой воздушной завесы может быть большим, а для завесы со значительно большим C_k (или, другими словами, с большей расчетной мощностью) — малым.

Что касается применения данного рассмотрения через C_k для конкретных задач, то оно было использовано в упрощенной методике верификации воздушных завес на базе АПИК [3] (хотя само обозначение C_k явно в методике и не использовалось). Напомним, что C_k — это константа лишь условно, она некоторым образом меняется при изменении относительного расхода. Следовательно, чем меньше расход при измерениях отличается от расхода при расчетных параметрах, тем выше будет точность пересчета через C_k .

Стремясь к значительно более высокой точности в новой редакции методики верификации [4],

мы стали получать температуры, еще более близкие к расчетным, а незначительный пересчет производить по законам температурного подобия (5) и (6). И только минимальное температурное расхождение величиной обычно менее 1 °С, обусловленное невозможностью точной установки температурного подобия, пересчитывается согласно закономерности (7), что обеспечивает очень высокую точность итоговых расчетов.

Однако если для лабораторного определения параметров использование приблизительных закономерностей необходимо сводить к минимуму, то за пределами научных лабораторий (7) будет давать удовлетворительную точность в областях больших и средних расходов. Несколько худшую точность данная формула дает для малых расходов теплоносителя, и совершенно неприемлемой она становится для очень малых расходов, если C_k для расчетов мощности был измерен в области больших расходов. Если же C_k изначально измерить для малого расхода (смысл определений степеней расхода станет ясным непосредственно из приведенных ниже графиков), то эти данные могут давать погрешность для расчетов мощностей при больших расходах.

Для того чтобы выразить мощность воздушной завесы во всем диапазоне рабочих температур и расходов, необходимо учесть влияние T_r в формуле для мощности явно, исправив таким образом недостаток выражения (7).

Предложим для этой цели уточненную эмпирическую формулу:

$$W = 4,2(0,12T_z + 0,88T_x - T_0)C. \quad (9)$$

Данная формула, так же как и (7), позволяет производить пересчеты мощности при изменении температурных условий (изменяется расход, который явно в (7) не входит). Совместное решение (9) и (2) дает для расхода зависимость:

$$G = C \frac{(0,12T_z + 0,88T_x - T_0)}{(T_z - T_x)}. \quad (10)$$

Заметим, что данные выражения не противоречат и реализуемому при постоянных расходах G критерию состояний температурного подобия (5) и (6).

Для определения C необходимо будет сделать всего одно измерение мощности при некоторых условиях. Заметим, что $C \neq C_k$. Если расход измеряется в кг/с, то:

$$C = \frac{G(T_z - T_x)}{(0,12T_z + 0,88T_x - T_0)} \quad [\text{кг/с}]. \quad (11)$$

Покажем теперь на графиках сравнительное поведение C_k и C для воздушной завесы Тропик Т 109W [5] и трех воздушных завес Frisco различных серий [6]. Для этого решим уравнения (7) и (9) относительно C_k и C соответственно для всех представленных в [5] и [6] данных и отобразим это в виде графиков (рис. 3–6) зависимостей данных величин от некоторого расходного параметра $0 < (T_x - T_0) / (T_r - T_0) < 1$.

Из приведенных графиков следует, что C является константой уже во всех рассматриваемых областях, что и служит обоснованием формулы (9) для областей от больших до очень малых расходов. Физи-

ческий смысл величины C — сколько килограммов теплоносителя за одну секунду данная воздушная завеса может «обработать» в области средних расходов, то есть при заметном падении величины T_x по сравнению с начальной температурой T_r . (Точнее, $C = G$ при условиях $T_r = 90^\circ\text{C}$, $T_x = 50,11^\circ\text{C}$, $T_0 = 15^\circ\text{C}$.) При оптимальном использовании воздушных завес расход теплоносителя воздушной завесы составля-

Графическое отображение коэффициентов C_k и C для Тропик Т109W

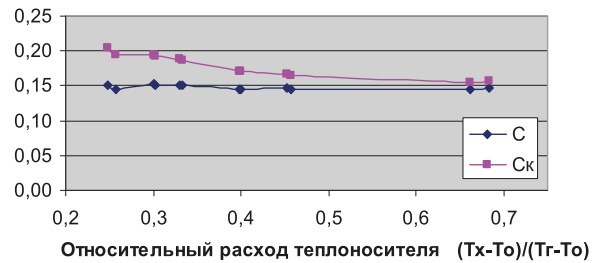


Рис. 3

Графическое отображение коэффициентов C_k и C для Frisco AD210W

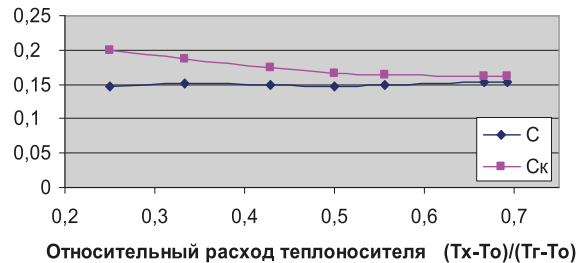


Рис. 4

Графическое отображение коэффициентов C_k и C для Frisco AD310W

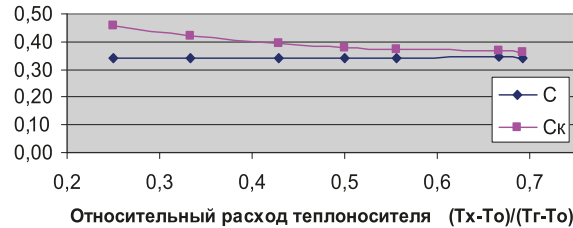


Рис. 5

Графическое отображение коэффициентов C_k и C для Frisco AD410W

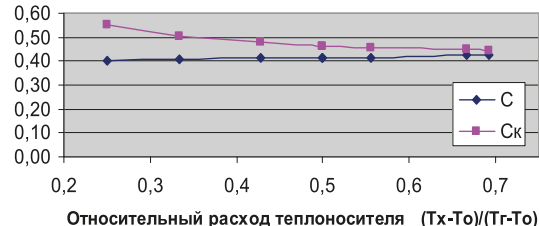


Рис. 6

ет величину более двух коэффициентов C для данной завесы.

Итак, получена закономерность для мощности и расхода воздушных завес во всем диапазоне изменения рабочих температур. Выражение (9) подтверждает слабую зависимость мощности воздушной завесы от температуры T_r . Покажем, как производят пересчет мощности завесы, если ее характеристики получены для стандартных условий: $T_r=95^\circ\text{C}$, $T_x=70^\circ\text{C}$, $T_0=15^\circ\text{C}$. Как будет вести себя воздушная завеса при иных условиях работы? Когда можно и когда нельзя применять упрощенный подход через C_k , предложенный в [1]? Для ответа на эти вопросы рассмотрим три случая возможно-го задания условий:

1. задается некоторый набор температур (T_r' , T_x' , T_0'), который однозначно определяет расход G' и, следовательно, мощность W' . Рассчитаем сначала по (8) и (10) C_k и C соответственно. Из (7), (8), (9) и (10) следует, что если мы хотим остаться в пределах погрешности 5%, то для любой воздушной завесы пересчет мощности через (7) можно производить для случаев, когда T_x' ближе к T_r' , чем к T_0' или: $T_x' > (T_r' + T_0') / 2$. Это же условие можно выразить через параметр абсолютного расхода, приблизительно как $G' > C_k$. Для расходов меньших, чем C_k пересчет через C_k даст заниженное выражение для мощности.

2. Пусть теперь задан набор (T_r' , T_0' , G'), который определяет температуру обратной воды T_x' и мощность W' . В этом случае область применимости расчетов через C_k значительно расширяется: точности с погрешностью менее 5% можно добиться и при значительно меньших расходах теплоносителя, и всю область применимости формулы (7) можно определить как $G > 2/3 C_k$. Кажущееся противоречие с условием применимости для случая 1 легко разрешается, если вспомнить, что для всех воздушных завес при изменении величин T_x и G при фиксированных T_r и T_0 , расход G изменяется сильнее, чем $T_r - T_x$. Заданный жестко расход G' компенсирует возникающее расхождение слабо меняющегося параметра T_x' , что и расширяет границы применимости (7).

3. Пусть теперь задан набор (T_x' , T_0' , G'), подразумевающий поиск температуры прямой воды, чтобы обратная была близка к (или не превосходила) T_x' . Учитывая условие, что T_r явно не входит в выражение мощности через C_k , интуиция подсказывает, что в этом случае расхождения точной и приближенной зависимости обнаружатся при большем расходе, чем в первых двух случаях. Это действительно так: чтобы остаться в пределах 5% погрешности, расчет через C_k можно применять только при $G > 1,15 C_k$. В остальных случаях потребуется применение формулы (9).

Рассмотрим конкретные примеры расчетов завес. Пусть некоторая воздушная завеса продемонстрировала для данных температурных условий мощность $W=27,5\text{ кВт}$ при расходе $G=0,262\text{ кг/с}$ [7]. Можно считать характеризующие ее константы $C=0,113\text{ кг/с}$ и $C_k=0,119\text{ кг/с}$.

1. Пусть для рассмотренной завесы необходимо найти мощность для условий $T_r'=65^\circ\text{C}$, $T_x'=35^\circ\text{C}$, $T_0'=25^\circ\text{C}$. Так как 35 ближе к 25, чем к 65, пересчет мощности необходимо произвести, используя C . При помощи (10) найдем $G'=0,0512\text{ кг/с}$ и для мощности получим $W'=6,45\text{ кВт}$. (Расчет через C_k дал бы заметно заниженные расход и мощность, соответственно 0,0397 кг/с и 5 кВт.)

2. Пусть заданы температуры прямой воды и помещения и расход теплоносителя: $T_r'=65^\circ\text{C}$, $T_0'=25^\circ\text{C}$, $G'=0,2\text{ кг/с}$. Так как расход значительно больше, чем $2/3 C_k=0,0793\text{ кг/с}$, то для расчета мощности применима упрощенная закономерность через C_k . Решая уравнение (8) относительно температуры холодной воды, получим: $T_x' \approx 50,1^\circ\text{C}$ и для итоговой мощности: $W' \approx 12,5\text{ кВт}$. (В этом случае пересчитывать через C нет необходимости, при большей трудоемкости мы получим значения: $T_x'=49,9^\circ\text{C}$ и $W'=12,7\text{ кВт}$, то есть почти те же значения, что и выше, если учесть начальные погрешности измерений, приведенных для расчета C и C_k .)

3. Пусть теперь заданы температуры помещения, обратной воды и расход воды $T_0'=25^\circ\text{C}$, $T_x'=40^\circ\text{C}$, $G'=0,05\text{ кг/с}$. В этом случае расход значительно меньше, чем $1,15 C_k=0,137\text{ кг/с}$. То есть, пересчет произведем, используя (9). Сначала решим уравнение (10) относительно температуры горячей воды: $T_r'=86,5^\circ\text{C}$. Для мощности получим $W'=9,8\text{ кВт}$. Пересчет через C_k привел бы к сильно заниженным выражениям для температуры и мощности: $T_r' \approx 75,7^\circ\text{C}$ и $W' \approx 7,5\text{ кВт}$.

Примечание: Все утверждения данной статьи относятся к стандартным воздушным завесам с жидким теплоносителем. Измерения и данные, используемые в статье, относятся к максимальной скорости воздушного потока, когда коэффициенты рекуперации относительно низкие, и приведены для воздушных завес шириной около 1 м. Расходы теплоносителя в терминах $(T_x - T_0) / (T_r - T_0)$ варьировались от достаточно больших (0,7) до малых (0,25). Выводы данной статьи нельзя экстраполировать на другие типы теплообменных систем «вода — воздух».

Поиск и представление формулы для мощности воздушной завесы в виде: $W = 4,2 (\alpha T_r + (1 - \alpha) T_x - T_0) C$ были обусловлены тем, что данный вид удовлетворяет критериям температурного подобия при любых α . Обработка большого объема опытных данных сможет привести к некоторым уточнениям α для различных типов воздушных завес. В этом случае для данных завес в формулах (9), (10) и (11) вместо коэффициентов 0,12 и 0,88 необходимо будет использовать коэффициенты α и $1 - \alpha$ соответственно. Как показано выше, коэффициенты C в широком диапазоне расходов теплоносителя с хорошей точностью являются для воздушных завес константами. Однако, при ничтожно малых расходах теплоносителя G величины C также станут малы. Это обусловлено физическим смыслом вышеуказанной формулы для мощности воздушной завесы W при данном предельном переходе.

Применяя метод, используемый в данной статье, можно получить закономерности аналогичного вида с α , заметно отличающимися от 0,12, для других классов теплообменных систем, где роль процессов свободной конвекции и излучения также мала.

Литература

1. Методика оценочного расчета тепловых параметров водяных завес. Лысцев С. А., Азин А. В. Журнал «Мир климата» № 76.
2. Основы теплопередачи. Михеев М. А. Издательство «Энергия», 1977 г., с. 55.
3. Методика верификации воздушных завес с водяным нагревом, результаты испытаний. Журнал «Мир климата» № 71.
4. Обновленная методика верификации воздушных завес с водяным нагревом. Журнал «Мир климата» № 77, с. 172.
5. Протоколы измерений на стенде АПИК воздушной завесы Тropic T109W от 18.01.13.
6. Данные из каталога Frisco для воздушных завес серий AD210W, AD310W и AD210W (см., например, www.frisco-sales.ru).
7. Паспорт верификации воздушной завесы Тropic X525W. Журнал «Мир климата» № 77, с. 177.