

# О тепловой эффективности воздушных завес



М.Е. ДИСКИН, канд. техн. наук (ООО «КЛИМАТВЕНТМАШ»)

**Анализируется эффективность двух вариантов горизонтальных верхних воздушных завес. Делается вывод о том, что оптимально подобранные завесы без нагрева могут обеспечить требуемую температуру воздуха в конце струи при существенном снижении энергозатрат. Дается рекомендация о целесообразности обеспечения регулирования расхода воздуха через завесу.**

В случае применения воздушных завес для образования преграды проникновению холодного воздуха сквозь защищаемый проем создается воздушная струя поперек проникающему воздуху, которая смешивается с частью наружного воздуха и воздуха внутри помещения. При этом распределение температуры воздуха по сечению струи неравномерно [1]. На границе с наружным воздухом температура воздуха струи равна температуре наружного воздуха, на границе с внутренним – внутреннего.

Вслед за В.М. Эльтерманом [2] считаем, что в правильно спроектированной завесе при наибольшей расчетной скорости ветра, действующего на проем (наибольшем перепаде давления по обе стороны проема), струя завесы должна перекрывать проем и целиком поступать внутрь помещения. При этом количество холодного воздуха, подмешивающегося к струе, определяется параметрами завесы, т.е. прорыв холодного воздуха является контролируемым. При меньших значениях скорости ветра, если расход воздуха в завесе или угол выхода струи относительно плоскости проема не регулируются, струя завесы частично или полностью не поступает в проем. Поскольку при этом происходит поступление внутрь помещения или унос из помещения некоторого количества воздуха, это влияет на тепловой баланс помещения.

Условно сечение струи завесы можно разделить на три части. Первая часть струи, масса которой соответствует массовой доле на-

ружного воздуха в струе ( $\bar{G}_x$ ), граничит с наружным воздухом; вторая часть, масса которой соответствует массовой доле в струе внутреннего воздуха ( $\bar{G}_b$ ), граничит с внутренним воздухом; и третья часть, масса которой соответствует массовой доле в струе расхода воздуха через завесу ( $\bar{G}_z$ ), расположена между первой и второй частями. При соприкосновении с ограждением проема, либо со встречной струей при двухсторонней завесе, струя делится на две части – не поступающую внутрь проема, массовую долю которой обозначим  $\bar{G}$ , и поступающую внутрь проема –  $(1-\bar{G})$ .

В свою очередь, массовые доли наружного и внутреннего воздуха в струе равны:

$$\bar{G}_x = \bar{G}_b = 0,5(1-q_c), \quad (1)$$

$$\text{где } q_c = \bar{G}_z = G_z/G_c; \quad (2)$$

$G_z$  – масса воздуха, поступающего из завесы;  $G_c$  – масса воздуха в сечении струи завесы, первым соприкасающимся с ограждением проема, либо со встречной струей при двухсторонней завесе.

При  $\bar{G} \leq 0,5(1-q_c)$  массовая доля воздуха, соответствующая количеству наружного воздуха, поступающего внутрь проема ( $\bar{G}_{вн}$ ), равна разнице между массовой долей наружного воздуха в струе ( $\bar{G}_x$ ) и массовой долей воздуха, не поступающей внутрь ( $\bar{G}$ ).

$$\bar{G}_{вн} = 0,5(1-q_c) - \bar{G}. \quad (3)$$

При  $\bar{G} > 0,5(1-q_c)$  наружный воздух внутрь не попадает, происходит потеря внутреннею воздуха из помещения. Массовая доля струи, соответствующая количеству внутреннего воздуха, захватываемого струей и поступающего вне проема ( $\bar{G}_{вн}$ ), равна разнице между массовой долей струи, не поступающей внутрь ( $\bar{G}$ ), и массовой долей наружного воздуха в струе ( $\bar{G}_x$ ):

$$\bar{G}_{вн} = \bar{G} - \bar{G}_x = \bar{G} - 0,5(1-q_c). \quad (4)$$

Количество теплоты, забираемое из помещения наружным воздухом, поступающим внутрь проема, равно:

$$Q = G_c \bar{G}_{вн} c_b (t_b - t_n) = G_z c_b (t_b - t_n) [0,5(1-q_c) - \bar{G}] / q_c, \quad (5)$$

где  $c_b$  – теплоемкость воздуха;

$t_b$  – температура воздуха внутри помещения;  $t_n$  – температура воздуха снаружи помещения.

В случае «уноса» струи завесы из помещения происходит потеря теплоты за счет «уноса» воздуха из помещения и компенсирующего поступления наружного воздуха с соответствующей температурой:

$$Q = G_c \bar{G}_{вн} c_b (t_n - t_b) = G_z c_b (t_b - t_n) [\bar{G} - 0,5(1-q_c)] / q_c. \quad (6)$$

При нагреве воздуха в завесе потери компенсируются на величину тепловой мощности нагрева  $Q_3$ , поступающей со струей внутрь:

$$Q_3 = G_z c_b t_3, \quad (7)$$

где  $t_3$  – температура нагрева воздуха в завесе.

Будем считать, что вследствие перемешивания мощность нагрева распределена по струе пропорционально распределению массы воздуха. Тогда тепловая мощность нагрева, поступающая со струей внутрь и компенсирующая теплопотери ( $Q_{3в}$ ), будет равна:

$$Q_{3в} = Q_3 (1 - \bar{G}). \quad (8)$$

Теплопотери мощности нагрева равны

$$Q_{3н} = Q_3 \bar{G}.$$

В итоге при поступлении холодного воздуха в проем  $\bar{G} \leq 0,5(1-q_c)$  суммарные теплопотери ( $Q_c$ ) равны:

$$Q_c = G_z c_b (t_b - t_n) [0,5(1-q_c) - \bar{G}] / q_c + Q_3 \bar{G}. \quad (9)$$

В случае «уноса» струи завесы из помещения  $\bar{G} > 0,5(1-q_c)$

$$Q_c = G_z c_b (t_b - t_n) [\bar{G} - 0,5(1-q_c)] / q_c + Q_3 \bar{G}. \quad (10)$$

Эффективность завесы:

$$e = (Q_0 - Q_c) / Q_0, \quad (11)$$

где  $Q_0$  – тепловая мощность, которая теряется из помещения при поступлении холодного воздуха через проем без завесы;

$Q_c$  – тепловая мощность, которая теряется из помещения при работе завесы.

Показатель  $e$  соответствует доле теплопотерь при работе без завесы.

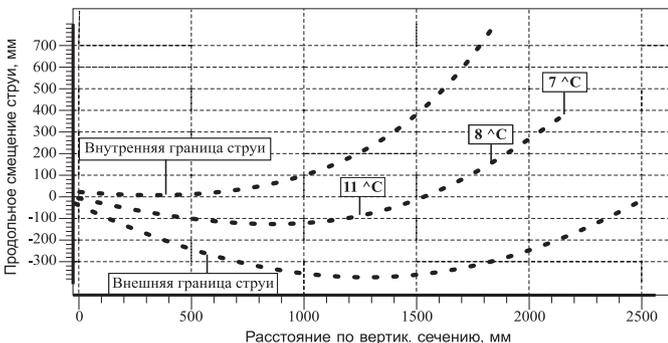


Рис. 1. Траектория струи завесы 1

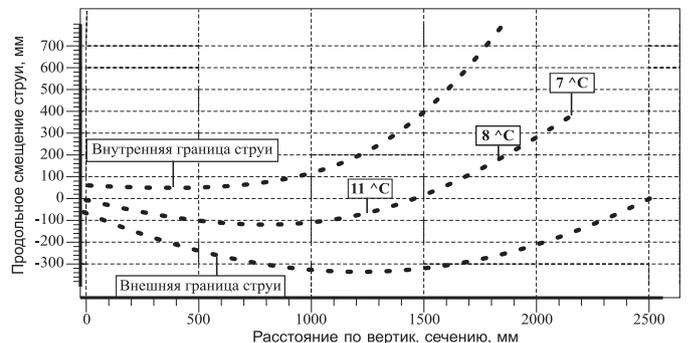


Рис. 2. Траектория струи завесы 2

В свою очередь  $Q_0 = G_0 c_b (t_b - t_n)$ , (12)  
 где  $G_0$  – расход воздуха, поступающего  
 через проем при отсутствии завесы.

Величину расхода воздуха, поступающе-  
 го через проем при отсутствии завесы, опре-  
 делим в соответствии с работой [2], коэф-  
 фициент расхода воздуха через проем при  
 отсутствии завесы  $\mu_0 = 0,64$ , приток и вытяж-  
 ка помещения сбалансированы.

Произведена оценка эффективности воз-  
 душной завесы для двух вариантов горизон-  
 тальных верхних завес, основные характери-  
 стики которых приведены в таблице.

Для принятый расчетных условий:

- защищаемый проем:  
 высота – 2,5 м;  
 ширина – 1,5 м;
- температура внутри помещения – +20°C;
- скорость ветра – 2,8±0,2 м/с;
- температура наружного воздуха – -26°C;
- угол выхода струи относительно плоско-  
 сти проема – 15°
- количество воздуха, проходящего через  
 открытый проем без завесы – 8020 кг/ч;
- теплотери через открытый проем без  
 завесы – 123 кВт.

Энергопотребление завесы складывается  
 из мощности нагревателя ( $Q_3$ ) и мощности на  
 привод вентилятора ( $N_3$ ):

$$N_3 = Q_3 + N_b \quad (13)$$

Как видно из таблицы, сравниваемые за-  
 весы отличаются расходом воздуха через  
 завесу, скоростью воздуха на выходе из  
 щели, энергопотреблением завесы.

Траектории струи каждой из завес, полу-  
 ченные численным моделированием [3] при  
 работе в указанных условиях, показаны на  
 рис. 1, 2. Как видно из рисунков, при расчет-  
 ной скорости ветра у каждой из завес струя пе-  
 рекрывает весь проем и попадает внутрь по-  
 мещения. За счет рационального выбора рас-  
 хода воздуха и ширины щели завесы 2 без на-  
 грева можно обеспечить одинаковую с заве-  
 сой 1 температуру воздуха в конце струи.

Изменение величины эффективности за-  
 весы в зависимости от массовой доли струи,  
 уносимой из проема, для сравниваемых за-  
 вес показано на рис. 3.

Точки перелома зависимости  $e = f(\bar{G})$  на  
 рис. 3 соответствуют такому расположению  
 струи относительно проема, при котором

внутри проема попада-  
 ет часть струи, включа-  
 ющая только расход за-  
 весы и присоединен-  
 ную массу внутреннего  
 воздуха. Остальная, наиболее холодная часть  
 струи, из-за неравномерного распределения  
 температуры воздуха [1], поступает за проем.  
 Точка  $\bar{G} = 0$  соответствует проектным услови-  
 ям работы завесы. Влево от точки перелома  
 завеса работает с поступлением внутрь поме-  
 щения некоторого количества наружного воз-  
 духа, вправо от точки перелома струя завесы  
 удаляет воздух из помещения. Как видно из  
 рис. 3 эффективность завесы при удалении  
 воздуха из помещения существенно снижается  
 за счет того, что уносится большая доля  
 расхода воздуха в струе. Подобрать парамет-  
 ры завесы, обеспечивающие такое протека-  
 ние траектории струи, чтобы обеспечить мак-  
 симум эффективности завесы, с учетом всего  
 многообразия оформления ограждений про-  
 емов и взаимного расположения щели заве-  
 сы и плоскости проема при нынешнем уров-  
 не методологии определения параметров за-  
 весы не представляется возможным. Для ка-  
 чественной оценки величины  $\bar{G}$  по расчетной  
 или экспериментальной траектории струи  
 можно использовать взаимосвязь массовой  
 и геометрической частей струи в соответствии  
 с работой [1], показанную на рис. 4.

Выбор завесы для наиболее сильного вет-  
 ра из условия полного отсутствия «уноса»  
 струи завесы позволяет при снижении ветро-  
 вой нагрузки оставаться в зоне относительно  
 малых теплотер. Для исключения «уноса»  
 струи завесы из помещения можно регулиро-  
 вать либо угол выхода струи относительно  
 плоскости проема, либо расход воздуха че-  
 рез завесу, либо то и другое (технические воз-  
 можности такого регулирования в рамках  
 данной статьи не рассматриваются). При ре-  
 гулировании угла выхода струи можно пре-  
 дотвратить унос струи и обеспечить поступ-  
 ление всей струи в проем. Однако при умень-  
 шении расхода воздуха через завесу тепло-  
 потери пропорционально уменьшаются (см.  
 уравнение 6) и одновременно за счет умень-  
 шения скорости на выходе из щели происхо-  
 дит изменение траектории струи с поступле-  
 нием ее в проем. Следовательно, более це-

лесообразным является регулирование рас-  
 хода воздуха через завесу.

В настоящее время единственным норми-  
 руемым показателем завесы является сред-  
 няя температура воздуха, поступающего че-  
 рез проем [4]. В правильно спроектирован-  
 ной завесе при наибольшей расчетной ско-  
 рости ветра, действующего на проем (наиболь-  
 шем перепаде давления по обе сторо-  
 ны проема), температура воздуха, поступа-  
 ющего через проем равна средней темпера-  
 туре воздуха  $t_c$  в сечении струи завесы, пер-  
 вым соприкасающимся с ограждением про-  
 ема либо с встречной струей при двухсторон-  
 ней завесе (температура воздуха в конце  
 струи). Эта температура определяется как  
 температурами воздуха снаружи  $t_n$ , внутри  
 $t_b$  и величиной нагрева воздуха в завесе  $t_3$ ,  
 так и соотношением  $q_c$  в сечении струи за-  
 весы, первым соприкасающимся с ограждени-  
 ем проема, либо с встречной струей при  
 двухсторонней завесе [1], [5]:

$$t_c = q_c (t_3 + t_b) + 0,5(1 - q_c)(t_b + t_n). \quad (14)$$

Значение температуры воздуха в конце  
 струи должно соответствовать нормативным  
 документам, либо требуемым комфортным  
 условиям на ближайших рабочих местах,  
 либо технологическим требованиям (назо-  
 вем эту температуру комфортной темпера-  
 турой в конце струи).

При работе завесы в нерасчетном режи-  
 ме средняя температура части струи посту-  
 пающей в проем равна

$$t_{cb} = [\bar{G}_{sb}(t_3 + t_b) + \bar{G}_{bb}t_b + \bar{G}_{nb}t_n]/(1 - \bar{G}). \quad (15)$$

Для сравниваемых завес значения сред-  
 них температур части струи завесы, поступа-  
 ющей в проем, в зависимости от массовой  
 доли струи поступающей вне проема пока-  
 заны на рис. 5.

На рис. 5 для завесы 1 с нагревом выде-  
 лается зона, в которой средняя температу-  
 ра части струи, поступающей в проем выше  
 температуры воздуха внутри помещения. В  
 указанном случае завеса с нагревом выс-  
 тупает в качестве нагревательного прибо-  
 ра. Несмотря на наличие нагрева, завеса 1

Модель	Расход воздуха, м³/ч	Мощность нагрева, кВт	Мощность привода вентилятора, кВт	Температура воздуха в конце струи, °С	Скорость воздуха на выходе из щели, м/с
Завеса 1	2450	13,9	0,75	7	11
Завеса 2	4100	0	0,45	7	6,1

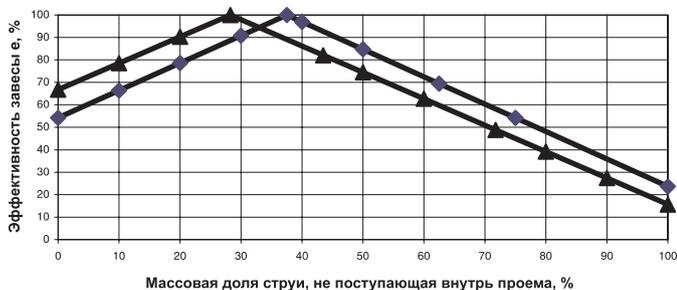


Рис. 3. Изменение эффективности завесы e в зависимости от массовой доли струи, не поступающей внутрь проема ( $\bar{G}$ )

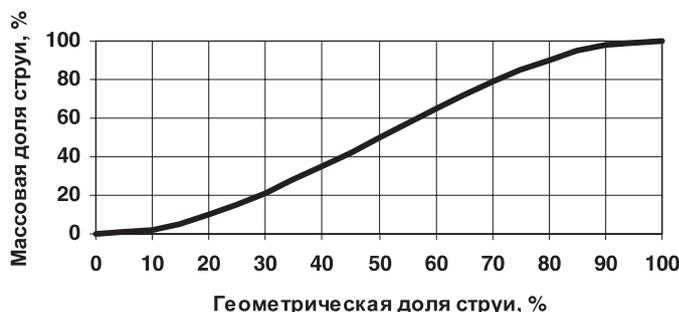


Рис. 4. Взаимосвязь массовой и геометрической частей струи

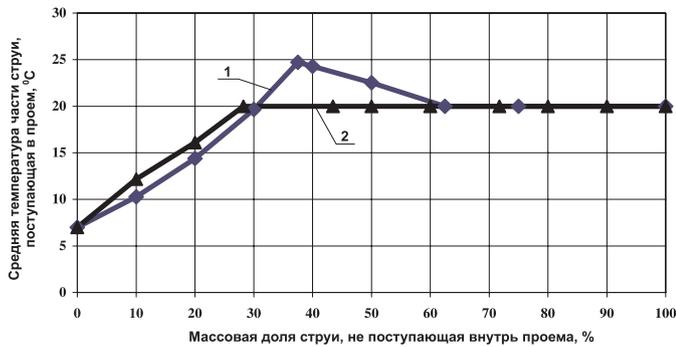


Рис. 5. Средняя температура воздуха части струи, поступающей в проем в зависимости от массовой доли струи, поступающей вне проема

уступает завесе 2 без нагрева как по средней температуре части струи, поступающей в проем, так и по эффективности завесы при работе завесы до точки перегиба (см. рис. 3 и 5). При работе завесы правее точки перегиба (см. рис. 3 и 5) наличие в ней нагрева не оказывает положительного влияния ни на среднюю температуру воздуха, поступающего в проем при открытой завесе, ни на компенсацию теплопотерь при закрытии завесы. Дело в том, что теплопотери в этом случае вызваны поступлением холодного воздуха в местах притока, которые чаще всего расположены вне зоны проема, но могут оказаться вблизи зон с нормируемой комфортной температурой в конце струи. Влияние нагрева в завесе при закрытом проеме на компенсацию снижения температуры в указанных зонах ока-

жется затянутым по времени и, как следствие, мало эффективным. В некоторых случаях завесы с нагревом используют в качестве отопительного прибора при закрытом проеме. Такое решение возможно дает снижение капитальных затрат за счет отказа от приобретения отопительного прибора. Однако, поскольку завеса размещается непосредственно у проема, это осложняет транспортировку теплоты от проема к местам с нормируемой комфортной температурой. Отдельный отопительный прибор может быть расположен оптимально, исходя из обеспечения требуемых комфортных условий на рабочих местах, либо технологических требований.

На основании проведенного сопоставления можно заключить:

- оптимально подобранные завесы без нагрева могут обеспечивать требуемые значения температуры воздуха в конце струи. При этом энергозатраты на привод вентилятора существенно (более чем на порядок) меньше энергозатрат на подогрев воздуха в завесах с нагревом;
- поскольку подбор параметров завесы производится для наиболее тяжелых ус-

ловий работы, с целью уменьшения теплопотерь целесообразно обеспечивать регулирование расхода воздуха через завесу для случаев работы в более легких условиях.

- необходимость нагрева воздуха в завесе может диктоваться экономическими соображениями при использовании воздушной завесы в качестве отопительного прибора при закрытом проеме, хотя по соображениям энергосбережения это менее эффективно в сравнении с использованием отдельного отопительного прибора.

**Библиографический список:**

1. Титов В.П. Особенности струй воздушных завес//Тепловой режим систем отопления, вентиляции, кондиционирования и теплогазоснабжения: Сб. трудов. – М.: МИСИ, 1980. – № 177.
2. Эльтерман В.М. Воздушные завесы. – М., Машиностроение, 1966.
3. Дискин М.Е. К вопросу о расчете воздушных завес//АВОК, 2003, № 7. С. 58–64.
4. СНиП 2.04.05-91\* «Отопление, вентиляция и кондиционирование».
5. Батулин В.В. Основы промышленной вентиляции. – М., Профиздат, 1965.

**ООО «КлиматВентМаш»**  
 109202, г. Москва, ул. 1-я Фрезерная, 2/1  
 Тел.: (095) 504-25-40  
 E-mail: info@cvm.ru; www.cvm.ru

# SHK MOSCOW 2005

9-я международная специализированная выставка  
**Санитарная техника. Отопительное оборудование. Кондиционирование воздуха.**  
**Инженерное оборудование. Технологии интеллектуального здания.**

9-й европейский АВОК-ЕНІ симпозиум  
**«Современное энергоэффективное оборудование для теплоснабжений и климатизации зданий. Технологии интеллектуального здания»**



23 - 26 мая 2005

Россия, Москва

Выставочный комплекс ЗАО «ЭКСПОЦЕНТР» на Красной Пресне, павильоны 7, 4 и открытые площадки

www.shk.ru

www.shk-online.com

Партнеры:



Генеральные информационные спонсоры:



Мессе Дюссельдорф Москва  
 123 100 Москва, Россия  
 Краснопресненская наб., 14, павильон 7  
 Тел.: +7 (095) 256 73 95  
 +7 (095) 255 27 36  
 Факс: +7 (095) 255 27 71  
 ShatovM@messedd.ru  
 www.messe-duesseldorf.ru

