



Оценка эффективности воздушно-тепловых завес для ворот производственно-складских зданий

А. С. Стронгин, канд. техн. наук, заведующий лабораторией НИИСФ РААСН

В последние годы наблюдается массовое строительство производственно-складских зданий и комплексов, которые являются крупными потребителями энергоресурсов. Большая высота и объем складских помещений, наличие значительного количества ворот, транспортных коридоров требуют повышенного внимания к энергоэффективности систем отопления, вентиляции и воздушно-тепловых завес. Тепловая мощность систем достигает нескольких тысяч киловатт, а их стоимость – десятков миллионов рублей.

Оптимизация систем позволит улучшить параметры микроклимата помещений, добиться экономии первоначальных затрат на их устройство, а также снизить потребление энергоресурсов в процессе эксплуатации на 10–20 %.

В отечественной и мировой практике применяются различные принципиальные схемы воздушных (ВЗ) и воздушно-тепловых (ВТЗ) завес, включая ВТЗ с частичным или полным использованием неподогретого воздуха. Выбор оптимальной схемы является сложной задачей, требующей проведения технико-экономических расчетов.

Отсутствие научно-обоснованных рекомендаций, методических указаний и нормативных требований

приводит к завышению стоимости строительства и перерасходу энергоресурсов. Кроме того, нередко применяется оборудование, не отвечающее современным требованиям к энергоэффективности и безопасности.

Здания складов формируются из базовых модульных унифицированных секций площадью до 10 000 м² каждая, снабженных воротами для автомобильного и железнодорожного транспорта. В табл. 1 приведены



удельные показатели тепловых нагрузок представительных объектов. Доля ВТЗ составляет от 20 до 60 % общей тепловой нагрузки здания.

К сожалению, параметрический ряд предлагаемых агрегатов завес неоптимальный, особенно для автомобильных и железнодорожных ворот. Сложившаяся практика проектирования ориентируется не на проведение соответствующих расчетов, а на рекомендации фирм-производителей, которые не всегда предоставляют полную информацию. В результате потребитель получает энергозатратный агрегат, не дающий гарантии защиты открытого проема.

Для устранения перечисленных выше недостатков необходима разработка обоснованных рекомендаций по выбору энергоэкономичных схемных решений ВТЗ, а также методические указания по их расчету и подбору.

В зависимости от назначения и условий обычно применяются следующие типы ВЗ:

- ВЗ на внутреннем подогреме воздуха (ВПВЗ),
- ВЗ на внутреннем неподогрете воздуха (ВНВЗ).

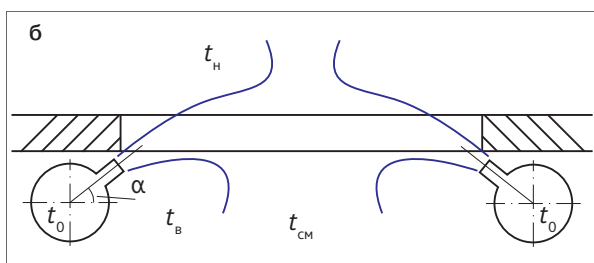
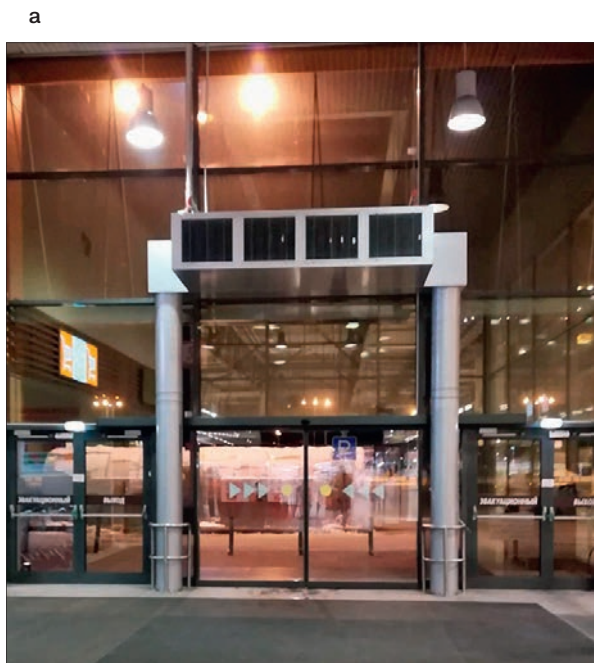


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) ВПВЗ

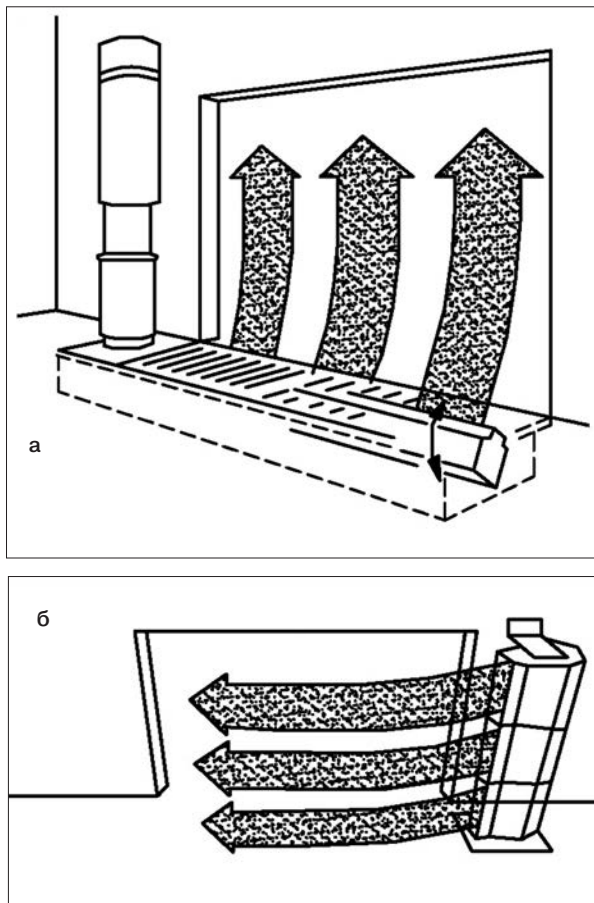
Для ВПВЗ рекомендуется применять одно- или двухстороннюю боковую или одностороннюю нижнюю или верхнюю подачу подогретого в агрегате завесы внутреннего воздуха плоскими струями, формируемыми приточной щелью или системой сопел под углом к плоскости ворот в сторону, с которой поступает воздух (рис. 1).

Для ВНВЗ применяется аналогичная схема подачи воздуха (рис. 2).

Таблица 1

Удельные показатели тепловых нагрузок складских комплексов

Характеристика Склад (год постройки)	Площадь, м ²	Высота, м	Удельная тепловая нагрузка на единицу площади, Вт/м ²	Удельная тепловая нагрузка на единицу объема, Вт/м ³
Домодедово (2007)	746 000	12,4	64,4	5,2
Солнцево (2007)	39160	11,85	103,1	8,7
Шерлэнд (2006)	42700	18,4	48,9	2,7
Истра (2008)	165 000	15,0	91,0	6,1
Касторама (2014)	11100	8,0	84,6	11,0



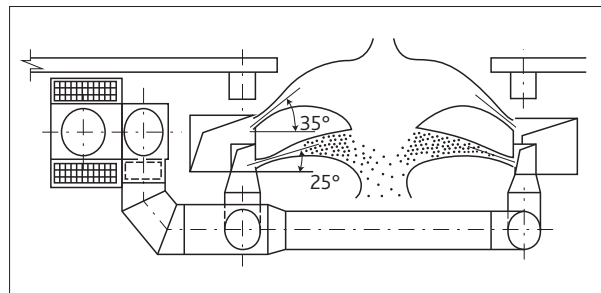
■ Рис. 2. ВНВЗ: а – с нижней подачей, б – с боковой подачей

ВНВЗ рекомендуется применять в случаях, когда нормируемая температура смеси воздуха, входящего в проем открытых ворот, обеспечивается без подогрева воздуха в завесе:

- помещения с перегревом верхней зоны более 2 °С (при возможности использования воздуха из верхней перегретой зоны помещения);
- помещения с избыточными тепловыделениями (при технической возможности и целесообразности их использования);
- помещения с низкой нормируемой температурой воздуха в рабочей зоне около ворот либо при отсутствии постоянных рабочих мест вблизи ворот.

ВНВЗ имеют более ограниченную область применения по сравнению с ВПВЗ, но позволяют отказаться от установки воздухонагревателей в агрегатах завес.

Кроме рассмотренных типов ВЗ, в некоторых случаях могут применяться двухслойные комбинированные воздушно-тепловые завесы (КВТЗ) и воздушные завесы на неподогретом наружном воздухе (НВЗ).



■ Рис. 3. Вариант конструкции КВТЗ

В КВТЗ воздух подается двумя плоскими струями, параллельными друг к другу или расходящимися под небольшим углом (5–15°) (рис. 3).

Струя, находящаяся ближе к проему ворот, считается наружной и подает неподогретый воздух помещения. Струя, находящаяся дальше от проема ворот, считается внутренней и подает подогретый в агрегате воздух (рис. 3). Такая схема позволяет обеспечить нормируемую температуру смеси воздуха, поступающего в помещение, при меньших затратах тепловой энергии.

Сокращение затрат тепловой энергии происходит за счет снижения теплопотерь струи ВЗ, контактирующей с наружным воздухом, вследствие уменьшения ее средней температуры с внешней стороны. Для снижения теплообмена между наружной и внутренней (более нагретой) струями КВТЗ рекомендуется оставлять зазор, обеспечивающий подтекание внутреннего воздуха помещения в межструйное пространство. Оптимальную величину зазора, расстояние между выпускными насадками, углы подачи воздуха определяют при конструировании агрегатов КВТЗ.

Недостатками КВТЗ являются более высокая стоимость и сложность конструкции, что ограничивает область ее применения.

Основными преимуществами НВЗ являются их простота и экономичность, обусловленные отсутствием подогрева подаваемого воздуха и, соответственно, исключением затрат на тепловую энергию и оборудование (теплообменники и т.п.) (рис. 4).

В то же время НВЗ имеют ряд недостатков, ограничивающих область их применения, а именно:

- отрицательное воздействие струи воздуха на человека исключает применение НВЗ для транспорта с открытой кабиной. Для прохода людей необходимо предусматривать двери (рядом с воротами либо в их створке);
- непригодность для помещений с влаговыведениями из-за туманообразования.

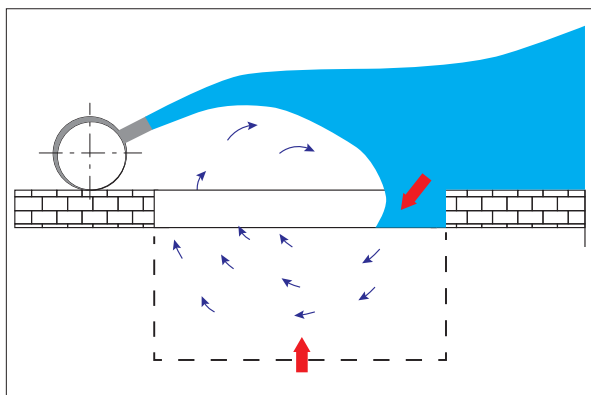


Рис. 4. Схема НВЗ

НВЗ целесообразно применять при отсутствии высоких санитарно-гигиенических требований к микроклимату помещений (отсутствие постоянных рабочих мест, неотапливаемые помещения и т.п.).

В зависимости от конструкции НВЗ в помещении создается либо замкнутая в области ворот либо разомкнутая на объем помещения циркуляция воздуха. Замкнутая циркуляция является предпочтительной с точки зрения тепловой защиты проема, поскольку теплообмен между воздухом помещения и воздухом циркуляционной зоны происходит при отсутствии направленного осредненного течения только за счет механизма турбулентного обмена.

Для сопоставления различных конструкций и схемных решений ВЗ и ВТЗ могут применяться следующие безразмерные показатели.

Коэффициент динамической эффективности ВЗ:

$$E = \frac{\Delta p_{НВ}}{2I_0}, \quad (1)$$

где Δp – расчетный перепад давления в районе ворот, Па;

I_0 – начальный импульс струи ВЗ, н;

H, B – размеры проема ворот, м.

Коэффициент E показывает, насколько эффективно используется при шиберовании проема начальный



импульс струи, т.е. какая доля начального импульса переходит в противодействие.

Коэффициент энергетической эффективности ВЗ

$$\eta = 1 - \frac{q_{вз}}{q_{пр}}, \quad (2)$$

где $q_{вз}, q_{пр}$ – соответственно, тепловые потери через проем, защищенный и не защищенный ВЗ, кВт. При наличии ВТЗ в величине теплопотерь учитывается ее тепловая мощность;

$\eta = 1$ означает идеальную ВЗ (полностью устраняющую теплопотери в проеме), а $\eta = 0$ – отсутствие ВЗ (незащищенный проем). Отметим, что для нерационально устроенных ВЗ и ВТЗ данный коэффициент может быть отрицательным (интенсификация теплообмена в проеме или избыточная тепловая мощность).

Коэффициент температурной (гигиенической) эффективности ВЗ

$$\theta = 1 - \frac{t_{в} - t_{сн}}{t_{в} - t_{н}}, \quad (3)$$

Таблица 2

Исходные данные для расчетов (бесфонарное здание, высокостеллажный склад)

Размер ворот, м	Расчетные условия						Условия эксплуатации				
	параметры Б			среднеотопительные			$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$T, \text{сут.} - \text{продолжит. отопительного периода}$	режим открывания ворот		
	$t_{н}, ^\circ\text{C}$	скорость ветра, $W_{в}, \text{м/с}$	$\Delta p, \text{Па}$	$t_{н}, \text{ср}, ^\circ\text{C}$	скорость ветра, $W_{вср}, \text{м/с}$	$\Delta p_{ср}, \text{Па}$			кол-во открываний в смену, n	продолжительность одного открывания, $\tau, \text{с}$	кол-во смен в сутки
4x4	-15	3,5	4,67	-5	2,0	2,77	20	200	10	240	2

Таблица 3

Результаты сопоставительных расчетов

Тип ВЗ	Расчетные параметры			Эффективность			
	начальная скорость струи ВЗ, V_0 , м/с	t_{cm} , °C	теплотери через проем, кВт	η	θ	$Q_{пр}^{год}$, годовые теплотери через проем, кВт·ч/год	$Q_э^{год}$, годовая экономия тепла, кВт·ч/год
ВЗ отсутствует	0	-15	456	0	0	71467	0
ВПВЗ	15,1	20	230	0,5	1,0	34667	36800
ВНВЗ	15,1	11,8	162	0,64	0,77	22960	48507
НВЗ	10,3	-6,6	77	0,83	0,24	11523	60214
КВТЗ	12,5	20	170	0,63	1,0	26225	45242

Таблица 4

Расчет экономической эффективности воздушной завесы складских ворот

Схема ВЗ	Первоначальные затраты, руб.	Дополнительные первоначальные затраты	Промежуточный доход, руб.	Полный доход за срок службы ДД, руб.	Полный дисконтированный доход, руб.	Чистый дисконтированный доход, руб.	Индекс доходности,	Бездисконтный срок окупаемости, T_0 , год	Дисконтированный срок окупаемости, T_d , год	Примечание
ВЗ отсутствует: базовый вариант	150 000	0	0	0	0	0	0	0	0	Требуется компенсирующий обогрев зоны вблизи ворот. Возможно локальное нарушение параметров микроклимата
ВПВЗ: допустимый вариант	550 000	400 000	73 600	1 104 000	571 872	171 872	0,43	5,4	7,8	Традиционное решение
КВТЗ: оптимальный вариант	630 000	480 000	90 484	1 357 260	703 061	223 061	0,465	5,3	7,5	Приемлемо

где t_b , t_n , t_{cm} – соответственно, температура внутреннего, наружного и поступающего в помещение воздуха, °C;

$\theta = 1$ означает идеальную ВЗ, $\theta = 0$ – отсутствие ВЗ.

Данный коэффициент удобно применять при проведении контрольных замеров и наладке оборудования.

Проведем сопоставительные расчеты различных типов ВЗ для одинаковых условий (размер ворот, климат, тип здания, режим открывания и т.п.) (табл. 2). Выбирались ВЗ, близкие по конструктивным параметрам (относительная ширина щели и пр.), оптимизация каждого типа ВЗ для конкретного примера не проводилась. Расчеты проведены по методикам,

приведенным в [1]. Показатели эффективности рассчитывались в соответствии с формулами (1)–(3). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Показано, что ВПВЗ позволяет примерно вдвое сократить теплотери через проем ворот (по сравнению с незащищенным проемом) и обеспечить оптимальную температуру смеси, равную температуре воздуха в помещении.

ВНВЗ позволяет экономить на 30 % больше тепловой энергии по сравнению с ВПВЗ, но имеет меньшую гигиеническую (температурную) эффективность.

НВЗ является наилучшей по энергосбережению, но наихудшей по гигиенической эффективности.

Она позволяет сэкономить на 65 % больше тепловой энергии по сравнению с традиционной ВПВЗ и на 25 % больше по сравнению с ВНВЗ. В то же время вблизи открытого проема ворот образуется зона низких температур.

КВТЗ по энергоэффективности соизмерима с ВНВЗ, а по гигиенической (температурной) эффективности – с традиционной ВПВЗ.

Проведенные расчеты позволяют определить область применения различных вариантов воздушных завес. Поскольку открытый проем ворот приводит к существенным теплопотерям и нарушению параметров микроклимата в помещении, следует предусматривать устройство ВЗ или ВТЗ для всех климатических районов РФ.


Традиционная схема с подогревом воздуха – ВПВЗ – может применяться для небольших, редко открываемых ворот в мягком климате.

Схема с подачей неподогретого внутреннего воздуха – ВНВЗ – оптимально сочетает энергетические, гигиенические и стоимостные показатели. Ее применение, как правило, сдерживается только сложностью конструктивного размещения подпольного канала.

Схема с подачей неподогретого наружного воздуха – НВЗ – имеет наилучшие теплозащитные свойства, минимальную стоимость, но наихудшие гигиенические показатели. Следует применять для помещений с отсутствием нормативных гигиенических и технологических требований к температуре воздуха в зоне, примыкающей к воротам.

КВТЗ следует применять для помещений со строгими требованиями к микроклимату рабочей зоны преимущественно в районах с суровыми климатическими условиями.

В табл. 4 приведен пример расчета экономической эффективности ВТЗ складских ворот.

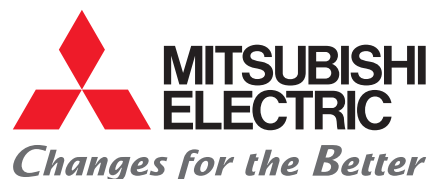
Окончательный выбор конструктивного решения определяется расчетом экономической эффективности. 

Литература

1. Гримитлин А. М., Стронгин А. С. Воздушные завесы для зданий и технологических установок: учеб. пос. СПб.: Лань, 2018.

Автор выражает глубокую благодарность за предоставленные материалы и сотрудничество

А. Н. Гаврилову («Глобус»), М. В. Никулину, А. В. Аносовой (ЦНИИПромзданий).



РАСШИРЯЕТ СВОЮ ПРОДУКТОВУЮ ЛИНЕЙКУ ОБОРУДОВАНИЕМ CLIMAVENETA



A Group Company of MITSUBISHI ELECTRIC

Climaveneta — европейский лидер в сфере кондиционирования, отопления и вентиляции с 40-летней историей.

С 2015 года компания входит в состав Mitsubishi Electric Corporation

aircon@mer.mee.com