



Расчетные параметры и эффективность применения воздушных завес у ворот охлаждаемых помещений

А. С. Стронгин, к. т. н., главный специалист АО «ЦНИИПромзданий»

На охлаждение воздуха в кондиционируемых помещениях и технологических морозильных камерах тратится значительное количество энергии, экономия которой является актуальной задачей и имеет большой потенциал. Применение воздушных завес (ВЗХ) позволяет снизить нагрузку на холодильное оборудование, повысить срок его службы, сократить затраты электроэнергии, увеличить межсервисный интервал. Кроме того, исключаются аварийные ситуации, связанные с образованием конденсата и наледи, обеспечивается удобство перемещения для людей и транспорта.



Агрегаты ВЗХ размещаются, как правило, над воротами (верхняя подача), снаружи охлаждаемого помещения. Подача воздуха осуществляется под небольшим углом к плоскости проема ворот. В зависимости от конструкции ворот поток воздуха может быть направлен внутрь или наружу помещения. С нашей точки зрения, оптимальный угол подачи воздуха составляет 15–20°, а относительная ширина выпускной щели

$$f = \frac{H}{b_0} = 20 \div 50.$$

Расчетные формулы ВЗХ приведены в табл. 1. Для упрощения введены значения экспериментальных коэффициентов и физических констант. В графе 4 представлены расчетные зависимости, используемые автором [1], а в

графе 5 — имеющиеся в зарубежных публикациях [2, 3].

Разность давлений в проеме определяет гравитационный напор, обусловленный разностью удельных весов воздуха снаружи и внутри помещения.

При отсутствии ВЗХ эпюра статических давлений представляет собой два треугольника (рис. 1). Холодный воздух выходит из помещения внизу проема, а теплый поступает сверху. Нейтральная линия, в соответствии с условием равенства массовых расходов воздуха, находится ниже середины высоты ворот ($h_0 < H/2$).

При шиберовании проема струей воздушной завесы эпюра давлений перестраивается и представляет собой треугольник (рис. 2). Нейтральная линия находится у верхнего края во-

рот $h_0 = H$. Отметим, что средняя разность давлений в проеме при наличии ВЗХ больше, чем при ее отсутствии. Формула для расчета разности давлений в проеме при работе ВЗХ приведена в п. 1 табл. 1.

Рис. 3 и 4 иллюстрируют линии тока в открытом проеме при отсутствии и наличии ВЗХ.

При отсутствии ВЗХ (рис. 3) движение воздуха происходит в режиме естественной конвекции, поступление воздуха в охлаждаемое помещение — сверху проема.

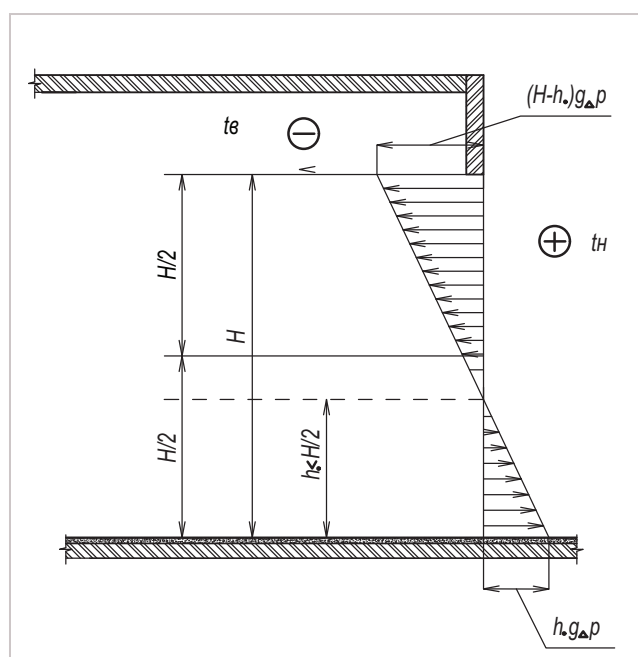


Рис. 1. Эпюра давлений при отсутствии ВЗХ

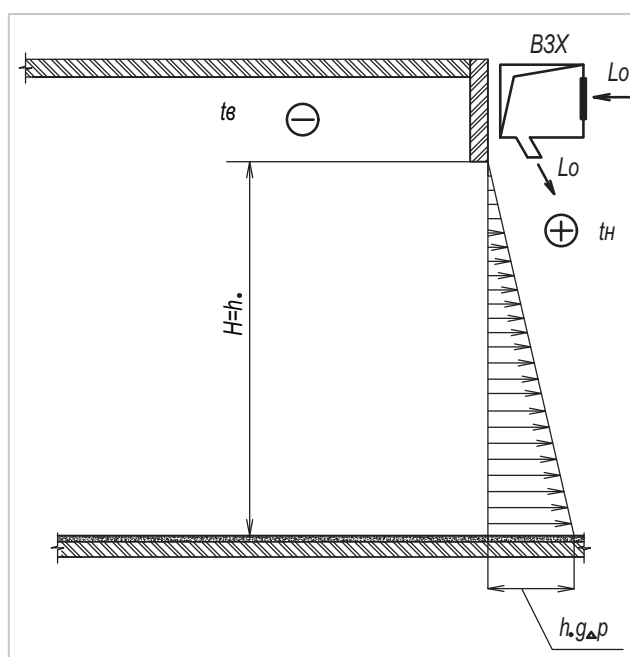


Рис. 2. Эпюра давлений при наличии ВЗХ

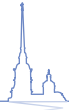


Таблица 1.

Сводная таблица расчетных формул ВЗХ

№ п/п	Параметр	Обозначение, размерность	Формула автора	Формула ASHRAE	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	Разность давлений в проеме	Δp , Па	$\frac{Hg(\rho_b - \rho_n)}{2}$	-----''-----	Гравитационный напор при работе ВЗХ
2	Начальная скорость ВЗХ	V_o , м/с	$\left(\frac{\Delta p H}{2,2 b_o \rho_n E}\right)^{0,5}$	$\left(\frac{D_m g H^2 (\rho_b - \rho_n)}{b_o \rho_n}\right)^{0,5}$	Значения параметра, рассчитанные по (4) и (5), совпадают при $D_m = \frac{0,23}{E}$
3	Начальный расход ВЗХ	L_o , м ³ /с	$V_o \times b_o \times B$	-----''-----	Верхняя подача, ВЗ установлена по всей ширине проема
4	Массовый расход смеси воздуха, поступающей в проем при работе ВЗХ	$G_{см}$, кг/с	$0,5 \rho_{см} L_o (0,6 \sqrt{f} - 1)$	—	$f = \frac{H}{b_o}$
5	Массовый расход воздуха, поступающего в проем при отсутствии ВЗХ	$G_{пр}$, кг/с	$0,7 H B [\rho_n (\rho_b - \rho_n) H]^{0,5}$	-----''-----	$\mu_o = 0,67$
6	Температура смеси воздуха, поступающего в проем при работе ВЗХ	$t_{см}$, °С	$t_b + P(t_n - t_b)$	—	Температурный коэффициент $P = \frac{t_{см} - t_b}{t_n - t_b} = \frac{2(0,009f + 0,05)}{(0,6 \sqrt{f} - 1)}$
7	Тепловой поток через проем при работе ВЗХ	$q_{вз}$, кВт	$C_p G_{см} (t_{см} - t_b)$	$Nu B \lambda (t_n - t_b)$	$Nu = f(Re \cdot Pr)$ $\lambda = 2,59 \cdot 10^{-5}$ кВт/м·гр
8	Тепловой поток через проем при отсутствии ВЗХ	$q_{пр}$, кВт	$C_p G_{пр} (t_n - t_b)$	-----''-----	Теплоемкость воздуха $C_p = 1,01$ кДж/кг·гр
9	Затраты энергии через проем при работе ВЗХ в смену (8 ч)	$Q_{вз}$, кВт·ч/в смену	$\frac{(q_{пр} + N)\tau}{3600}$	$\frac{q_{вз}\tau}{3600}$	В графе 4 учтены затраты энергии на работу электродвигателя ВЗХ мощностью N, кВт
10	Затраты энергии через проем при отсутствии ВЗХ в смену (8 ч)	$Q_{пр}$, кВт·ч/в смену	$\frac{q_{пр}\tau}{3600}$	-----''-----	τ — время открывания проема за смену, с
11	Коэффициент энергетической эффективности ВЗХ	η	—	$1 - \frac{q_{вз}}{q_{пр}}$	См. п.п. 7, 8
12	Коэффициент тепловой эффективности ВЗХ	θ	$1 - P$	—	См. п. 6

Таблица 2.

Безразмерные параметры ВЗХ]

1	2	3	4	5	6
H / b_o	E	D_m	$Nu / Re \cdot Pr$	P	θ
20	0,15	1,53	0,23	0,27	0,73
30	0,17	1,35	0,32	0,28	0,72
40	0,19	1,21	0,41	0,29	0,71
50	0,2	1,15	0,5	0,30	0,70



Таблица 3.

Сводная таблица примеров ВЗХ

Исходные данные			Расчетные параметры					Эффективность	
Размер ворот В*Н (высота), м Время открывания в смену, т сек	$\frac{t_{в}, ^\circ\text{C}}{\rho_{в}, \text{кг/м}^3}$	$\frac{t_{н}, ^\circ\text{C}}{\rho_{н}, \text{кг/м}^3}$	динамика		теплообмен			$\frac{\eta}{\theta}$	$\frac{Q_{пр}^{\text{год}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/}}{\text{В ГОД,}} \cdot \frac{Q_{вз}^{\text{год}}, \text{кВт}\cdot\text{ч/}}{\text{В ГОД}}$
			$\frac{\Delta P, \text{Па}}{L_0, \text{м}^3/\text{с}}$	$\frac{V_{02}, \text{м/с}}{b_0, \text{м}}$	$\frac{t_{см1}, ^\circ\text{C}}{g_{вз}, \text{кВт}}$	$\frac{G_{см3}, \text{кг/с}}{G_{пр3}, \text{кг/с}}$	$\frac{Q_{пр3}, \text{кВт}\cdot\text{ч/}}{\text{В СМЕНУ}} \cdot \frac{Q_{вз3}, \text{кВт}\cdot\text{ч/}}{\text{В СМЕНУ}}$		
$\frac{3,6 \times 3,6}{1800}$	$\frac{-3}{13,1}$	$\frac{+16}{1,22}$	$\frac{1,6}{3,6}$	$\frac{11,2}{0,09}$	$\frac{2,5}{35,7}$	$\frac{6,43}{5,7}$	$\frac{54,7}{18,3}$	$\frac{0,67}{0,71}$	$\frac{38\ 290}{12\ 810}$
$\frac{2,4 \times 2,8}{1200}$	$\frac{-12}{1,35}$	$\frac{+18}{1,21}$	$\frac{1,9}{1,79}$	$\frac{13,3}{0,056}$	$\frac{-3}{34,5}$	$\frac{3,79}{3,24}$	$\frac{32,7}{11,7}$	$\frac{0,65}{0,7}$	$\frac{22\ 890}{8190}$
$\frac{2,2 \times 2,5}{3600}$	$\frac{-23}{1,41}$	$\frac{+20}{1,2}$	$\frac{2,6}{1,73}$	$\frac{15,7}{0,05}$	$\frac{-10}{49,4}$	$\frac{3,76}{3,06}$	$\frac{132,9}{50,2}$	$\frac{0,63}{0,7}$	$\frac{93\ 030}{35\ 140}$

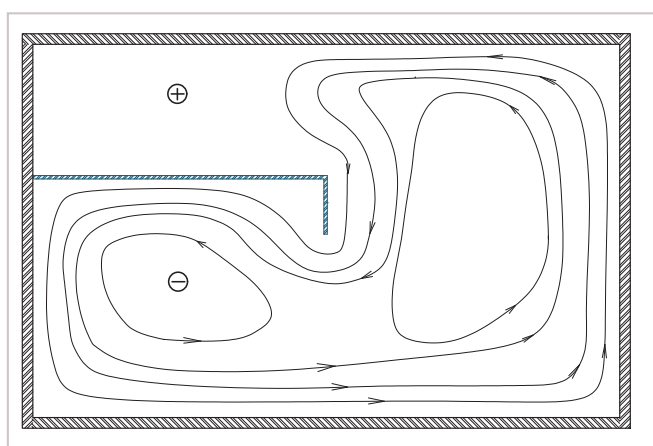


Рис. 3. Линии тока при отсутствии ВЗХ

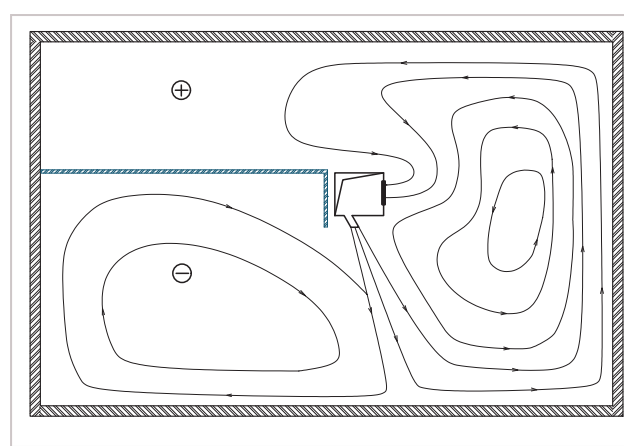


Рис. 4. Линии тока при наличии ВЗХ

При наличии ВЗХ (рис. 4) движение воздуха происходит в режиме вынужденной конвекции, деление струи и поступление воздуха в охлаждаемое помещение — внизу проема. В помещении циркулирует только присоединенная с внутренней стороны струи масса воздуха. Снаружи циркулируют начальный расход (L_0) и присоединенная с внешней стороны струи масса воздуха.

Динамические параметры ВЗХ (начальная скорость и расход в приточной струе) рассчитываются по формулам, приведенным в п.п. 2 и 3 табл. 1. В зарубежных источниках [2] используется понятие «модуля устойчивости» (D_m), который характеризует стабильность струи ВЗХ. Величина D_m представляет собой отношение стабилизирующего фактора (импульса струи) к дестабилизирующему (разности давлений) и рассчитывается по формуле:

$$D_m = \frac{\rho_n b_0 V_0^2}{g H^2 (\rho_v - \rho_n)}. \quad (1)$$

Для практических расчетов предлагается рассматривать диапазон $D_m = 1,3 \div 2,0$.

Широкий диапазон значений модуля устойчивости делает его выбор затруд-

нительным и неоднозначным. Поскольку увеличение D_m приводит к увеличению теплообмена в проеме, обычно рекомендуется принимать минимальное значение $D_m = 1,3$.

Модуль устойчивости связан с предложенным автором коэффициентом динамической эффективности воздушной завесы E [1] следующим простым соотношением:

$$D_m = \frac{0,23}{E}. \quad (2)$$

Коэффициент E определяется как следствие закона сохранения импульса для выделенного контура и позволяет получить однозначное решение для конструкции ВЗХ.

Расчетная схема динамики ВЗХ приведена на рис. 5. Выделяется контур ABCDEF, выходящий за границы проема. Закон сохранения импульса в выделенном контуре, в проекции на ось X, выражается уравнением:

$$I_0 \sin \alpha + I_n - I_b = (P_n - P_b) H B + (P_n - P_p) (F_{AB} - H B). \quad (3)$$

Проекцией импульса потока, проходящего через плоскости DE и FA, пренебрегаем.

Коэффициент динамической эффективности ВЗХ определяется формулой:

$$E = \frac{\Delta p H B}{2 I_0} = 0,5 (\sin \alpha + R), \quad (4)$$

где R — безразмерная величина, зависящая от соотношения геометрических параметров.

Коэффициент E выражается в долях единицы и показывает, насколько эффективно используется при шибровании проема начальный импульс струи, т. е. какая доля начального импульса переходит в противодавление.

Максимальная эффективность ВЗХ, т. е. поворот струи на уровне пола и минимальный расход воздуха, попадающего в помещение, может быть достигнута при единственно возможном, определяемом расчетом, соотношении параметров f , Δp , V_0 (табл. 1, п. 2, графа 4). Рассчитанные динамические параметры являются необходимым и достаточным условием обеспечения минимального теплового потока через проем ворот. Значения коэффициента

E для выбранного диапазона $\frac{H}{b_0}$, а

также соответствующая ему величина D_m приведены в табл. 2, графы 2 и 3.

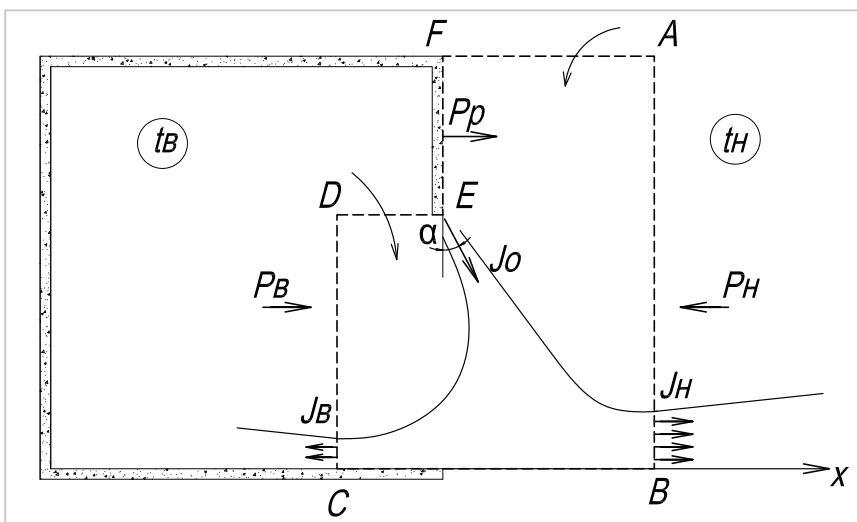


Рис. 5. Расчетная схема динамики ВЗХ

Формулы для расчета теплообмена в проеме ворот при наличии и отсутствии ВЗХ приведены в п.п. 4÷8 табл. 1.

В зарубежных источниках [3] тепловой поток через проем рассчитывается аналогично известным критериальным зависимостям для теплообмена при вынужденной конвекции, с использованием безразмерного комплекса:

$$\frac{Nu}{RePr} = f\left(\frac{H}{b_o}\right). \quad (5)$$

Значения безразмерного комплекса, рассчитанного в работе [3] по CFD-модели, приведены в табл. 2, графа 4.

Нами предлагается рассчитывать тепловой поток на основе струйных закономерностей, определив массовый расход и среднюю температуру смеси воздуха, проходящего в проем. Использование струйных закономерностей дает больше информации об особенностях теплообменных процессов при одинаковой с зарубежными исследованиями интегральной величине теплового потока.

Приняв для функциональной зависимости (5) аппроксимирующую формулу, приведенную в работе [3], получим следующую зависимость для температурного коэффициента p :

$$P = \frac{t_{cm} - t_B}{t_H - t_B} = \frac{2(0,009f + 0,05)}{(0,6\sqrt{f} - 1)}. \quad (6)$$

Значения коэффициента P , рассчитанные по формуле (6), приведены в табл. 2, графа 5.

Затраты энергии через проем при наличии и отсутствии ВЗХ рассчитываются по формулам табл. 1, п.п. 9 и 10. В п. 9 учитываются затраты электроэнергии на электродвигатель агрегата ВЗХ.

Эффективность ВЗХ можно оценить принятым в справочнике ASHRAE коэффициентом энергетической эффективности η , величина которого рассчитывается по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{q_{вз.}}{q_{пр}}. \quad (7)$$

Анализ формулы (7) показывает, что $\eta = 1$ означает идеальную ВЗХ (полностью устраняющую теплопотери в проеме), а $\eta = 0$ — отсутствие ВЗХ (незащищенный проем). Практически величина η не превышает значения 0,7 ($\eta < 0,7$), однако возможный диапазон ее изменения составляет $-1,58 < \eta < 0,85$. Отрицательная величина η указывает, что некорректный подбор ВЗХ может привести к существенному возрастанию теплообмена через проем по сравнению с ее отсутствием.

Автором предлагается также оценивать эффективность ВЗХ коэффициентом тепловой эффективности θ :

$$\theta = 1 - P = 1 - \left(\frac{t_{cm} - t_B}{t_H - t_B}\right). \quad (8)$$

$\theta = 1$ означает идеальную ВЗХ, а $\theta = 0$ — отсутствие ВЗХ.

В отличие от коэффициента η коэффициент θ не может быть отрицательным. Его максимальная величина известна априори и приведена в табл. 2, графа 6. Фактическое значение θ может быть определено путем замера полей температур в проеме и непосредственно использовано при проведении пусконаладочных работ.

Примеры расчета ВЗХ для ряда характерных случаев, встречающихся на практике, приведены в табл. 3. Результаты расчетов показывают, что, хотя массообмен в проеме ворот при действии ВЗХ несколько возрастает



$\left(\frac{G_{см}}{G_{пр}} = 1,13 \div 1,23\right)$, теплообмен существенно снижается

$\left(\frac{q_{пр}}{q_{вз}} = 2,7 \div 3,0\right)$. Безразмерные коэффициенты эффективности

составили: $E = 0,19 \div 0,2$; $\eta = 0,63 \div 0,67$; $\theta = 0,7 \div 0,71$.

Выводы

1. Корректно подобранные воздушные завесы позволяют сократить расходы теплоты через открытый проем ворот охлаждаемых помещений почти в три раза по сравнению с незащищенным проемом. Годовая экономия тепловой энергии в рассмотренных примерах, в соответствии с размерами ворот и разностью температур, составила $14\,700 \div 57\,890$ кВт·ч/в год.

2. Для расчета параметров ВЗХ рекомендуется использовать функциональные зависимости и константы, приведенные в табл. 1 и 2.

3. Для оценки эффективности применения ВЗХ следует использовать безразмерные коэффициенты динамической, энергетической и тепловой эффективности (E , η и θ).

Литература

1. Гримитлин А. М. Воздушные завесы для зданий и технологических установок. Учебное пособие. / А. М. Гримитлин, А. С. Стронгин // «Лань», Санкт-Петербург, 2018.

2. Foster, A. Three-dimensional effects of an air curtain used to restrict cold room infiltration. / A. Foster, M. J. Swain, R. Barrett, P. D'Agaro, L. Ketteringham, S. J. James // Applied Mathematical Modelling, 31 (6), 2007.

3. Verhaeghe, G. Study of air curtains used to restrict infiltration into refrigerated rooms. / G. Verhaeghe, M. V. Belleghem, A. Willockx, I. Verhaert, M. D. Paepe // Heat Transfer. Fluid Mechanics and Thermodynamics. 7th International Conference. January 2010. Proceedings.

Условные обозначения

B — ширина ворот, м;

H — высота ворот, м;

τ — время открывания ворот за смену, с;

$t_{в}, t_{н}$ — соответственно температуры воздуха в охлаждаемом и примыкающем к нему помещении, °С;

$\rho_{в}, \rho_{н}$ — соответственно плотность воздуха в охлаждаемом и примыкающем к нему помещении, кг/м³;

Δp — разность давлений в проеме ворот, Па;

$P_{н}, P_{в}, P_{р}$ — соответственно средние аэростатические давления снаружи и внутри помещения, реактивное давление наружной стены, Па;

$I_{н}, I_{в}, I_{р}$ — соответственно импульсы потоков — начальный, уходящий и входящий в помещение, Н;

D_m — модуль отклонения;

V_0 — начальная скорость воздушной завесы, м/с;

α — угол между начальным направлением струи и плоскостью проема;

b_0 — ширина воздуховыпускной щели воздушной завесы, м;

$t_{см}$ — средняя температура смеси воздуха, поступающего в проем ворот при работе воздушной завесы, °С;

Nu, Re, Pr — соответственно числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля;

$G_{см}, G_{пр}$ — соответственно массовые расходы воздуха, поступающего в проем ворот при работе воздушной завесы и при ее отсутствии, кг/с;

$Q_{пр}, Q_{вз}$ — соответственно поступления теплоты через открытый проем ворот в течение рабочей смены (8 часов) при отсутствии и наличии воздушной завесы, кВт·ч/в смену;

$Q_{пр}^{год}, Q_{вз}^{год}$ — соответственно поступления теплоты через открытый проем ворот в течение года (2 смены, 350 дней) при отсутствии и наличии воздушной завесы, кВт·ч/в год;

$q_{пр}, q_{вз}$ — соответственно тепловой поток через открытый проем ворот при отсутствии и наличии воздушной завесы, кВт;

N — мощность электродвигателя ВЗ, кВт;

f — относительная площадь выпускных отверстий ВЗ;

P — температурный коэффициент;

E — коэффициент динамической эффективности воздушной завесы;

η — коэффициент энергетической эффективности воздушной завесы;

θ — коэффициент тепловой эффективности воздушной завесы.

