

Проблемы регулирования шиберующих завес

Ю. Н. Марр, советник генерального директора АО «НПО «Тепломаш»

Проектные расчеты и выбор завес выполняются для единственного режима, соответствующего расчетной зимней температуре воздуха и скорости ветра. Неизбежное повышение наружной температуры по отношению к расчетной может быстро перевести режим работы из энергосберегающего в энергорастрастный: нагретые струи завес начнут не только уходить на улицу, но и выбрасывать из помещения теплый воздух. В [1] показано, что для сохранения режимов нормальной защиты проема в течение всего отопительного периода иногда требуется уменьшение расхода воздуха вдвое (при обычном отсутствии других способов регулирования). Однако распространенный подход к организации защиты по остаточному принципу, как правило, снимает с повестки дня вопросы регулирования даже в самой примитивной форме.

В [1] проблема регулирования фактически лишь обозначена. Расчетные зависимости частоты вращения вентиляторов приведены в [1] для верхней завесы и не распространяются на завесы боковые. Акцент сделан на непрерывном изменении частоты и, соответственно, расхода воздуха завесы в зависимости от наружной температуры. В то же время предлагаемые рынком завесы имеют, в большинстве своем, установленные дискретные частоты вращения. Рекомендаций по связи момента переключения частоты с наружной температурой не дают ни производители, ни проектанты. Поэтому в настоящей работе предпринята попытка проанализировать особенности работы верхних и боковых завес в условиях изменяющейся наружной температуры и выработать, по возможности, простые способы дискретного регулирования. Анализ и рекомендации ограничены помещениями негерметичного типа.

Общая для верхних и боковых завес аналитическая связь частоты вращения вентиляторов (расхода) с параметрами защиты проема получается после несложных преобразований выражения для разности давлений в проеме с учетом как гравитационной разности, так и ветрового напора:

$$(n/n_0)^2 = (\sigma_0/\sigma) [(9,8(\theta - 1)H + K_B\theta v_B^2)/(9,8(\theta_0 - 1)H + K_{B/0}\theta_0 v_{B/0}^2)], \quad (1)$$

где $\theta = T_B/T_H$, T_B и T_H — абсолютные внутренняя и наружная температуры воздуха;
 $\sigma = \Delta P_{\text{пр}}^- F^-$ — параметр, характеризующий отношение потоков импульса от разности давлений и завесы;

$\Delta P_{\text{пр}}^- = \Delta P_{\text{пр}}/\rho v_3^2$ — относительная разность давлений в проеме;

v_3 — скорость струи на выходе из завесы;

$F^- = HB/F_3$ — отношение площадей проема и сопел завесы;

K_B — коэффициент, совокупно учитывающий наружную аэродинамику здания и внутренние особенности аэрационных проемов;

v_B — скорость ветра, индексом «0» отмечены величины при расчетных условиях: наружной температуре, ветре и аэродинамике защиты (показателе q_0);

H — высота проема.

В (1) отношение (σ_0/σ) рассматривается как функция основных расчетных и варьируемых параметров защиты: показателей работы завесы q_0 и q , параметра F^- , угла струи α .

Для верхней завесы отношение (σ_0/σ) легко получается из основных уравнений [1] и окончательно выражение (1) имеет вид:

$$(n/n_0)^2 = [(9,8(\theta - 1)H + K_B\theta v_B^2)/(9,8(\theta_0 - 1)H + K_{B/0}\theta_0 v_{B/0}^2)] \times$$

$$X [(0,25\hat{q}_o^2/F^- + \hat{q}_o\sqrt{(\hat{K}/F^-) + \sin\alpha}) / (0,25\hat{q}^2/F^- + \hat{q}\sqrt{(\hat{K}/F^-) + \sin\alpha})], (2)$$

$$\text{где } \hat{q} = (2/q) - 1, K' = K + 0,5 = (\xi/0,55)^2 \cos\alpha + 0,5.$$

Проанализируем вначале вариацию параметров на примере верхней завесы. Если подбор завесы для расчетных условий определил показатель $q \leq 0,85$, то завеса имеет «запас» на повышение наружной температуры без изменения расхода до момента перехода через полную защиту ($q = 1$). Примем для дальнейшего анализа данную степень свободы $q_o = 0,75$, границу роста температуры при неизменном расходе определим как $q = 1,1$. Тогда $\hat{q} = (2/q) - 1 = 0,82$, $\hat{q}_o = 1,67$. Кроме того, примем остальные параметры близкими к «обычным»: $\alpha = 30^\circ$, $\xi = 0,8$, $K' = 2,32$, $F^- = 20$, $v_B = 3$ м/с, $K_B = 0,16$, $T_B = 18 + 273 = 291$ К. Для определения границы роста наружной температуры θ_1 при неизменной частоте вращения положим в (2) $n/n_o = 1$ и подставим принятые величины:

$$[(\theta_1 - 1)N + 0,147\theta_1] / [(\theta_o - 1)N + 0,147\theta_o] = 0,713. (3)$$

Выражение (3) определяет граничную наружную температуру θ_1 ($t_{н1}$), при которой показатель q достигнет отведенного ему предела $q = 1,1$. Далее потребуется уменьшение частоты вращения (расхода завесы) с возвратом показателя q к величине 0,75. Для этого в (2) следует положить $\theta = \theta_o$, $\hat{q}_o = 0,82$, $\hat{q} = 1,67$, после чего останется

$$n_1 = 0,844 n_o. (4)$$

Для определения новой температурной границы изменения частоты необходимо в (3) заменить θ_o на θ_1 , а θ_1 на θ_2 :

$$[(\theta_2 - 1)N + 0,147\theta_2] / [(\theta_1 - 1)N + 0,147\theta_1] = 0,713 (5)$$

По результатам (3) – (5) можно записать в общем виде

$$[(\theta_i - 1)N + 0,147\theta_i] / [(\theta_{i-1} - 1)N + 0,147\theta_{i-1}] = 0,713 (6)$$

или после упрощений

$$\theta_i = 0,287N / (N + 0,147) + 0,713\theta_{i-1} (7)$$

$$n_i = 0,844 n_{i-1}. (8)$$

Расчет по выражениям (7) и (8) сведен в табл. 1–3 для наружных температур -26°C и -50°C с высотой проема 3 м и 6 м.

Таблица 1. Вариация температур и частот для высоты проема Н = 3 м (верхняя завеса, расчетная температура -26°C)

$t_{i-1} // t_i, ^\circ\text{C}$	$-26 // -11,8$	$-11,8 // -0,6$	$-0,6 // + 8,0$
$n_{i-1} // n_i, \text{об/мин}$	1430//1207	1207//1020	1020//860
$\theta_{i-1} // \theta_i$	1,178//1,114	1,114//1,068	1,068//1,036

Таблица 2. Вариация температур и частот для высоты проема Н = 3 м (верхняя завеса, расчетная температура -50°C)

$t_{i-1} // t_i, ^\circ\text{C}$	$-50 // -31,4$	$-31,4 // -16,0$	$-16,0 // -3,8$	$-3,8 // + 5,5$
$n_{i-1} // n_i, \text{об/мин}$	1430//1207	1207//1020	1020//860	860//725
$\theta_{i-1} // \theta_i$	1,305//1,204	1,204//1,132	1,132//1,081	1,081//1,044

Таблица 3. Вариация температур и частот для высоты проема Н = 6 м (верхняя завеса, расчетная температура –50 °С)

$t_{i-1} // t_i, \text{ }^\circ\text{C}$	-50// -32,6	-32,6// -18,3	-18,3// -7,2	-7,2// +1,5	+1,5// +7,7
$n_{i-1} // n_i, \text{ об/мин}$	1430//1207	1207//1020	1020//860	860//725	725//615
$\theta_{i-1} // \theta_i$	1,305//1,21	1,21//1,143	1,143//1,095	1,095//1,061	1,061//1,037

Как видно, минимальное число частот в принятом диапазоне показателя $q = 0,75 - 1,1$ составляет 4 (табл. 1). Для более низких расчетных температур требуется большее число переключений частоты вращения. Относительное изменение частоты на каждом шаге неизменно (8) и определяется при прочих равных условиях только заданными границами изменения показателя q . Сближение границ наименьшего и наибольшего значений показателя q приведет к увеличению числа переключений. Увеличение размеров проема (высоты), согласно табл. 3, может добавить еще один шаг переключения частоты.

Для двусторонних боковых завес по [1] выводится следующее уравнение относительно параметра σ :

$$[0,5\sigma(1 + \sigma - \sin\alpha)]^{0,5} = 0,5[(1 + \sin\alpha)/(K + 1)]^{0,5} + (1/q - 0,5)(\sigma/F^-)^{0,5}. \quad (9)$$

Это уравнение переходит в квадратное, если приближенно принять, что последнее слагаемое в (9) не зависит от σ . Можно задать величину σ в последнем слагаемом и найти решение уравнения. Проверка методом последовательных приближений показала, что первое приближение отличается от второго не более чем на 5%. Расчет по (9) получено $\sigma_{(q=0,75)} = 0,53$, $\sigma_{(q=1,1)} = 0,42$, откуда

$$n_i = (0,42/0,53)^{0,5} n_{i-1} = 0,89 n_{i-1}. \quad (10)$$

Соответственно, выражение (7) перейдет в

$$\theta_i = 0,208N/(N + 0,147) + 0,792\theta_{i-1}. \quad (11)$$

Расчет по (10) и (11) представлен в табл. 4 и 5. В равных условиях боковые завесы требуют большего числа шагов переключения частот. Объяснение этому следует искать в плохой аэродинамике встречных струй (развитие автоколебательных процессов) [1], что в скрытом виде отображается в методе расчета боковых завес.

Таблица 4. Вариация температур и частот для высоты проема Н = 3 м (боковая двусторонняя завеса, расчетная температура –26 °С)

$t_{i-1} // t_i, \text{ }^\circ\text{C}$	-26// -15,8	-15,8// -7,0	-7,0// +0,3	+0,3// +6,3
$n_{i-1} // n_i, \text{ об/мин}$	1430//1273	1273//1133	1133//1010	1010//900
$\theta_{i-1} // \theta_i$	1,178//1,131	1,131//1,094	1,094//1,065	1,065//1,042

Таблица 5. Вариация температур и частот для высоты проема Н = 3 м (боковая двусторонняя завеса, расчетная температура –50 °С)

$t_{i-1} // t_i, \text{ }^\circ\text{C}$	-50// -36,8	-36,8// -25,0	-25,0// -15,0	-15,0// -6,5	-6,5// +1,0
$n_{i-1} // n_i, \text{ об/мин}$	1430//1273	1273//1133	1133//1010	1010//900	900//800
$\theta_{i-1} // \theta_i$	1,305//1,232	1,232//1,174	1,174//1,128	1,128//1,092	1,092//1,062

Для односторонних боковых завес аналогичные преобразования выражений [1] дали уравнение

$$\sigma = 2 F^- \sin \alpha \{ F^- - \lambda [1/q - 0,5(\lambda + 1)] / \sin \alpha \}^{-1}. \quad (12)$$

Здесь коэффициент эжекции определяется как $\lambda = (0,55/\xi)(F^-/\cos \alpha)^{0,5}$, принято $F^- = 30$, $\alpha = 45^\circ$. Расчет по (12) получено $\sigma_{(q=0,75)} = 1,089$, $\sigma_{(q=1,1)} = 1,018$, откуда

$$n_i = (1,018/1,089)^{0,5} n_{i-1} = 0,935 n_{i-1}. \quad (13)$$

Выражение (7) переходит в

$$\theta_i = 0,126N/(N + 0,147) + 0,874\theta_{i-1}. \quad (14)$$

Таблица 6. Вариация температур и частот для высоты проема $N = 3$ м (боковая односторонняя завеса, расчетная температура -26°C)

$t_{i-1} // t_i, ^\circ\text{C}$	$-26 // -19,9$	$-19,9 // -14,4$	$-14,4 // -9,2$	$-9,2 // -4,6$
$n_{i-1} // n_i, \text{об/мин}$	$1430 // 1337$	$1337 // 1250$	$1250 // 1170$	$1170 // 1090$
$\theta_{i-1} // \theta_i$	$1,178 // 1,150$	$1,150 // 1,125$	$1,125 // 1,103$	$1,103 // 1,084$

Расчет по выражениям (13) и (14) приведен в табл. 6. Очевидно, регулирование односторонних боковых завес пошаговым снижением частоты вращения не имеет смысла. Это связано со сложной и плохо организованной аэродинамикой струи, набегающей на острый край проема. В отличие от боковой, односторонняя струя верхней завесы организованно растекается по полу.

Как соотносятся полученные результаты с реальными промышленными завесами, представленными на рынке? У двухскоростных завес снижение частоты лежит в диапазоне от 0,78 до 0,5. У трехскоростных на каждом шаге от 0,9 до 0,7, причем первый и второй шаги могут быть разными. Если принимать во внимание только завесы с фиксированными частотами вращения, то очень небольшое число моделей имеет величину шага, необходимого для регулирования верхних и боковых двусторонних завес. При этом количества шагов недостаточно для регулирования работы во всем возможном диапазоне наружной температуры. Понятно, что шаги большего размера фактически приведут к повышению верхней границы показателя q и понижению его нижней границы. Это означает, что в некоторые моменты стояния определенных наружных температур завеса будет работать с низкой эффективностью, хотя и не в такой степени энергозатратно, как если бы регулирование вообще отсутствовало. Опираясь на каталожные данные по возможным расходам воздуха выбранной модели завесы, можно дать лишь индивидуальные рекомендации наружных температур, при которых следует осуществлять переключение скоростей в каждом конкретном случае.

Вместе с тем для организации более тонкого регулирования при защите двусторонними боковыми завесами предлагается использовать несимметричную схему струйной структуры. Пусть завесы имеют установленное отношение частот переключения 0,81, а заданные границы показателя q требуют шаг 0,9. Не вдаваясь в рамках данной работы в аэродинамические особенности несимметричной защиты проема, обрисуем схему предлагаемого регулирования, представленную на рис. 1.

Изменения частоты вращения вентиляторов в зависимости от наружной температуры по условию (10) изображены черным цветом, предлагаемые несимметричные переключения частот: зеленая линия — правая сторона проема, красная линия — левая сторона. В диапазоне температур от -26°C до -16°C завесы на обеих сторонах имеют одинаковую частоту вращения 1430 об/мин. При повышении температуры за -16°C правая сторона продолжает работать на частоте 1430 об/мин, а левая переключается на 1130 об/мин. Расход из левой завесы уменьшается до 0,8 номинального. Суммарный расход будет

составлять 0,9 номинального, как и было бы при шаге 0,9. Интересно, что и поток импульса несимметричной структуры будет равен 0,8 номинального, как это было бы при шаге 0,9. В условиях разности давлений, меньшей, чем расчетная (при $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$), область взаимодействия левой и правой струй сместится от плоскости симметрии проема в левую его часть. Несимметричная структура будет поддерживаться до температуры $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этот момент правая завеса должна переключиться на частоту 1130 об/мин — симметричная картина восстанавливается и функционирует до температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. При переходе через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ снова формируется несимметричная структура вплоть до $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Окончательно, от $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$ проем защищает симметричная структура.

Таким образом, относительно крупный шаг переключения скоростей может быть уменьшен вдвое при организации защиты боковыми двусторонними завесами.

В односторонних завесах такой способ невозможен. Однако для них предлагается пусть более грубое, но простое и действенное регулирование. Для этого необходимо, чтобы завеса состояла из трех или хотя бы из двух отдельных модулей, которые можно переключать независимо друг от друга. Поскольку разность давлений в проеме возрастает снизу вверх, то с повышением наружной температуры в первую очередь переключается на уменьшение расхода один верхний модуль, затем второй сверху и, в последнюю очередь, нижний. Далее такая последовательность переключений повторяется.

Если для примера взять за основу данные табл. 6 с расчетным шагом изменения частоты 0,935 и принять действительный шаг переключения модулей 0,82, то примерно три расчетных шага табл. 6 будут соответствовать одному шагу модулей ($0,935^3 = 0,82$). Примем для простоты, что завеса состоит из трех одинаковых модулей. Схема регулирования для этого случая представлена на рис. 2. Как видно, суммарные расходы воздуха от трех модулей и суммарные потоки импульса в этой схеме соответствуют расчетным величинам на каждом шаге переключения по (13). Несмотря на то, что подобные решения являются сугубо индивидуальными, проектная разработка схемы регулирования односторонней боковой завесы не представляет трудностей. Не следует переоценивать влияние отклонения от идеальной картины защиты, связанное с неравномерностью аэродинамики по высоте проема при последовательном переключении скоростей модулей. Хотя бы такое отслеживание повышения наружной температуры привносит упорядочение в организацию защиты проема.

Значительно более сложно организовать комбинированное переключение частот на модулях верхних завес. Если, например, шаг изменения скорости модуля примерно совпадает с расчетным по (7) и (8), т. е. 0,844, то при расчетной температуре $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ три установленные обычно скорости доводят режим защиты до нормальной положительной температуры $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако при более низкой наружной температуре может потребоваться больше трех ступеней. Так, при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ требуется уже 4 ступени для небольших ворот и еще больше для больших ворот. Оправданием отсутствия всех требуемых ступеней изменения скоростей может служить лишь близость нерегулируемого «хвоста» к «теплому» краю диапазона и относительно небольшому снижению комфортности и эффективности защиты.

Если же установленный шаг переключения скоростей в модулях верхней завесы составляет около $(0,844)^{0,5} = 0,92$ или, напротив, $0,844^2 = 0,71$, то решение задачи упирается в тривиальное отсутствие инструментов последовательного микширования разноскоростных верхних струй, как это предложено в других завесах. Так, еще при шаге 0,92 можно, дождавшись температуры $-11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по табл. 1), переключить одновременно все секции, однако не на режим с показателем $q = 0,75$, а где-то около 0,9. В лучшем случае удастся после трех переключений выйти на показатель $q = 1,1$ при наружной температуре около $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Больше ступеней переключения нет и, начиная с $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, завеса будет работать на выброс нагретой струи на улицу. Единственное, что логично сделать, это отключить источник тепла.

При установленном шаге 0,71 одновременное переключение всех модулей в точке $-11,8$ °С на частоту 1020 об/мин переведет защиту по (2) вместо показателя $q = 0,75$ на $q = 0,52$. При расчетной температуре -26 °С это может оказаться некритичным. Но при расчетной -50 °С (первое переключение при -32 °С) такое ослабление защиты приведет к неприемлемо низкой температуре затекающей смеси.

Подводя итог проведенному анализу, можно дать некоторые обобщенные проектные рекомендации приближенного характера для каждого типа завес с трехскоростными модулями при защите помещений негерметичного типа.

Общая расчетная формула промежуточных температур t_1 и t_2 , при которых должно происходить переключение скоростей, имеет вид:

$$t_1 = 5 - a_1(5 - t_p), t_2 = 5 - a_2(5 - t_p),$$

где t_p — расчетная зимняя температура, °С, 5 °С — принятая граница регулируемого температурного диапазона;

a_1 и a_2 — коэффициенты, зависящие от типа завес и параметров защиты. Дальнейшие рекомендации величин a_1 и a_2 могут служить лишь ориентировочными оценками.

Если наружная текущая температура $t_p \leq t_n < t_1$, завеса работает на штатной частоте вращения n_0 . При $t_1 \leq t_n < t_2$ завеса работает на второй установленной частоте n_1 . При $t_2 \leq t_n < 5$ °С завеса работает на третьей установленной частоте n_2 . Рекомендации сведены в табл. 7.

Таблица 7. Проектные рекомендации переключения скоростей завес

Тип завесы	Шаг регулирования $n_1 / n_0 = n_2 / n_1$	Расчетная температура t_p , °С	a_1	a_2		
Верхняя завеса	$\approx 0,84$	$t_p \geq -26$ °С	0,55	0,16		
		$t_p < -26$ °С	0,67	0,33		
	< 0,84 после второго переключения отключить источник тепла	$t_p \geq -26$ °С	0,55	0,16		
		$t_p < -26$ °С	0,67	0,33		
	> 0,84	$t_p \geq -26$ °С	0,48	0,16		
		$t_p < -26$ °С	0,60	0,30		
Боковая двусторонняя завеса — одновременное переключение всех модулей — грубое регулирование		Во всем диапазоне	0,67	0,33		
Боковая двусторонняя завеса — тонкое регулирование	Для одной стороны*)		0,67	0,33		
	Для противоположной стороны*)				0,33	0
	Для одной стороны*)		0,76	0,36		
	Для противоположной стороны*)				0,55	0,20
Боковая односторонняя завеса — одновременное переключение всех модулей — грубое регулирование		Во всем диапазоне	0,67	0,33		
Боковая односторонняя завеса, 3-модульная тонкое регулирование	Верхний модуль**)		Во всем диапазоне	0,80		
	Средний модуль**)				0,67	0,16
	Нижний модуль**)				0,45	0
Боковая	Верхний модуль**)		0,67	0,26		

односторонняя завеса, 2-мо- дульная тонкое регулирование	Нижний модуль**))	Во всем диапазоне	0,45	0,16
---	--------------------	-------------------	------	------

* Модули каждой стороны имеют самостоятельное регулирование по своему датчику наружной температуры.

** Каждый модуль должен быть обеспечен самостоятельным регулированием по своему датчику наружной температуры.

Литература

1. Марр Ю. Н. Воздушно-тепловые завесы. Расчет и проектирование завес для защиты проемов промышленных и общественных зданий. — СПб.: АО «НПО «Тепломаш», 2017.