воздуха, проходящего через двери многоэтажного здания, будет иметь вид

$$G_{пр} = 3600\, k_1 \mu F_в \sqrt{2g\left(h^*_{н.\,з} - \frac{H_{дв}}{2}\right)\Delta\gamma\gamma_{см}}\,. \qquad (70)$$

Таблица 6

Расстояния от пола до нейтральной зоны и коэффициенты расхода воздуха через входы

Конструкция входных дверей	$h^*_{н.\,з}$	μ_0
Двойные двери в тамбуре; прямой проход	0,36 $H_{зд}$	1,0
Тройные двери в двух тамбурах; прямой проход . . .	0,40 $H_{зд}$	0,75
Двойные двери в тамбуре; зигзагообразный проход . .	0,44 $H_{зд}$	0,6
Тройные двери в двух тамбурах; зигзагообразный проход	0,55 $H_{зд}$	0,5
Четыре распашные двери в тамбуре; зигзагообразный проход	0,60 $H_{зд}$	0,45
Вращающиеся двери	0,65 $H_{зд}$	0,1

Примечание. $h^*_{н.\,з}$ — высота расположения нейтральной зоны от пола 1-го этажа, $H_{зд}$ — высота здания от пола 1-го этажа до потолка последнего этажа.

Ввиду того, что сопротивление проходу воздуха через двери значительно, а скорость выпуска воздуха из воздушных завес в дверях ограничена 8 *м/сек*, то, допуская небольшую ошибку в сторону запаса, можно не учитывать влияния завесы на уменьшение коэффициента расхода и считать $\mu = \mu_0$. Это очевидно при $\mu_0 \leqslant 0{,}6$. При $\mu_0 > 0{,}6$ для определения μ можно воспользоваться графиками рис. 17 и 18.

Необходимое количество воздуха на завесу, при заборе его внутри помещения или снаружи и подаче в тамбур у наружных дверей определяется по формуле

$$G_з = G_{пр}\,\frac{t_{вн} - t_н}{t_з - t_н}\ кг/ч, \qquad (71)$$

где $t_з$ — температура воздуха, подаваемого для завесы; принимается в соответствии со СНиП II-Г. 7-62 равной 50° (см. § 6);

$t_{вн}$ — температура воздуха внутри помещения.

Расход тепла на подогрев воздуха, подаваемого в завесу, определяется:

а) при заборе воздуха внутри помещения по формуле

$$Q = G_з \cdot 0{,}24\,(t_з - t_{вн})\ ккал/ч; \qquad (72)$$

б) при заборе снаружи

$$Q = G_з \cdot 0{,}24\,(t_з - t_н)\ ккал/ч. \qquad (73)$$

Когда в вестибюле нет постоянных рабочих мест и допускается кратковременное понижение температуры воздуха, можно уменьшить расход тепла и воздуха на завесу. В этом случае в зависимости от числа людей, проходящих в течение часа через вход, в формулы (70)—(73) вводится уменьшающий коэффициент k_2, приведенный в табл. 8.

Таблица 7

Поправочный коэффициент k_1

Место забора воздуха	Место подачи воздуха	k_1
Внутри помещения	Открытый вестибюль	1,0
	Закрытый вестибюль или тамбур	0,9
Снаружи	Открытый вестибюль	0,8
	Закрытый вестибюль или тамбур	0,7

Таблица 8

Количество человек, проходивших через вход за час	Двери	
	двойные	тройные
	Коэффициент k_2	
600	0,25	0,2
600—1000	0,45	0,4
1000—1500	0,62	0,52
1500—2000	0,75	0,65

§ 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА, ПРОХОДЯЩЕГО ЧЕРЕЗ ВОРОТА, ЗАЩИЩЕННЫЕ ЗАВЕСОЙ, И КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА ДЛЯ ЗАВЕСЫ ПРИ ДИСБАЛАНСЕ РАСХОДОВ ВОЗДУХА МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

VIII. Рассмотрим случаи, когда воздушная завеса устроена в высоком здании с фонарем. Нейтральная зона проходит выше ворот ($h_{н.\,з} > \frac{H_в}{2}$). В здании имеется механическая приточная и вытяжная вентиляция, причем расход воздуха приточной вентиляции не равен расходу воздуха вытяжной вентиляции.

Большей частью в производственных помещениях расход воздуха вытяжной механической вентиляции превышает количество воздуха, подаваемого приточной вентиляцией, поэтому назовем величиной дисбаланса превышение вытяжки над притоком:

$$\Delta G = G^{мех}_{выт} - G^{мех}_{прит}.$$

Уравнение воздушного баланса при заборе воздуха для завесы из помещения будет иметь вид

$$G_{пр} + G_{прит} - G_{выт} - G_{зав} = \Delta G. \qquad (74)$$

Подставив вместо входящих величин в уравнение (74) соответствующие формулы, получим

$$\left[\mu F_в (1-q)\sqrt{\gamma_{см}} + (\mu F)_{прит}\sqrt{\gamma_н}\right]\cdot\sqrt{2gh_{н.з}\Delta\gamma} - (\mu F)_{вып}\times$$
$$\times\sqrt{2g(h-h_{н.з})\Delta\gamma\cdot\gamma_{ух}} = \frac{\Delta G}{3600}. \qquad (75)$$

Поделив обе части равенства на $(\mu F)_{вып}\sqrt{2g\Delta\gamma\cdot\gamma_{ух}}$, найдем

$$\frac{\left[\mu F_в (1-q)\sqrt{\frac{\gamma_{см}}{\gamma_н}} + (\mu F)_{прит}\right]\sqrt{\frac{\gamma_н}{\gamma_{ух}}}}{(\mu F)_{вып}}\sqrt{h_{н.з}} - \sqrt{h-h_{н.з}} =$$
$$= \frac{\Delta G}{3600\,(\mu F)_{вып}\sqrt{2g\gamma_{ух}}\sqrt{\Delta\gamma}}. \qquad (75')$$

Обозначим, как это было сделано при построении номограмм I и II, отношение площади приточных отверстий к вытяжным [см. формулы (53), (54)], примем постоянные значения объемных весов, когда они входят как сомножители, и дополнительно обозначим

$$Ф = \frac{\Delta G}{3600\,(\mu F)_{вып}\sqrt{2g\gamma_{ух}}\sqrt{\Delta\gamma}} = 5{,}72\cdot 10^{-5}\frac{\Delta G}{(\mu F)_{вып}\sqrt{\Delta\gamma}}. \qquad (75'')$$

Тогда уравнение (75′) запишется

$$1{,}052\,Б\sqrt{h_{н.з}} - \sqrt{h-h_{н.з}} = Ф. \qquad (76)$$

Решить уравнение (76) можно с помощью номограммы IV (рис. 38). На осях этой номограммы отложены $Ф$ и $h_{н.з}$, а на поле нанесены два семейства кривых

$$1{,}052\,Б\sqrt{h_{н.з}} = Ф_1;$$
$$\sqrt{h-h_{н.з}} = Ф_2.$$

Для решения уравнения (76) надо подобрать такое значение $h_{н.з}$, чтобы при данных $Б$ и h уравнение

$$Ф_2 + Ф = Ф_1 \qquad (76')$$

превратилось в тождество.

Графически значение $h_{н.з}$ определяется перенесением кривой $Ф_2$ (для данного значения h) вправо, параллельно на расстояние $Ф$. Ордината точки пересечения передвинутой кривой $Ф_2$ с кривой $Ф_1$ для данного значения $Б$ и будет искомым значением высоты нейтральной зоны $h_{н.з}$.

Перенести кривую, параллельную данной, можно с помощью циркуля и двух треугольников.

Можно скопировать на кальку оси координат номограммы и семейство кривых $Ф_2$.

Подвинув кальку с семейством кривых $Ф_2$ вдоль оси абсцисс на расстояние $Ф$, найдем искомое значение $h_{н.з}$ — ординату точки пересечения данной кривой $Ф_2$ с кривой $Ф_1$, соответствующей заданному значению $Б$ (см. пример 9 в гл. IV).

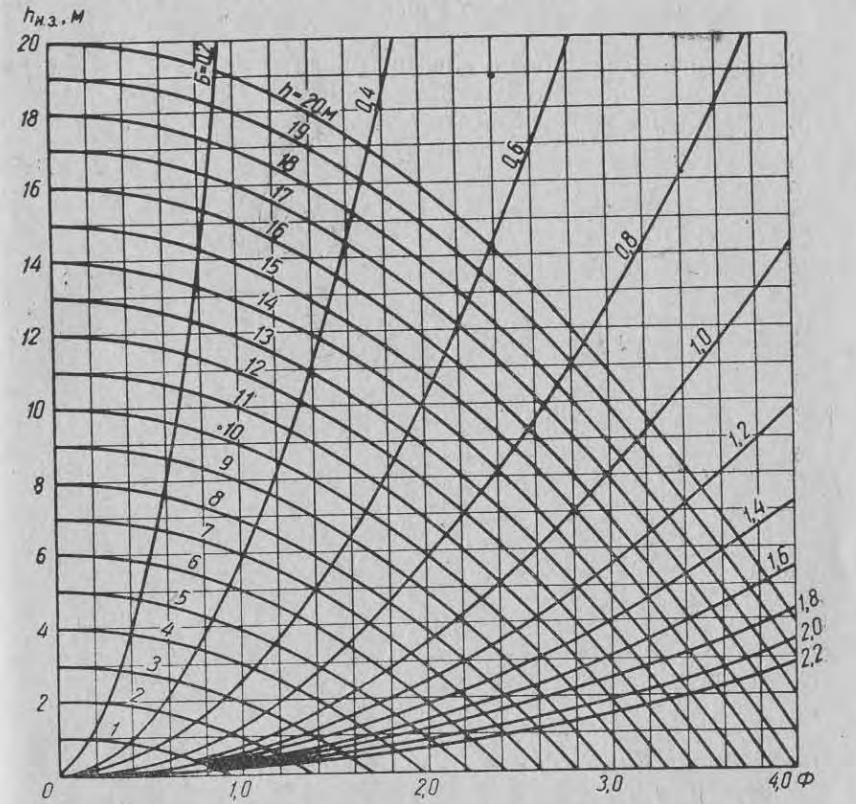


Рис. 38. Номограмма IV для расчета воздушных завес при дисбалансе механической вентиляции при расположении нейтральной зоны выше ворот

Если $\Delta G > 0$ $(G^{мех}_{вып} > G^{мех}_{прит})$, то кальку надо двигать вправо. Если механический приток превалирует над механической вытяжкой, то кальку следует передвигать вдоль оси абсцисс диаграммы влево на величину $Ф$, которую в этом случае также находят по формуле (75″), принимая абсолютное значение дисбаланса $[\Delta G]$.

Уравнение (76) можно решить и другим путем, сделав следующие преобразования:

$$1{,}052\,Б\sqrt{h_{н.з}} - Ф = \sqrt{h-h_{н.з}}. \qquad (76'')$$

Подставив вместо входящих величин в уравнение (74) соответствующие формулы, получим

$$\left[\mu F_в (1-q)\sqrt{\gamma_{см}} + (\mu F)_{прит}\sqrt{\gamma_н}\right]\cdot\sqrt{2gh_{н.з}\Delta\gamma} - (\mu F)_{вып}\times$$
$$\times\sqrt{2g(h-h_{н.з})\Delta\gamma\cdot\gamma_{ух}} = \frac{\Delta G}{3600}. \qquad (75)$$

Поделив обе части равенства на $(\mu F)_{вып}\sqrt{2g\Delta\gamma\cdot\gamma_{ух}}$, найдем

$$\frac{\left[\mu F_в (1-q)\sqrt{\frac{\gamma_{см}}{\gamma_н}} + (\mu F)_{прит}\right]\sqrt{\frac{\gamma_н}{\gamma_{ух}}}}{(\mu F)_{вып}}\sqrt{h_{н.з}} - \sqrt{h-h_{н.з}} =$$
$$= \frac{\Delta G}{3600\,(\mu F)_{вып}\sqrt{2g\gamma_{ух}}\sqrt{\Delta\gamma}}. \qquad (75')$$

Обозначим, как это было сделано при построении номограмм I и II, отношение площади приточных отверстий к вытяжным [см. формулы (53), (54)], примем постоянные значения объемных весов, когда они входят как сомножители, и дополнительно обозначим

$$Ф = \frac{\Delta G}{3600\,(\mu F)_{вып}\sqrt{2g\gamma_{ух}}\sqrt{\Delta\gamma}} = 5{,}72\cdot 10^{-5}\frac{\Delta G}{(\mu F)_{вып}\sqrt{\Delta\gamma}}. \qquad (75'')$$

Тогда уравнение (75′) запишется

$$1{,}052\,Б\sqrt{h_{н.з}} - \sqrt{h-h_{н.з}} = Ф. \qquad (76)$$

Решить уравнение (76) можно с помощью номограммы IV (рис. 38). На осях этой номограммы отложены $Ф$ и $h_{н.з}$, а на поле нанесены два семейства кривых

$$1{,}052\,Б\sqrt{h_{н.з}} = Ф_1;$$
$$\sqrt{h-h_{н.з}} = Ф_2.$$

Для решения уравнения (76) надо подобрать такое значение $h_{н.з}$, чтобы при данных $Б$ и h уравнение

$$Ф_2 + Ф = Ф_1 \qquad (76')$$

превратилось в тождество.

Графически значение $h_{н.з}$ определяется перенесением кривой $Ф_2$ (для данного значения h) вправо, параллельно на расстояние $Ф$. Ордината точки пересечения передвинутой кривой $Ф_2$ с кривой $Ф_1$ для данного значения $Б$ и будет искомым значением высоты нейтральной зоны $h_{н.з}$.

Перенести кривую, параллельную данной, можно с помощью циркуля и двух треугольников.

Можно скопировать на кальку оси координат номограммы и семейство кривых $Ф_2$.

Подвинув кальку с семейством кривых $Ф_2$ вдоль оси абсцисс на расстояние $Ф$, найдем искомое значение $h_{н.з}$ — ординату точки пересечения данной кривой $Ф_2$ с кривой $Ф_1$, соответствующей заданному значению $Б$ (см. пример 9 в гл. IV).

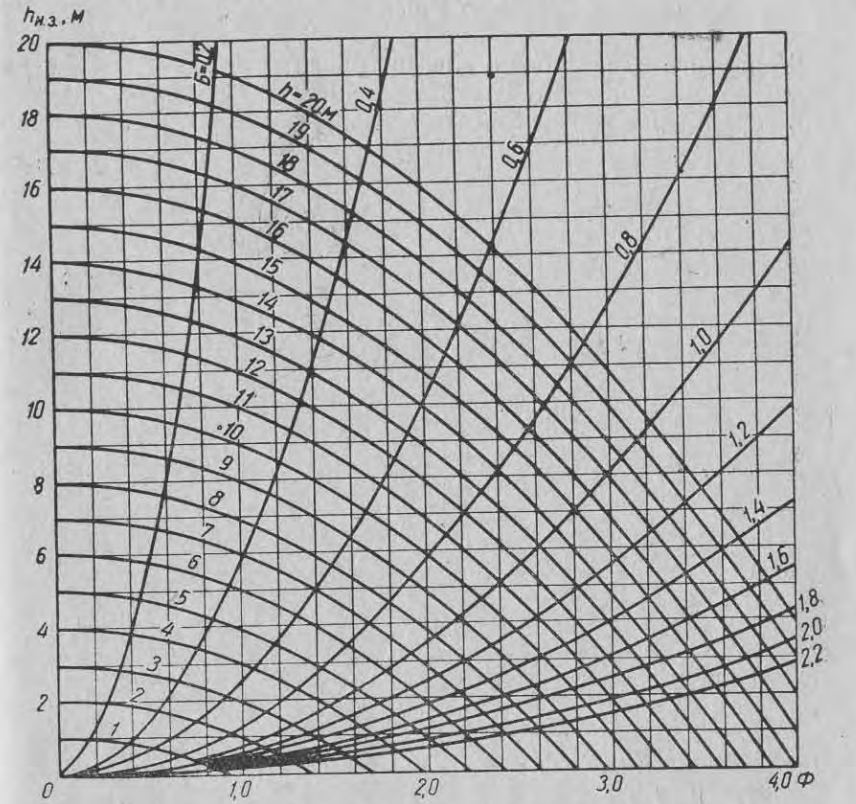


Рис. 38. Номограмма IV для расчета воздушных завес при дисбалансе механической вентиляции при расположении нейтральной зоны выше ворот

Если $\Delta G > 0$ $(G^{мех}_{вып} > G^{мех}_{прит})$, то кальку надо двигать вправо. Если механический приток превалирует над механической вытяжкой, то кальку следует передвигать вдоль оси абсцисс диаграммы влево на величину $Ф$, которую в этом случае также находят по формуле (75″), принимая абсолютное значение дисбаланса $[\Delta G]$.

Уравнение (76) можно решить и другим путем, сделав следующие преобразования:

$$1{,}052\,Б\sqrt{h_{н.з}} - Ф = \sqrt{h-h_{н.з}}. \qquad (76'')$$

После возведения обеих частей уравнения в квадрат и соответствующих преобразований получим квадратное уравнение с неизвестным $\sqrt{h_{н.э}}$:

$$h_{н.э} - \frac{2{,}104\,БФ}{(1{,}052\,Б)^2+1}\sqrt{h_{н.э}} - \frac{h-Ф^2}{(1{,}052Б)^2+1} = 0. \qquad (77)$$

Уравнение (77) можно легко решить, подставив в него числовые значения. Чтобы найти величину $h_{н.э}$, надо полученный корень уравнения возвести в квадрат. На рис. 39 приведена

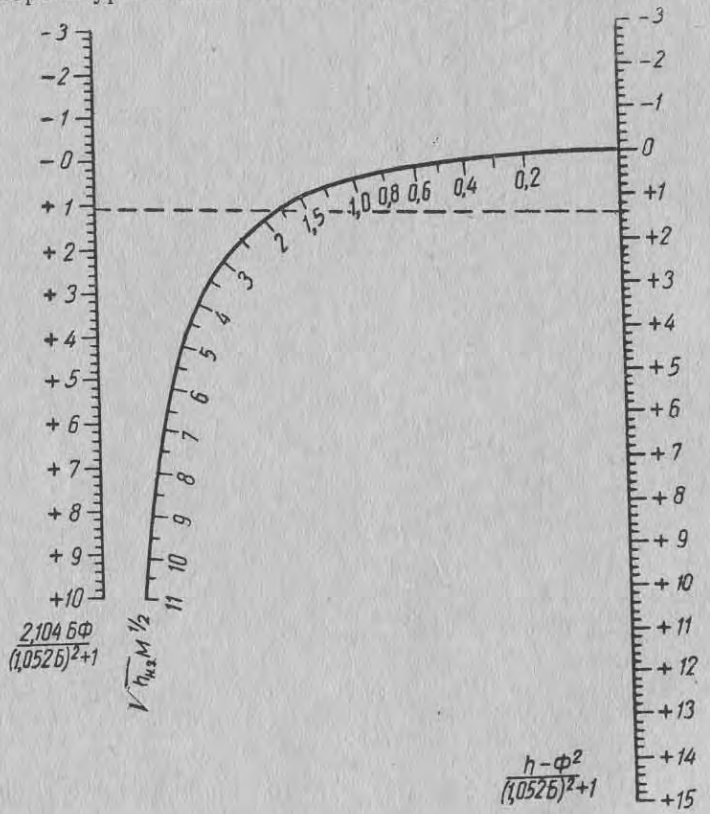


Рис. 39. Номограмма V для определения высоты расположения нейтральной зоны при дисбалансе механической вентиляции $\left(\text{случай } h_{н.э} > \frac{H_в}{2}\right)$

номограмма V для определения величины $h_{н.э}$ по известным коэффициенту и свободному члену; в гл. IV дан пример (9) расчета по этой номограмме.

IX. В низком здании без фонарей имеется дисбаланс механической вентиляции, нейтральная зона находится в пределах высоты ворот:

$$h'_{н.э} < H_в.$$

В этом случае при заборе воздуха для завесы из верхней зоны помещения уравнение воздушного баланса будет иметь вид

$$G_{нижн} - G_{верхн} - G_э - \Delta G = 0, \qquad (78)$$

где $G_{нижн}$ — количество воздуха, проходящего в цех через нижнюю часть ворот, в *кг/ч*;

$G_{верхн}$ — количество воздуха, выходящего через верхнюю часть ворот, в *кг/ч*.

Подставив вместо величин, входящих в уравнение (75), соответствующие формулы, получим

$$(1-q)^{\frac{2}{3}} B\mu_{нижн}\left(h'_{н.э}\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{2g\Delta\gamma\cdot\gamma_{см}} - \frac{2}{3}B\mu_{верхн}\left(H_в - h'_{н.в}\right)^{\frac{3}{2}} \times$$
$$\times\sqrt{2g\Delta\gamma\cdot\gamma_{ух}} - \frac{\Delta G}{3600} = 0. \qquad (79)$$

Поделив уравнение (79) на $\frac{2}{3}B\mu_{верхн}\sqrt{2g\Delta\gamma\cdot\gamma_{ух}}$

и обозначив $\quad \phi = \dfrac{\Delta G}{\frac{2}{3}\cdot 3600\,B\,\mu_{верхн}\sqrt{2g\Delta\gamma\cdot\gamma_{ух}}} \quad E = (1-q)\mu_{нижн}$

(при заборе воздуха для завесы снаружи или над воротами $E = \mu_{нижн}$), получим

$$\frac{E}{\mu_{верхн}}\sqrt{\frac{\gamma_{см}}{\gamma_н}}\left(h'_{н.э}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(H_в - h'_{н.э}\right)^{\frac{3}{2}} = \phi. \qquad (80)$$

Приняв определенные значения объемных весов воздуха, когда они входят как сомножители и $\mu_{верхн} = 0{,}6$, найдем

$$1{,}73\,E\left(h'_{н.э}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(H_в - h'_{н.э}\right)^{\frac{3}{2}} = \phi. \qquad (80')$$

Если ΔG выражается в *кг/ч*, то $\phi = 1{,}432\cdot 10^{-4}\dfrac{\Delta G}{B}\cdot\dfrac{1}{\sqrt{\Delta\gamma}}$.

На номограмме VI (рис. 40) аналогично тому, как это сделано на номограмме VII, построены два семейства кривых $\phi_1 = 1{,}73E\left(h'_{н.э}\right)^{\frac{3}{2}}$ и $\phi_2 = \left(H_в - h'_{н.э}\right)^{\frac{3}{2}}$. Искомое значение $h'_{н.э}$ находим по номограмме.

Подбираем такое значение $h'_{н.э}$, при котором для заданных величин E и H уравнение $\phi_1 = \phi_2 + \phi$ превратится в тождество.

Переносим на кальку оси координат с семейством кривых

$\phi_2 = (H_в - h'_{н.з})^{\frac{3}{2}}$. Передвинув кальку вдоль оси ординат вправо на величину ϕ, находим точку пересечения кривой ϕ_2, нанесенной на кальке, с кривой ϕ_1 на основной номограмме, получаем искомое значение высоты нейтральной зоны.

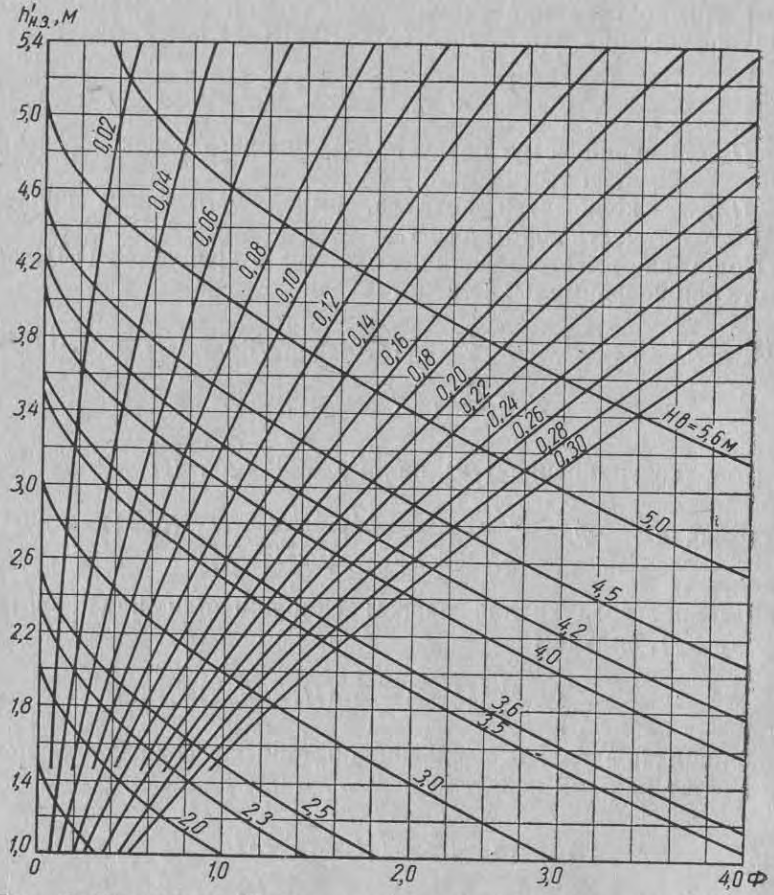


Рис. 40. Номограмма VI для расчета воздушных завес при дисбалансе механической вентиляции при расположении нейтральной зоны в пределах высоты ворот $\left(h'_{н.з} > H_в\right)$

Пример расчета по номограмме V приведен в гл. IV § 15 (пример 11).

X. В невысоком здании имеется настолько большой дисбаланс, что разрежение, создаваемое некомпенсированной механической вытяжкой, значительно больше теплового напора.

В этом случае как при действии, так и при бездействии воздушной завесы нейтральная зона будет находиться значительно выше ворот и воздух будет входить в цех через ворота по всей их высоте.

Если, кроме ворот, в стенах здания нет других сравнительно больших отверстий, то воздушная завеса не даст никакого эффекта. Во время действия завесы в цех будет поступать через ворота почти такой же объем наружного воздуха, как и во время ее бездействия.

Это происходит потому, что воздушная завеса хотя и увеличивает сопротивление проходу воздуха в здание, но не настолько, чтобы воздействовать на работу вытяжных вентиляторов. Поэтому при действии завесы объем воздуха, удаляемого механической вытяжкой, останется почти таким же.

Воздушную завесу в низком здании при большом дисбалансе целесообразно устраивать только в том случае, если для притока воздуха можно использовать окна. Их нужно открывать там, где расположено оборудование, выделяющее тепло, и нет рабочих мест. Чем больше будет площадь открытых окон, тем эффективнее будет работать воздушная завеса.

В этом случае уравнение воздушного баланса будет

$$(1 - q)\, G_{пр} + G_{прит} = \Delta G. \tag{81}$$

Скорость воздуха, проходящего через ворота, будет настолько велика, что напор, соответствующий этой скорости, будет значительно больше теплового напора:

$$P_{ск} \gg H_в \Delta\gamma. \tag{82}$$

Поэтому в данном случае тепловым напором можно пренебречь. Тогда уравнение (78) примет вид

$$(1 - q)\, \mu F_в \sqrt{2gP_x\gamma_{см}} + (\mu F)_{прит} \sqrt{2gP_x\gamma_н} = \frac{\Delta G}{3600}, \tag{83}$$

где P_x — разрежение в цехе в $кг/м^2$.

Решая уравнение (83), найдем

$$P_x = \frac{(\Delta G)^2}{2g \cdot 3600\, \gamma_{см} \left[(1 - q)\, \mu F_в + (\mu F)_{прит} \sqrt{\frac{\gamma_н}{\gamma_{см}}}\right]^2}, \tag{84}$$

откуда

$$G_{пр} = \frac{\Delta G}{(1 - q) + \frac{(\mu F)_{прит}}{\mu F_в} \sqrt{\frac{\gamma_н}{\gamma_{см}}}} \tag{85}$$

и по уравнению

$$G_з = qG_{пр} \quad кг/ч.$$

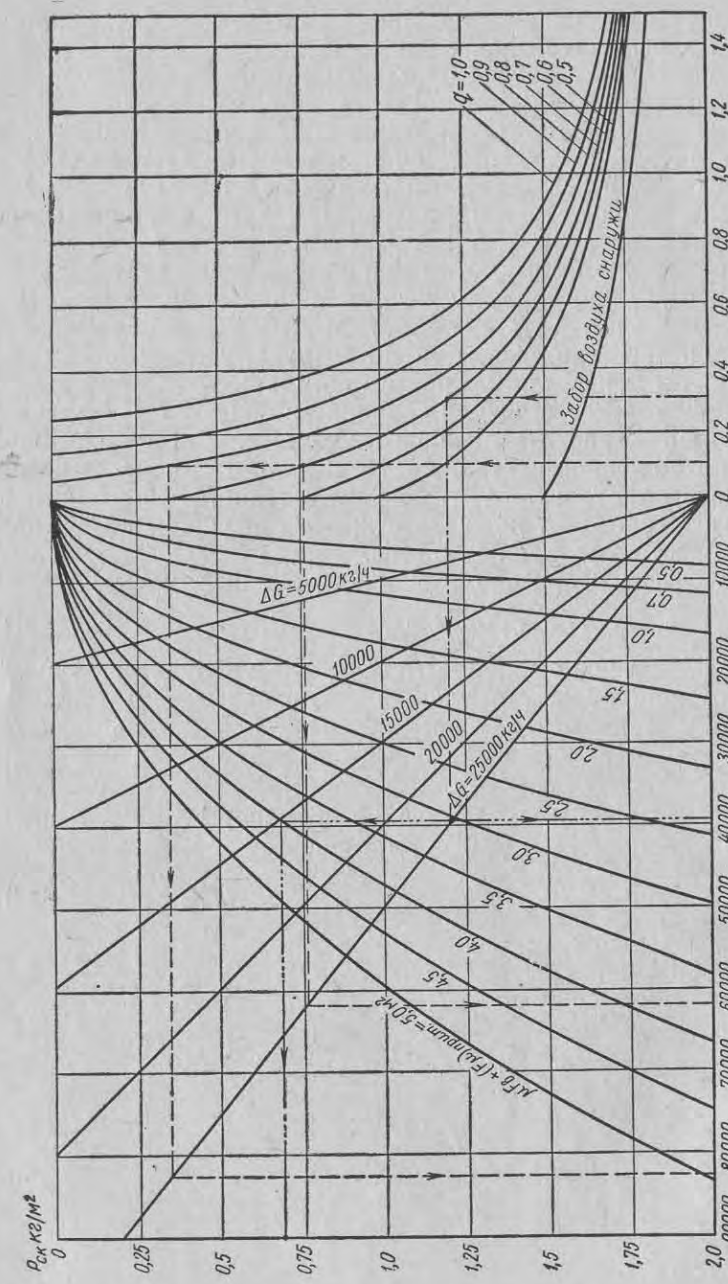


Рис. 41. Номограмма VII для расчета воздушных завес в низких зданиях при значительном превышении вытяжной механической вентиляции над механической приточной ($G^{мех}_{выт} \gg G^{мех}_{прит}$)

На рис. 41 представлена номограмма VII для расчета воздушных завес в низких зданиях со значительным превышением вытяжной механической вентиляции над приточной.

В этом случае $h'_{н.з} > H_в$ и $p_{ск} > H_в \Delta\gamma$.

Расчет по номограмме VII приведен в гл. IV § 15. (примеры 12, 13).

§ 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ЭКОНОМИЧНЫХ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС

Изложенный выше метод расчета позволяет использовать методику экономических расчетов [22] для определения основных параметров завес. Такими параметрами являются относительное количество воздуха, подаваемого в завесу, q и относительная ширина щели $\bar{F}_щ$.

Оптимальными будут значения q и $\bar{F}_щ$, при которых затраты на сооружение и эксплуатацию воздушных завес будут минимальными. Эти расходы за срок окупаемости воздушной завесы определяются уравнением

$$M = K_{зав} + K_{калор} + (C_т + C_э + A_{зав} + A_{калор}) Z_н, \qquad (86)$$

где $K_{зав}$ — капитальные затраты на устройство завесы (вентилятор, электродвигатель и сеть воздуховодов); по смете эти затраты составляют 21 руб. на 1000 *м³/ч* или 2 р. 52 к. на 1 *кг/ч* подаваемого воздуха.

$K_{калор}$ — капитальные расходы на устройство калориферов; по смете для калориферов тепломощностью 1000 *ккал/ч* при теплоносителе — воде 150—70° С или паре до 2 *ата*, средней температуре воздуха 35° С, разности средних температур теплоносителя и воздуха 75° С составляют 1 р. 80 к.;

$C_т$ — расходы на подогрев воздуха;

$C_э$ — расходы на электроэнергию;

$A_{зав}$ — расходы на ремонт и обслуживание установки воздушной завесы;

$A_{калор}$ — расходы на ремонт и обслуживание калориферов;

$Z_н$ — срок окупаемости воздушной завесы (см. табл. 9).

Таблица 9

Нормативные сроки окупаемости $Z_н$

Отрасль промышленности или объект	$Z_н$ в годах	Отрасль промышленности или объект	$Z_н$ в годах
Химическая, машиностроительная, легкая	4	тельные объекты (театры, больницы и пр.)	6
Лесная, топливная, лесообрабатывающая	5	Металлургическая	7
Строительная, градостроительные объекты (театры, больницы и пр.)	6	Энергетические объекты . . .	7—10
Металлургическая	7	Гаражи, депо городского транспорта	10
Энергетические объекты . . .	7—10		

Амортизационные отчисления и затраты на ремонт и обслуживание вентиляционного оборудования составляют 18,7% сметной стоимости завесы.

Срок окупаемости равен четырем-десяти годам в зависимости от отрасли промышленности.

Расчет ведется исходя из того, что воздушная завеса создает в помещении, в районе ворот, температуру воздуха согласно санитарным нормам (СН 245-63). Когда ворота открыты более 10 *мин*, воздушная завеса в соответствии с СН 245-63 должна обеспечивать в районе ворот такую же температуру, какую имеет воздух в рабочей зоне помещения ($t_{см}=t_{вн}$).

Рассмотрим случай устройства воздушных завес в высоких отапливаемых зданиях с фонарями без избытка тепла в зимнее время. Нейтральная зона находится выше ворот.

По формуле (41) определим расход тепла на воздушную завесу (забор воздуха для завесы производится из помещения).

Для этого температуру воздуха, подаваемого в завесу, определяем по формуле (40).

Для расчета принимаем $t_{нач}=t_{см}=t_{вн}$, что соответствует наиболее часто встречающемуся случаю забора воздуха для завесы около ворот.

После подстановки значения $t_з$ в формулу (41) и принятия $t_{нач}=t_{см}=t_{вн}$ найдем

$$Q_з = G_з c\,(t_{вн}-t_н)\left[\frac{1}{q\left(1-\frac{Q'}{Q_з}\right)}-1\right]. \qquad (87)$$

Преобразуем формулу (87) делением ее на $Q_0 = G_0 c\Delta t_{расч}$ ($\Delta t_{расч}=t_{вн}-t_{н\,расч}$)) и подстановкой в формулу $G_з = qG_{пр}$, получаем

$$\frac{Q_з}{Q_0}=\frac{qG_{пр}c\Delta t_{расч}}{G_0 c\Delta t_{расч}}\left[\frac{1}{q\left(1-\frac{Q'}{Q_з}\right)}-1\right]=$$

$$=\frac{G_{пр}}{G_o}\left(\frac{1}{1-\frac{Q'}{Q_з}}-q\right), \qquad (88)$$

где G_0 — количество воздуха, проходящего через ворота, при бездействии завесы;

Q_0 — количество тепла, необходимого для нагрева вошедшего через ворота холодного воздуха без завесы.

Считается, что с помощью автоматических устройств расход воздуха и его нагрев регулируются в зависимости от температуры наружного воздуха.

Относительные затраты на нагрев воздуха, подаваемого в завесу (отношение затрат на нагрев воздуха, необходимого для завесы к затратам на тепло, расходуемое на нагрев воздуха, врывающегося в помещение при отсутствии завесы), будут составлять

$$\frac{C_m}{C_{m_0}}=\frac{Q_з n_{сут} n_ч \cdot 0{,}55^{3/2} S_m}{Q_0 n_{сут} n_ч 0{,}55^{3/2} S_m}=\frac{G_{пр}}{G_0}\left[(1-q)+\frac{Q'}{Q_з}\cdot\frac{1}{1-\frac{Q'}{Q_з}}\right], \qquad (89)$$

где $n_{сут}$ — длительность отопительного периода (в сутках);

$n_ч$ — суммарное время в часах, когда ворота открыты в течение одних суток;

0,55 — коэффициент, учитывающий уменьшение разности температур в течение отопительного сезона

$$\left(\frac{t_в-t_{н\,ср}}{t_в-t_{н\min}}\approx 0{,}55\right);$$

S_m — отпускная цена единицы тепла в *коп/ккал*.

Для того чтобы выдержать размерность, все расчеты ведутся в коп. (на устройство воздушной завесы в *коп/м*^{3}, на калориферы в *коп/ккал*, на единицу тепла в *коп/ккал*, на единицу электроэнергии в *коп/квт · ч*).

Ввиду того, что цена на тепловую энергию большей частью дается в *руб/Г · кал*, в дальнейшем в окончательные результаты введены соответствующие коэффициенты.

Цена тепла и электроэнергии различна в разных городах и районах страны. Она зависит от способа получения тепла и электроэнергии (гидроэлектростанции, ТЭЦ, отопительные котельные), от топлива, дальности транспортировки топлива и теплоносителя и ряда других причин.

Цена электроэнергии колеблется в пределах от 0,35 *коп/квт · ч* до 6,5 *коп/квт · ч*, стоимость тепла от 1,6 *руб/Г · кал* до 7,1 *руб/Г · кал*.

Как для действующих заводов, так и для вновь проектируемых всегда известны цена на тепло и электроэнергию конкретно для данного объекта. Этими данными и следует воспользоваться для определения оптимальных параметров воздушных завес.

Относительные затраты на устройство калориферов для подогрева воздуха определяются формулой

$$\frac{K_{калор}}{C_{m_0}}=\frac{Q_з S_{калор}\cdot 75}{Q_0 n_{сут} n_ч \cdot 0{,}55^{3/2}\Delta t_{калор} S_m}=$$

$$=\frac{G_{пр}}{G_0}\left[(1-q)+\frac{Q'}{Q_з}\cdot\frac{1}{1-\frac{Q'}{Q_з}}\right]\frac{S_{калор}\cdot 75}{\Delta t_{калор} n_{сут} n_ч \cdot 0{,}55^{3/2} S_m},$$

где $\Delta t_{калор}$ — разность средних температур теплоносителя и воздуха, проходящего через калорифер; $\Delta t_{калор}$ зависит от необходимой температуры воздуха, подаваемого в завесу $t_з$, которая, в свою очередь, зависит от q и $\frac{Q'}{Q_з}$ и определяется по формуле (40) или по графикам (рис. 27—29).

Относительные затраты на установку воздушной завесы (вентилятора, электромотора и воздуховодов) определяются по формуле:

$$\frac{K_{зав}}{C_{m_0}} = \frac{G_з S_{зав}}{G_0 c \Delta t_{расч} n_{сут} n_ч \cdot 0{,}55^{3/2} S_m} = \frac{G_{пр}}{G_0} q \frac{S_{зав}}{c \Delta t_{расч} n_{сут} n_ч \cdot 0{,}55^{3/2} S_m}. \quad (91)$$

Относительные расходы на электроэнергию находятся по формуле:

$$\frac{C_э}{C_{m_0}} = \frac{G_з H_{полн} S_э n_{сут} n_ч \cdot 0{,}55^{3/2}}{3600 \cdot 102 \eta_в \eta_{эд} \gamma_з G_0 c \Delta t_{расч} n_{сут} n_ч \cdot 0{,}55^{3/2} S_m}, \quad (92)$$

где $S_э$ — цена 1 *квт/ч*;

$\eta_в$ — к. п. д. вентилятора;

$\eta_{эд}$ — к. п. д. электродвигателя;

$H_{полн}$ — полный напор, создаваемый вентилятором, в *кг/м²*,

$$H_{полн} = \Sigma\zeta H_д = \Sigma\zeta \frac{G_з^2}{3600^2 F_щ^2 2g\gamma_з},$$

где $\Sigma\zeta$ — сумма коэффициентов сопротивления всей системы воздуховодов, отнесенная к скорости выхода воздуха из воздуховыпускной щели.

Определяются относительные расходы на электроэнергию.

Подставляя значение $H_{полн}$ в формулу (92), получим

$$\frac{C_э}{C_{m_0}} = \frac{G_з^3 \Sigma\zeta S_э}{3600^3 \cdot 102 \eta_в \eta_{эд} \gamma_з^2 F_щ^2 \cdot 2g G_0 c \Delta t_{расч} S_m}. \quad (93)$$

Используя уравнения $G_з = qG_{пр}$ и $G_{пр} = 3600\ \mu F_в \sqrt{2gh_{н.з} \Delta\gamma\gamma_{см}}$, подставляя их в уравнение (93), получим

$$\frac{C_э}{C_{m_0}} = \frac{G_{пр}}{G_0} q^3 \cdot \frac{3600^2 F_в^2 \mu^2 \cdot 2gh_{н.з} \Delta\gamma\gamma_{см} \Sigma\zeta S_э}{3600^3 \cdot 102 \eta_в \eta_{эд} \gamma_з^2 F_щ^2 2gc \Delta t_{расч} S_m}.$$

Произведем сокращение и, учитывая, что

$$\Delta\gamma = \gamma_н - \gamma_в = \frac{353}{T_н} - \frac{353}{T_в} = \frac{353\,\Delta t_{расч}}{T_н T_в};\quad \gamma_{см} = \frac{353}{T_{см}};\quad \gamma_з = \frac{353}{T_з},$$

будем иметь

$$\frac{C_э}{C_{m_0}} = \frac{G_{пр}}{G_0} \cdot \frac{1}{3600 \cdot 102 \eta_в \eta_{эд}} \cdot \frac{q^3 \mu^2 T_з^2}{\bar{F}_щ^2 T_{см} T_н T_в c} \cdot \frac{\Sigma\zeta h_{н.з} S_э}{S_m}.$$

Принимая $\eta_в = 0{,}6$; $\eta_{эд} = 0{,}9$; $T_з = 273 + 50 = 323°$ К; $T_{см} = T_{вн} = 273 + 20 = 293°$ К и $T_н = 273 - 26 = 247°$ К и $c = 0{,}24$ *ккал/кг · град*, найдем

$$\frac{C_э}{C_{m_0}} = 10^{-7} \frac{G_{пр}}{G_0} \cdot \frac{q^3 \mu^2}{\bar{F}_щ^2} \cdot \frac{\Sigma\zeta h_{н.з} S_э}{S_m} \quad (94)$$

(если стоимость тепла будет выражаться не в *коп/ккал*, а в *руб/Г · кал*, то коэффициент в формуле (94) не 10^{-7}, а 10^{-3}).

Подставим в уравнение (86) найденные значения из уравнений (90), (92), (94) и после некоторых преобразований получим

$$\frac{M}{C_{m_0}} = \frac{G_{пр}}{G_0} \left\{ q \frac{S_{зав}}{c \Delta t_{расч}} + \left[(1 - q) + \frac{Q'}{Q_з} \cdot \frac{1}{1 - \frac{Q'}{Q_з}} \right] \frac{S_{калор} \cdot 75}{\Delta t_{калор}} \right\} \times$$

$$\times \frac{\frac{1}{\bar{Z}_н} + 0{,}187}{0{,}55^{3/2} n_{сут} n_ч S_m} + \frac{G_{пр}}{G_0} \left[(1 - q) + \frac{Q'}{Q_з} \cdot \frac{1}{1 - \frac{Q'}{Q_з}} \right] +$$

$$+ 10^{-7} \frac{G_{пр}}{G_0} \cdot \frac{q^3 \mu^2}{\bar{F}_щ^2} \cdot \frac{\Sigma\zeta h_{н.з} S_э}{S_m}. \quad (95)$$

Для определения оптимальных значений q и $\bar{F}_ш$ необходимо продифференцировать уравнение (95) по переменной q, считая $\bar{F}_ш$ величиной постоянной, а затем продифференцировать, считая $\bar{F}_щ$ переменной, а q постоянной (т. е. найти частные производные от функции $\frac{M}{C_{m_0}}$ по q и $\bar{F}_ш$).

По полученным двум уравнениям, каждое из которых приравнивается к нулю, можно найти два неизвестных $q_{опт}$ и $\bar{F}_{щ\,опт}$. Решение этих уравнений в общем виде представляет большие трудности, поэтому приходится находить отдельные решения для определенных значений параметров (коэффициентов), входящих в уравнение (95). Для этого произведем анализ уравнения (95). Оно составлено таким образом, что величины, не зависящие от q и $\bar{F}_щ$, можно выделить в отдельные комплексы. Уравнение (95) имеет следующие параметры (коэффициенты):

1) $\Delta t_{расч}$;

2) $P_1 = \frac{\frac{1}{\bar{Z}_н} + 0{,}187}{n_{сут} n_ч S_m}$;

3) $P_2 = \frac{\Sigma\zeta h_{н.з} S_э}{S_m}$;

4) $\frac{G_{пр}}{G_0}$.

В первый и второй параметры входят величины, определяющие только конкретные условия устройства завесы.

Первый параметр ($\Delta t_{расч} = t_в - t_{н.\ расч}$) может меняться в пределах от 35 до 65° С.

При расчетной температуре наружного воздуха для отопления $t_н = -15°$ С (отопительный период около 100 суток) минимальное значение параметра P_1 при $Z_н = 10$ лет и цене единицы тепла $S_m = 6$ *руб/Г · кал* и $n_ч = 2{,}5$ *ч*.

$$P_1 = \frac{\frac{1}{10} + 0{,}157}{100 \cdot 2{,}5 \cdot 6 \cdot 1{,}15 \cdot 10^{-4}} = 1{,}66.$$

Максимальное значение параметра P_1 при $t_н = -15°$ будет когда $Z_н = 4$ года, $S_m = 3$ *руб/Г · кал* и $n_ч = 1{,}5$ *ч*.

$$P_1 = \frac{\frac{1}{4} + 0{,}187}{100 \cdot 1{,}5 \cdot 3 \cdot 1{,}15 \cdot 10^{(-4)}} = 13{,}8.$$

Следовательно, при $t_н = -15°$ С параметр P_1 будет меняться в пределах от 1,66 до 13,8.

При расчетной температуре наружного воздуха для отопления $t_н = -40°$ С (отопительный период более 200 суток) максимальное значение параметра P_1 (при тех же условиях) будет

$$P_1 = \frac{\frac{1}{4} + 0{,}187}{200 \cdot 1{,}5 \cdot 3 \cdot 1{,}15 \cdot 10^{-4}} = 4{,}2.$$

Минимальное значение параметра P_1 при $n_{сут} = 350$ суток ($S_m = 6$ *руб/Г · кал*, $Z_н = 10$ лет) будет

$$P_1 = \frac{\frac{1}{10} + 0{,}187}{350 \cdot 2{,}5 \cdot 6 \cdot 1{,}15 \cdot 10^{-4}} = 0{,}47.$$

Таким образом, при $t_н = -40°$ С параметр P_1 будет меняться в пределах 0,47—4,2, а весь диапазон изменения P_1 будет в пределах 0,47—13,8. Расчеты по определению оптимальных характеристик воздушных завес были произведены для значений параметра P_1 от 0,5 до 10.

В третьем параметре (P_2) величина $\Sigma\zeta$ (коэффициент сопротивления системы) складывается из коэффициентов сопротивления воздуховодов, калориферов и воздуховыпускной щели.

Коэффициент сопротивления воздуховыпускной щели $\zeta_щ = 2{,}0$. Коэффициенты сопротивлений воздуховодов и калориферов можно (с достаточной для данного расчета точностью) принять по табл. 10.

В таблице даны коэффициенты сопротивления для случая установки одного вентилятора на оба стояка и для случая установки по вентилятору на каждый стояк двусторонней боковой

завесы, когда уменьшаются длина воздуховодов и число фасонных частей. В параметр должна быть подставлена сумма коэффициентов $\sum\zeta = \zeta_{сети} + \zeta_щ = \zeta_{сети} + 2{,}0$.

В третьем параметре (P_2) величина $h_{н.\ з}$ (высота нейтральной зоны) зависит от высоты здания h, площади вытяжных и приточных отверстий, имеющихся в здании, и от величин q и $\bar{F}_щ$ по формуле

$$h_{н.\ з} = \frac{h\bar{f}^2_{вып}}{1{,}1\left[\frac{\mu}{\mu_0}(1-q) + \bar{f}_{пр}\right]^2 + \bar{f}^2_{вып}}, \quad (50')$$

где $\bar{f}_{прит}$ — относительная площадь приточных отверстий,

$$\bar{f}_{прит} = \frac{(\mu F)_{прит}}{\mu_0 F_в};$$

Таблица 10

Ориентировочные коэффициенты сопротивления сети ($\zeta_{сети}$), приведенные к скорости в выходной щели завесы

$\bar{F}_щ$	Вентилятор на оба стояка завесы		Вентилятор на каждый стояк завесы	
	с калориферами	без калориферов	с калориферами	без калориферов
1/10	10	1,2	8,8	При отсутствии воздуховодов $\zeta_{сети} = 0$
1/15	6	0,8	5,2	
1/20	4	0,7	3,3	
1/30	3	0,6	2,4	
1/40	2	0,5	1,5	

$\bar{f}_{вып}$ — относительная площадь вытяжных отверстий,

$$\bar{f}_{вып} = \frac{(\mu F)_{вып}}{\mu_0 F_в}.$$

Как видно из формулы (50′), высота нейтральной зоны пропорциональна высоте здания (расстоянию между серединой ворот и серединой вытяжных отверстий). Высота нейтральной зоны увеличивается с увеличением площади вытяжных отверстий и уменьшается с увеличением площади приточных отверстий.

Четвертый параметр $\left(\frac{G_{пр}}{G_0}\right)$ зависит от отношения $\frac{h_{н.\ з}}{h}$ и является функцией переменных величин q и $\bar{F}_щ$, $\bar{f}_{прит}$ и $\bar{f}_{вып}$.

На рис. 42 показано, как изменяется количество воздуха, проходящего через ворота при изменении q для разных $\bar{F}_щ$ и $\bar{f}_{прит}$ и $\bar{f}_{вып}$.

Графики построены на основании расчетов воздушных завес по приведенным формулам.

Как видно из графиков (рис. 42), на оси ординат которых отложено $\frac{G_{пр}}{G_0}$ при малых площадях $\bar{f}_{прит}$ и $\bar{f}_{вып}$ при действии завесы с забором воздуха из помещения, количество воздуха, проходящего через ворота, не только не уменьшается, а даже увеличивается (см. графики *а*, *б*, *в*, *г*, *д*). Правда, при этом

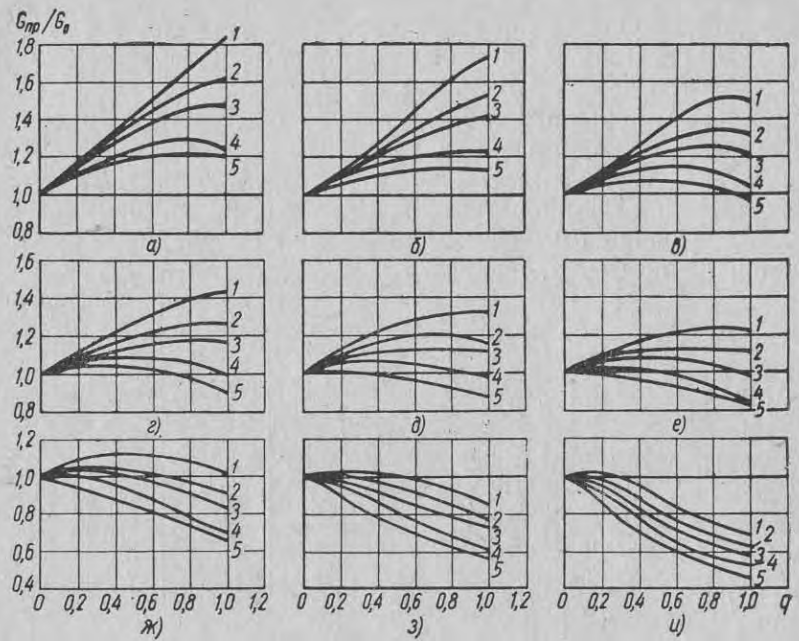


Рис. 42. Изменение относительного количества воздуха, проходящего через ворота $\left(\frac{G_{пр}}{G_0}\right)$, в зависимости от q и $\bar{F}_{щ}$ при разных $\bar{f}_{прит}$ и $\bar{f}_{выт}$:

$1-\bar{F}_{щ}=1/10$; $2-\bar{F}_{щ}=1/15$;
$3-\bar{F}_{щ}=1/20$; $4-\bar{F}_{щ}=1/30$; $5-\bar{F}_{щ}=1/40$;
$а-\bar{f}_{прит}=0{,}2$; $\bar{f}_{выт}=0{,}1$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}3$;
$б-\bar{f}_{прит}=0{,}2$; $\bar{f}_{выт}=0{,}14$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}34$;
$в-\bar{f}_{прит}=0{,}25$; $\bar{f}_{выт}=0{,}12$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}37$;
$г-\bar{f}_{прит}=0{,}25$; $\bar{f}_{выт}=0{,}17$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}42$;
$д-\bar{f}_{прит}=0{,}3$; $\bar{f}_{выт}=0{,}15$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}45$;
$е-\bar{f}_{прит}=0{,}3$; $\bar{f}_{выт}=0{,}2$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}5$;
$ж-\bar{f}_{прит}=0{,}4$; $\bar{f}_{выт}=0{,}2$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}6$;
$з-\bar{f}_{прит}=0{,}5$; $\bar{f}_{выт}=0{,}25$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}76$
$и-\bar{f}_{прит}=0{,}1$; $\bar{f}_{выт}=0{,}2$; $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}9$;

количество наружного воздуха, врывающегося в ворота, $G_н = G_{пр} - G_э$ уменьшается.

Начиная со значения $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}=0{,}45$, действие завесы уменьшает количество воздуха, проходящего через ворота. Чем меньше относительная ширина щели, тем меньше отношение $\frac{G_{пр}}{G}$ при тех же значениях q и $\bar{f}_{прит}$ и $\bar{f}_{выт}$.

Из графиков (рис. 42) можно видеть, что характер кривых $\frac{G_{пр}}{G_0}$ в основном зависит от суммы $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}$. Поэтому, исключая из параметра $\frac{G_{пр}}{G_0}$ искомые величины q и $\bar{F}_{щ}$, получаем новый параметр $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}$.

Ввиду того, что $\frac{h_{н.з}}{h}$, так же как и $\frac{G_{пр}}{G_0}$, зависит от q, $\bar{F}_{щ}$ и $\bar{f}_{прит}$ и $\bar{f}_{выт}$, в параметре P_2 высота нейтральной зоны $\left(h_{н.з}=\frac{h_{н.з}}{h}\cdot h\right)$ заменяется пропорциональной ей величиной h.

Таким образом, получили четыре параметра:

$$1)\ \Delta t_{расч}=t_{вн}-t_н; \tag{96}$$

$$2)\ P_1=\frac{\frac{1}{Z_н}+0{,}187}{n_{сут}n_ч S_m\cdot 10^{-4}}; \tag{97}$$

$$3)\ P_2=\frac{\Sigma\zeta h S_э}{S_m}; \tag{98}$$

$$4)\ \bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}. \tag{99}$$

Для удобства расчета стоимость тепла применялась в *руб/Гкал*, что было учтено соответствующим множителем 10^{-4} в параметре P_1 и изменением коэффициента у третьего члена уравнения (95) с 10^{-7} на 10^{-3}.

Параметр P_2 будет иметь минимальное значение в сравнительно невысоких зданиях, когда каждый стояк завесы снабжен вентилятором и при наибольшей стоимости тепла. Например, при $h=6$ *м*, $\zeta_{сети}=2$, $S_m=6$ *руб/Гкал*, $S_э=1{,}58$ *коп/квт·ч*

$$P_2=\frac{\Sigma\zeta h S_э}{S_m}=\frac{2\cdot 6\cdot 1{,}58}{6}=3{,}16.$$

Минимальное значение параметр P_2 будет иметь в высоких зданиях при установке одного вентилятора на оба стояка и высокой цене на электроэнергию. При $S_э=2{,}2$ *коп/квт·ч* ($S_m=3{,}5$ *руб/Гкал*, $h=14$ *м*, $\zeta_{сети}=10$)

$$P_2=\frac{10\cdot 14\cdot 2{,}2}{3{,}5}=88.$$

Параметр $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}$, для случая, когда нейтральная зона располагается выше ворот, обычно больше 0,2.

Были определены величины, входящие в уравнение (95) для значения $\bar{f}_{прит}+\bar{f}_{выт}$, от 0,2 до 0,7. Параметр $P_2=\Sigma\zeta h\frac{S_э}{S_m}$

изменялся в пределах 5—80, а параметр P_1 — в пределах 0,5—10. Вычисления были сделаны для трех расчетных разностей температур $\Delta t_{расч} = 35°$ С, 50° С и 65° С.

В результате были найдены оптимальные значения $q_{опт}$ и $\bar{F}_{щ\,опт}$ (см. табл. 11 и 12).

Таблица 11

Оптимальные значения $q_{опт} = \frac{G_э}{G_{пр}}$ для двусторонних завес с углом $\alpha = 30°$

$\Delta t_{расч}$	35° С						50° С		
$\bar{F}_{щ} = \frac{F_{щ}}{F_в}$	$P_2 = \frac{\Sigma\zeta h S_э}{S_m}$								
	5	10	20	40	60	80	5	10	20
1/10	—	0,8	0,75	0,7	0,6	0,5	—	0,9	0,8
1/15	—	0,7	0,65	0,55	0,45	—	—	0,8	0,7
1/20	—	0,6	0,55	0,5	0,45	—	—	0,65	0,6
1/30	0,6	0,55	0,5	0,45	—	—	0,62	0,57	0,52
1/40	0,55	0,5	0,45	0,4	—	—	0,57	0,52	0,52

Продолжение табл. 11

$\Delta t_{расч}$	50° С			65° С					
$\bar{F}_{щ} = \frac{F_{щ}}{F_в}$	$P_2 = \frac{\Sigma\zeta h S_э}{S_m}$								
	40	60	80	5	10	20	40	60	80
1/10	0,75	0,76	0,6	—	1,0	0,9	0,85	0,75	0,65
1/15	0,6	0,5	—	—	0,85	0,8	0,70	0,6	—
1/20	0,53	0,47	—	—	0,7	0,65	0,55	0,5	—
1/30	0,47	—	—	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	—
1/40	0,5	0,45	—	0,6	0,55	0,52	0,5	—	—

Примечания. 1. Оптимальные значения $q_{опт}$ соответствуют случаю $\bar{f}_{прит} + \bar{f}_{выт} = 0,4 + 0,7$. При значении суммы $\bar{f}_{прит} + \bar{f}_{выт} = 0,3$ указанные в таблице значения $q_{опт}$ следует уменьшить на 20%, а при $\bar{f}_{прит} + \bar{f}_{выт} = 0,2$ уменьшить на 30%.

2. При устройстве перед завесой открытого тамбура указанные в таблице значения $q_{опт}$ следует увеличивать на 10%.

3. Ввиду того, что кривая расходов оптимальных значений $q_{опт}$ идет полого, учитывая конкретные условия, можно брать $q_{опт}$ в пределах ± 0,05 от указанного в таблице.

На рис. 43 приведены в качестве примера кривые зависимости расходов $\frac{M}{C_{m_0}}$ от q для случая $\bar{F}_{щ} = 1/30$; $\bar{f}_{прит} = 0,2$; $\bar{f}_{выт} = 0,4$ и $P_2 = 20$.

Таблица 12

Определение оптимальной ширины щели $F_{щопт}$ для двусторонних завес с углом $\alpha = 30°$.

P_1	$\Delta t_{расч}$ в °С			P_1	$\Delta t_{расч}$ в °С		
	35	50	65		35	50	65
0,5	—	1/10	1/10	3	1/30	1/20	1/15
1	—	1/10	1/10	4	1/30	1/30	1/20
2	1/20	1/15	1/10	5 и выше	1/30	1/30	1/30

Даны два варианта расчетов: для $P_1 = 0,4$ (рис. 43, *а*) и $P_1 = 8$ (рис. 43, *б*). На каждом графике нанесены по две кривые для $\Delta t_{расч} = 35°$ С и $\Delta t_{расч} = 65°$ С.

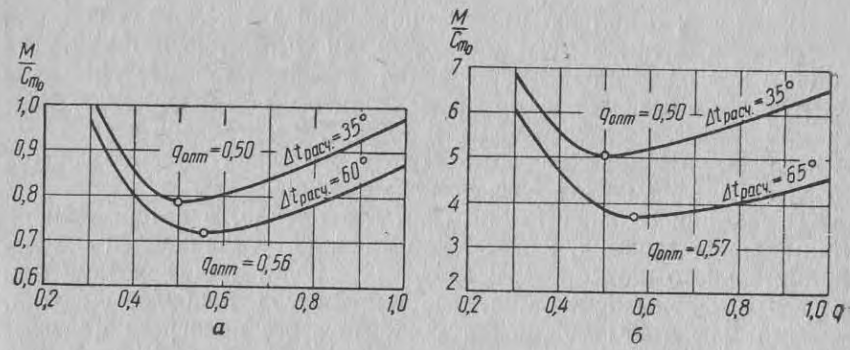


Рис. 43. К определению оптимального значения $q_{опт}$

Как видно из графиков, изменение параметра P_1 от 0,4 до 8 меняет абсолютное значение $\frac{M}{C_{m_0}}$, но почти не вызывает изменения в положении точки минимума (см. рис. 43). То же самое наблюдалось и при других значениях $\bar{F}_{щ}$, $\bar{f}_{прит}$ и $\bar{f}_{выт}$. Отсюда вывод: $q_{опт}$ не зависит от величины P_1.

Это дает возможность искать оптимальные значения $q_{опт}$ только от трех параметров: $\Delta t_{расч}$; $P_2 = \Sigma\zeta h \frac{S_э}{S_m}$ и $\bar{f}_{прит} + \bar{f}_{выт}$.

В табл. 11 оптимальная величина ($q_{опт}$) находится в зависимости от двух параметров (от $\Delta t_{расч}$ и $P_2 = \Sigma\zeta h \frac{S_э}{S_m}$), которые оказывают наибольшее влияние на величину $q_{опт}$. Влияние третьего параметра ($\bar{f}_{прит} + \bar{f}_{выт}$) учитывается в виде поправки к данным табл. 11.

Для определения оптимальной ширины щели были проведены расчеты разных значений всех четырех параметров и при этом

принимались найденные (см. табл. 11) оптимальные значения $q_{опт}$. Расчеты показали, что наибольшее влияние на величину $\overline{F}_{щ\,опт}$ оказывают параметры $\Delta t_{расч}$ и P_1. Параметр P_2 оказывает меньшее влияние. Поэтому для упрощения расчетов с достаточной точностью было принято среднее его значение.

В табл. 12 приведены рекомендуемые оптимальные значения $\overline{F}_{щ\,опт}$ в зависимости от параметров $\Delta t_{расч}$ и P_1. Чем больше разность температур и меньше параметр P_1 (т. е. чем больше продолжительность оптимального периода) и чем больше срок окупаемости завесы и цена тепловой энергии, тем выгоднее устраивать завесы с большой шириной щели. При устройстве завес в высоких отапливаемых зданиях без избытков тепла проектировать относительную ширину щели меньше 1/30 не следует, это не экономично.

В высоких отапливаемых зданиях с дисбалансом механической вентиляции оптимальную ширину щели $F_{щ\,опт}$ можно взять из табл. 12, а оптимальное значение $q_{опт}$ — из табл. 11. При этом в случае превышения вытяжки над притоком рекомендуется принимать несколько меньшее значение $q_{опт}$, чем указано в табл. 11, а в случае превышения притока под вытяжкой брать значения $q_{опт}$ больше, чем указано в той же таблице.

В зданиях со значительным избытком тепла, в которых зимой применяется аэрация, завесы, как правило, устраиваются без дополнительного подогрева, с забором воздуха над воротами или из верхней зоны помещения, где температура наиболее высокая.

Для того чтобы можно было обойтись без подогрева подаваемого в завесу воздуха, необходимо ограничить выбор ширины воздуховыпускной щели. В зависимости от заданного отношения разностей температур $\theta = \frac{t_{см} - t_н}{t_з - t_н}$ следует принимать

при $\theta > 0{,}53$ относительную ширину щели $\overline{F}_{щ} > \frac{1}{40}$

при $\theta > 0{,}60$ . . . . . $\overline{F}_{щ} > \frac{1}{30}$

при $\theta > 0{,}67$ . . . . . $\overline{F}_{щ} > \frac{1}{20}$

при $\theta > 0{,}73$ . . . . . $\overline{F}_{щ} > \frac{1}{15}$

при $\theta > 0{,}77$ . . . . . $\overline{F}_{щ} > \frac{1}{10}$

В зданиях с избытком тепла последнее не представляет ценности. При экономическом сопоставлении различных вариантов устройства завес следует сравнивать только расходы на устройство завесы (вентилятор с электродвигателем, воздуховодом) и

расходы на электроэнергию во время эксплуатации. Может быть составлено уравнение, аналогичное (95), но содержащее меньше членов: не будет второго члена в фигурных скобках, отражающего затраты на устройство калориферов, а также в правой части этого уравнения не будет второго члена — затрат на тепло, расходуемое на завесу.

Оба оставшихся члена в новом уравнении пропорциональны расходу воздуха на завесу.

Так как при аэрации «горячего» цеха и в зимнее время площадь приточных отверстий значительно больше площади ворот, то действие завесы в этом случае не оказывает заметного влияния на разрежение в цехе. Это дает возможность считать, что $\frac{G_{пр}}{G_0} = \frac{\mu}{\mu_0}$, это значительно упрощает расчеты. Поделив все уравнение на комплекс параметров, входящих в первый член уравнения и производя соответствующие преобразования, можно получить [35] новый комплексный параметр

$$P_з = \frac{\Delta t_{расч} \Sigma \zeta h n_{сут} n_ч S_э \cdot 10^{-4}}{\frac{1}{Z_н} + 0{,}187}. \qquad (100)$$

Этот параметр характеризует отношение эксплуатационных затрат на электроэнергию к капитальным затратам с учетом срока их окупаемости.

Нетрудно заметить, что новый параметр ($P_з$) можно определить через P_1, P_2, $\Delta t_{расч}$:

$$P_з = \frac{\Delta t_{расч} P_2}{P_1}.$$

Параметр $P_з$ может изменяться в пределах 20—8000.

В табл. 13 на основе произведенных расчетов [35] даны оптимальные значения $\overline{F}_{щ}$ в зависимости от параметра $P_з$ для зна-

Таблица 13

$P_з$	0,4	0,45	0,5	0,53	0,55	0,57	0,6	0,63	0,65	0,67	0,7	0,73	0,77
20	1/40	1/40	1/40	1/40	1/40	1/30	1/30	1/30	1/20	1/20	1/15	1/15	1/10
50	1/40	1/40	1/40	1/40	1/30	1/30	1/30	1/20	1/20	1/20	1/15	1/10	1/10
250	1/40	1/40	1/40	1/30	1/30	1/30	1/20	1/15	1/15	1/15	1/10	1/10	1/10
500	1/30	1/30	1/30	1/30	1/20	1/20	1/15	1/15	1/15	1/10	1/10	1/10	1/10
1000	1/20	1/20	1/20	1/20	1/15	1/15	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
2000	1/20	1/15	1/15	1/15	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
3000	1/15	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10
4000 и более	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10	1/10

чений отношения температур $\theta = \frac{t_{см} - t_н}{t_э - t_н}$. При большой величине P_3 (т. е. больших эксплуатационных расходах) выгоднее делать большую ширину щели. При кратковременном же использовании завесы, дешевой электроэнергии, малом сопротивлении сети воздуховодов завесы и при коротком нормативном сроке окупаемости завесы в невысоком здании выгодно делать завесу с малой шириной щели.

Необходимо дать методику определения $q_{опт}$ и $\overline{F}_{щ.опт}$ еще и для случая $h'_{н.э} < H_в$. Для того чтобы не усложнять расчетов и не вводить новых параметров и таблиц, можно воспользоваться табл. 11 и 12. В соответствии с произведенными расчетами в рассматриваемом случае параметр P_1 надо разделить на 1,25:

$$P_1 = \frac{\left(\frac{1}{Z_н} + 0{,}187\right)}{1{,}25 n_{сут} n_ч S_т \cdot 10^{-4}} \qquad (97')$$

и в параметре P_2 вместо высоты h принять высоту ворот $H_в$, т. е.

$$P_2 = \frac{\Sigma \zeta H_в S_э}{S_т}. \qquad (98')$$

ГЛАВА III

КОНСТРУКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

§ 11. ПРИМЕНЯЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС

Воздушные завесы подразделяются на нижние (рис. 44), боковые односторонние и боковые двусторонние с одинаковыми и разными углами выхода струи.

Боковые (односторонние и двусторонние) завесы применяются при высоком стоянии грунтовых вод, возможном загрязнении пола в проеме ворот, а также, когда в воротах на продолжительное время может останавливаться транспорт.

Боковые завесы выполняются с одним вентилятором на оба стояка и с вентилятором на каждый стояк. В. Е. Решетниковым [23] была предложена конструкция двусторонней боковой воздушной завесы с осевыми вентиляторами на каждом стояке и с разными углами выхода струи.

Институтом ЦНИИПромзданий разработаны рабочие чертежи боковых двусторонних завес с подачей в каждый стояк воздуха индивидуальным центробежным вентилятором с производительностью от 10 000 до 120 000 *м*³/*ч* на оба стояка.

Чертежи разработаны для случая, когда вентиляционный агрегат расположен над воротами (рис. 45) и на полу, у ворот (рис. 46).

Данные завесы в настоящее время утверждены как типовые и разработаны для раздвижных и распашных ворот размером 3 × 3; 4 × 3; 4 × 4,2 и 4,7 × 5,6 *м*. Завесы могут быть установлены с калориферами и без них. Калориферы не типизированы и устанавливаются в соответствии с расчетом. Компоновка вентиляционных агрегатов воздушных завес позволяет устанавливать воздуховоды для забора воздуха из верхней зоны помещения в цехах, где зимой большие избытки тепла (см. рис. 46).

Завесы, как правило, оборудуются калориферами для подогрева воздуха, подаваемого в завесу. Калориферы могут не устанавливаться в «горячих» цехах при заборе воздуха из верхней зоны помещения и в некоторых случаях при расположении вентиляционных агрегатов на площадках над воротами. Возможность обойтись без дополнительного подогрева воздуха каждый раз должна быть проверена расчетом (см. § 6).

На площадках, расположенных над воротами, рекомендуется устанавливать воздушные завесы с производительностью до 38 000 $м^3/ч$. В зданиях без фонарей и шахт, в которых производительность завес меньше 38 000 $м^3/ч$, вентиляторы следует располагать над воротами. Площадки следует делать не сплош-

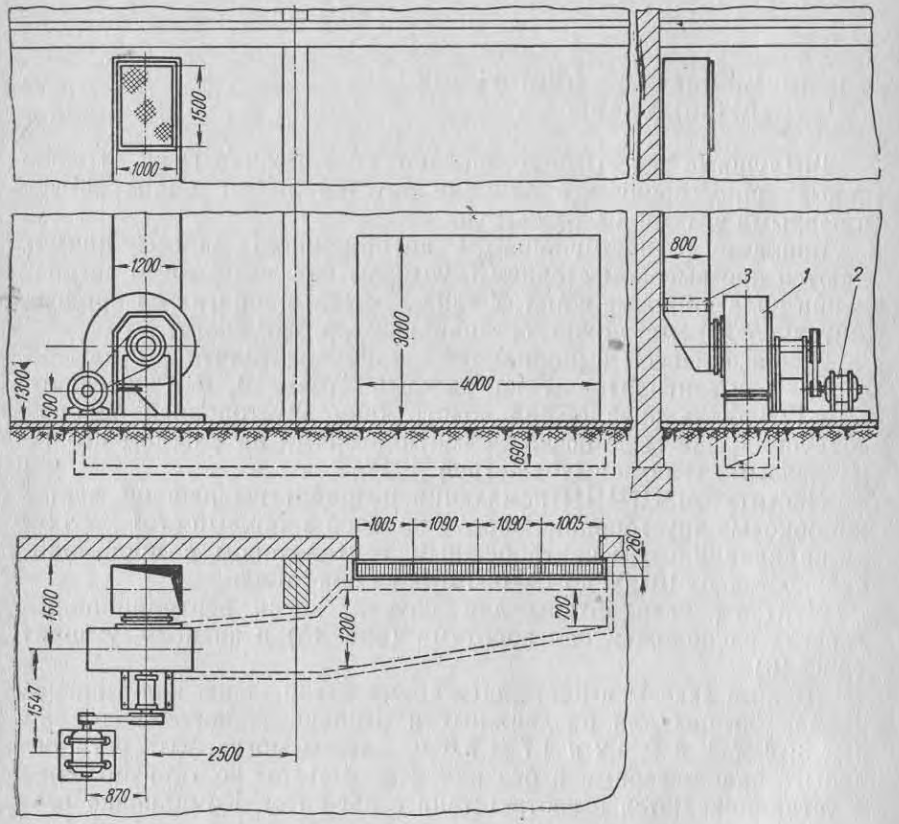


Рис. 44. Нижняя завеса для автомобильных ворот здания кузнечного цеха:

1 — вентилятор РВС № 10, $L = 45\,000$ $м^3/ч$, $n = 540$ *об/мин*; *2* — электродвигатель $N = 28$ *квт*, $n = 950$ *об/мин*; *3* — направляющий аппарат

ными, а решетчатыми. Это дает возможность частично забирать для завесы воздух, выходящий из помещения наружу через верхнюю часть ворот. Такие завесы по эффективности приближаются к завесам с забором воздуха снаружи (см. § 8).

В некоторых случаях применяют верхнюю подачу воздуха (над воротами). Такая подача устраивается, когда опасаются неприятного воздействия струи воздушной завесы на человека,

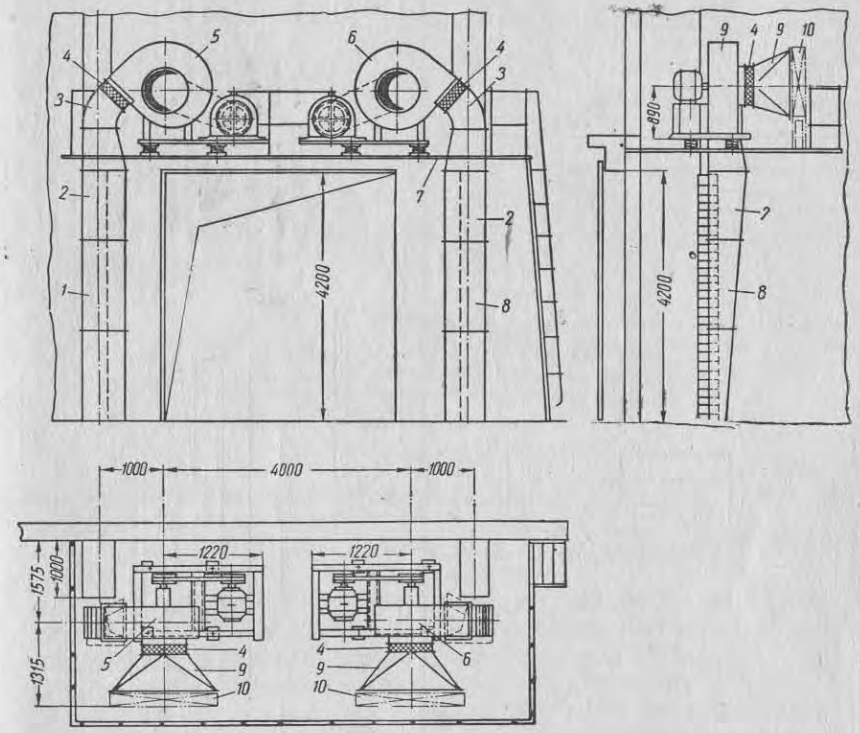


Рис. 45. Типовая воздушная завеса для автомобильных ворот, разработанная ЦНИИПромзданий, производительностью $L = 30\,000 \div 40\,000$ $м^3/ч$:

1 — правый раздаточный короб; *2* — левый раздаточный короб; *3* — переходной патрубок; *4* — гибкие вставки; *5* — вентиляторная установка с положением кожуха вентилятора НП (вентилятор Ц 4-70 № 8 с электродвигателем АО2-41-4 $N = 2{,}2$ *квт* или АО2-41-4 $N = 4$ *квт*, $n = 1440$ *об/мин* на виброизолирующем основании); *6* —то же положение кожуха вентилятора НЛ; *7* — металлическая площадка; *8* — дополнительный насадок раздаточного короба (правый и левый) *9* — конфузор; *10* — калориферы

который при боковых и нижних завесах может находиться в непосредственной близости от воздуховыпускных щелей.

Так, например, верхние завесы были устроены в воротах зольного отделения одной из ленинградских ТЭЦ, в которой применялось вагонеточное золоудаление. В завесы подавался воздух

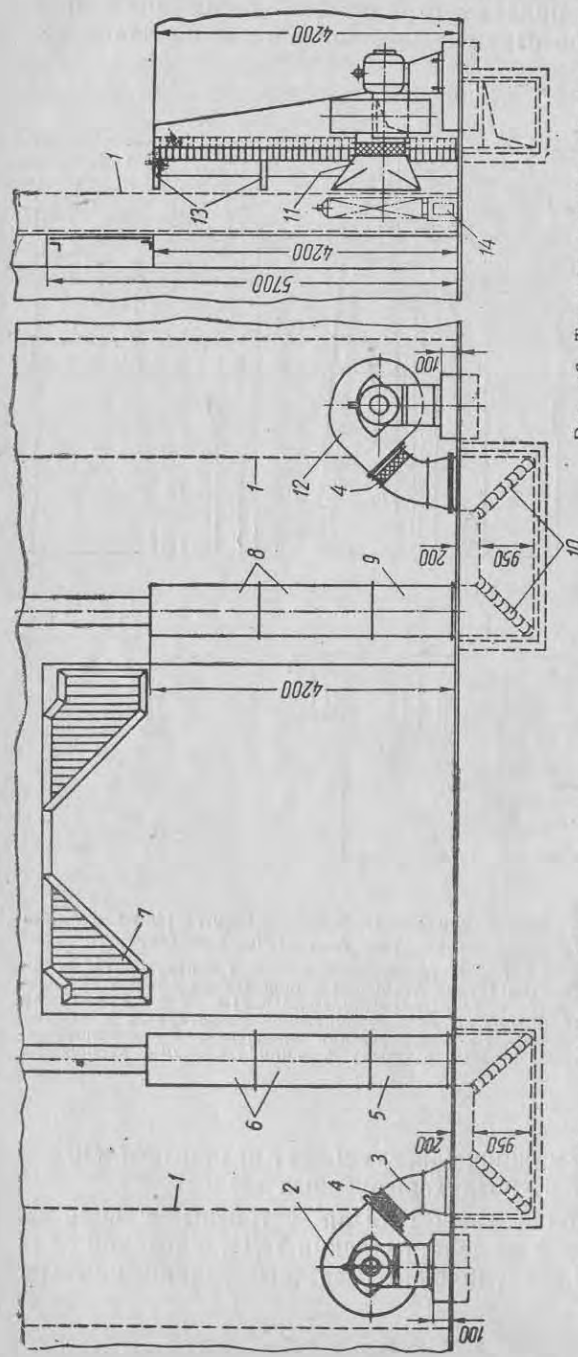


Рис 46. Типовая воздушная завеса для железнодорожных ворот, разработанная ЦНИИПромзданий производительностью $L = 80\,000 \div 120\,000$ м³/ч:

1 — воздуховод для забора воздуха из верхней зоны помещения; *2* — вентиляционная установка с положением кожуха вентилятора Н.Л (вентилятор Ц-4-70 № 12 с электродвигателем от $N = 7$ квт до $N = 14$ квт); *3* — переход; *4* — гибкая вставка; *5* — правый дополнительный насадок к раздаточным коробам; *6* — левый раздаточный короб; *7* — съемные щиты; *8* — правый раздаточный короб; *9* — левый дополнительный насадок к раздаточным коробам; *10* — направляющие лопатки; *11* — конфузор; *12* — то же, что и позиция *2* с положением кожуха вентилятора НП; *13* — крепление раздаточного короба; *14* — подставки под калориферы; *15* — калориферы

температурой около 100° из воздушных экономайзеров. Воздух выпускался через узкую (50 *мм*) щель над воротами на высоте 3 *м* от пола. На высоте человеческого роста температура смеси согласно произведенным измерениям падала (при $t_н = -5°$) до 28°; таким образом устранялась опасность ожогов людей горячим воздухом. Верхние завесы можно устраивать только

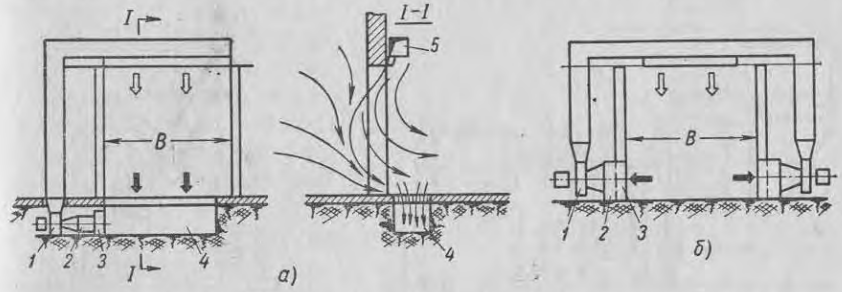


Рис. 47. Схемы воздушных завес с верхней подачей воздуха:

1 — вентилятор; *2* — калорифер; *3* — фильтр; *4* — канал для забора воздуха; *5* — воздухораздаточный канал завесы

в высоких зданиях, когда ворота по всей высоте «работают на приток». В рассматриваемом примере зольное отделение сообщается с высоким зданием котельной через отверстия в перекрытии.

Верхние завесы широко применяют в США, Франции, Швейцарии, ФРГ [24]—[26]. В завесы подается воздух температурой 55—80°. Завесы устраиваются циркуляционные (рис. 47) с забором воздуха внизу проема. Для очистки воздуха от пыли устанавливаются фильтры. Благодаря высокой температуре подаваемого в завесу воздуха можно значительно уменьшить расход его на завесу, т. е. проектировать завесы с малым значением $q = 0{,}3 \div 0{,}5$. При таком значении q получается сравнительно небольшой агрегат для завесы, занимающий мало места. Малое значение q, а также направление горячего воздуха сверху вниз, наличие плоскости земли, препятствующее выходу горячего воздуха струи завесы наружу (см. рис. 47, *а*), обеспечивают значительное снижение потерь тепла. Отсос воздуха внизу (рис. 47, *б*) или же сбоку (рис. 47, *а*) в нижней части ворот улавливает наиболее холодную часть воздуха, входящего в ворота и стелющегося по низу.

Такие завесы можно широко рекомендовать, особенно там, где имеется воздух, нагретый до температуры 50—100°. Кроме уже указанного случая применения такого типа завес на электростанции, они могут устраиваться на металлургических,

стекольных и других заводах, где горячий воздух получается при утилизации тепла дымовых газов.

Расчет завес с верхней подачей следует производить так же, как нижних и боковых.

При устройстве воздушных завес в высоких зданиях у больших ворот приходится устанавливать электродвигатели значительной мощности. В этом случае целесообразно устанавливать

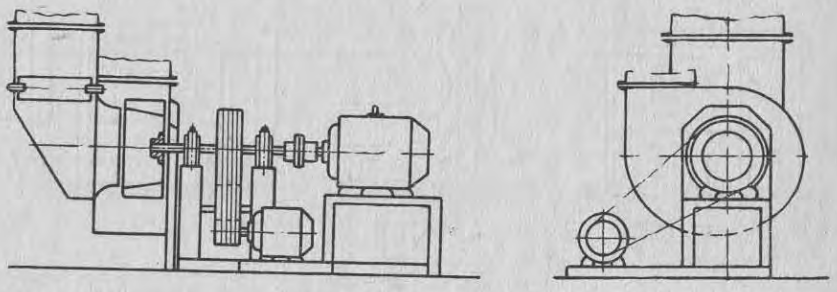


Рис. 48. Установка двух электродвигателей к вентилятору воздушной завесы

двухскоростные электродвигатели или два электродвигателя. Один из электродвигателей имеет максимально необходимую мощность, второй электродвигатель вращает вентилятор с меньшим числом оборотов и имеет мощность в m^3 раз меньше (m — отношение числа оборота вентилятора при большом электродвигателе к числу оборотов при меньшем двигателе).

Установка двух электродвигателей к вентилятору воздушной завесы может быть выполнена так, как показано на рис. 48.

В целях экономии электроэнергии такая установка двух электродвигателей была предложена и выполнена в цехах Уралмашзавода.

§ 12. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС

Одним из основных конструктивных элементов воздушных завес является раздаточный короб с воздуховыпускной щелью.

Он должен обеспечивать выход воздуха под заданным углом α к плоскости ворот и под прямым углом к оси воздуховода. Для уменьшения перемешивания воздуха струи завесы с наружным воздухом рекомендуется иметь на выходе из щели равномерное поле скоростей. Для этого рекомендуется делать глубину направляющих стенок не менее $2{,}5b$ (b — ширина щели), а при возможности делать направляющие с глубиной до $6b$. На входе в щелевидный насадок целесообразно устанавливать конфузор.

Для того чтобы сделать ограждение стенки большей глубины, щелевой насадок на бо́льшую его часть утапливается в раздаточный короб.

В настоящее время ЦНИИПромзданий разработано пять типовых стояков воздухораздаточных коробов с сечением в основании 470 × 470; 600 × 600; 650 × 650; 800 × 800 и 950 × 950 *мм* (рис. 49). Ширина щели в этих стояках от 50 до 200 *мм*. Длина типовых стояков 3 *м*. При устройстве воздушных завес для ворот с высотой 4,2 и 5,6 *м* применяется дополнительный насадок длиной 1,2 *м* (рис. 50). В железнодорожных воротах верх обычно закрывается щитами, имеющими у кромки ворот высоту 1,4 *м*. Благодаря щитам необходимая высота стояка завесы 4,2 *м*. Таким образом, ворота всех применяемых размеров обеспечиваются типовыми стояками вместе с дополнительными насадками.При устройстве завес в низких зданиях, когда нейтральная зона находится в пределах ворот, верхняя часть щелей, находящаяся выше этой зоны, должна быть заглушена. Высота нейтральной зоны определяется по расчету (см. § 8).

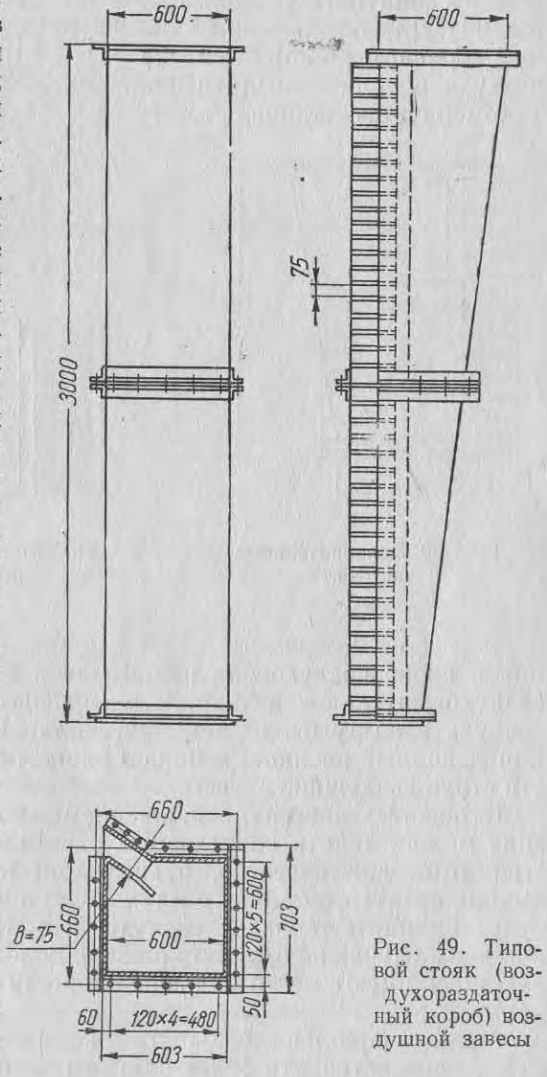


Рис. 49. Типовой стояк (воздухораздаточный короб) воздушной завесы

На рис. 51 изображено устройство воздуховыпускной щели в канале нижней завесы.

Для выравнивания потока, а также для того, чтобы создать более густую и прочную решетку, щель разгораживают двумя

продольными перегородками и поперечные перегородки устанавливают через каждые 40—50 *мм*.

Воздухораспределительные воздуховоды для нижних завес следует делать как воздуховоды равномерной раздачи, сужающиеся к концу воздуховода (см. рис. 44). Для обеспечения большей равномерности выхода воздуха по длине воздуховода рекомендуется площадь сечения в корне воздуховода принимать в 2 раза больше площади воздуховыпускных щелей. Чем меньше продольная скорость воздуха в воздуховоде, тем более плавным будет вход воздуха в щелевидный насадок, и можно ожидать меньшей турбулентности струи воздушной завесы.

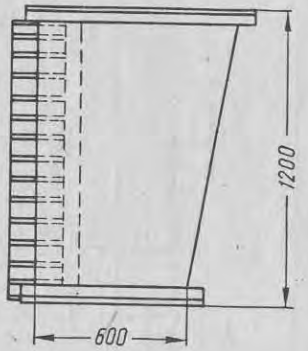


Рис. 50. Дополнительный насадок

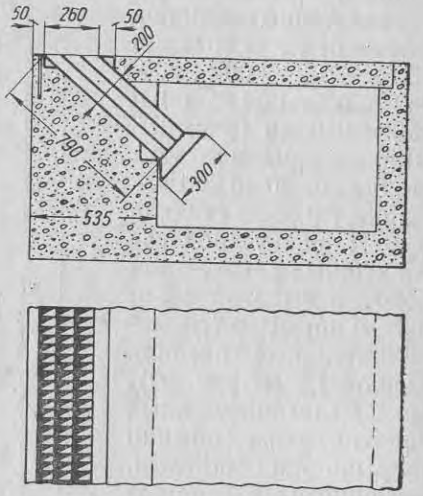


Рис. 51. Конструкция воздуховыпускной щели у нижней завесы

В боковых завесах с движением воздуха в стояках сверху вниз можно делать воздуховоды одного сечения по всей длине. При этом, как известно, будет наблюдаться неравномерность выхода воздуха по длине воздуховода; в конце его, у низа ворот, будет выходить больше воздуха. Но такая неравномерность в данном случае не отрицательное, а положительное явление, так как здесь имеют место большие скорости прохода воздуха через ворота.

Малые продольные скорости в концевом участке воздуховода будут способствовать более плавному входу воздуха в щелевидный насадок.

Для регулирования расхода воздуха, подаваемого центробежным вентилятором в воздушную завесу, наиболее целесообразно применять упрощенный направляющий аппарат языкового типа

[21] или аппарат, предложенный А. Г. Бычковым [28]. Эти аппараты (рис. 52) устанавливаются в воздуховоде, ось которого перпендикулярна оси вентилятора. Такой подвод воздуха с устройством входной коробки несколько уменьшает производительность вентилятора даже при полностью открытом направляющем аппарате. Но примерно так же уменьшается производительность и при установке перед вентилятором отвода, создающего неравномерное поле скоростей на входе в вентилятор.

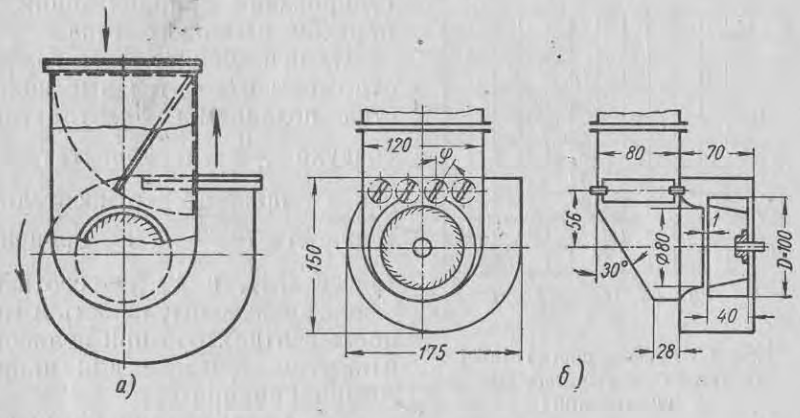


Рис. 52. Упрощенные направляющие аппараты:
а — языкового типа; *б* — конструкции А. Г. Бычкова

Так как центробежные вентиляторы, подающие воздух в завесу, устанавливаются большей частью на уровне пола, а забор воздуха для воздушных завес, как правило, производится из верхней зоны, обычно в установках воздушных завес воздуховод подходит к вентилятору под прямым углом к его оси (см. рис. 44) и установка отвода неизбежна. Поэтому применение входной коробки с направляющим аппаратом в ней не вызывает в данном случае дополнительных потерь.

В положении полного закрытия клапан направляющего аппарата может служить как запорное приспособление. При промежуточных положениях клапана поток воздуха отжимается к одной стороне воздуховода. Этим достигается закручивание потока в направлении вращения ротора вентилятора при входе на рабочее колесо и изменяется характеристика вентилятора.

По мере закрытия клапана увеличивается степень закручивания потока. Благодаря этому одновременно с уменьшением производительности вентилятора уменьшается развиваемое им давление. Поэтому при сокращении производительности наблюдается значительное падение мощности, необходимой для вращения вентиляторов.

Такой способ регулирования закручивающим аппаратом значительно выгоднее регулирования дросселями или шиберами, при которых часть создаваемого вентилятором давления, и следовательно, часть расходуемой им энергии идет на преодоление дополнительно введенного в сеть сопротивления.

На рис. 53 (по данным испытаний И. М. Готгельфа и В. К. Исаевой [29]), даны кривые сброса мощности при регулировании дросселем и при регулировании направляющим аппаратом языкового типа.

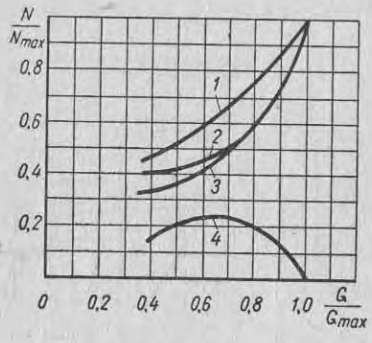


Рис. 53 График сброса мощности при различных способах регулирования:

1 — регулирование дросселем $\frac{N_{др}}{N_0}$; *2* — регулирование упрощенным направляющим аппаратом $\frac{N_{уп}}{N_0}$; *3* — регулирование направляющим аппаратом с поворотными радиальными лопатками $\frac{N_к}{N_0}$; *4* — выигрыш мощности при регулировании упрощенным направляющим аппаратом по сравнению с регулированием дросселем $\Delta N = \frac{N_{др} - N_{уп}}{N_{др}}$

На оси абсцисс этого графика отложены относительные количества подаваемого вентилятором воздуха $\frac{G}{G_{max}}$ в процентах, а на оси ординат — относительная мощность $\frac{N}{N_{max}}$ в процентах (здесь G_{max} и N_{max} — соответственно производительность и мощность вентилятора при полностью открытом дросселе или направляющем аппарате).

Как видно из рис. 53, при регулировании в пределах от 100 до 38% от максимальной производительности вентилятора применение направляющего аппарата дает значительную экономию в расходе электроэнергии по сравнению с обычным дросселем или шибером.

Наибольший выигрыш в мощности при регулировании направляющими аппаратами получается при глубине регулирования до 30%. В этих пределах качество регулирования упрощенным направляющим аппаратом и направляющим аппаратом с поворотными радиальными лопатками одинаково.

На рис. 54 приведен пример регулирования производительности вентилятора с помощью направляющего аппарата. При изменении угла лопаток направляющего аппарата меняется характеристика вентилятора. Ввиду того, что при закрытии направляющего аппарата увеличивается сопротивление проходу воздуха через него, меняется характеристика сети воздуховодов. Производительность и давление, развиваемое вентилятором при каждом угле поворота лопаток, будут определяться точкой пересечения кривой характеристики вентилятора с кривой характеристики сети, соответствующих данному углу поворота лопаток направляющего аппарата. На рис. 54 также нанесены линии расхода мощности при разных углах открытия направляющего аппарата.

Из этого рисунка видно, что при регулировании направляющим аппаратом уменьшение производительности вентилятора происходит двумя путями: за счет изменения характеристики

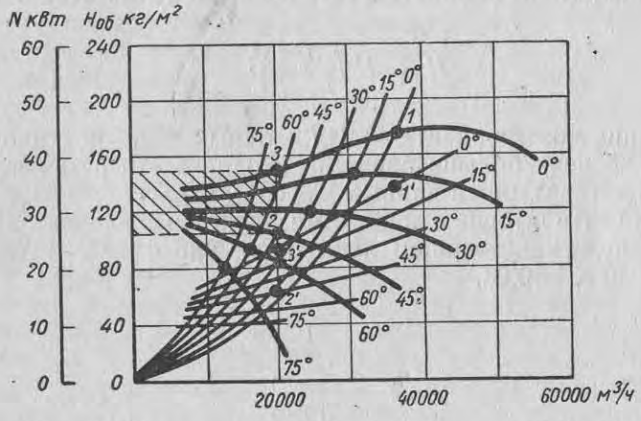


Рис. 54. Пример изменения характеристики вентилятора и сети воздуховодов при регулировании расхода упрощенным направляющим аппаратом. Заштрихованная площадь показывает выигрыш в мощности при регулировании направляющим аппаратом по сравнению с регулированием шибером.

$H_{об}$ — толстые линии; N — тонкие линии

вентилятора — уменьшения создаваемого им давления и за счет изменения характеристики сети. Так, например, при уменьшении производительности с 38 000 *м³/ч* (точки *1* и *1'* на рис. 54) до 20 000 *м³/ч* при регулировании только изменением характеристики сети (путем закрытия дроссель-клапана) работа вентилятора будет характеризоваться точкой *3*, в то время как при регулировании направляющим аппаратом — точкой *2*. Разница в давлениях, равная на последнем графике отрезку *2—3*, определяет бесполезную потерю давления в дроссель-клапане при регулировании последним. Точки *3'* и *2'* на линиях расхода мощности также указывают на разницу в расходе мощности при регулировании дроссель-клапаном и направляющим аппаратом.

Во избежание больших гидравлических потерь и неравномерности поля скоростей на входе в вентилятор рекомендуется площадь сечения коробки $F_{кор}$ принимать равной или большей, чем две площади входного отверстия вентилятора F_0.

При подборе вентилятора с установленной перед ним входной коробкой делается поправка к характеристике вентилятора по данным М. И. Невельсона [28].

Вентилятор подбирается на расход L' несколько больше заданного ($L_{задан}$):

$$L' = (1 + K)\, L_{задан}$$

и на напор H', который должен развивать вентилятор без входной коробки, чтобы подавать в сеть воздух в количестве L' вместо $L_{задан}$:

$$H' = H\left(\frac{L'}{L_{задан}}\right)^2. \qquad (101)$$

Величина коэффициента K для входных коробок с площадью в 1,75—2,25 раза больше площади входного отверстия вентилятора и по литературным данным [28] составляет:

1) для вентиляторов с лопатками, загнутыми вперед:

а) на режиме, лежащем левее η_{max}, при $n_{уд} < 40$ $K = 0{,}03$; при $n_{уд} > 40$ $K = 0{,}08$,

где

$$n_{уд} = \frac{L^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}}\, n;$$

б) на режиме, лежащем правее η_{max}, при $n_{уд} < 40$ $K = 0{,}05$; при $n_{уд} > 40$ $K = 0{,}1$; при указанных размерах площади входной коробки для этих вентиляторов можно принять, что расходуемая мощность не увеличивается;

2) для вентиляторов с лопатками, загнутыми назад, при $n_{уд} < 40$ коэффициент $K = 0{,}02 \div 0{,}03$.

§ 13. КОНСТРУКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА И МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС

Для сокращения затрат на сооружение и эксплуатацию воздушных завес и для того, чтобы обеспечить наибольшую эффективность их работы, следует:

а) максимально уплотнить притворы створок в фонаре и окнах, чтобы живое сечение щелей не превышало величин, указанных в табл. 4 *.

* Для существующих зданий суммарная площадь щелей в притворах створок фонарей и окон может быть определена по методике, изложенной в гл. VII, § 20. Если в результате испытаний фактическая площадь щелей на 1 *пог.м* длины притворов окажется большей указанной в табл. 4, то необходимо произвести уплотнение притворов.

б) перекрыть шахты вытяжных систем, не работающих в зимнее время;

в) применяя автоматику, сократить время, в течение которого ворота или проемы должны быть открыты;

г) применяя шторы, уменьшить площадь проемов, обслуживаемых воздушными завесами;

д) не допускать в обслуживаемом помещении преобладания вытяжки над притоком;

е) в зданиях со значительными избытками тепла в зимнее время рекомендуется открывать окна на высоте 4—6 *м* в местах, где расположено оборудование, выделяющее тепло, и отсутствуют рабочие места;

ж) в многоэтажных зданиях максимально сократить воздухопроницаемость путем герметизации лифтовых шахт, разделением лестничных клеток по высоте здания на отдельные секции, применением многокамерных шлюзов и т. п.

Для уменьшения потерь тепла, уходящего с частью струи завесы, не попадающей в помещение (см. рис. 25, *а*), рекомендуется перед воротами, особенно при односторонних завесах, устраивать открытый тамбур. Он должен иметь боковые стенки и крышу; в наружном проеме тамбура ворот не навешиваются (см. рис. 25, *б*). Длина тамбура должна быть не меньше ширины ворот, ширина тамбура не менее чем на 1 *м* больше ширины ворот.

В открытом тамбуре, особенно при односторонних завесах, воздух, подмешивающийся снаружи к струе завесы, будет в основном циркулировать внутри тамбура. Таким образом, имея открытый тамбур, можно уменьшить потери тепла, а в некоторых случаях обойтись без дополнительного подогрева воздуха, забираемого для завесы из помещения.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС У ВОРОТ ЗДАНИЙ

Используя предложенные в предыдущих главах методики расчетов и рекомендации по конструированию, рассмотрим ряд наиболее характерных примеров проектирования воздушных завес с установлением последовательности операций расчета этих устройств.

§ 14. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС ПРИ СБАЛАНСИРОВАННЫХ РАСХОДАХ ПРИТОЧНОЙ И ВЫТЯЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Пример 1. Рассчитать воздушную завесу для раздвижных ворот ($\mu_0 = 0{,}8$) размерами 4×3 *м*; $F = 12$ *м*^{2} в сварочном цехе машиностроительного завода.

Расчетная температура наружного воздуха в зимнее время $t_н = -25°$; температура в рабочей зоне $t_{р.з} = 18°$; средняя температура по высоте помещения $t_{вн} = 20°$; $\Delta t_{расч} = 20 + 25 = 45°$; продолжительность отопительного периода 178 суток; продолжительность открывания ворот $n_ч = 1{,}5$ *ч* в сутки; отпускная стоимость тепла $S_т = 2{,}4$ *руб/Гкал*; отпускная стоимость электроэнергии $S_э = 0{,}69$ *коп/квт · ч*; категория работ — легкая; рабочие места, расположенные вблизи ворот, защищены ширмами; суммарная длина притворов окон с деревянными двойными переплетами, расположенных в нижней зоне помещения, $l = 760$ *м*; суммарная длина притворов двух ворот, расположенных в цехе, кроме рассматриваемых, $l_{вор} = 48$ *м* (ворота в зимнее время закрыты); суммарная длина притворов створок фонаря с металлическими переплетами $l = 700$ *м*; вертикальное расстояние между центром проема ворот и центром фрамуг фонаря $h = 5$ *м*; объемы воздуха, подаваемого в цех и удаляемого из цеха механическим путем, сбалансированы.

Р е ш е н и е.

1. Температуру смеси воздуха в рабочей зоне вблизи ворот в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями (см. § 5) принимаем $t_{см} = 14°$ С.

2. Нормативный срок окупаемости затрат по устройству воздушной завесы для машиностроительной промышленности по табл. 8 составляет $Z_н = 4$ года.

Определяем P_1 по формуле (97):

$$P_1 = \frac{\frac{1}{Z_н} + 0{,}187}{n_{сут} n_ч S_т \cdot 1{,}15 \cdot 10^{-4}} = \frac{\frac{1}{4} + 0{,}187}{178 \cdot 1{,}5 \cdot 2{,}4 \cdot 1{,}15 \cdot 10^{-4}} = 5{,}9.$$

4. Находим по табл. 12 оптимальное значение $\bar{F}_щ = \frac{F_щ}{F_в}$ для данных $\Delta t_{расч} = 45°$ С и $P_1 = 5{,}9$:

$$\bar{F}_щ = \frac{2bH}{BH} = \frac{1}{30},$$

откуда оптимальная ширина щели

$$b = \frac{1}{30} \cdot \frac{B}{2} = \frac{4{,}0}{60} = 0{,}067 \text{ м}.$$

Принимается к установке двусторонняя боковая завеса; по номенклатуре типовых стояков, разработанных ЦНИИПромзданий (серия ПР05-43/64), ширина щели берется $b = 0{,}075$ *м*, при этом

$$\bar{F}_щ = \frac{2b}{B} = \frac{2 \cdot 0{,}075}{4} = \frac{1}{27}.$$

5. Определяем P_2, для чего по табл. 10 находим сумму коэффициентов местных сопротивлений воздуховодов завесы.

Принимается индивидуальная подача воздуха в каждый стояк с расположением вентиляторов на полу и с установкой калориферов $\Sigma\zeta = 4{,}4$

$$P_2 = \frac{\Sigma\zeta h S_{эл}}{S_т \cdot 1{,}15} = \frac{4{,}4 \cdot 5 \cdot 0{,}69}{2{,}4 \cdot 1{,}15} = 5{,}5.$$

На потери тепла и транспортирование теплоносителя в пределах заводской площадки вводится коэффициент 1,15.

6. По табл. 11 находим $q_{опт} = \frac{G_э}{G_{пр}}$; при $P_2 = 5{,}5$; $\bar{F}_щ = \frac{1}{27}$ и $\Delta t_{расч} = 45°$С $q_{опт} = 0{,}6$.

7. Коэффициент расхода воздуха μ для раздвижных ворот ($\mu_0 = 0{,}8$) при $\bar{F}_щ = \frac{1}{27}$; $q = 0{,}6$ и $\alpha = 30°$ С по интерполяции в табл. 2 приложения I находим $\mu = 0{,}3$. Коэффициент расхода μ можно также найти по номограмме (см. рис. 17).

8. Исходя из данных табл. 4 и заданных величин длин и притворов створок фонаря, окон и неоткрывающихся в зимнее время ворот находим площади щелей, умноженные на коэффициенты расхода:

а) площадь приточных щелей

$$(\mu F)_{прит} = 760 \cdot 0{,}002 + 48 \cdot 0{,}01 = 2{,}0 \text{ м}^2;$$

б) площадь вытяжных щелей

$$(\mu F)_{выт} = 700 \cdot 0{,}004 = 2{,}8 \text{ м}^2.$$

9. По формуле (50′) определяем высоту расположения нейтральной зоны, для чего раньше находим отношение площади приточных отверстий к площади вытяжных:

$$Б = \frac{\mu F_в (1-q) + (\mu F)_{прит}}{(\mu F)_{выт}} = \frac{0{,}3 \cdot 12\,(1-0{,}6) + 2{,}0}{2{,}8} = 1{,}23,$$

откуда

$$h_{н.\,з} = \frac{h}{(1{,}052Б)^2 + 1} = \frac{5}{(1{,}052 \cdot 1{,}23)^2 + 1} = 1{,}88\ м.$$

10. Количество воздуха, проходящего при действии завесы через ворота, находится по формуле (51):
где

$$G_{пр} = 3600 \mu F_в \sqrt{19{,}62 h_{н.\,з} \Delta\gamma \gamma_{см}} =$$

$$= 3600 \cdot 0{,}3 \cdot 12 \sqrt{19{,}62 \cdot 1{,}88 \cdot 0{,}215 \cdot 1{,}23} = 40\,565\ кг/ч,$$

где

$$\Delta\gamma = \gamma_{-25} - \gamma_{20} = 1{,}42 - 1{,}205 = 0{,}215\ кг/м^3;$$

$$\gamma_{см} = \gamma_{14} = 1{,}23\ кг/м^3.$$

11. Необходимый расход воздуха на завесу определяется по формуле (52):

$$G_з = qG_{пр} = 0{,}6 \cdot 40\,565 = 24\,339\ кг/ч.$$

12. Определим необходимую температуру воздуха, подаваемого в завесу. Для этого сначала найдем величину $\frac{Q'}{Q_з}$, при $\overline{F}_щ = \frac{1}{27}$ и $q = 0{,}6$ по графику (рис. 27, *а*) $\frac{Q'}{Q_з} = 0{,}10$.

Температура $t_з$ по формуле (40) равна:

$$t_з = t_н + \frac{t_{см} - t_н}{q\left(1 - \frac{Q'}{Q_з}\right)} = -25 + \frac{14 + 25}{0{,}6\,(1 - 0{,}10)} = 47{,}5°\,C.$$

13. Необходимый расход тепла на воздушную завесу найдем по формуле (41):

$$Q = G_з \cdot 0{,}24\,(t_з - t_{нач}) = 24\,339 \cdot 0{,}24\,(47{,}5 - 14) = 196\,000\ ккал/ч,$$

где $t_{нач} = t_{см} = 14°$ С; забор воздуха для завесы производится внизу у ворот.

14. Дополнительный расход тепла на систему отопления для догрева воздуха, проходящего через ворота, от температуры смеси $t_{см}$ до температуры $t_{вн}$ составляет

$$Q_{доп} = G_{пр} \cdot 0{,}24\,(t_{р.\,з} - t_{см}) = 0{,}24 \cdot 40\,565\,(18 - 14) = 39\,000\ ккал/ч.$$

15. Определяем потери напора в воздушном канале, подводящем воздух к стояку. Размер канала принимается равным размерам сечения входа в принятый типовой стояк — 0,6 × 0,6 *м*.

Скорость воздуха в канале

$$v_{кан} = \frac{24\,339}{2 \cdot 3600 \cdot 1{,}100 \cdot 0{,}6^2} = 8{,}5\ м/сек,$$

где 1,100 — удельный вес воздуха при $t_з = 47{,}5°$; в соответствии с конструкцией сети $\Sigma\zeta = 1{,}2$ и длина воздуховодов равна 3 *м*, откуда

$$\Delta H_{кан} = \Sigma\zeta \frac{v_{кан}}{2g} \gamma_з + Rl = 1{,}2 \frac{8{,}5^2}{19{,}62} 1{,}100 + 0{,}12 \cdot 3 = 5{,}2\ кг/м^2.$$

16. Потеря напора в стояке завесы, коэффициент местного сопротивления которого $\zeta = 2{,}0$, равен:

$$\Delta H_{ст} = \zeta \frac{v_щ^2}{19{,}62} \gamma_з = 2 \cdot \frac{13{,}74^2}{19{,}62} \cdot 1{,}10 = 21{,}2\ кг/м^2,$$

где

$$v_щ = \frac{G_в}{2 \cdot 3600 Hb\gamma_з} = \frac{24\,339}{2 \cdot 3600 \cdot 3 \cdot 0{,}075 \cdot 1{,}10} = 13{,}74\ м/сек.$$

Итого, потери напора в воздуховодах и в стояке составляют:

$$\Delta H_{кан} + \Delta H_{ст} = 26{,}4\ кг/м^2.$$

17. Подбор вентиляционного агрегата производится в комплекте по Инструкции ГПИ Сантехпроекта, 1964 г. Для данного случая наиболее подходящим является комплект А8-3к, который при заданной производительности $\frac{24\,339}{2\gamma_з} = 11\,060\ м^3/ч$ обеспечивает напор 38 $кг/м^3$.

18. Подбор калориферов производится по общепринятой методике. При этом следует учитывать необходимость использования всего остаточного напора, который составит

$$\Delta H = H_{вент} - \Delta H_{кан} - \Delta H_{ст} = 38 - 26{,}4 = 11{,}6\ кг/м^2.$$

Пример 2. Рассчитать воздушную завесу для распашных ворот ($\mu_0 = 0{,}64$) мартеновского цеха. Размер ворот 4,7 × 5,6 *м*.

В цехе в зимнее время используется аэрация. При расчетной температуре для отопления $t_н = -35°$ С ($\gamma_н = 1{,}483\ кг/м^3$) площадь аэрационных проемов составляет: в фонаре типа КТИС $F_ф = 34{,}2\ м^2$, в приточных окнах со среднеподвесными створками, открытыми под углом 60° — 44 $м^2$. В закрытых фонарях есть щели, длина притворов фонарей составляет 1400 *м*, в закрытых приточных одинарных окнах длина притворов 1700 *м*. Расстояние от середины ворот до середины створок в фонаре $h = 17{,}2\ м$, от середины ворот до середины приточных отверстий $h_{прит} = 5{,}2\ м$. Средняя температура воздуха в рабочей зоне $t_{р.\,з} = 18°$ С, температура уходящего воздуха $t_{ух} = 24{,}5°$ С и

средняя температура воздуха по высоте цеха $t_{вн} = 21°$ С ($\gamma_{вн} = 1{,}201$ *кг/м*³). В районе ворот постоянных рабочих мест нет. Здание защищено от воздействия ветра. Перед завесой нет тамбура.

Продолжительность отопительного периода $n = 180$ суток; ворота открыты 4,0 *ч* в сутки. Стоимость электроэнергии $S_э = 0{,}58$ *коп/квт·ч*.

Решение.

1. Температура в районе ворот и температура смеси в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями (см. § 5) принимается $t_{см} = 5°$ С ($\gamma_{см} = 1{,}27$ *кг/м*³).

2. Ввиду того, что в здании имеются значительные избытки тепла, проектируется завеса без дополнительного подогрева воздуха.

Предусматривается установка типовой двусторонней воздушной завесы по чертежам ЦНИИПромзданий с индивидуальными стояками; угол выхода струи завесы по отношению к плоскости ворот 30°. Вентиляционные агрегаты размещаются на полу. Воздух для завесы забирается из верхней зоны $t_э = t_{ух} = 24{,}5°$ С.

3. Определяем отношение температур:

$$\theta = \frac{t_{см} - t_н}{t_э - t_н} = \frac{5 + 35}{24{,}5 + 35} = \frac{40}{59{,}5} = 0{,}67.$$

4. Определяем параметр P_3:

$$P_3 = \frac{\Delta t_{расч} \Sigma\zeta h n_{сут} n_ч S_э \cdot 10^{-4}}{\frac{1}{Z_п} + 0{,}187} =$$

$$= \frac{56 \cdot 2{,}8 \cdot 17{,}2 \cdot 180 \cdot 4{,}0 \cdot 0{,}58 \cdot 10^{-4}}{\frac{1}{7} + 0{,}187} = 342;$$

при определении P_3 были приняты

$$\Delta t_{расч} = t_{вн} - t_н = 21 + 35 = 56° \text{С};$$

$$\Sigma\zeta = 2{,}8; \quad Z_н = 7 \text{ лет}.$$

5. В соответствии с табл. 14 для $\theta = 0{,}67$ и $P_3 = 342$ оптимальное значение $\overline{F}_щ = 1/15$.

Принимается к установке типовой стояк с шириной щели $b = 0{,}150$ *м*.

6. Для уменьшения площади открытых ворот верх их перекрывают щитами по высоте, соответствующей железнодорожным габаритам (см. рис. 46). При этом открытая площадь ворот будет составлять $F_в = 4{,}7 \cdot 5{,}6 - 3{,}28 = 23{,}08$ *м*².

Отношение площади воздуховыпускной щели (высота щели 4,2 *м* — расстояние от пола до нижней части щита) к площади ворот составляет

$$\overline{F}_щ = \frac{F_щ}{F_в} = \frac{2 \cdot 4{,}2 \cdot 0{,}15}{23{,}08} = \frac{1}{18{,}2}.$$

Чтобы обеспечить температуру смеси $t_{см} = 5°$ С, по заданной ширине щели и температуре воздуха, подаваемого в завесу, $t_в = 24{,}5°$ С определяем q.

Так как графика для $\overline{F}_щ = 1/18{,}2$ на рис. 28 нет, то q определяем по графикам рис. 27 путем последовательного приближения (см. расчет):

$$t'_{см} = t_н + (t_э - t_н)\, q\left(1 - \frac{Q'}{Q_э}\right) = -35 +$$

$$+ (24{,}5 + 35) \cdot 0{,}82 \cdot (1 - 0{,}17) = 5{,}4°,$$

где $\frac{Q'}{Q_э} = 0{,}17$ при $1/\overline{F}_щ = 18{,}2$ и $q = 0{,}82$ (см. рис. 27, *а*).

8. По табл. 1 (приложение 1) или по номограммам рис. 18 и 19 находим для данных $\overline{F}_щ = 1/18{,}2$; $q = 0{,}82$; $\alpha = 30°$ и $\mu_0 = 0{,}64$ значение коэффициента расхода $\mu = 0{,}243$.

9. Определяем площадь живого сечения вытяжных и приточных отверстий, пользуясь табл. 4 и 5:

а) вытяжные отверстия в фонаре:

$$(\mu F)_{выт} = 34{,}2 \cdot 0{,}48 + 1400 \cdot 0{,}004 = 22{,}0 \text{ } м^2;$$

б) приточные отверстия, расположенные на высоте $h_{прит} = 5{,}2$ *м*:

$$(\mu F)_{прит} = 44 \cdot 0{,}56 + 1700 \cdot 0{,}002 = 28{,}0 \text{ } м^2.$$

10. Так как площадь приточных отверстий значительно (в 28 раз) больше величины $\mu F_в (1 - q) = 0{,}243 \cdot 23{,}08 (1 - 0{,}82) = 0{,}01$ *м*², определить положение нейтральной зоны можно по формуле (56′)

$$h_{н.\,з} = \frac{h - h_{прит}}{\left[1{,}1 \frac{(\mu F)_{прит}}{(\mu F)_{выт}}\right]^2 + 1} + h_{прит} = \frac{17{,}2 - 5{,}2}{\left(1{,}1 \frac{28}{22}\right)^2 + 1} + 5{,}2 = 9{,}25 \text{ } м.$$

11. Количество воздуха, проходящего через ворота при действии завесы, при расчетной температуре для отопления определяется по формуле

$$G_{пр} = 3600 \mu F \sqrt{19{,}62\, h_{н.\,з} (\gamma_н - \gamma_{вн})\, \gamma_{см}} = 3600 \cdot 0{,}243 \cdot 23{,}08 \times$$

$$\times \sqrt{19{,}62 \cdot 9{,}25 (1{,}483 - 1{,}201) \cdot 1{,}27} = 160\,900 \text{ } кг/ч.$$

12. Необходимый расход воздуха на завесу

$$G_в = qG_{пр} = 0{,}82 \cdot 160\,900 = 131\,800 \text{ кг/ч}$$

или

$$\frac{131\,800}{1{,}109} = 118\,800 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Принимается к установке воздушная завеса по типовым чертежам ЦНИИПромзданий, серия ПР05 43/64 — ТЗ-80 по III схеме установки вентиляционного агрегата ВУ-11, комплект А-12-5а, вентилятор Ц4-70 № 12 с электродвигателем типа АО-63-4, мощность $N = 14$ *квт*, $n = 1450$ *об/мин* на каждый стояк (всего 2 вентилятора и 2 электродвигателя).

13. Калорифер не устанавливается. Для забора воздуха из верхней зоны к каждому стояку прикладывается вертикальный воздуховод сечением 1250×950 *мм*. Такого же размера канал делается и от вентилятора к стояку.

14. Сопротивление всей сети воздуховодов определяется расчетом, сведенным в табл. 14.

Таблица 14

Наименование участка	L в м³/сек	l в м	Размер воздуховода в мм	F в м²	v в м/сек	$d_{эк}$ в мм	R в кг/м³	Rl в кг/м²	$\Sigma\zeta$	Z
Воздуховод для забора воздуха . . .	16,5	14	1250×950	1,18	14,0	1100	0,12	1,68	1,4	16,8
Воздуховод от вентилятора	16,5	6	1250×950	1,18	14,0	1100	0,12	0,72	1,2	14,4
Стояк—выход из щели	16,5	—	2×4,2×0,15	1,26	12,3	—	—	—	2,0	18,6

$$\Sigma(Rl + Z) = 2{,}40 + 49{,}8 = 52{,}2 \text{ кг/м}^2$$

15. В соответствии с характеристикой вентилятора Ц4-70 № 12 для обеспечения расхода воздуха $L = 54\,000$ *м³/ч* и напора $H = 52$ *кг/м²* необходимое число оборотов $n = 650$ в минуту.

Пример 3. Рассчитать воздушные завесы для трех ворот, расположенных в здании рядом с источниками избытков тепла и вредных газов. Возможно открытие всех трех ворот одновременно. Ворота размером $4{,}0 \times 3{,}0$ *м*, площадью $F_в = 12{,}0$ *м*. На здании имеется фонарь, в котором для удаления тепла и вредных газов при минимальной наружной температуре открыты створки общей площадью 12 *м²*. Створки в фонаре верхнеподвесные и открыты под углом 70°. Расстояние от середины ворот до середины фонаря $h = 12$ *м*. Окна в цехе глухие (летом аэрация осуществляется через открытые ворота).

Температура воздуха в рабочей зоне $t_{р.з} = 16°$ С, у перекрытия $t_{ух} = 25°$ С ($\gamma_{ух} = 1{,}185$ *кг/м³*), средняя температура

воздуха по высоте помещения $t_{вн} = 21°$ С ($\gamma_{вн} = 1{,}201$ *кг/м³*). В районе ворот рабочих мест нет.

Расчетная температура наружного воздуха $t_н = -20°$ С ($\gamma_н = 1{,}396$ *кг/м³*).

Кромки стен проема раздвижных ворот скруглены ($\mu_0 = 0{,}8$).

Перед завесой нет тамбура.

Р е ш е н и е.

1. Принимается к устройству нижняя групповая завеса с установкой одного вентилятора на трое ворот и с забором воздуха из верхней зоны помещения $t_з = t_{ух} = 25°$ С.

Угол выхода струи завесы к плоскости ворот $\alpha = 30°$.

2. Согласно санитарно-гигиеническим требованиям (см. § 5) температура воздуха в районе ворот должна быть равна $t_{см} = 5°$ ($\gamma_{см} = 1{,}27$ *кг/м³*).

В соответствии с этим $t_з - t_н = 25 + 20 = 45°$; $t_{см} - t_н = 5 + 20 = 25°$; $\theta = \frac{25}{45} = 0{,}56$.

3. Для даных $t_з - t_н$ и $t_{см} - t_н$ по графикам (рис. 28) находим минимальные значения q_{min} при разных $\bar{F}_щ$. При $\bar{F}_щ = {}^1/_{30}$ $q_{min} = 0{,}67$; при $\bar{F}_щ = {}^1/_{20}$ $q_{min} = 0{,}59$; при $\bar{F}_щ = {}^1/_{15}$ $q_{min} = 0{,}58$ и при $\bar{F}_щ = {}^1/_{10}$ $q_{min} = 0{,}56$.

4. По табл. 2 приложения 1 находим коэффициенты расхода воздуха через ворота при действии завесы для всех четырех значений $\bar{F}_щ$:

$$\bar{F}_щ = \frac{1}{30},\ q = 0{,}67,\ \mu = 0{,}255,\ q\mu = 0{,}154;$$

$$\bar{F}_щ = \frac{1}{20},\ q = 0{,}58,\ \mu = 0{,}300,\ q\mu = 0{,}174;$$

$$\bar{F}_щ = \frac{1}{15},\ q = 0{,}57,\ \mu = 0{,}340,\ q\mu = 0{,}194;$$

$$\bar{F}_щ = \frac{1}{10},\ q = 0{,}56,\ \mu = 0{,}394,\ q\mu = 0{,}221.$$

5. Для расчета выбираем вариант $\bar{F}_щ = {}^1/_{20}$, $q = 0{,}58$, $\mu = 0{,}300$. При этом расход воздуха будет лишь на 10% больше минимального. Второй вариант в данном случае предпочтительнее первого ($\bar{F}_щ = {}^1/_{30}$, $q = 0{,}67$), так как во втором варианте $q < 0{,}6$, и поэтому расход воздуха будет меньше зависеть от количества открытых ворот.

8. Определяем площадь живого сечения вытяжных отверстий:

$$(\mu F)_{выт} = 0{,}42 \cdot 12 = 5{,}0 \text{ м}^2,$$

где 0,42 — коэффициент расхода для П-образного фонаря при угле открытия створок 70° (см. табл. 5).

7. Находим высоту расположения нейтральной зоны по формуле (50′)

$$h_{н.\,з} = \frac{h}{(1{,}052Б)^2 + 1} = \frac{12}{(1{,}052Б)^2 + 1}\ м,$$

величина $Б$ в данном случае будет равна (при заборе воздуха для завесы из помещения)

$$Б = \frac{n\mu F_в (1 - q)}{(\mu F)_{вып}} = \frac{n \cdot 0{,}3 \cdot 12\,(1 - 0{,}58)}{5{,}0}.$$

Подставляя значение n от 1 до 3, получим значение высоты нейтральной зоны. Результаты расчета сведены в табл. 15.

Таблица 15

Число открытых ворот	Забор воздуха для завесы из помещения				Забор для завесы наружного воздуха			
	$Б$	$h_{н.\,з}$	$\Sigma G_{пр}$	$\Sigma G_з$	$Б$	$h_{н.\,з}$	$\Sigma G_{пр}$	$\Sigma G_з$
		в $м$	в $кг/сек$	в $кг/сек$		в $м$	в $кг/сек$	в $кг/сек$
1	0,303	10,88	26,2	15,2	0,720	7,62	21,9	12,7
2	0,606	8,53	46,4	26,94	1,440	3,66	30,4	17,64
3	0,909	6,25	59,4	35,5	2,160	1,95	33,3	19,32

В табл. 15 приведены результаты расчета по определению суммарного количества воздуха, проходящего через ворота, по формуле

$$\Sigma G_{пр} = n\mu F_в \sqrt{2gh_{н.з}\Delta\gamma\gamma_{см}} =$$

$$= n \cdot 0{,}3 \cdot 12 \cdot \sqrt{19{,}62\,h_{н.з}(1{,}396 - 1{,}201) \cdot 1{,}27}$$

и необходимого количества воздуха на завесы открытых ворот $\Sigma G_з$.

Из табл. 15 видно, что при заборе воздуха для завесы из помещения при трех открытых воротах требуется не в 3 раза больше воздуха, а только несколько больше чем в 2 раза по сравнению со случаем, когда открыты одни ворота. Отсюда ясно, что установка одного вентилятора на трое ворот позволяет снизить установленную мощность вентиляторов и электродвигателей.

Так, например, в случае забора воздуха для завесы снаружи при трех открытых воротах необходим расход воздуха только в 1,3 раза больше, чем на одни ворота.

Необходимо подчеркнуть, что если принять q близким к 1, то высота нейтральной зоны при любом числе открытых ворот будет близка к h и необходимый расход воздуха на завесы ока-

жется пропорциональным числу открытых ворот. В этом нетрудно убедиться, если произвести аналогичные расчеты.

Если стоимость тепловой энергии сравнительно небольшая, то целесообразно забирать воздух для завесы снаружи, подогревая его до температуры $t_з = 25°$ С. Высота расположения нейтральной зоны будет определяться при этом по формуле (50′), но величина $Б$ в этой формуле будет равна

$$Б = \frac{n\mu F_в}{(\mu F)_{вып}} = \frac{n \cdot 0{,}3 \cdot 12}{5{,}0}$$

(расчеты для этого случая см. в табл. 15).

Пример 4. Рассчитать воздушную завесу для ворот производственного здания машиностроительного завода. Здание с малыми избытками тепла, фонаря нет (см. рис. 33); размер ворот 4×3 $м$; расчетная температура наружного воздуха $t_н = -25°$ С ($\gamma_н = 1{,}42$ $кг/м^3$); температура воздуха в рабочей зоне $t_{р.з} = 16°$ С; температура воздуха в верхней части помещения $t_{ух} = 21°$ С ($\gamma_{ух} = 1{,}2$ $кг/м^3$); средняя температура по высоте помещения $t_{вн} = 18°$ С ($\gamma_{вн} = 1{,}213$ $кг/м^3$); объемы приточной и вытяжной механической вентиляции соответствуют друг другу.

В районе ворот имеются рабочие места, на которых производится легкая физическая работа; перед воротами тамбура нет ($\mu_0 = 0{,}8$). Все остальные условия такие же, как в примере 1.

Решение.

1. В данном случае следует ожидать, что нейтральная зона будет в пределах ворот ($h'_{н.\,з} < H_в$).

2. В соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями (см. § 5), так же как и в примере 1, принимаем температуру смеси $t_{см} = 14°$ С.

3. Определяем P_1 по формуле (97′):

$$P_1 = \frac{\left(\frac{1}{Z_н} + 0{,}187\right)}{1{,}25 n_{сут} n_ц S_т \cdot 10^{-4}} = \frac{\left(\frac{1}{4} + 0{,}187\right)}{1{,}25 \cdot 178 \cdot 1{,}5 \cdot 2{,}4 \cdot 1{,}15 \cdot 10^{-4}} = 4{,}7.$$

4. Для $\Delta t_{расч} = 43°$ С и $P_1 = 4{,}7$ по табл. 12 находим оптимальное значение $\bar{F}_щ = 1/30$. Принимается к установке двусторонняя боковая завеса с углом $\alpha = 30°$. Устанавливаются типовые стояки, оборудованные индивидуальными центробежными вентиляторами; ширина воздуховыпускной щели $b = 0{,}075$ $м$;

$$F_щ = \frac{2b}{B} = \frac{2 \cdot 0{,}075}{4} = \frac{1}{27}.$$

5. Определим P_2:

$$P_2 = \frac{\Sigma\zeta H_в S_з}{S_т} = \frac{4{,}4 \cdot 3 \cdot 0{,}69}{2{,}4 \cdot 1{,}15} = 3{,}3.$$

6. По табл. 11 находим для $\bar{F}_{щ} = {}^1/_{27}$ и $P_2 = 3{,}3$ оптимальное значение $q_{опт} = 0{,}7$.

7. Находим по табл. 2 приложения 1 для данных $\mu_0 = 0{,}8$, $\bar{F}_{щ} = {}^1/_{27}$, $q = 0{,}7$, $\mu = 0{,}27$.

8. Определяем высоту расположения нейтральной зоны по формуле (62′):

$$h'_{н.\,з} = \frac{H_в}{1 + 1{,}42E^{2/3}} = \frac{3}{1 + 1{,}42 \cdot 0{,}081^{2/3}} = 2{,}36 \text{ м},$$

где

$$E = (1 - q)\,\mu = (1 - 0{,}7) \cdot 0{,}27 = 0{,}081;$$

$h'_{н.в} = 2{,}36 < H_в = 3$ м, наше предположение (см. пункт 1) подтверждается (расчет произведен по формулам, соответствующим данному случаю).

9. По формуле (63) находим количество воздуха, проходящего через нижнюю часть ворот при действии завесы:

$$G_{нижн} = 11\,850\, B\mu_{нижн} \left(h'_{н.\,з}\right)^{3/2} (\Delta\gamma)^{1/2} =$$

$$= 11\,850 \cdot 4 \cdot 0{,}27 \cdot 2{,}36^{3/2} \cdot (1{,}42 - 1{,}205)^{1/2} = 21\,500 \text{ кг/ч};$$

этот же результат можно получить по данным $H_в = 3$ м; $E = 0{,}081$, $\Delta\gamma = 0{,}215$ кг/м³ и $B\mu_{нижн} = 1{,}08$ по номограмме II (см. пунктирную линию на рис. 34).

10. Необходимый расход воздуха на завесу составляет

$$G_з = qG_{нижн} = 0{,}7 \cdot 21\,500 = 15\,000 \text{ кг/ч}$$

или

$$\frac{15\,000}{\gamma_з} = \frac{15\,000}{1{,}12} = 13\,400 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Принимается к установке завеса по типовым чертежам (тип Т-3-48) с вентиляционными агрегатами, расположенными на площадке под воротами.

11. Необходимая температура воздуха, подаваемого в завесу при $\bar{F}_{щ} = {}^1/_{27}$ и $q = 0{,}7$, согласно графику (рис. 27, *а*)

$$\frac{Q'}{Q_з} = 0{,}17;\ t_з = t_н + \frac{t_{см} - t_н}{q\left(1 - \frac{Q'}{Q_з}\right)} = -25 + \frac{14 + 25}{0{,}7\,(1 - 0{,}17)} = 42^\circ\text{C}.$$

Подбор вентиляционного оборудования аналогичен подбору, приведенному в примерах 1 и 3. Воздуховыпускные щели следует делать только до уровня 2,3 м от пола; выше этого уровня щели следует заглушать.

12. Расход тепла на нагрев воздуха, подаваемого в завесу, составляет

$$Q_з = G_з \cdot 0{,}24\,(t_з - t_{вн}) = 15\,000 \cdot 0{,}24\,(42 - 18) = 86\,000 \text{ ккал/ч};$$

так как забор воздуха производится над воротами, то (см. § 6) $t_{нач} = t_{вн} = 18^\circ$ С.

13. Дополнительный расход тепла на систему отопления

$$Q_{доп} = G_{пр} \cdot 0{,}24\,(t_{р.\,з} - t_{см}) = 21\,500 \cdot 0{,}24\,(16 - 14) = 10\,000 \text{ ккал/ч}$$

Пример 5. Рассчитать боковую двустороннюю завесу для условий, аналогичных рассмотренным в примере 4, но при наличии на перекрытиях двух сравнительно небольших шахт размером 0,41 × 0,41 м (см. рис. 36 и пример 4). Дано: $B = 4$ м; $H_в = 3$ м; $t_н = -25^\circ$ С; $t_{р.\,з} = 16^\circ$ С; $t_{ух} = 21^\circ$ С; $G^{мех}_{прит} = G^{мех}_{выт}$; забор воздуха для завесы производится из верхней зоны помещения. Высота шахты $h_ш = 6$ м; в соответствии с расчетами (см. пример 4) принимаем $q = 0{,}7$; $\frac{F_щ}{F_в} = \frac{1}{27}$; $\alpha = 30^\circ$; $\mu = 0{,}27$.

Решение. Пользуясь данными [30], определяем коэффициент местного сопротивления вытяжной шахты ($\zeta_ш$), слагаемый из сопротивления входа воздуха в шахту $\zeta_{вх} = 0{,}5$; сопротивления, которое при

$$Re = \frac{1{,}0 \cdot 0{,}41}{15 \cdot 10^{-6}} = 2{,}7 \cdot 10^4 \quad \text{будет}$$

$$\zeta_{тр} = \frac{\lambda l}{d_{экв}} = \frac{0{,}025 \cdot 30}{0{,}41} = 0{,}2;$$

сопротивления выхода из шахты с зонтом (при отношении высоты расположения зонта к размеру шахты 0,4) $\zeta_{вых} = 1{,}3$;

$$\zeta_ш = \zeta_{вх} + \zeta_{тр} + \zeta_{вых} = 0{,}5 + 0{,}2 + 1{,}3 = 2{,}0.$$

Затем определяем

$$\bar{F}_ш = \frac{F_ш}{\sqrt{\zeta_ш} F_в} = \frac{2 \cdot 0{,}17}{\sqrt{2} \cdot 12} = 0{,}02;$$

$$\bar{h}_ш = \frac{h_ш}{H_в} = \frac{6}{3} = 2;$$

$$Л = \frac{(1 - q)\,\mu_{нижн}}{\bar{F}_ш} = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}27}{0{,}02} = 4{,}05.$$

Высоту расположения нейтральной зоны определяем с помощью номограммы III (см. рис. 36). Перенесем на кальку первый квадрант номограммы, где имеется семейство кривых A_1. В данном случае из всего этого семейства кривых скопируем только кривую с $\bar{F}_ш = 0{,}02$. Сместим оси координат перенесенного на кальку первого квадранта влево на величину $Л = 4{,}05$ (см. рис. 55); наложив таким образом первый квадрант

номограммы на второй, находим точку, которая лежит на пересечении кривой $\bar{F}_ш = 0{,}02$ (на кальке) с кривой $\bar{h}_ш = 2$ (на основной номограмме). Ордината этой точки будет $\bar{h}_{н.з} = 0{,}84$.

Тогда

$$h'_{н.з} = 0{,}84 \cdot 3 = 2{,}52 \text{ м}.$$

Таким образом, наличие шахт несколько повысило нейтральную зону — с 2,36 м (пример 4) до 2,52 м. Однако нейтральная зона осталась в пределах ворот, поэтому для данного расчета

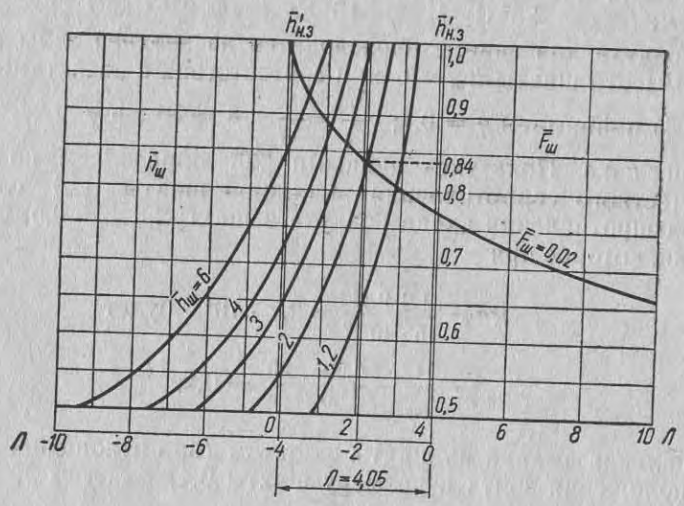


Рис. 55. Схема расчета по номограмме III к примеру 5

правильно применять номограмму III и нельзя применять номограмму I, предназначенную для случая, когда вследствие большой площади открытых шахт или створок в фонарях нейтральная зона находится выше ворот.

На номограмме II (см. рис. 34) отложим на оси ординат $h'_{н.з} = 2{,}52$ м.

Зная $B\mu_{нижн} = 4 \cdot 0{,}27 = 1{,}08$ м

и $$\Delta\gamma = 1{,}420 - 1{,}205 = 0{,}215 \text{ кг/м}^3,$$

определяем количество воздуха, проходящего через нижнюю часть ворот, $G_{нижн} = 24\,000$ кг/ч. То же можно определить и по формуле (63′):

$$G_{нижн} = 11\,850 B\mu_{нижн} (h'_{н.з})^{3/2} \Delta\gamma^{1/2} = 11\,850 \cdot 4 \cdot 0{,}27 \cdot 2{,}52^{3/2} \times$$

$$\times 0{,}215^{1/2} = 23\,700 \text{ кг/ч}.$$

Количество воздуха, необходимого для завесы, составит

$$G_з = 0{,}7 \cdot 23\,700 = 16\,600 \text{ кг/ч}.$$

Следовательно, при наличии двух шахт расход воздуха на завесу увеличится на 11% по сравнению с тем, когда шахт нет.

Если бы на крыше были не две, а шесть шахт, то

$$\bar{F}_ш = \frac{6 \cdot 0{,}17}{\sqrt{2} \cdot 12} = 0{,}06;$$

$$Л = \frac{\mu_{нижн}(1-q)}{\bar{F}_ш} = \frac{0{,}27 \cdot 0{,}3}{0{,}06} = 1{,}35.$$

Сдвинув кальку на величину $Л = 1{,}35$, отмечаем, что кривая $\bar{F}_ш = 0{,}06$ на кальке не пересекается с кривой $\bar{h}_ш = 2$ в пределах номограммы. Это указывает на то, что нейтральная зона лежит выше ворот и в данном случае надо пользоваться для расчета не номограммой III, а номограммой I. Таким образом, чем больше площадь открытых шахт, тем на меньшую величину $Л$ необходимо передвигать влево кальку с кривыми первого квадранта и меньше возможных случаев пересечения кривых с параметрами $\bar{F}_ш$ и $\bar{h}_ш$. Поэтому при заборе воздуха для завесы из помещения уже при несколько повышенной площади вытяжных шахт следует пользоваться номограммой I.

При заборе воздуха для завесы снаружи или над воротами диапазон применения номограммы III расширяется. В этом случае при довольно значительной площади вытяжных шахт нейтральная зона остается в пределах высоты ворот. Рассмотрим пример.

Пример 6. Рассчитать боковую двустороннюю воздушную завесу при условиях, аналогичных условиям примера 5, но при шести шахтах и заборе воздуха для завесы снаружи.

Р е ш е н и е. При шести шахтах

$$\bar{F}_ш = \frac{6 \cdot 0{,}17}{\sqrt{2} \cdot 12} = 0{,}06;$$

при заборе воздуха для завесы снаружи имеем

$$Л = \frac{\mu_{нижн}}{\bar{F}_ш} = \frac{0{,}27}{0{,}06} = 4{,}5.$$

Сдвигая начерченный на кальке первый квадрант номограммы III влево на величину $Л = 4{,}5$, найдем на пересечении кривых $\bar{F}_ш = 0{,}06$ и $\bar{h}_ш = 2$ точку с ординатой $\bar{h}'_{н.з} = 0{,}74$, откуда

$$h'_{н.з} = 0{,}74 \cdot 3 = 2{,}22 \text{ м}.$$

Количество воздуха, проходящего через нижнюю часть ворот, будет

$$G_{нижн} = 11\,850 B \mu_{нижн} (h'_{н.\,з})^{3/2} \Delta\gamma^{1/2} = 11\,850 \cdot 4 \cdot 0{,}27 \cdot 2{,}22^{3/2} \cdot 0{,}215^{1/2} =$$
$$= 19\,500 \ кг/ч.$$

Необходимый расход воздуха на завесу

$$G_з = 0{,}7 \cdot 19\,500 = 13\,650 \ кг/ч.$$

Если бы шахт не было, то в соответствии с номограммой II при заборе воздуха для завесы снаружи $E = \mu_{нижн} = 0{,}27$ высота расположения нейтральной зоны была бы равна $h'_{н.з} = 1{,}9$ *м* и количество воздуха, проходящего через ворота, составляло бы 15 500 *кг/ч*. Таким образом, при наличии шахт количество воздуха, проходящего через ворота, увеличилось на 26% и на столько же увеличился необходимый расход воздуха на завесу.

Пример 7. Рассчитать воздушную завесу у ворот размером 4×3 *м* в трехэтажном здании машиностроительного завода. Первый этаж соединяется с третьим лестничной клеткой (см. рис. 37) с проемом размером $3{,}0 \times 3{,}0$ *м*. Установлено (см. гл. VII), что живая площадь вытяжных отверстий в окнах и фонарях третьего этажа $(\mu F)_{выт} = 11{,}2$ *м*^{2}, а живая площадь приточных отверстий в первом этаже $(\mu F)_{прит} = 5{,}43$ *м*^{2}. Расстояние между серединой вытяжных отверстий и серединой ворот $h = 14$ *м*.

Температура наружного воздуха $t_н = -25°$ С ($\gamma_н = 1{,}42$ *кг/м*^{3}); средняя температура воздуха в помещении $t_{вн} = 20°$ С ($\gamma_{вн} = 1{,}205$ *кг/м*^{3}); кромки стен проема ворот скруглены ($\mu_0 = 0{,}8$); в районе ворот имеются рабочие места, защищенные от потоков воздуха, идущего от ворот. Все остальные условия аналогичны указанным в примере 1.

Решение.

1. Как и в примере 1, принимаем двустороннюю воздушную завесу с углом $\alpha = 30°$ и индивидуальным вентилятором на каждый стояк, ширина воздуховыпускных щелей 0,075 *м*; $\bar{F}_щ = 1/27$.

2. P_2 будет равен:

$$P_2 = \frac{4{,}4 \cdot 14 \cdot 0{,}69}{2{,}4 \cdot 1{,}15} = 15{,}4.$$

3. По табл. 11 находим оптимальное значение $q_{опт}$; при $\bar{F}_щ = 1/27$; $P_2 = 15{,}4$ и $\Delta t_{расч} = 43°$ $q_{опт} = 0{,}56$.

4. Коэффициент расхода воздуха при $\bar{F}_щ = 1/27$; $q = 0{,}56$; $\alpha = 30°$; $\mu_0 = 0{,}8$ находим по номограмме (см. рис. 17), а по вспомогательной номограмме (см. рис. 18) определяем значение $\sqrt{D} = 3{,}8$, и по номограмме (см. рис. 17) для $q\sqrt{D} = 0{,}56 \cdot 3{,}8 = 2{,}12$ и $\mu_0 = 0{,}8$ находим $\mu = 0{,}31$. Значение μ можно получить также путем интерполяции по табл. 2 приложения 1.

5. Определяем по формуле (69) площадь эквивалентного отверстия, соответствующего системе вытяжных отверстий:

$$\frac{1}{F^2_{эк_{выт}}} = \frac{1}{(\mu F)^2_{выт}} + \frac{1}{(\mu F)^2_{диаф_1}} + \frac{1}{(\mu F)^2_{диаф_2}} =$$
$$= \frac{1}{11{,}2^2} + \frac{1}{(9 \cdot 0{,}64)^2} + \frac{1}{(9 \cdot 0{,}64)^2} = 0{,}0684 \ \frac{1}{м^4},$$

откуда $F_{эк_{выт}} = 3{,}84$ *м*^{2}.

Таким образом, имеющиеся на пути движения воздуха (в помещении) преграды с отверстиями (диафрагмы) снижают площадь вытяжных отверстий с 11,2 до 3,84 *м*^{2}.

6. По формуле (50′) находим высоту расположения нейтральной зоны

$$h_{н.\,з} = \frac{h}{(1{,}052Б)^2 + 1} = \frac{14}{(1{,}052 \cdot 1{,}84)^2 + 1} = 2{,}95 \ м,$$

где

$$Б = \frac{\mu F_в (1 - q) + (\mu F)_{прит}}{(\mu F)_{эк_{выт}}} = \frac{0{,}31 \cdot 12\,(1 - 0{,}56) + 5{,}43}{3{,}84} = 1{,}84.$$

Нейтральная зона проходит выше ворот, так как $h_{н.\,з} > \frac{H_в}{2} =$ $= 1{,}5$ *м*.

7. Количество воздуха, проходящего через ворота, составит

$$G_{пр} = 3600 \mu F_в \sqrt{2 g h_{н.\,з} \Delta\gamma\gamma_{см}} =$$
$$= 3600 \cdot 0{,}31 \cdot 12 \sqrt{19{,}62 \cdot 2{,}95 \cdot 0{,}215 \cdot 1{,}23} = 53\,800 \ кг/ч.$$

8. Необходимый расход воздуха на завесу

$$G_з = 0{,}56 \cdot 53\,800 = 30\,100 \ кг/ч.$$

Весь дальнейший ход расчета такой же, как и в предыдущих примерах.

Пример 8. Рассчитать воздушную завесу у входа в многоэтажное здание приборостроительного завода. Высота здания от пола первого этажа $H_{зд} = 20$ *м*. Размер входных дверей $0{,}8 \times$ $\times 2{,}25$ *м* ($F_{дв} = 1{,}8$ *м*^{2}), у входных дверей сделан тамбур с двойными дверями и зигзагообразным проходом. Воздух забирается из помещения и подается в тамбур, расположенный между первой и второй дверями. Через двери проходит до 1000 *чел/ч*.

Расчетная температура наружного воздуха $t_н = -25°$ С ($\gamma_н = 1{,}429$ *кг/м*^{3}). Средняя температура внутри помещения $t_{вн} = 20°$ С ($\gamma_{вн} = 1{,}205$ *кг/м*^{3}).

Решение.

1. Определяем высоту расположения нейтральной зоны, пользуясь данными табл. 6,

$$h'_{н.\,з} = 0{,}44 \cdot H_{зд} = 0{,}44 \cdot 20 = 8{,}8 \ м.$$

2. По табл. 6 находим коэффициент расхода для двойных дверей с зигзагообразным проходом $\mu_{вх} = 0{,}6$.

3. По формуле (70) определяем количество воздуха, проходящего через двери, когда они открыты:

$$G_{пр} = 3600 k_1 \mu F_{дв} \sqrt{2g\left(h'_{н.з} - \frac{H_{дв}}{2}\right)\Delta\gamma\gamma_{см}} = 3600 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}6 \cdot 1{,}8 \times$$

$$\times \sqrt{19{,}62\left(8{,}8 - \frac{2{,}25}{2}\right)(1{,}429 - 1{,}205) \cdot 1{,}2} = 22\,300 \ кг/ч,$$

где $k_1 = 0{,}9$ (согласно табл. 7).

4. Необходимое количество воздуха, подаваемого завесой, получаем по формуле (71) с учетом коэффициента k_2 (табл. 8):

$$G_з = k_2 G_{пр} \frac{t_{вн} - t_н}{t_з - t_н} = 0{,}45 \cdot 22\,300 \frac{20 + 25}{50 + 25} = 6050 \ кг/ч.$$

5. Необходимый расход тепла на подогрев воздуха, подаваемого в завесу, равняется:

$$Q = G_з \cdot 0{,}24 (t_з - t_{вн}) = 6050 \cdot 0{,}24 (50 - 20) = 43\,500 \ ккал/ч.$$

§ 15. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС ПРИ ДИСБАЛАНСЕ РАСХОДОВ ВОЗДУХА МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Пример 9. Для ворот 4×3 *м* рассчитать воздушную завесу в случае, если в здании вытяжка превалирует над притоком; дисбаланс $\Delta G = 25\,000$ *кг/ч*.

Все остальные условия такие же, как и в примере 1.

Решение.

1. Принимаем так же, как в примере 1, $h = 5$ *м*; $(\mu F)_{прит} = 2{,}0$ *м*^{2}; $(\mu F)_{выт} = 2{,}8$ *м*^{2}; $\Delta\gamma = \gamma_н - \gamma_{вн} = 0{,}215$ *кг/м*^{3}; $\bar{F}_щ = {}^1/_{27}$; $q_{опт} = 0{,}6$; $\mu = 0{,}3$; $Б = 1{,}23$; определяем высоту нейтральной зоны.

Для этого дополнительно находим величину $Ф$:

$$Ф = 5{,}72 \cdot 10^{-5} \frac{\Delta G}{(\mu F)_{выт}\sqrt{\Delta\gamma}} = 5{,}72 \cdot 10^{-5} \frac{25\,000}{2{,}8\sqrt{0{,}215}} = 1{,}1;$$

передвинем кальку с кривыми h вправо так, чтобы начало координат на ней совпало с точкой $Ф = 1{,}1$. На пересечении кривой с $h = 5$ *м* на кальке с кривой $Б = 1{,}23$ на основной номограмме находим точку, ордината которой $h_{н.з} = 3{,}2$ *м*. Если на кальку заранее не был скопирован второй квадрант номограммы с кривыми h, для данного расчета можно скопировать оси координат этого квадранта и одну кривую $h = 5$ *м*. Сдвинув кальку вправо, вдоль оси абсцисс, на величину $Ф = 1{,}1$ найдем точку пересечения кривых $h = 5$ *м* и $Б = 1{,}23$.

Высоту нейтральной зоны можно определить и с помощью номограммы V (см. рис. 39), для этого

$$\frac{2.104 Б Ф}{(1{,}052Б)^2 + 1} = \frac{2{,}104 \cdot 1{,}23 \cdot 1{,}1}{(1{,}052 \cdot 1{,}23)^2 + 1} = 1{,}07;$$

$$\frac{h - Ф^2}{(1{,}052Б)^2 + 1} = \frac{5 - 1{,}1^2}{(1{,}052 \cdot 1{,}23)^2 + 1} = 1{,}42.$$

Отложив на вертикальных шкалах эти величины и соединив прямой эти точки (см. пунктирную прямую на номограмме V), находим $\sqrt{h_{н.з}} = 1{,}8$ *м*$^{1/2}$, откуда $h_{н.з} = 1{,}8^2 = 3{,}24$ *м*.

2. По данным $\Delta\gamma = 0{,}215$ *кг/м*^{3} и $\mu F_в = 0{,}3 \cdot 12 = 3{,}6$ *м*^{2} отложим на вертикальной оси второго квадранта номограммы I $h_{н.з} = 3{,}2$ *м*, найдем количество воздуха, проходящего через ворота при действии завесы, $G_{пр} = 53\,500$ *кг/ч*.

3. Необходимый расход воздуха на завесу

$$G_з = qG_{пр} = 0{,}6 \cdot 53\,500 = 32\,100 \ кг/ч.$$

Таким образом, дисбаланс увеличил количество необходимого воздуха на завесу на 32%.

4. Необходимый расход тепла на завесу

$$Q_з = G_з \cdot 0{,}24 (t_з - t_{нач}) = 32\,100 \cdot 0{,}24 (47{,}5 - 14) = 251\,000 \ ккал/ч,$$

где (как и в примере 1) $t_з = 47{,}5°$ С и $t_{нач} = t_{см} = 14°$ С.

Пример 10. В § 10 указывалось, что в случае дисбаланса ($\Delta G > 0$) значение $q_{опт}$ следует принимать несколько меньшим, чем при $\Delta G = 0$. В соответствии с этим примем $q_{опт} = 0{,}5$ и произведем расчет воздушной завесы, как это делалось в примере 9.

Решение.

1. Найдем коэффициент расхода воздуха при действии завесы. Если $\bar{F}_щ = {}^1/_{27}$; $\alpha = 30^c$ и $q = 0{,}5$, то по табл. 2 приложения 1 $\mu = 0{,}33$.

2. Определим $Б = \frac{0{,}33 \cdot 12 \cdot (1 - 0{,}5) + 2{,}0}{2{,}8} = 1{,}42$; $\frac{\Delta G}{(\mu F)_{выт}} = 8950$ *кг/м*^{2}*ч* и $Ф = 1{,}1$ (такие же, как и в примере 9).

3. Находим

$$\frac{2 \cdot 104 Б Ф}{(1{,}052Б)^2 + 1} = \frac{2{,}104}{(1{,}052 \cdot 1{,}42)^2 + 1} = 0{,}65;$$

$$\frac{h - Ф^2}{(1{,}052Б)^2 + 1} = \frac{5 - 1{,}12}{(1{,}052 \cdot 1{,}42)^2 + 1} \doteq 1{,}18.$$

По номограмме V определяем $\sqrt{h_{н.з}} = 1{,}65$ *м*$^{1/2}$, откуда $h_{н.з} = 2{,}7$ *м*.

4. Количество воздуха, проходящего через ворота при действии завесы,

$$G_{пр} = 3600 \cdot 0{,}33 \cdot 12\sqrt{19{,}62 \cdot 2{,}7 \cdot 0{,}215 \cdot 1{,}23} = 53\,500 \ кг/ч.$$

5. Необходимый расход воздуха на завесу

$$G_з = 0{,}5 \cdot 53\,500 = 26\,750 \text{ кг/ч}.$$

6. Необходимая температура воздуха, подаваемого в завесу,

$$t_з = -25 + \frac{14 + 25}{0{,}5\,(1 - 0{,}05)} = 57^\circ \text{ С}.$$

7. Расход тепла на подогрев воздуха, подаваемого в завесу, будет равен:

$$Q_з = G_з \cdot 0{,}24\,(t_з - t_{нач}) = 26\,750 \cdot 0{,}24\,(57 - 14) = 276\,000 \text{ ккал/ч}.$$

Сравнивая решение этого примера с решением примера 9, можно сказать, что более экономичной будет завеса с $q_{опт} = 0{,}5$ (пример 10), так как в этом случае расход воздуха на завесу уменьшается на 20%, а расход тепла увеличивается только на 10%.

Пример 11. Рассчитать воздушную завесу (условия такие же, как в примере 4), но при дисбалансе расходов воздуха механической вентиляции $\Delta G = 5200$ *кг/ч*.

Решение.

1. Расчет ведем по номограмме VI (см. рис. 40). Дополнительно к уже полученным величинам (см. пример 4) находим

$$\Phi = 1{,}432 \cdot 10^{-4} \frac{\Delta G}{B\sqrt{\Delta\gamma}} = 1{,}432 \cdot 10^{-4} \frac{5200}{4{,}0\sqrt{0{,}215}} = 0{,}4.$$

2. На номограмме, передвинув кальку с кривой $H_в = 3{,}0$ *м* вдоль оси абсцисс вправо на величину $\Phi = 0{,}4$, находим точку пересечения с кривой $E = 0{,}081$ (см. пример 4) и определяем $h'_{н.з} = 2{,}63$ *м* (меньше $H_в = 3$ *м*).

3. По формуле (63′) находим количество воздуха, проходящего через нижнюю часть ворот:

$$G_{нижн} = 11\,850 B \mu_{нижн} \left(h'_{н.з}\right)^{3/2} \Delta\gamma^{1/2} =$$

$$= 11\,850 \cdot 4 \cdot 0{,}27 \cdot 2{,}63^{3/2} \cdot 0{,}215^{1{,}2} = 25\,300 \text{ кг/ч}.$$

4. Необходимый расход воздуха на завесу равняется

$$G_з = 0{,}7 \cdot 25\,300 = 17\,700 \text{ кг/ч}.$$

Таким образом, дисбаланс увеличил необходимый расход воздуха на завесу на 18%.

Пример 12. Рассчитать воздушную завесу по условиям примера 4, но при большом превышении вытяжки над притоком механической вентиляции $\Delta G = 25\,000$ *кг/ч*. В здании имеются окна с двойными деревянными рамами, длина притворов 165 *м*.

Решение.

1. Попробуем сначала решить задачу с помощью номограммы VI. Определим, так же как и в примере 11, величину Φ:

$$\Phi = 1{,}432 \cdot 10^{-4} \frac{25\,000}{4{,}0\sqrt{0{,}215}} = 1{,}93.$$

2. Принимаем такую же завесу, как и в примере 4: $\bar{F}_{щ} = {}^1/_{27}$; $q = 0{,}7$; $\mu = 0{,}27$; $E = (1 - q)\mu = 0{,}081$; $\Delta\gamma = 0{,}215$ *кг/м*³.

3. Передвигая кальку с кривой $H_в = 3{,}0$ *м* вдоль оси абсцисс в данном случае на величину $\Phi = 1{,}93$, убеждаемся в том, что кривая $H_в = 3{,}0$ *м* (на кальке) не пересекается с кривой $E = 0{,}081$ на основной номограмме. Это говорит о том, что нейтральная зона лежит выше ворот и расчет надо производить по номограмме VII.

4. Проведем расчет по номограмме VII (см. рис. 41).

При расчетах по номограммам III и VI, когда $h'_{н.з} < H_в$, не учитывается площадь отверстий в окнах, так как нейтральная зона в этих случаях находится примерно в средине окон, и количество воздуха, поступающего через щели в нижней части окон, примерно соответствует количеству воздуха, выходящего через щели в верхней части окон. Поэтому наличие щелей в приточных окнах почти не влияет на воздушный баланс помещения.

В случае же, когда нейтральная зона находится выше ворот и, следовательно, выше окон, через ворота и окна будет только приток воздуха; поэтому при расчете следует обязательно учитывать их площадь.

5. Определим площадь щелей в приточных окнах, пользуясь данными табл. 4: $(\mu F)_{прит} = 165 \cdot 0{,}002 = 0{,}33$ *м*².

6. Определяем

$$\frac{(\mu F)_{прит}}{\mu F_в} = \frac{0{,}33}{0{,}27 \cdot 12} = 0{,}1;$$

$$\mu F_в + (\mu F)_{прит} = 0{,}27 \cdot 12 + 0{,}33 = 3{,}57 \text{ м}^2.$$

7. По номограмме VII (см. пунктирную линию) находим количество воздуха, проходящего через ворота при действии завесы:

$$G_{пр} = 62\,000 \text{ кг/ч}.$$

8. Необходимый расход воздуха на завесу составит

$$G_з = 0{,}7 \cdot 62\,000 = 43\,400 \text{ кг/ч}.$$

Из примера видно, какой большой расход воздуха требуется на завесу из-за малой площади приточных отверстий.

Если увеличить площадь приточных отверстий, дополнительно открыв окна на высоте 4—6 *м* в местах, где расположено оборудование, выделяющее тепло, и нет рабочих мест, то можно расход воздуха на завесу значительно снизить.

Пример 13. Рассчитать воздушную завесу, если условия расчета такие же, как в примерах 4 и 12, но «живая» площадь щелей и открытых проемов для притока воздуха увеличена до $(\mu F)_{прит} = 1{,}0\ м^2$.

Решение.

1. Определяем

$$\frac{(\mu F)_{прит}}{\mu F_в} = \frac{1{,}0}{0{,}27 \cdot 12} = 0{,}309;$$

$$\mu F_в + (\mu F)_{прит} = 3{,}24 + 0{,}9 = 4{,}14\ м^2.$$

2. Для $\frac{(\mu F)_{прит}}{\mu F_в} = 0{,}309$; $q = 0{,}7$; $\Delta G = 25\,000\ кг/ч$, находим (см. номограмму VII на рис. 41 — пунктирная линия с точкой) количество воздуха, проходящего через ворота при действии завесы, $G_{пр} = 40\,000\ кг/ч$.

3. Необходимый расход воздуха на завесу

$$G_з = 0{,}7 \cdot 40\,000 = 28\,000\ кг/ч.$$

Таким образом, благодаря открытым дополнительным приточным окнам расход воздуха на завесу снизился более чем в 1,5 раза.

Для того чтобы убедиться, можно ли в данном примере пользоваться номограммой VII, проверим, было ли соблюдено неравенство $P_{ск} > H_в \Delta\gamma$. Делаем это для случая $G_{пр} = 40\,000\ кг/ч$. По номограмме (см. линию — пунктир с тремя точками) находим $P_{ск} = 0{,}73\ кг/м^2$, что больше теплового напора $H_в \Delta\gamma = 3 \cdot 0{,}215 = 0{,}645\ кг/м^2$.

В заключение рассмотрим наиболее сложный случай расчета воздушных завес.

Пример 14. В здании прокатного цеха надо запроектировать воздушную завесу у ворот размером $3{,}6 \times 4\ м$. Здание имеет фонарь, расположенный на высоте $h_ф = 14\ м$ от пола. Для удаления тепла и вредных газов, выделяющихся от оборудования, в фонаре в зимнее время открыты на 35° створки общей площадью $20\ м^2$. Общая площадь щелей в притворах створок фонаря, определенная опытным путем (методику определения см. в гл. VII), составляет $(\mu F) = 4\ м^2$. Общая площадь отверстий и щелей на уровне рабочей зоны определена в размере $(\mu F)_{прит_1} = 8\ м^2$. Из цеха механической вентиляцией удаляется воздух $120\,000\ м^3/ч$ при температуре 22° С и подается приточными установками $50\,000\ м^3/ч$ при температуре 16° С.

Здание стоит на открытом месте и обдувается ветром. Средняя скорость ветра $v_{вет} = 5{,}1\ м/сек$; скоростной напор $P_{вет} = 1{,}9\ кг/м^2$.

Величина аэродинамических коэффициентов при ветре, направленном перпендикулярно проему ворот, и по данным продувок в аэродинамической трубе для ворот $k_1 = +0{,}8$, для приточных окон на фасаде, где расположены ворота, $k_2 = 0{,}7$, для створок фонаря, открытых на заветренной стороне $k_ф = -0{,}3$.

Несмотря на значительные избытки тепла в цехе при низких наружных температурах, в рабочей зоне цеха на значительном расстоянии от ворот наблюдаются неблагоприятные метеорологические условия ($t_{р.з} < 0°$ С).

Средняя температура в рабочей зоне $t_{р.з} = 16°$ С. Температура воздуха у перекрытия $t_{ух} = 25°$ С ($\gamma_{ух} = 1{,}185\ кг/м^3$). Средняя температура по высоте помещения $t_{вн} = 21°$ ($\gamma_{вн} = 1{,}2\ кг/м^3$). Расчетная температура наружного воздуха $t_н = -26°$ С ($\gamma_н = 1{,}429\ кг/м^3$);

$$\Delta\gamma = \gamma_н - \gamma_{вн} = 1{,}429 - 1{,}20 = 0{,}229\ кг/м^3.$$

Для уменьшения воздействия ветра перед воротами сделан тамбур. Ворота в тамбуре установлены только одни, у внутреннего его проема. Входные кромки ворот несколько скруглены; $\zeta = 2{,}1$; $\mu_0 = 0{,}69$.

Вблизи ворот есть постоянные рабочие места. Необходимая температура $t_{см} = 5°$ С. Так как предварительные расчеты показали, что при указанных условиях (превышение вытяжки над притоком на $70\,000\ м^3/ч$ и действие ветра) через ворота проходит огромное количество воздуха и требуется очень большой расход воздуха на завесу (порядка $150\,000\ м^3/ч$), то для уменьшения этого количества воздуха было предложено дополнительно открыть приточные окна за печами на высоте $5\ м$.

Были открыты нижнеподвесные створки второго света общей площадью $35\ м^2$ на угол 30° С. Одно это мероприятие, проведенное до устройства воздушной завесы, позволило значительно (почти в 2 раза) уменьшить количество воздуха, проходящего через ворота. Приводимое ниже решение дано с учетом открытых дополнительных приточных окон.

Решение.

1. Определим площадь вытяжных и приточных отверстий, сообразуясь с табл. 4.

а) вытяжные отверстия в фонаре:

$$(\mu F)_{выт} = 20 \cdot 0{,}30 + 4 = 10\ м^2;$$

б) приточные отверстия, расположенные на высоте середины ворот:

$$(\mu F)_{прит_1} = 8\ м^2;$$

в) приточные отверстия, расположенные на высоте $5\ м$,

$$(\mu F)_{прит_2} = 35 \cdot 0{,}27 = 9{,}5\ м^2.$$

2. Устанавливается двусторонняя завеса с шириной щели $b = 100\ мм$ ($\bar{F}_щ = \frac{F_щ}{F_в} = \frac{2 \cdot 0{,}1}{3{,}6} = \frac{1}{18{,}0}$); угол между направле-