

В. М. ЭЛЬТЕРМАН

# ВОЗДУШНЫЕ ЗАВЕСЫ

*Издание 2-е, переработанное  
и дополненное*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»  
Москва 1966

В книге приведены конструкции, способ и примеры расчета воздушных завес у ворот промышленных зданий, встроенных в оборудование автоматических линий и расположенных в проемах наружных стен, а также описаны устройства для их автоматического регулирования.

В книге обобщен опыт заводов по устройству и эксплуатации наиболее эффективных завес, дана методика их испытания.

Книга рассчитана на инженеров и техников, занимающихся проектированием, монтажом, наладкой и эксплуатацией вентиляционных установок, а также работников по технике безопасности машиностроительных заводов.

Рецензент канд. техн. наук Г. Т. Татарчук

ХАРЬКОВСКАЯ ТИПООФЕТНАЯ ФАБРИКА

## ВВЕДЕНИЕ

Воздушные завесы нашли широкое применение как устройства, препятствующие проходу воздуха через открытые проемы, которые по технологическому процессу нельзя держать закрытыми. Благодаря этим устройствам через открываемые зимой ворота предотвращается прорыв холодного воздуха в производственные помещения. Воздушные завесы применяются также в проемах между двумя цехами, когда один из них отапливается, а другой не отапливается; в проемах наружных ограждений, через которые проходит производственное оборудование (транспортеры и т. п.).

Воздушные завесы дают возможность поддерживать зимой в производственных помещениях требуемые санитарными нормами метеорологические условия и при этом значительно сокращать расход тепла.

Воздушными завесами можно воспользоваться для предотвращения перемещения воздуха из одного помещения, в котором имеется концентрация вредных паров, газов или пыли (хотя бы в размерах, предельно допустимых по нормам), в другое, где выделения этих вредностей нет.

По-видимому, впервые воздушные завесы были применены именно для решения такой задачи.

По предложению Г. Ф. Проскуры [1] в угольных шахтах были устроены воздушные завесы для предотвращения распространения пыли, образующейся в скиповом отделении при загрузке угля в скип.

Воздушные завесы находят применение в машиностроении. Так, например, при устройстве автоматических линий бывает необходимо в отдельных камерах поддерживать температуру воздуха до 200° (в сушилках и т. п.). Сделать эти камеры герметичными нельзя, так как в них должны быть проемы для непрерывного поступления и выхода обрабатываемых заготовок деталей. Устройство воздушных завес у этих проемов обеспечивает поддержание в камерах высокой температуры воздуха и при этом предотвращает прорыв горячего воздуха, большей частью загрязненного вредными газами, из камеры в рабочее помещение.

Широкому распространению воздушных завес способствовали работы советских ученых и инженеров В. В. Батурина [2], [6],

И. А. Шепелева [2], [5], Г. Н. Абрамовича [3], [4], Г. Н. Уфимцева и Л. Б. Белотелова [7], С. Е. Бутакова [8], М. И. Фильней [9] и других.

Впервые метод расчета воздушных завес был предложен в 1936 г. В. В. Батуриным и И. А. Шепелевым [2]. Он основывался на геометрическом сложении векторов скоростей потока ветра, входящего в ворота, и векторов средних скоростей вдоль оси струи воздушной завесы. В результате было получено уравнение изогнутой оси струи воздушной завесы.

В дальнейшем И. А. Шепелев [5] предложил новый метод расчета. В этом методе для нахождения уравнения изогнутой оси струи воздушной завесы складывались функции тока струи завесы и сносящего потока ветра.

В 1950 г. В. В. Батуриным [6] в целях уточнения расчета воздушных завес были поставлены опыты на моделях и впервые получены достаточно полные экспериментальные данные о работе воздушных завес.

С. Е. Бутаковым [8] был предложен метод расчета воздушных завес, учитывающий разность давлений по обе стороны завесы. Для определения траектории струи воздушной завесы им использовалась теорема о количестве движения.

Излагаемый в книге расчет воздушных завес является дальнейшим развитием методов, предложенных В. В. Батуриным, И. А. Шепелевым и С. Е. Бутаковым.

Рекомендуемый в книге способ расчета [10] получен составлением уравнения количества движения для массы воздуха, ограниченной районом ворот, в которых устроена воздушная завеса. Уравнение учитывает все силы, действующие на эту массу воздуха, и на получаемое приращение количества движения. Примерно такой же подход к решению задачи был опубликован позднее в иностранной литературе [11].

Автор выражает благодарность заслуженному деятелю науки и техники доктору технических наук профессору К. А. Ушакову, давшему ценные указания по совершенствованию метода расчета воздушных завес, а также инженерам М. З. Брауде, М. Ю. Кун и И. В. Середневу, которые помогали в проведении опытов и составлении примеров расчетов воздушных завес.

## ГЛАВА I ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС

### § 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС

Наружный воздух входит в помещение через ворота и другие проемы в наружных ограждениях вследствие разности давлений снаружи и внутри здания. Разность давлений может создаваться под действием теплового напора, ветра и при работе механической вентиляции (рис. 1).

Поэтому наиболее правильно рассматривать ворота, защищенные воздушной завесой, как приточный проем при совместном действии аэрации и механической вентиляции. Действие воздушной завесы следует учитывать как дополнительное сопротивление, уменьшающее количество воздуха, проходящего через ворота в помещение. Сопротивление, оказываемое прохождению воздуха, может быть охарактеризовано коэффициентом сопротивления  $\zeta$  или коэффициентом расхода воздуха  $\mu = \frac{1}{\sqrt{\zeta}}$ . Если известно, как

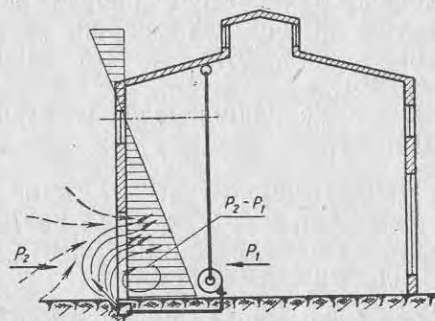


Рис. 1. Разрез производственного здания с воздушной завесой у ворот

изменяется коэффициент расхода воздуха через ворота при действии завесы, по формулам аэрации можно определить количество воздуха, проходящего через ворота, или найти такие параметры воздушной завесы (ширину воздуховыпускной щели, угол между направлением струи завесы и плоскостью ворот, расход воздуха на завесу), которые обеспечили бы проход через ворота наружного воздуха в объеме не более заданного.

Под воздействием разности давлений воздуха внутри помещения  $P_1$  и снаружи (в окружающей атмосфере)  $P_2$  через ворота проходит определенное количество воздуха  $G_{np}$ , состоящего из смеси воздуха, поданного в завесу,  $G_z$  и наружного воздуха  $G_n$ :

$$G_{np} = G_n + G_z. \quad (1)$$

Обозначим через  $q$  отношение количества воздуха, подаваемого в завесу, к количеству воздуха, проходящего через ворота,

т. е.  $q = \frac{G_s}{G_{np}}$ . Если в завесу подавать столько воздуха, сколько при данных условиях проходит через ворота, наружный воздух почти не будет поступать в помещение. В этом случае прдеом ворот оказывается заполненным воздухом, подаваемым в завесу. Поэтому, несмотря на то, что воздух через ворота будет проходить, наружный холодный воздух не сможет врываться в помещение.

Правда, путем подмешивания наружного воздуха к струе воздушной завесы холодный воздух частично будет попадать в помещение (см. ниже § 6).

Для аэродинамического расчета воздушной завесы величина  $q$  должна быть задана. Эта величина определяется либо исходя из технических соображений (обеспечения необходимой температуры воздуха в районе ворот без дополнительного подогрева — см. § 6), либо на основе экономических расчетов (см. § 10).

Наиболее рациональны воздушные завесы с  $q$  в пределах от 0,5 до 1.

## § 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ПРОЕМЫ, ЗАЩИЩЕННЫЕ ВОЗДУШНОЙ ЗАВЕСОЙ

Определим коэффициент расхода воздуха через ворота при действии завесы для случая  $q \leq 1$ . Для этого воспользуемся теоремой о количестве движения, как это было сделано П. Н. Каменевым [12] при решении задачи о сопротивлении тройников.

Проведем контрольную поверхность  $ABVGDKMH$  так, чтобы она проходила снаружи здания на таком расстоянии от ворот, где скорости движения воздуха столь малы, что их можно считать равными нулю, и внутри здания — через сжатое сечение струи воздуха, проходящего через ворота (рис. 2).

Составим уравнение количества движения в проекции на ось  $X$ . Количество движения по плоскости  $AB$  будет равно нулю, так как скорость воздуха, пересекающего эту плоскость, близка к нулю. Проекция количества движения по плоскости  $DK$  будет равна  $F_{сж} \psi v_{сж}^2 \rho_{см} \cos \vartheta$ ; проекция количества движения по плоскости  $MK$  (а при двусторонней завесе и по плоскости  $ГД$ ) будет равна  $-F_{щ} v_3^2 \rho_s \sin \alpha$  (знак минус показывает, что проекция скорости направлена навстречу оси  $X$ ).

Действующими силами будут сила давления на плоскость  $AB$  площадью  $F$ , равная  $FP_2$ ; сила реакции стен  $BГ$  и  $MН$   $(F - F_s)R_c$  и сила давления на плоскость  $DK$   $F_s P_1$ .

Реакция горизонтальной поверхности (земли) и объемные силы не учитываются, так как проекции этих сил на ось  $X$  равны

нулю. Приравнивая приращение количества движения действующим силам и пренебрегая силами трения, получим следующее уравнение:

$$F_s \mu \psi v_{сж}^2 \rho_{см} \cos \vartheta + F_{щ} v_3^2 \rho_s \sin \alpha = P_2 F - R_c (F - F_s) - P_1 F_s. \quad (2)$$

В этом уравнении:

- $F_s$  — площадь ворот;
- $F_{щ}$  — суммарная площадь щелей, через которые выходит струя воздушной завесы;
- $F$  — площадь плоскости  $AB$ ;
- $\mu$  — коэффициент расхода воздуха через ворота, защищенные завесой;
- $\psi$  — поправочный коэффициент на количество движения, учитывающий неравномерность поля скоростей;
- $v_{сж}$  — средняя скорость движения воздуха в сжатом сечении за воротами;
- $v_3$  — скорость выхода воздуха из щели воздушной завесы;
- $\rho_s$  — плотность воздуха, выходящего из завесы;
- $\rho_{см}$  — плотность воздуха при температуре смеси воздуха завесы и наружного;
- $R_c$  — среднее реактивное давление стены в пределах плоскостей  $BГ$  и  $MН$ ;
- $\alpha$  — угол между направлением выхода струи завесы и плоскостью ворот;
- $\vartheta$  — угол между направлением скорости  $v_{сж}$  и осью  $X$  (см. рис. 7, а).

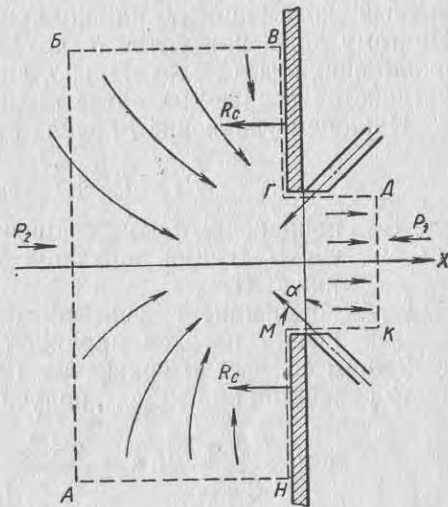


Рис. 2. К применению уравнения количества движения для расчета воздушной завесы

Наблюдениями, проведенными автором на опытных установках за траекторией движения струи воздушной завесы, выпущенной в плоскости ворот, было установлено, что в обычно применяемых конструкциях завес (у которых  $\alpha \geq 30^\circ$ ,  $\frac{F_{щ}}{F_s} > 1/40$  и  $q \leq 1$ ) угол  $\vartheta$  находится в пределах  $0-30^\circ$  и, следовательно,  $\cos \vartheta$  меняется в пределах  $1-0,87$ . Кроме того, было установлено,

что угол  $\theta$  увеличивается при уменьшении угла  $\alpha$  и относительной ширины щели, а также при увеличении  $q$ , и что поправочный коэффициент на количество движения  $\psi$ , учитывающий неравномерность поля скоростей в плоскости ДК, при этом меняется от 1 до 1,15. Коэффициент  $\psi$  увеличивается при тех же условиях, которые вызывают увеличение угла  $\theta$  и соответствующее уменьшение  $\cos \theta$ . Таким образом, произведение  $\psi \cos \theta$  для всех вариантов воздушных завес близко к единице; такое положение наблюдается даже при угле  $\theta > 30^\circ$ . В этих случаях струя воздушной завесы мало деформируется, сохраняется профиль скоростей, характерный для свободной струи, у которой поправочный коэффициент на количество движения  $\psi = 1,65$  [13]. Поэтому даже при углах  $\theta$  до  $55^\circ$  произведение  $\psi \cos \theta$  будет около единицы. Следовательно, для рассматриваемых вариантов устройства воздушных завес можно считать  $\psi \cos \theta \approx 1$ .

Напишем уравнение Бернулли для сечений АБ и ДК:

$$P_2 = P_1 + \frac{v_{сж}^2}{2} \rho_{см} (\varphi + \zeta_{см}), \quad (3)$$

где  $\varphi$  — поправочный коэффициент на динамическое давление, учитывающий неравномерность поля скоростей в сечении ДК;

$\zeta_{см}$  — коэффициент, учитывающий потерю энергии при смещении потоков наружного воздуха и воздуха завесы.

Решим совместно уравнения (2) и (3) и затем, поделив обе части равенства на  $F_в v_{сж}^2 \rho_{см}$ , получим

$$\mu + \frac{F_{щ} v_{в}^2}{F_в v_{сж}^2 \rho_{см}} \sin \alpha = \frac{\varphi + \zeta_{см}}{2} + \frac{P_2 - R_c}{F_в v_{сж}^2 \rho_{см}} (F - F_в). \quad (4)$$

Величины  $\varphi$ ,  $\zeta_{см}$  и  $R_c$ , входящие в правую часть уравнения (4), в настоящее время не могут быть найдены теоретически и определяются опытным путем.

Реактивное давление стены в районе всасывающего отверстия по абсолютному значению меньше давления в окружающей атмосфере. Это объясняется значительными скоростями движения воздуха вдоль поверхности около всасывающего отверстия (ворот). В соответствии с законом Бернулли с увеличением скорости уменьшается давление.

На рис. 3 приведен примерный график изменения величины реактивного давления стены, построенный на основе данных о распределении скоростей около всасывающего отверстия [14].

Как видно из графика, на некотором удалении от всасывающего отверстия, там, где скорость меньше 10% скорости во всасывающем отверстии, величина реактивного давления (по абсолютному значению) равна давлению в окружающей атмосфере  $P_2$ . По мере приближения к всасывающему отверстию величина реактивного давления уменьшается и прибли-

жается к величине давления внутри помещения  $P_1$ . Искомую разность сил  $(P_2 - R_c) (F - F_в)$  можно найти, если проинтегрировать заштрихованные на рис. 3 площадки по периметру всасывающего отверстия. Сумма членов правой части уравнения (4), которую обозначим  $\Pi$ , легко может быть найдена для случая бездействия завесы. Когда  $v_в = 0$ , тогда  $\Pi = \mu_0$ , где  $\mu_0$  — коэффициент расхода воздуха через ворота при бездействии завесы, зависящий от конструктивного оформления ворот.

На рис. 4 представлены несколько вариантов оформления ворот, для которых известны коэффициенты расхода воздуха  $\mu_0$ : ворота в тонкой стене (рис. 4, б) и ворота в толстой стене (рис. 4, в) с закругленными входными кромками. Последний вариант наиболее характерен для ворот, устраиваемых в кирпичных стенах толщиной в два и более кирпича. Если не приняты специальные меры к сохранению наружной кромки стены у ворот, при прохождении транспорта через ворота кромка быстро отбивается и принимает форму, близкую к указанной на рис. 4, в.

Необходимо отметить, что всякого рода конструктивные уступы (рис. 4, г) влияют на увеличение коэффициента расхода воздуха, как и скругленные входные кромки [15].

На основе проведенных испытаний ворот ряда типов было установлено, что величина  $\mu_0 = 0,8$  является верхним пределом этого коэффициента для ворот применяемых конструкций.

Для определения того, как меняется сумма членов правой части уравнения (4) при действии завесы, автором были поставлены опыты<sup>1</sup>. Входные кромки ворот были оформлены в соответ-

<sup>1</sup> Опыты проводились во Всесоюзном центральном научно-исследовательском институте охраны труда ВЦСПС. Описание опытной установки см. в § 3.

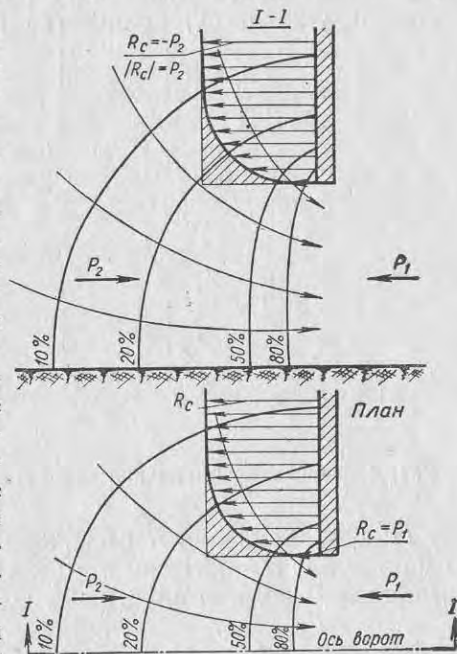


Рис. 3. График изменения реактивного давления стены в районе всасывающего отверстия

ствии с фиг. 4, в, и, таким образом, величина  $\Pi$  была наибольшей. Испытания проводились с односторонней завесой, имеющей угол  $\alpha = 40^\circ$ :

$$\frac{F_{щ}}{F_s} = \frac{1}{30}$$

Во время опыта измерялись расходы воздуха, подаваемого в воздушную завесу, количество воздуха, проходящего через ворота, разрежение внутри модели  $P_1$  и давление на наружной поверхности стены около ворот в точках, указанных на рис. 5. Измерения позволили определить все величины, входящие в уравнение (4). На оси координат графика (рис. 6) отложены опытные значения величин, входящих в  $\Pi$ , а на оси абсцисс — значение  $q = \frac{G_s}{G_{нд}}$ .

Как видно из графика, при  $q = 0$  величина  $\Pi = 0,8$ . По мере увеличения количества воздуха, подаваемого в завесу (т. е.  $q$ ), величина  $\Pi$  несколько уменьшается, достигая своего минимума;  $\Pi = 0,59$  при  $q \approx 0,2$ . При дальнейшем увеличении  $q$  величина  $\Pi$  возрастает и при  $q = 1$  равна  $\Pi \approx 0,7$ . Таким об-

разом, величина  $\Pi$  уменьшается только на 26% по сравнению с первоначальным значением. При наиболее часто применяемых значениях  $q = 0,7 \div 1$  величина  $\Pi$  отличается от первоначального своего значения 0,8 только на 15%. Поэтому для упрощения

Рис. 4. Варианты оформления ворот

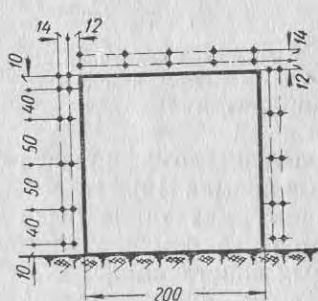


Рис. 5. Точки замера давлений по периметру ворот

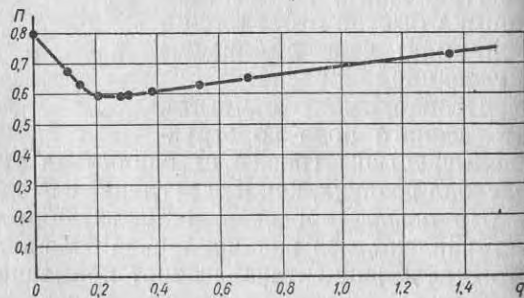


Рис. 6. График изменений величины  $\Pi$  в зависимости от  $q$

расчетов с некоторым запасом примем в интересующем нас интервале  $0,6 < q < 1$  величину  $\Pi$  постоянной и для рассмотренного случая равной 0,8, в общем случае будем считать, что

$$\Pi = \mu_0 \quad (5)$$

Тогда уравнение (4) примет следующий вид:

$$\mu + \frac{F_{щ}}{F_s} \frac{v_s^2}{v_{сж}^2} \frac{\gamma_s}{\gamma_{см}} \sin \alpha - \mu_0 = 0, \quad (6)$$

где  $\gamma_s$  — объемный вес воздуха, подаваемого в завесу;  $\gamma_{см}$  — объемный вес смеси воздуха наружного и завесы (остальные обозначения см. выше).

Преобразуем уравнение (6) таким образом, чтобы в него вошла величина  $q$ . Для этого второй член уравнения помножим и поделим на  $\frac{F_{щ}}{F_s} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_{см}} \mu^2$ . В результате получим

$$\frac{F_{щ}^2 v_s^2 \gamma_s^2}{F_s^2 \mu^2 v_{сж}^2 \gamma_{см}^2} \mu^2 \frac{F_s \gamma_{см}}{F_{щ} \gamma_s} \sin \alpha + \mu - \mu_0 = 0. \quad (7)$$

Но первый дробный множитель есть  $q^2$ , следовательно, имеем

$$q^2 \mu^2 \frac{F_s \gamma_{см}}{F_{щ} \gamma_s} \sin \alpha + \mu - \mu_0 = 0. \quad (8)$$

Решая уравнение относительно  $\mu$  и беря только положительное значение корня, получим

$$\mu = \frac{\sqrt{1 + 4\mu_0 q^2 D} - 1}{2q^2 D}, \quad (9)$$

где

$$D = \frac{F_s \gamma_{см}}{F_{щ} \gamma_s} \sin \alpha. \quad (10)$$

Если уравнение (8) решить относительно  $q$ , будем иметь

$$q = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\mu_0 - \mu}{\frac{F_s \gamma_{см}}{F_{щ} \gamma_s} \sin \alpha}} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\mu_0 - \mu}{D}}. \quad (11)$$

Необходимо подчеркнуть, что данный вывод сделан для рационально устроенных воздушных завес.

Как видно из уравнения (2), разность давлений снаружи и внутри здания в воротах, защищенных завесой, расходуется на торможение струи завесы и на придание потоку воздуха, входящего в помещение, скорости в горизонтальном направлении.

Рациональным устройством завесы будет тогда, когда струя завесы полностью тормозится силой разности давления (т. е.

теряет скорость в направлении оси  $X$ ) и участок контрольной поверхности  $НАБВ$  (рис. 7) не пересекают потоки, выходящие из объема, ограниченного этой поверхностью, наружу. Такими потоками могут быть отдельные струи воздушной завесы при настилении их на плоскость земли (рис. 7,  $з$ ), при больших расходах воздуха, подаваемого в одностороннюю завесу (рис. 7,  $д$ )

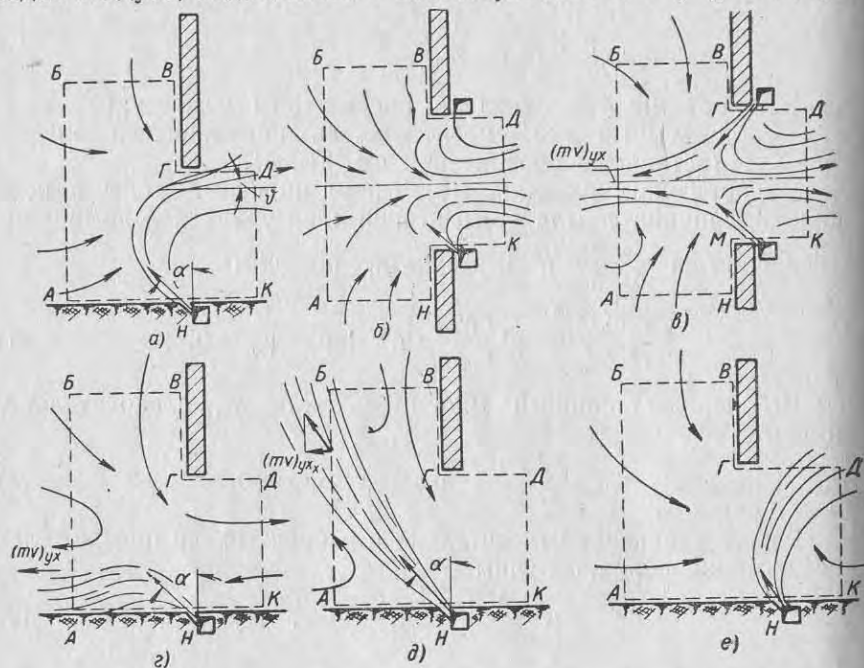


Рис. 7. Различные случаи истечения воздуха из воздушной завесы

и в двустороннюю завесу в результате столкновения двух струй (рис. 7,  $в$ ). При этом эффективность завесы будет меньше, чем в рассматриваемом случае, когда весь воздух, подаваемый в завесу, под действием разности давлений снаружи и внутри здания поворачивается и проходит через ворота (рис. 7,  $а$  и  $б$ ).

Для случаев, изображенных на рис. 7,  $в$ ,  $г$  и  $д$ , формула (11) примет вид

$$q = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\mu_0 + \varepsilon - \mu}{D}}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon = \frac{(mv)_{yx}}{(mv)_{cm}}$  — отношение проекции на ось  $X$  количества движения потока, уходящего наружу из объема, ограниченного плоскостями  $НАБВ$ , к количеству движения в потоке, пересекающего плоскость  $ДК$ .

Необходимо, чтобы угол  $\theta$  был меньше  $55^\circ$ . Как уже отмечалось, в большинстве случаев, когда завеса выпускается в плоскости ворот, угол  $\theta$  значительно меньше указанного предела. Только, когда воздуховыпускная щель отнесена на расстояние более  $0,1H_0$  ( $H_0$  — высота ворот) от плоскости ворот (рис. 7,  $е$ ), угол  $\theta$  может быть больше  $55^\circ$ .

В. Н. Трояновский приводит описание нижней односторонней воздушной завесы с выпуском воздуха, отнесенным внутрь помещения на  $0,37H_0$  [16]. Вследствие этого струя завесы с присоединившимися к ней массами воздуха уходит почти вертикально вверх. Согласно испытаниям в случае  $t_n = -5,5^\circ$  ( $t_n$  — температура наружного воздуха) при подаче к воротам размером  $1,7 \times 2$  м количества воздуха на завесу  $G_0 = 8790$  кг/ч через ворота прошло наружного воздуха  $G_n = 6130$  кг/ч.

Если бы завеса была расположена в плоскости ворот, при таком же количестве подаваемого воздуха и прочих равных условиях наружный воздух почти совсем не поступал бы в цех.

Как показали опыты, оба указанных выше требования к рациональному устройству завес хорошо выполняются, когда выпуск воздуха производится в плоскости ворот и величина  $q$  меньше предельной, указанной в табл. 1.

Таблица 1

$\frac{F_{из}}{F_0}$	Угол $\alpha$ в град			
	90	60	45	30
$\frac{1}{20}$	0,3	0,86	1,5	2,8
$\frac{1}{30}$	0,25	0,7	1,2	2,3
$\frac{1}{40}$	—	0,6	1,0	2,0

В пределах указанных величин расчетные значения, определенные по формуле (9), хорошо совпадают с опытными (см. § 3). Так как завесы проектируются с углом  $\alpha = 30 \div 60^\circ$  и величиной  $q = 0,5 \div 1$ , предлагаемый метод дает возможность рассчитать все встречающиеся в практике варианты завес.

Анализируя формулы (8) и (9), устанавливаем, что эффективность действия воздушной завесы зависит от параметра

$$D = \frac{F_{0\gamma_{cm}}}{F_{из\gamma_3}} \sin \alpha, \text{ величин } q = \frac{G_0}{G_{np}} \text{ и } \mu_0.$$

При прочих равных условиях необходимый расход воздуха на завесу обратно пропорционален корню квадратному из  $D$ , т. е.

$$q = \frac{G_s}{G_{np}} \approx \sqrt{\frac{1}{D}}. \quad (13)$$

Так как параметр  $D$  состоит из трех сомножителей, следует, что

$$q \approx \sqrt{\frac{F_{щ}}{F_s}}, \quad (14)$$

т. е. чем больше относительная площадь щели, тем больше воздуха нужно подавать в завесу для получения того же эффекта;

чем более угол  $\alpha$  приближается к  $90^\circ$ , тем меньше расход воздуха на завесу:

$$q \approx \sqrt{\frac{1}{\sin \alpha}}. \quad (15)$$

Кроме того, установлена зависимость  $q$  от соотношения объемного веса воздуха, подаваемого в завесу, к объемному весу смеси воздуха завесы с наружным:

$$q \approx \sqrt{\frac{\gamma_s}{\gamma_{см}}}. \quad (16)$$

Так как  $\gamma_s < \gamma_{см}$ , для получения того же эффекта (того же значения коэффициента расхода воздуха  $\mu$ ) можно подавать в завесу несколько меньше воздуха (по весу), чем при изотермических условиях ( $\gamma_s = \gamma_{см}$ ). Но необходимый объем воздуха, подаваемого в завесу, возрастает с увеличением его температуры (с уменьшением  $\gamma_s$ ).

Чем больше  $\mu_0$ , тем при прочих равных условиях будет больше коэффициент расхода воздуха при действии завесы. Поэтому при конструировании ворот нужно стремиться к тому, чтобы  $\mu_0$  было наименьшим.

### § 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС

Для подтверждения сделанных выводов автором были поставлены опыты на установке, изображенной на рис. 8.

Были испытаны модели воздушных завес с углами  $\alpha = 20, 30, 40, 45, 60$  и  $90^\circ$  и с относительной шириной щели  $\frac{F_{щ}}{F_s} = 0,02 \div 0,16$ . Испытания проводились при устройстве воздушных завес у ворот, сделанных в тонкой стене ( $\mu_0 = 0,64$ ) и в толстой стене с закругленными кромками ( $\mu_0 = 0,8$ ).

Опыты проводились в изотермических условиях. Во время испытаний измерялись количество воздуха, проходящего через ворота,  $G_{np}$ , количество воздуха, подаваемого в завесу,  $G_s$  и разрежение в камере  $P_k$ .

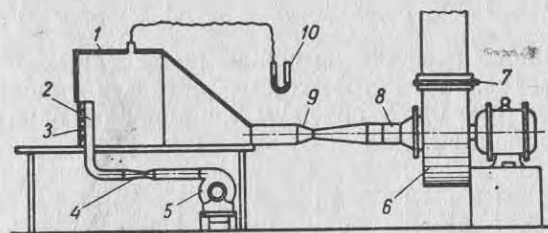


Рис. 8. Опытная установка для определения сопротивления, оказываемого воздушной завесой проходу воздуха через ворота:

1 — камера — модель здания; 2 — ворота; 3 — воздуховыпускные патрубки воздушной завесы; 4 — вентилятор, подающий воздух в завесу; 5 — труба Вентури для измерения количества воздуха, подаваемого в завесу; 6 — центробежный вентилятор, отсасывающий воздух из камеры и создающий в ней разрежение; 7 — труба Вентури для измерения количества воздуха, отсасываемого от камеры; 8 — спрямляющая решетка; 9 — шибер для регулирования разрежения в камере; 10 — микроманометр типа ЦАГИ, измеряющий разрежение в камере

По этим данным определялись величины  $q$  и  $\mu$ :

$$q = \frac{G_s}{G_{np}} = \frac{L_s}{L_{np}}; \quad (17)$$

$$\mu = \frac{L_{np}}{F_s \sqrt{\frac{2g}{\gamma} P_k}}. \quad (18)$$

В этих формулах:

$L_s$  — расход воздуха на завесу в  $m^3/сек$ ;

$L_{np}$  — расход воздуха через ворота при действии завесы в  $m^3/сек$  ( $L_{np} = L_s + L_n$ , где  $L_n$  — расход наружного воздуха, прорывающегося через ворота).

Результаты обработки данных, полученных из опытов, приведены на рис. 9—15.

Кроме опытов автора, на этих графиках нанесены результаты проведенных ранее опытов В. В. Батурина и опытов Г. Т. Татарчук [17].

Исследования всех трех авторов проводились с помощью опытных установок, имеющих одинаковую аэродинамическую схему, впервые примененную для испытания воздушных завес В. В. Батуриным.

Опыты подтвердили правильность теоретического вывода зависимости эффективности действия завесы от отдельных ее



параметров. Так, в соответствии с теоретическим выводом было установлено [см. формулу (15)], что при  $q < q_{пред}$  наименьший необходимый расход воздуха на завесу получается при  $\alpha = 90^\circ$ .

На рис. 9 приведены результаты опытов с односторонней боковой завесой  $\frac{F_{ш}}{F_0} = \frac{1}{30}$  с углами  $\alpha = 20, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$ .

Для данного графика из серии проведенных опытов были отобраны такие, при которых  $\mu = 0,475$ , или определялось значение  $q$  для  $\mu = 0,475$  по двум ближайшим опытным точкам путем интерполяции.

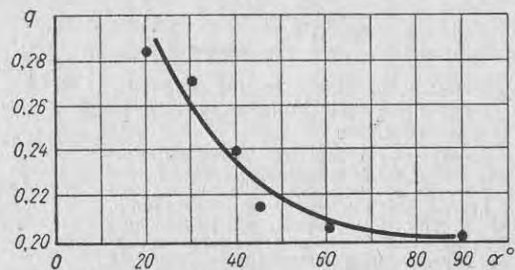


Рис. 9. График зависимости величины  $q$  от угла  $\alpha$  для односторонней боковой завесы

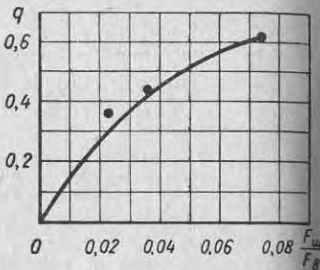


Рис. 10. График зависимости величины  $q$  от относительной ширины щели для односторонней завесы

По опытным точкам проведена кривая, которая близка к кривой, соответствующей зависимости (15). Таким образом, эту зависимость можно считать подтвержденной опытами.

График наглядно подтверждает, что при  $q < q_{пред}$ , когда течение воздуха происходит по схеме, показанной на рис. 7, а, оптимальным углом, при котором величина  $q$  минимальна, является  $\alpha = 90^\circ$ . Но с увеличением  $q$ , когда его значение становится больше  $q_{пред}$  (см. рис. 7, б), завеса будет оказывать меньшее сопротивление прохождению воздуха через ворота.

Из теории следует, что необходимый расход воздуха возрастает пропорционально  $\sqrt{\frac{F_{ш}}{F_0}}$ .

На рис. 10 даны результаты опытов, в которых испытывалась односторонняя завеса с углом  $\alpha = 30^\circ$ , с разной относительной шириной щели:

$$\frac{F_{ш}}{F_0} = \frac{1}{13,8} = 0,0725; \quad \frac{1}{29} = 0,0345; \quad \frac{1}{47,5} = 0,0211.$$

Для данного графика (так же, как это было сделано при построении графика, представленного на рис. 9) отобраны результаты опытов, при которых бралась разная ширина щели и было одинаковое значение коэффициента  $\mu = 0,2$ . Через опыт-

ную точку для относительной ширины щели  $\frac{F_{ш}}{F_0} = \frac{1}{13,8}$  проведена парабола. Как видно из графика, остальные точки хорошо ложатся на эту кривую.

Опыты позволили также решить и вопрос о возможности рассматривать двусторонние завесы как две односторонние, каждая из которых перекрывает свою половину ворот.

Согласно опытам такое допущение возможно, когда струи воздуха, вытекающие из каждой ветви двусторонней завесы,

искривляются настолько сильно, что не сталкиваются, или когда скорости воздуха, направленные наружу после столкновения струй, значительно меньше скоростей подтекающего к воротам потока наружного воздуха (см. рис. 7, б).

На рис. 11 приведены результаты опытов с одно- и двусторонними завесами, имеющими одинаковую ширину щели ( $\frac{F_{ш}}{F_0} = \frac{1}{30}$ ).

Как видно из графика, при значениях  $q < 0,3$  кривые для односторонней и двусторонней завес совпадают друг с другом. При  $q > 0,3$  кривая для двусторонней завесы проходит выше кривой для односторонней завесы. Следовательно, для получения того же эффекта (того же значения коэффициента расхода воздуха  $\mu$ ) двусторонние завесы требуют при  $q > 0,3$  больше воздуха, чем односторонние. По мере увеличения  $q$  это превышение возрастает и при  $q = 1$  достигает 25%.

Из анализа графика вытекает, что двустороннюю завесу можно рассматривать как две односторонние только при  $q < 0,3$ .

На рис. 12 представлен сводный график результатов опытов с односторонними завесами, имеющими разные углы  $\alpha$  и относительные площади воздуховыпускных щелей, для случая оформления ворот по рис. 4, б ( $\mu_0 = 0,64$ ).

На оси абсцисс графика отложены значения произведения  $q\sqrt{D}$ . Как видно из формулы (9), при постоянном значении  $\mu_0$

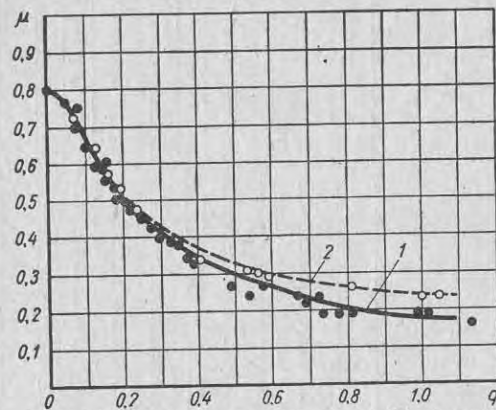


Рис. 11. График зависимости коэффициента расхода воздуха  $\mu$  через ворота, защищенные завесой, от величины  $q$  для односторонней и двусторонней завес с одинаковой площадью воздуховыпускной щели: 1 — кривая для односторонней завесы; 2 — кривая для двусторонней завесы

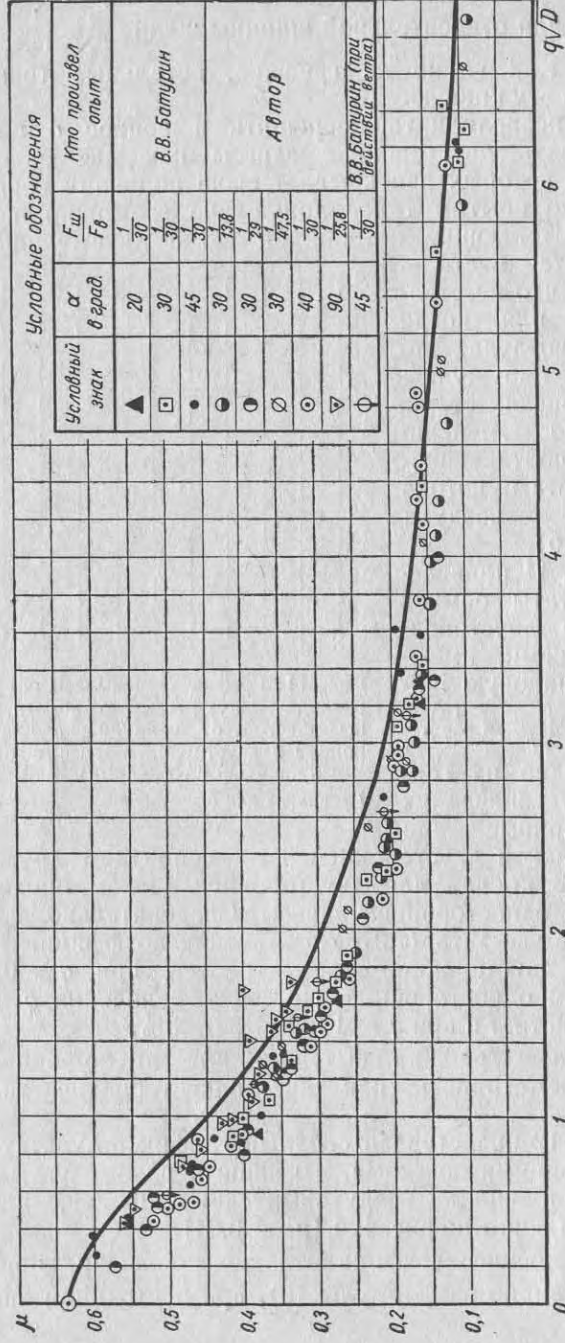


Рис. 12. Сводный график результатов опытов с односторонними завесами ( $\mu_0 = 0,64$ )

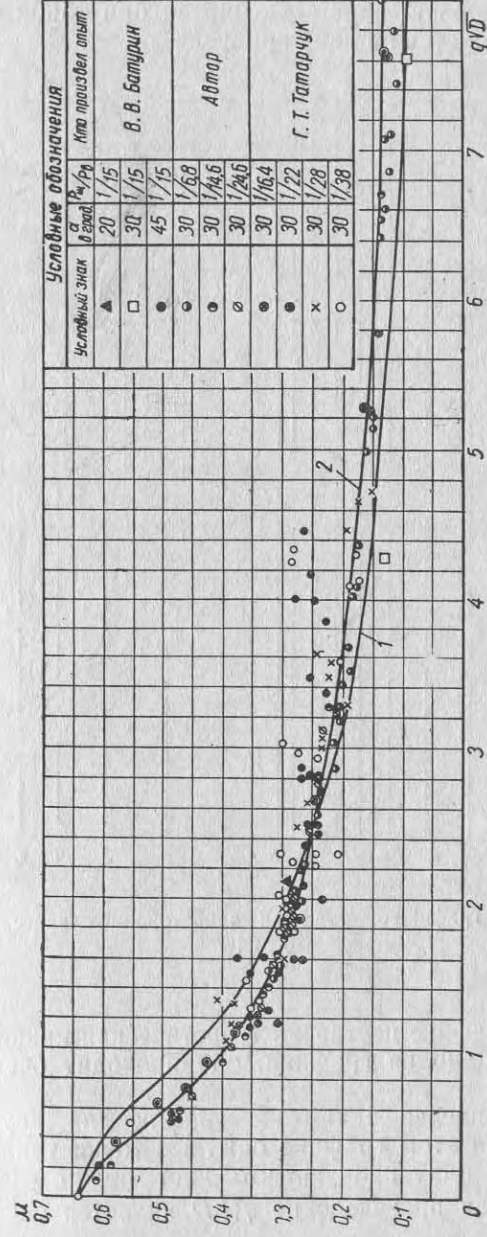


Рис. 13. Сводный график результатов опыта с двусторонними завесами ( $\mu_0 = 0,64$ ):  
1 — опытная кривая; 2 — теоретическая кривая

это произведение является единственным аргументом, от которого зависит величина  $\mu$ . Опытные точки для завес с различными углами и относительной площадью щелей при такой обработке данных хорошо ложатся на одну кривую.

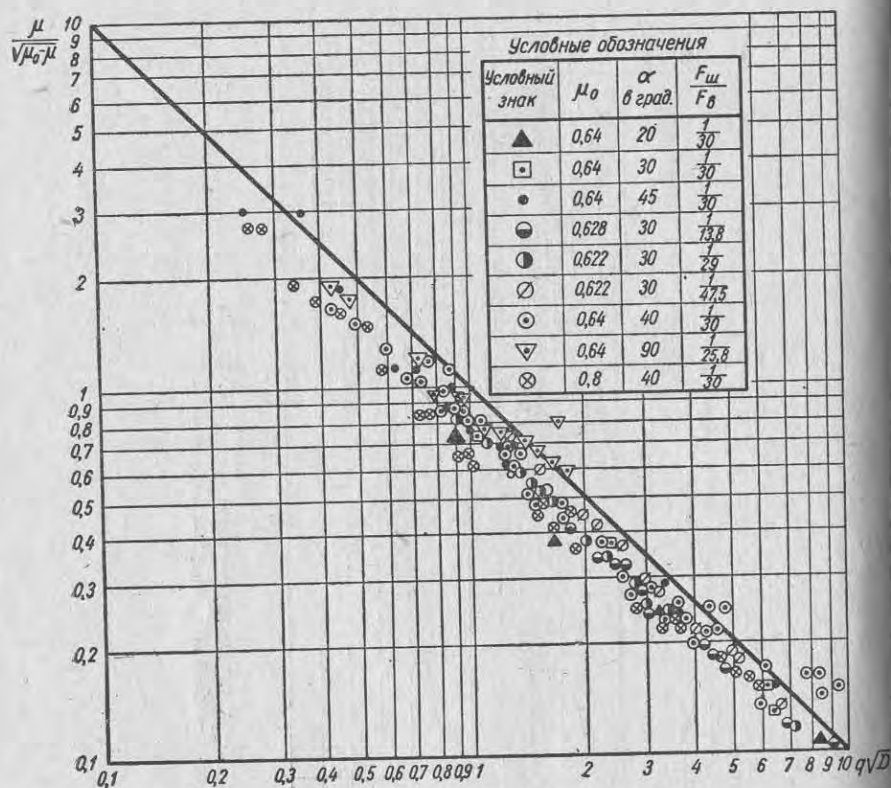


Рис. 14. Сводный график опытов для односторонних завес при любых значениях  $\mu_0$

На этом же графике построена теоретическая кривая по формуле (9). Как видно из графика, она проходит очень близко от опытных точек.

На рис. 13 приведен такой же график для двусторонних боковых завес. На этом графике опытные точки также хорошо укладываются на одну кривую, что дает право считать, что и для этого случая произведение  $q\sqrt{D}$  является единственным аргументом.

Можно построить график, на котором будут обобщены результаты опытов при разных величинах как  $\alpha$  и  $\frac{F_{щ}}{F_0}$ , так и  $\mu_0$ . Для этого приведем уравнение (8) или (11) к виду

$$\frac{\mu}{\sqrt{\mu_0 - \mu}} = \frac{1}{q\sqrt{D}} \quad (19)$$

Таким образом, уравнение, определяющее эффективность действия воздушной завесы, может быть выражено зависимостью между двумя безразмерными величинами.

На рис. 14 построен график в координатах  $\lg \frac{\mu}{\sqrt{\mu_0 - \mu}}$  и  $\lg q\sqrt{D}$  для односторонних боковых завес, а на рис. 15 такой же график для двусторонних завес. В логарифмической анаморфозе зависимость (19) будет изображаться прямой линией.

Как видно из графика, опытные точки опытов с  $\mu_0 = 0,64$  и  $\mu_0 = 0,8$  при разных величинах  $\alpha$  и  $\frac{F_{щ}}{F_0}$  хорошо ложатся на прямую линию. Таким образом, можно считать, что опыты хорошо подтверждают выведенные формулы и оправдывают допустимость принятых при их выводе предположений. Поэтому эти формулы могут быть приняты для расчета воздушных завес.

В первом издании книги для расчетов воздушных завес были рекомендованы коэффициенты расхода для односторонних завес при  $q\sqrt{D} < 5$  и для двусторонних завес при  $q\sqrt{D} < 2,5$  по теоретической прямой 1 (см. рис. 14 и 15), т. е. с некоторым запасом против опытных значений. Проведенные в последнее время дополнительные эксперименты показали, что такого запаса можно не делать. Поэтому при составлении расчетных таблиц приложения 1 и номограмм для определения коэффициента расхода были приняты опытные кривые.

С учетом поправок, полученных проведенными опытами, уравнение (19) запишется в виде

$$\frac{\mu}{\sqrt{\mu_0 - \mu}} = \frac{c}{q\sqrt{D}}, \quad (19')$$

где  $c$  — переменный коэффициент, зависящий от  $q\sqrt{D}$  (определяется опытными данными, приведенными на рис. 14 и 15).

По этому уравнению и определены величины, указанные в приложении 1.

Для быстрого нахождения величины коэффициента расхода воздуха через проем при действии завесы для любого значения  $\mu_0$  по уравнению (19') были составлены номограммы для односторонних завес в пределах  $\mu_0$  от 0,6 до 0,8 (рис. 16) и двусторонних завес в пределах от 0,6 до 1,0 (рис. 17).

На номограммах нанесено семейство кривых, характеризующихся параметром  $q\sqrt{D}$ , и семейство прямых для разных

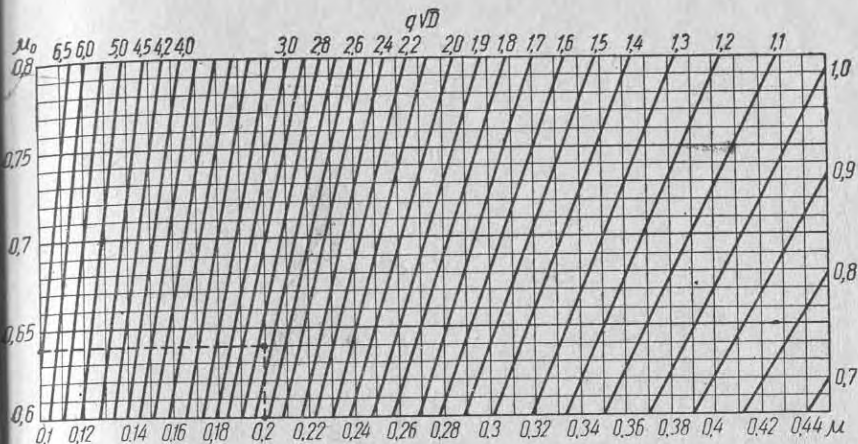
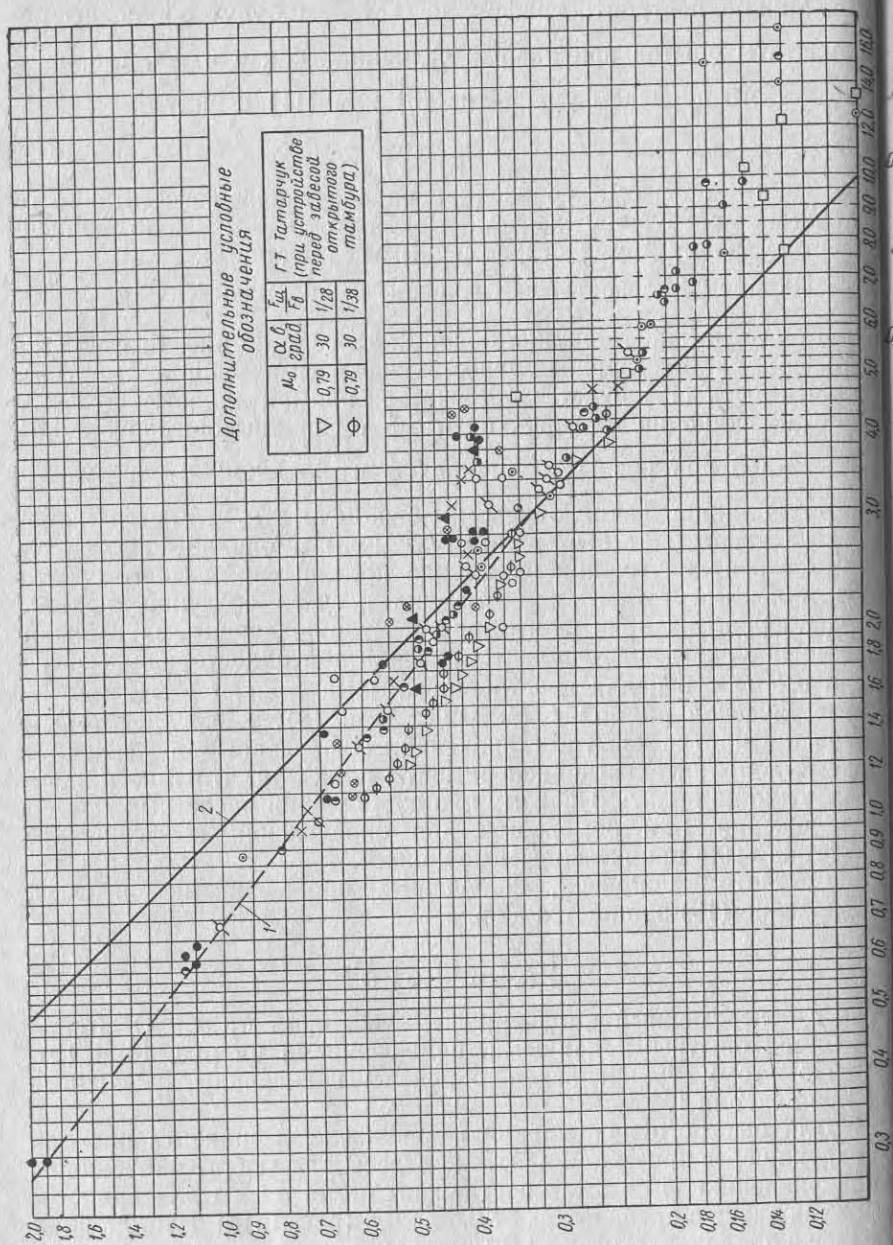


Рис. 16. Номограмма для определения коэффициента расхода воздуха  $\mu$  через ворота при действии односторонних завес

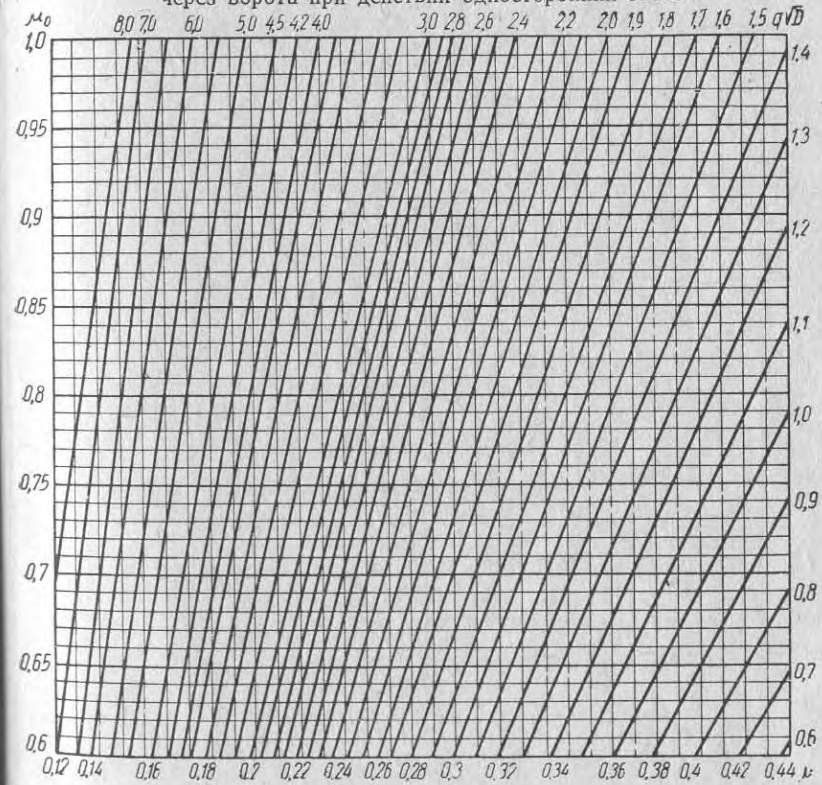


Рис. 17. Номограмма для определения коэффициента расхода воздуха  $\mu$  через ворота при действии двусторонней завесы

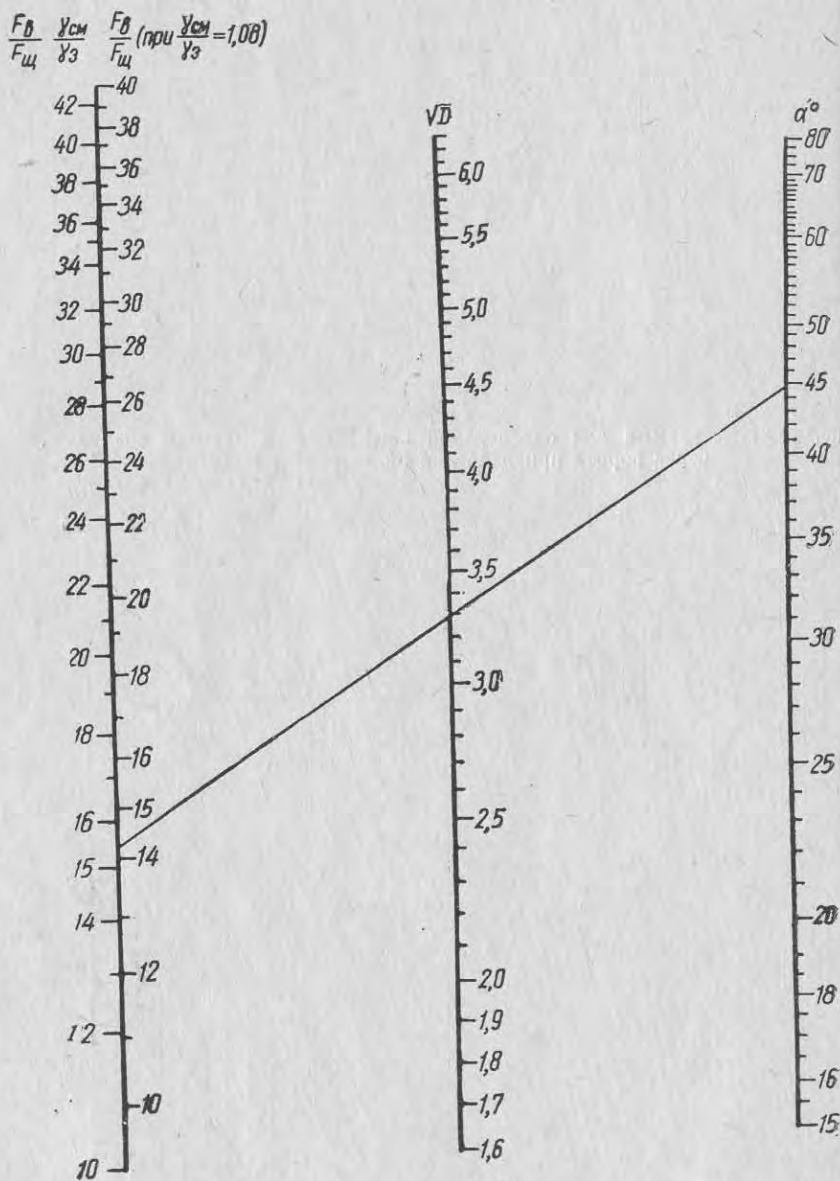


Рис. 18. Вспомогательная номограмма для определения величины  $D$

значений  $\mu$ . Искомое значение  $\mu$  определяется в точке пересечения кривой, соответствующей данному значению  $q\sqrt{D}$ , с прямой для данного  $\mu$ .

Чтобы определить величины  $\sqrt{D}$ , на рис. 18 приведена вспомогательная номограмма. На этой номограмме даны две шкалы, на которых откладываются известные параметры воздушной завесы: угол  $\alpha$  и отношение  $\frac{F_в}{F_ц} \cdot \frac{\gamma_{см}}{\gamma_с}$ . По третьей шкале, расположенной в середине номограммы, определяется величина  $\sqrt{D}$ . Пользование номограммами поясняется примером.

**Пример.** Определить коэффициент расхода воздуха через ворота при действии односторонней завесы.

Дано  $\frac{F_ц}{F_в} = \frac{1}{15}$ ;  $\alpha = 45^\circ$ ;  $q = 0,8$ ;  $\mu_0 = 0,64$ ;  $\gamma_{см} = 1,27 \text{ кг/м}^3$ ;  $\gamma_с = 1,23 \text{ кг/м}^3$ .

Решение. Находим

$$\frac{\gamma_{см}}{\gamma_с} = \frac{1,27}{1,23} = 1,03; \quad \frac{F_в}{F_ц} \cdot \frac{\gamma_{см}}{\gamma_с} = 15 \cdot 1,03 = 15,4.$$

Если  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_с} < 1,05$ , то эту величину можно не учитывать и откладывать на первой шкале значение  $\frac{F_в}{F_ц}$ , при этом ошибка будет меньше 3%.

Пользуясь вспомогательной номограммой (см. рис. 18), находим величину  $\sqrt{D} = 3,3$  (см. наклонную линию), тогда

$$q\sqrt{D} = 0,8 \cdot 3,3 = 2,64.$$

По номограмме (см. рис. 16) определяем значение  $\mu = 0,202$  (см. пунктирную линию).

Для того чтобы упростить пользование вспомогательной номограммой при  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_с} > 1,05$ , можно с достаточной точностью принять постоянные значения удельных весов воздуха  $\gamma_{см} = \gamma_{+12} = 1,239 \text{ кг/м}^3$  и  $\gamma_с = \gamma_{+35} = 1,145 \text{ кг/м}^3$ , тогда  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_с} = \frac{1,239}{1,145} = 1,08$ . На первой шкале номограммы рис. 18 с правой стороны нанесены деления для значений  $\frac{F_в}{F_ц}$  с учетом указанных величин удельных весов воздуха.

Зная параметр  $D = \frac{F_в \gamma_{см}}{F_ц \gamma_с} \sin \alpha$  и величины  $q$  и  $\mu_0$ , по графикам (рис. 12—17) можно определить  $\mu$ .

На основе этих же формул и опытов М. И. Фильней [18] построил другую систему номограмм для определения коэффициента расхода  $\mu$  односторонних и двусторонних завес.

Для удобства расчетов при проектировании воздушных завес в приложении 1 даны значения коэффициентов расхода воздуха  $\mu$  при действии одно- и двусторонних завес. Таблицы даны для ворот со значениями  $\mu_0 = 0,64$  и  $0,8$ , углов выхода струи завесы по отношению к плоскости ворот  $\alpha = 30, 45$  и  $60^\circ$ , ряда значений  $q$  и относительной площади щели  $\frac{F_{щ}}{F_0}$  и для отношения  $\frac{\gamma_{см}}{\gamma_0} = 1$ .

#### § 4. МЕТОД УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВЕТРА НА ДЕЙСТВИЕ ВОЗДУШНОЙ ЗАВЕСЫ У ВОРОТ

Для определения влияния ветра на действие воздушной завесы проведем контрольную поверхность  $АВВГДК$  так, как это показано на рис. 19, и составим уравнение количества движения в проекции на ось  $X$ .

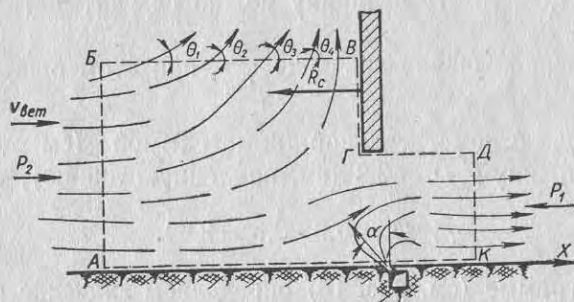


Рис. 19. К применению уравнения количества движения для расчета воздушной завесы с учетом действия ветра (стена с воротами)

Уравнение количества движения для данного случая будет иметь вид

$$-Fv_{вет}^2\rho_n + \int v_{вет}^2\rho_n \cos \theta dF + F_s \mu \psi v_{см}^2 \rho_{см} \cos \vartheta + F_{щ} v_s^2 \rho_s \sin \alpha = P_2 F - R_c (F - F_0) - P_1 F_0. \quad (20)$$

В этом уравнении второй член в левой части равенства не может быть определен расчетным путем (неизвестными являются значения  $\cos \theta_i$  — см. рис. 19), его можно определить опытным путем.

Примем, так же как это делается при расчете аэрации зданий, давление, создаваемое ветром на наружных поверхностях, одинаковым для глухих моделей (без окон и ворот) и моделей зданий, имеющих проемы.

Для глухой модели здания (рис. 20) уравнение количества движения будет иметь вид

$$-Fv_{вет}^2\rho_n + \int v_{вет}^2\rho_n \cos \theta dF = P_2 F - R_c F. \quad (21)$$

В опытах по продувке глухих моделей зданий определяются аэродинамические коэффициенты. Величина правой части уравнения (21) может быть выражена через аэродинамические коэффициенты  $k$ :

$$P_2 F - R_c F = (P_2 - R_{ср}) F = v_{вет}^2 \rho_n F = -k \frac{v_{вет}^2}{2} \rho_n F, \quad (22)$$

где  $k$  — среднее значение аэродинамического коэффициента на поверхности стены, в которой имеются ворота.

Используя уравнения (21) и (22), преобразуем уравнение (20) к виду

$$-k \frac{v_{вет}^2}{2} \rho_n F + F_s \mu \psi v_{см}^2 \rho_{см} \cos \vartheta + F_{щ} v_s^2 \rho_s \sin \alpha = P_2 F - R_c (F - F_0) - P_1 F_0. \quad (23)$$

Перенесем первый член левой части равенства (23) в правую часть, сгруппируем его с первым членом правой части равенства и получим

$$F_s \mu \psi v_{см}^2 \rho_{см} \cos \vartheta + F_{щ} v_s^2 \rho_s \sin \alpha = \left( P_2 + k \frac{v_{вет}^2}{2} \rho_n \right) F - R_c (F - F_0) - P_1 F_0. \quad (24)$$

Уравнение (24) аналогично выведенному ранее уравнению (2). Разница состоит только в том, что в уравнении (24) давление воздуха снаружи определяется как сумма статического давления и некоторой части динамического давления ветра:

$$\left( P_2 + \frac{k v_{вет}^2}{2} \rho_n \right).$$

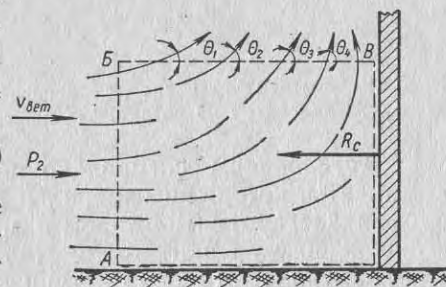


Рис. 20. К применению уравнения количества движения для случая обтекания ветром глухой стены

Таким образом приходим к выводу, что так же как при расчете аэрации, влияние ветра учитывается тем, что наружное давление увеличивается на величину скоростного давления ветра, умноженного на аэродинамический коэффициент.

В. В. Батуриным опыты с действием ветра были поставлены на установке, изображенной на рис. 21 [6].

Модель здания 1 обдувалась потоком, созданным вентилятором 8. Воздух входил в ворота 2, расположенные на наветренной стороне модели, и выходил из модели здания через отверстия 6 и 7. В этих отверстиях

были установлены специально протарированные крыльчатые аномоменты, которыми измерялся расход воздуха. Воздух подавался в завесу вентилятором 5 и выходил через патрубки 3, установленные у ворот. Количество воздуха, подаваемого в завесу  $L_s$ , измерялось трубой Вентури 4.

Рассмотрим явление, имевшее место в опытах с установкой, изображенной на рис. 21. При обдувании здания потоком воздуха («ветром») на наветренной стороне модели (где были расположены ворота) создавалось давление, а на заветренной (где были отверстия 6 и 7) — разрежение. Разность давлений  $\Delta P$  вызывала движение воздуха через модель и тратилась на последовательное преодоление сопротивлений в воротах  $\Delta P_s$  и указанных отверстиях  $\Delta P_{отв}$ :

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_{отв}. \quad (25)$$

В упомянутых опытах В. В. Батурина ворота имели площадь  $0,3 \cdot 0,3 = 0,09 \text{ м}^2$ ;  $F_s \mu_0 = 0,09 \cdot 0,64 = 0,0576 \text{ м}^2$ . Отверстие 6 имело диаметр 150 мм, а отверстие 7 — диаметр 200 мм. В соответствии с оформлением подхода воздуха к отверстиям значения коэффициентов расхода могут быть приняты для отверстия 6  $\mu_0 = 1$ , для отверстия 7  $\mu_0 = 0,8$ .

Суммарная эффективная площадь обоих отверстий составляла  $\Sigma (\mu F)_{отв} = 0,0177 + 0,0252 = 0,043 \text{ м}^2$ .

Попытаемся, пользуясь данными этих опытов, установить, как менялся коэффициент расхода  $\mu$  в зависимости от величины  $q$  при действии завесы в этих опытах.

Для этого сначала определим площадь эквивалентного сопла  $F_{эк}$ , соответствующего по сопротивлению проходу воздуха через ворота, и отверстия 6 и 7 при бездействии завесы;

$$\frac{1}{F_{эк}^2} = \frac{1}{(\mu F_s)^2} + \frac{1}{(\mu F)_{отв}^2}; \quad (26)$$

подставляя известные площади ворот и отверстий 6 и 7, получим

$$\frac{1}{F_{эк}^2} = \frac{1}{0,0576^2} + \frac{1}{0,043^2}, \quad (26a)$$

откуда  $F_{эк} = 0,0346 \text{ м}^2$ .

При действии завесы уменьшится коэффициент расхода воздуха через ворота и уменьшится эквивалентное сопло  $F_{эк}$ , соответствующее сопротивлению всей модели.

Величина эквивалентного сопла  $F_{эк}$  при действии завесы может быть найдена из соотношения

$$\frac{F_{эк}}{F_{эк_0}} = \frac{L_{нр}}{L_0}; \quad (27)$$

подставляя полученное выше значение  $F_{эк_0} = 0,0346 \text{ м}^2$ , определяем

$$F_{эк} = 0,0346 \frac{L_{нр}}{L_0} \text{ м}^2. \quad (27a)$$

Зная  $F_{эк}$  при действии завесы, можно найти коэффициент расхода воздуха  $\mu$  через ворота при действии завесы из уравнения

$$\frac{1}{(\mu F_s)^2} = \frac{1}{F_{эк}^2} - \frac{1}{(F\mu)_{отв}^2}. \quad (28)$$

В табл. 2 приведена обработка опытных данных по уравнению (28) для односторонней боковой завесы с углом  $\alpha = 45^\circ$  и

$$\frac{F_{ш}}{F_s} = \frac{1}{30}; \quad \gamma_{см} = 1.$$

В графах 1 и 2 табл. 2 помещены опытные данные  $\frac{L_s}{L_0}$  и  $\frac{L_{нр}}{L_0}$ ,

Таблица 2

$\frac{L_s}{L_0}$	$\frac{L_{нр}}{L_0}$	$q = \frac{L_s}{L_{нр}}$	$L_{эк} = 0,0346 \frac{L_{нр}}{L_0}$	$\frac{1}{F_{эк}^2}$	$\frac{1}{F_{эк}^2} - \frac{1}{(F\mu)_{отв}^2}$	$\mu$ , полученный опытным путем	$\mu$ по теоретической формуле (9)
0,103	0,89	0,115	0,0308	1050	510	0,492	0,563
0,15	0,84	0,178	0,0291	1180	640	0,438	0,485
0,202	0,766	0,256	0,0265	1420	880	0,374	0,411
0,234	0,705	0,333	0,0244	1680	1140	0,328	0,35
0,253	0,668	0,378	0,0231	1870	1330	0,304	0,322
0,303	0,52	0,58	0,018	3090	2550	0,22	0,239
0,318	0,463	0,689	0,016	3900	3360	0,191	0,207

в графе 3 — величина  $q = \frac{L_9}{L_{np}}$  и в графе 7 — величина  $\mu$ , определенная на основе опытных данных.

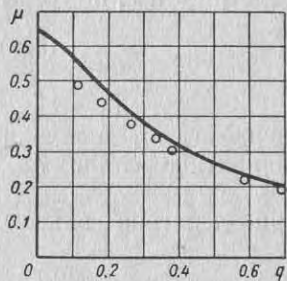


Рис. 22. Теоретическая кривая  $\mu = f(q)$  для односторонней завесы с опытными точками экспериментов В. В. Батурина при действии ветра

В графе 8 даны найденные по теоретической формуле (9) значения  $\mu$  для величин  $q$ . Теоретическая кривая по формуле (9) и опытные точки нанесены на рис. 22. Как видно из табл. 2 и рис. 22, опытные точки хорошо совпадают с теоретической кривой и в случае действия ветра. Таким образом, теоретический вывод, сделанный для случая действия ветра, можно считать подтвержденным.

Вывод справедлив не только при направлении ветра, перпендикулярном к плоскости ворот, но и при любом другом его направлении. Для учета влияния ветра на количество воздуха,

проходящего через ворота при любом его направлении, необходимо только знать аэродинамические коэффициенты для здания, к воротам которого проектируется воздушная завеса.

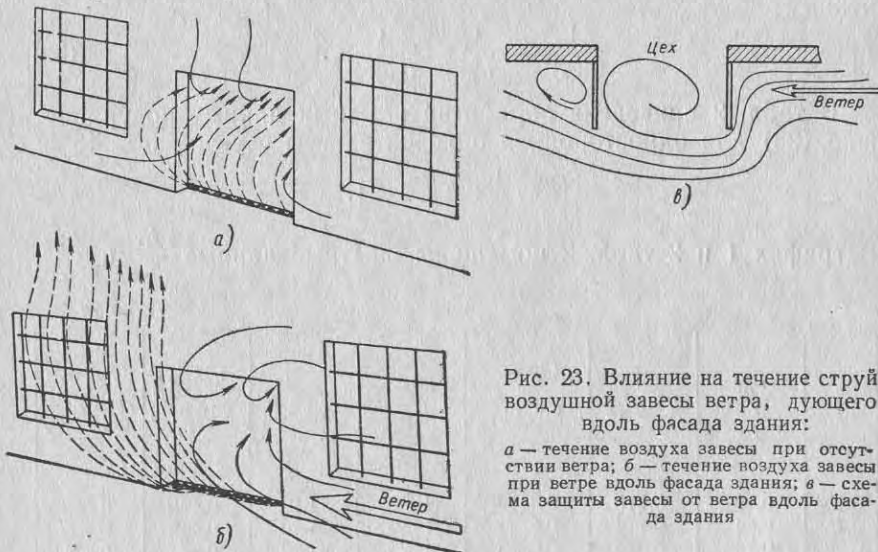


Рис. 23. Влияние на течение струй воздушной завесы ветра, дующего вдоль фасада здания:

*a* — течение воздуха завесы при отсутствии ветра; *b* — течение воздуха завесы при ветре вдоль фасада здания; *в* — схема защиты завесы от ветра вдоль фасада здания

Рассмотрим случай, когда ветер направлен вдоль стены, в которой устроены ворота.

Как известно, при таком направлении ветра аэродинамические коэффициенты близки к нулю. Следовательно, количество

воздуха, проходящего через ворота при ветре, будет почти такое же, как при безветрии. Однако, если при отсутствии ветра в ворота будет входить в основном теплый воздух, подаваемый в завесу (рис. 23, *a*), то при продольном ветре теплый воздух завесы может быть снесен в бок по фасаду здания, и в ворота будет входить холодный наружный воздух (рис. 23, *b*). Во избежание такого явления рекомендуется устраивать наружные тамбуры. Даже установленные перпендикулярно фасаду плоскости открываемых наружу распашных ворот (рис. 23, *в*) дают возможность в значительной мере предотвратить снос ветром теплового воздуха завесы в сторону от ворот.

В тех случаях, когда нет защиты от ветра, дующего вдоль фасада здания, не следует делать завесы с большими углами выпуска воздуха по отношению к плоскости ворот (угол  $\alpha$ ). Чем больше угол  $\alpha$ , тем больше струя завесы будет выходить наружу и тем больше возможность сноса ее в бок от ворот. Поэтому для ворот, не защищенных тамбуром, рекомендуется применять угол  $\alpha = 30^\circ$ . В случае устройства наружных тамбуров угол  $\alpha$  может быть принят  $45^\circ$ . При устройстве завес в коридорах, туннелях, каналах угол  $\alpha$  может быть принят  $60^\circ$  и больше (до  $90^\circ$ ).



## РАСЧЕТ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС У ВОРОТ И ДВЕРЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

### § 5. САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВОЗДУШНЫМ ЗАВЕСАМ У ВОРОТ И ДВЕРЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

Воздушные завесы должны обеспечивать в холодный период года на рабочих местах в районе ворот или технологических проемов температуры воздуха, требуемые санитарными нормами [19] (приложение 3) для рабочей зоны.

При кратковременном (до 10 мин) открывании ворот допускается снижение температуры воздуха на рабочих местах, защищенных перегородками или ширмами от обдувания воздухом, проходящим через ворота, до 14°С — при легкой физической работе, до 12°С — при работе средней тяжести и до 8°С — при тяжелой работе.

При отсутствии постоянных рабочих мест в районе ворот и открывании их на короткое время (до 10 мин) допускается снижение температуры воздуха в рабочей зоне (в районе ворот) до 5°С, если это допустимо технологическими требованиями.

Температура смеси воздуха, проходящего через ворота, проемы или наружные двери (смесь воздуха, подаваемого в завесу с наружным), должна быть не меньше указанных выше температур.

Температура воздуха, подаваемого для воздушных завес, должна быть для ворот промышленных зданий не более 70°С и для наружных дверей не более 50°С.

Скорость воздуха, поступающего из воздушных завес для ворот промышленных зданий, не ограничивается и определяется исходя из аэродинамических и экономических расчетов. Скорость воздуха, поступающего из воздушных завес, у наружных дверей должна быть не более 8 м/сек.

Санитарные нормы и Строительные Нормы и Правила СНиП III-Г. 7-62 требуют, чтобы воздушные завесы устраивались:

а) у ворот, открывающихся чаще пяти раз или более чем на 40 мин в смену, а также у технологических проемов отапливаемых зданий и помещений, находящихся в районах с расчетной температурой наружного воздуха для проектирования отопления минус 15°С и ниже, когда исключена возможность устройства шлюзов;

б) у ворот и технологических проемов помещений при любых расчетных температурах наружного воздуха и при любой продолжительности открывания ворот, если снижение температуры

воздуха в помещениях недопустимо технологическими и гигиеническими требованиями;

в) у входов в производственные, вспомогательные здания при частом открывании дверей (при проходе более 600 человек в час);

г) в производственных и общественных зданиях, оборудованных системой кондиционированного воздуха;

д) в помещениях со значительными влаговыведениями.

В случаях, указанных в пунктах в, г, д, воздушно-тепловые завесы устраиваются также и при устройстве у входов шлюзов.

На рис. 24 показан участок цеха около ворот, на температуру воздуха которого сильно влияет температура смеси воздуха, проходящего через ворота.

Величина расстояния  $l$  (см. рис. 24) определяется исходя из условия, что перепад температур между средней температурой в рабочей зоне всего цеха и в струе воздуха, выходящей из ворот в цех,  $\Delta t < 2^\circ\text{C}$ . В табл. 3 дано значение  $\frac{l}{B}$  для нескольких значений разностей  $t_{p.з} - t_{см}$ , где  $B$  — ширина ворот в м.

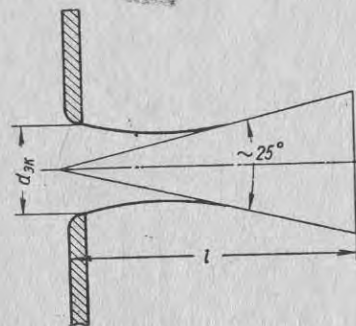


Рис. 24. Район помещения около ворот, на котором сильно сказывается температура воздуха, входящего через ворота

Таблица 3

Значение  $\frac{l}{B}$  для нескольких значений разностей  $t_{p.з} - t_{см}$

$t_{p.з} - t_{см}$ в °С	12	10	8	6	4
$\frac{l}{B}$	12	10	8	5	3

### § 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, ПРОХОДЯЩЕГО ЧЕРЕЗ ВОРОТА, И НЕОБХОДИМОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, ПОДАВАЕМОГО В ВОЗДУШНУЮ ЗАВЕСУ

К струе воздушной завесы, вытекающей из щели, подмешивается с одной стороны наружный воздух  $G_{п.н.}$ , с другой — воздух из помещения  $G_{п.в.}$  (рис. 25, а). Объем воздуха в струе возрастает по мере ее продвижения в пределах ворот, и уже при сравнительно небольших значениях  $q$  порядка 0,3 и выше, объем

воздуха в струе завесы превышает объем воздуха, входящего в ворота ( $G_{вх}$ ). Часть тепла, заключенная в струе завесы, теряется с частью струи, не попадающей в проем и уходящей наружу. Эта потеря тепла довольно значительна и не учитывать

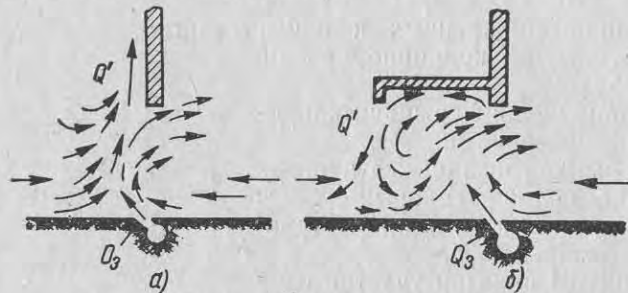


Рис. 25. Схема движения воздуха завесы:  
а — при отсутствии тамбура; б — при наличии открытого тамбура

ее при определении необходимой температуры воздуха, подаваемого в завесу, нельзя.

Часть струи воздушной завесы, уходящей наружу ( $G_{yx}$ ), равняется

$$G_{yx} = G_{стр} - G_{вх}, \quad (29)$$

где  $G_{стр}$  — количество воздуха в струе завесы после прохода ею всей высоты ворот (при нижней завесе) или ширины ворот (при боковой односторонней завесе), или половины ширины ворот (при двусторонней боковой завесе) в кг/сек;

$G_{вх}$  — количество воздуха из струи завесы, входящего в ворота, в кг/сек.

В соответствии с методикой лабораторных и производственных испытаний количество воздуха, проходящего через ворота ( $G_{нр}$ ), определяется как разность количества воздуха, входящего через ворота ( $G_{вх}$ ) и подсосывающегося к струе завесы воздуха из помещения:

$$G_{нр} = G_{вх} - G_{п. в}, \quad (30)$$

откуда

$$G_{вх} = G_{нр} + G_{п. в}. \quad (30')$$

Количество воздуха в струе равно

$$G_{стр} = \beta G_{вх}, \quad (31)$$

где  $\beta$  — коэффициент увеличения объема воздуха в струе завесы при ее движении в пределах ворот.

Величина коэффициента  $\beta$  определяется исходя из закономерностей свободных турбулентных струй. При распределении

скоростей на выходе, характерном для обычно применяемых конструкций воздуховыпускных щелей, коэффициент равен:

$$\beta = 0,76 \sqrt{\frac{S}{b} + 1}, \quad (32)$$

где  $S$  — путь, проходимый струей.

Этот путь для струи с искривленной траекторией можно приближенно определить как длину дуги по формулам:

а) для односторонней завесы

$$S \approx \frac{0,01745 H_g \alpha}{\sin \alpha}; \quad (33)$$

б) для двусторонней завесы

$$S \approx \frac{0,00873 B \alpha}{\sin \alpha}. \quad (34)$$

В последних двух формулах угол  $\alpha$  измеряется в градусах.

Считая, что с каждой стороны к струе воздушной завесы подсосывается равное количество воздуха, будем иметь

$$G_{п. н} = \frac{\beta - 1}{2} G_{вх}. \quad (35)$$

Подставляя формулу (35) в уравнение (30) и полученный результат в формулу (29), будем иметь

$$G_{yx} = \beta G_{вх} - \frac{(\beta - 1)}{2} G_{вх} - G_{нр} = G_{нр} \left( q \frac{1 + \beta}{2} - 1 \right). \quad (36)$$

Таким образом, при значениях  $q \leq \frac{2}{1 + \beta}$  вся струя воздушной завесы проходит через ворота, и, следовательно, не будет потерь тепла с воздухом завесы, уходящим наружу. С учетом распределения избыточных температур (под избыточной температурой понимается превышение температур в струе завесы над температурой наружного воздуха) по сечению струи воздушной завесы и количества воздуха, уходящего наружу, была найдена следующая ориентировочная формула для определения количества тепла, теряемого воздушной завесой:

$$\frac{Q'}{Q_3} = (2 \div 2,5) \left( \frac{q \frac{1 + \beta}{2} - 1}{q\beta} \right)^2. \quad (37)$$

Здесь  $Q_3$  — количество тепла, заключенного в струе завесы, в ккал/ч;

$Q'$  — потери тепла с частью струи завесы, уходящей наружу, в ккал/ч.

При выводе формулы (37) учитывалось также то обстоятельство, что когда ось струи воздушной завесы пересекает плоскость

ворот у верхней кромки, в ворота проходит половина объема воздуха, подаваемого в завесу:

$$G_{np} = 0,5 G_s,$$

т. е.  $q = 2$ . При этом с воздухом, уходящим наружу, будет теряться несколько больше половины тепла:

$$\frac{Q'}{Q} \approx 0,5 \div 0,6.$$

Г. Т. Татарчук [17] в НИИ Санитарной техники были проведены опыты с воздушными завесами в неизотермических условиях. Задачей этих опытов было определение величины потери тепла струей воздушной завесы и необходимой температуры воздуха, подаваемого в завесу.

Опытная установка была аналогична изображенной на рис. 8 и отличалась только тем, что в завесу подавался подогретый воздух. На воздуховоде от вентилятора 5 (см. рис. 8) после устройства 4 для измерения расхода воздуха был установлен электрический подогреватель. В этих опытах, кроме замеров, указанных в § 3 ( $G_{np}$ ,  $G_s$ ,  $P_x$ ), дополнительно измерялись температура воздуха, подаваемого в завесу ( $t_s$ ) и удаляемого из модели ( $t_{yx}$ ), внутри модели около ворот в 30 точках ( $t_{вн}$ ) и температуры окружающего модель воздуха  $t_n$  (температура в лабораторном помещении). Температура в помещении лаборатории принималась за температуру наружного воздуха ( $t_n$ ) и считалась нулевой температурой. Все остальные температуры отсчитывались от этого уровня. В опытах избыточная температура воздуха, подаваемого в завесу, была в пределах от нуля (изотермические условия) до  $50^\circ\text{C}$ , внутри модели — от нуля до  $24,2^\circ\text{C}$ . Количество тепла в воздухе, подаваемого в завесу,  $Q$  и количество тепла, теряемого наружу,  $Q'$  так же определялось с учетом  $t_n$ , равным  $0^\circ\text{C}$ .

Исследовалась двусторонняя боковая завеса с выпуском воздуха из щелей под углом  $\alpha = 30^\circ$  к плоскости ворот. Суммарная площадь воздуховыпускных щелей составляла  $\frac{1}{14,4}$ ,  $\frac{1}{22}$ ,  $\frac{1}{28}$  и  $\frac{1}{38}$  от площади ворот. Воздух выходил из щелей равномерно по всей высоте проема. Искомое отношение  $\frac{Q'}{Q}$  определялось из уравнения теплового баланса модели

$$Q_s - Q' - Q_{yx} - Q_{m.n} = 0, \quad (38)$$

поделив которое на  $Q_s$ , получали

$$\frac{Q'}{Q_s} = 1 - \frac{Q_{yx}}{Q_s} - \frac{Q_{m.n}}{Q_s}, \quad (38')$$

где  $Q_{yx}$  — количество тепла, уносимого с воздухом, удаляемым из модели, в ккал/ч;

$Q_{m.n}$  — теплопотери модели в ккал/ч.

Количество тепла, уносимого с удаляемым воздухом, определялось по формуле

$$Q_{yx} = G_{np}c(t_{yx} - t_n)$$

и теплопотери по формуле

$$Q_{m.n} = \bar{Q}_{m.n}(t_s - t_n),$$

где  $\bar{Q}_{m.n}$  — удельные теплопотери на  $1^\circ\text{C}$  разности температур, определенные опытным путем для данной экспериментальной установки, в ккал/град·ч.

Результаты опытов представлены на графиках (рис. 26). Как показано на этих графиках, потери тепла струей завесы возрастают с уменьшением ширины щели и увеличением относи-

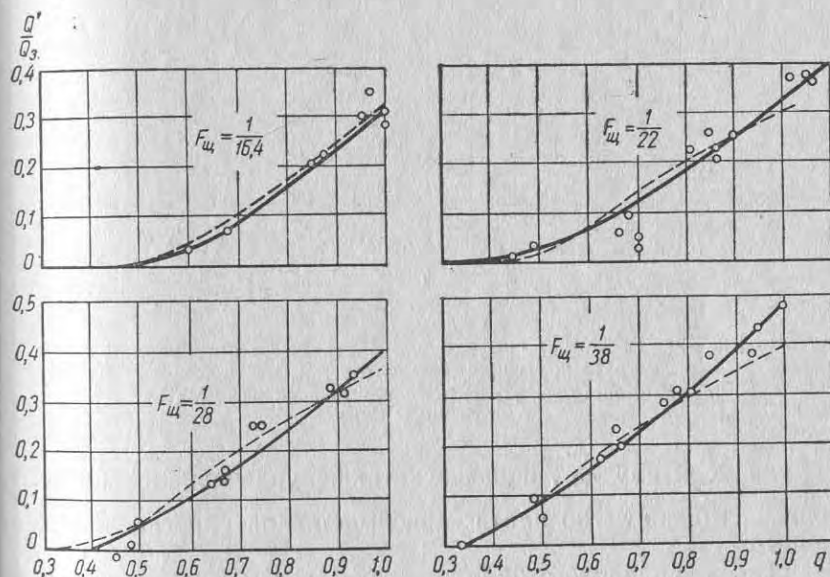


Рис. 26. Опытные данные о потере тепла с частью струи воздушной завесы, уходящей наружу; угол  $\alpha = 30^\circ$

тельного расхода воздуха на завесу. Наибольшие потери наблюдаются при  $q = 1$ . В этом случае они составляют 32—50% от количества тепла, подаваемого в завесу.

Теоретические величины  $\frac{Q'}{Q_s}$ , определенные по формуле (37) (пунктирные кривые), хорошо совпадают с данными опытов (сплошные кривые), если в формуле (37) коэффициент принять равным 2,5.

На основе опытных данных Г. Т. Татарчук построила расчетный график для определения потерь тепла  $\frac{Q'}{Q_s}$  (рис. 27, а).

В случае устройства перед воротами открытого тамбура (рис. 25, б) потери тепла несколько сокращаются (рис. 27, б).

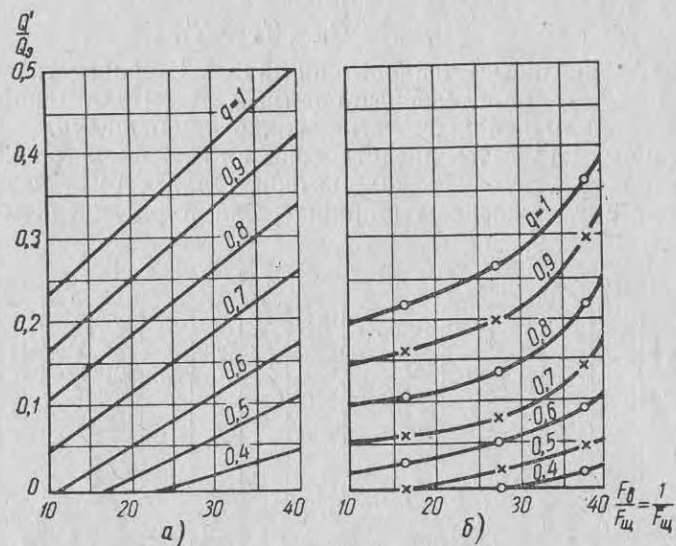


Рис. 27. Расчетные графики для определения потерь тепла струей воздушной завесы с углом  $\alpha = 30^\circ$ :  
а — при отсутствии тамбура; б — при наличии перед завесой открытого тамбура

Зная величину  $\frac{Q'}{Q_s}$ , пользуясь также уравнением теплового баланса, можно легко найти зависимость для определения температуры  $t_s$ .

Уравнение теплового баланса струи завесы в месте ее входа в ворота будет иметь вид

$$\left(1 - \frac{Q'}{Q_s}\right) G_s (t_s - t_n) = G_{np} (t_{cm} - t_n). \quad (39)$$

Величина  $\left(1 - \frac{Q'}{Q_s}\right)$  определяет часть тепла завесы, вносимого струей внутрь цеха.

Из уравнения (39) получаем

$$t_s - t_n = \frac{t_{cm} - t_n}{q \left(1 - \frac{Q'}{Q_s}\right)}. \quad (40)$$

По формуле (40) построены графики (рис. 28). На осях этих графиков отложены разности температур  $t_{cm} - t_n$ ,  $t_s - t_n$ . Графики построены для относительной ширины щели воздушной завесы  $\frac{F_{щ}}{F_0} = 1/10; 1/15; 1/20; 1/30; 1/40$ .

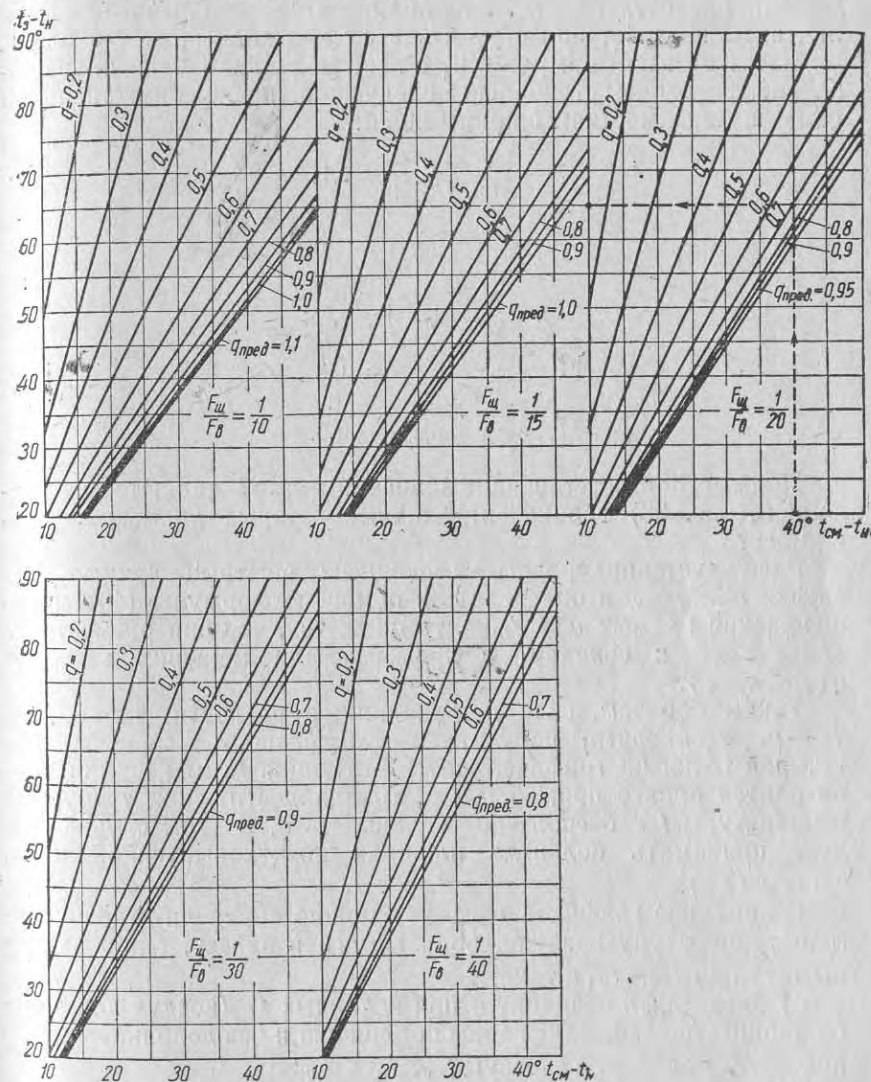


Рис. 28. Графики для определения температуры воздуха, подаваемого в завесу с углом  $\alpha = 30^\circ$ , без тамбура

На графиках рис. 28 проведены прямые для  $q$  от 0,2 до значения, близкого к единице. Интересно отметить, что при определенных предельных значениях  $q$  дальнейшее его увеличение не приводит к повышению разности температур  $t_{см} - t_n$  при данной разности  $t_s - t_n$ . Это объясняется значительным увеличением потерь тепла струей завесы при значениях  $q$  около 1.

Расчетами по формуле (40) с использованием данных графика рис. 28 были установлены следующие предельные значения  $q_{пред}$  в зависимости от ширины щели:

$$\bar{F}_{щ} = \frac{1}{10} \quad q_{пред} = 1,1;$$

$$\bar{F}_{щ} = \frac{1}{15} \quad q_{пред} = 1,0;$$

$$\bar{F}_{щ} = \frac{1}{20} \quad q_{пред} = 0,95;$$

$$\bar{F}_{щ} = \frac{1}{30} \quad q_{пред} = 0,9;$$

$$\bar{F}_{щ} = \frac{1}{40} \quad q_{пред} = 0,8.$$

Прямые, соответствующие значениям  $q_{пред}$ , являются на графиках (рис. 28) граничными, правее которых прямые лежать не могут.

Если экстерполировать имеющиеся опытные данные для случая  $q > q_{пред}$  и определить с помощью формулы (40) место положения прямых  $q > q_{пред}$ , то окажется, что они размещаются левее  $q_{пред}$  и совпадут с прямыми для меньших значений  $q$  ( $q < q_{пред}$ ).

Таким образом, если при заданной разности температур  $t_s - t_n$  необходимо получить такую разность  $t_{см} - t_n$ , при которой точка на графике, соответствующая этим координатам, находится правее прямой  $q_{пред}$ , то для достижения требуемой температуры  $t_{см}$  бесполезно увеличивать  $q$ . В этом случае следует принимать большую площадь воздуховыпускной щели завесы ( $\bar{F}_{щ}$ ).

С помощью графиков (рис. 28) можно определить необходимую температуру воздуха, подаваемого в завесу,  $t_s$  по заданным  $\bar{F}_{щ}$ ,  $q$ ,  $t_{см}$ ,  $t_n$ , а также:

а) определить величину  $q$  при заданных  $t_s$  (воздух для завесы забирается из верхней зоны помещения и без дополнительного подогрева подается в завесу),  $t_{см}$ ,  $t_n$  и  $\bar{F}_{щ}$ ;

б) найти  $\bar{F}_{щ}$  при заданных  $q$ ,  $t_s$ ,  $t_{см}$  и  $t_n$ ;

в) найти  $t_{см}$  при данных  $\bar{F}_{щ}$ ,  $q$ ,  $t_s$  и  $t_n$ .

Необходимо еще раз подчеркнуть, что графики на рис. 26—28 приведены для двусторонних завес с углом  $\alpha = 30^\circ$  С. При уве-

личении угла  $\alpha$  потери тепла несколько возрастут. Пользуясь при расчете формулами (32)—(34) и (37), можно считать, что при угле  $\alpha = 45^\circ$  величина  $\frac{Q'}{Q_s}$  для завесы с той же относительной шириной щели возрастает на 6%, а при угле  $\alpha = 60^\circ$  — на 15%.

Можно предполагать, что у односторонних завес потери тепла при той же относительной ширине щели и угле  $\alpha$  будут несколько меньше, особенно в случае устройства перед завесой открытого тамбура. Однако до проведения экспериментов с односторонними завесами следует принимать потери тепла по данным для двусторонних завес. Ниже приводятся два примера определения температуры воздуха, подаваемого в завесу, с помощью графиков.

**Пример 1.** Определить необходимую температуру воздуха, подаваемого в завесу у ворот цеха с незначительными выделениями тепла. Ворота открываются на короткое время. В районе ворот расположены рабочие места, на которых производится легкая физическая работа. Рабочие места защищены от непосредственного действия потока воздуха. Расчетная температура наружного воздуха  $t_n = -26^\circ$  С, температура в рабочей зоне цеха  $t_{р.з} = 20^\circ$  С. Температура воздуха под потолком, откуда производится забор воздуха для завесы,  $t_{ух} = 23^\circ$  С. Перед завесой нет тамбура. Устраивается двусторонняя завеса с  $\frac{F_{щ}}{F_8} = 1/20$ ,  $\alpha = 30^\circ$  С, принимается  $q = 0,7$ .

**Решение.** В соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями (см. § 5) необходимая температура смеси  $t_{см} = 14^\circ$  С, откуда  $t_{см} - t_n = 14 + 26 = 40^\circ$ .

По графику (рис. 28) для  $\frac{F_{щ}}{F_8} = 1/20$  находим  $t_s - t_n = 65^\circ$ , откуда  $t_s = 65 - 26 = 39^\circ$  С (см. пунктирную линию). Следовательно, необходим подогрев воздуха, подаваемого в завесу.

**Пример 2.** Определить, какую относительную ширину щели  $\frac{F_{щ}}{F_8}$  и минимальную величину  $q$  следует принять при отсутствии перед завесой открытого тамбура, чтобы, не делая дополнительного подогрева воздуха, подаваемого в завесу, обеспечить требуемую температуру  $t_{см} = 14^\circ$  С. Завеса устраивается в горячем цехе; температура воздуха в рабочей зоне  $t_{р.з} = 20^\circ$ , температура воздуха под потолком, откуда производится забор воздуха для завесы,  $t_{ух} = 30^\circ$  С. Расчетная температура наружного воздуха  $t_n = -26^\circ$  С.

**Решение.** Находим  $t_{см} - t_n = 14 + 26 = 40^\circ$  С;  $t_s - t_n = 30 + 26 = 56^\circ$  С.

На номограмме (рис. 28) проводим горизонтальную линию, соответствующую  $t_3 - t_n = 56^\circ \text{C}$ . Видим, что при  $\frac{F_{ш}}{F_a} = 1/40, 1/30$  и  $1/20$  точки пересечения этой линии с вертикальными линиями, соответствующими  $t_{см} - t_n = 40^\circ \text{C}$ , лежат правее прямых  $q_{пред}$ . При  $\frac{F_{ш}}{F_a} = 1/15$  и  $1/10$  точки пересечения указанных линий лежат в пределах графика, и, следовательно, можно предложить два варианта решения, обеспечивающие требуемую температуру смеси.

$$1\text{-й вариант: } \frac{F_{ш}}{F_a} = \frac{1}{15}; \quad q = 0,93;$$

$$2\text{-й вариант: } \frac{F_{ш}}{F_a} = \frac{1}{10}; \quad q = 0,8.$$

Зная температуру воздуха, подаваемого в завесу, можно определить необходимый расход тепла для подогрева этого воздуха.

Расход тепла на воздушную завесу определяется по формуле

$$Q = G_3 \cdot 0,24 (t_3 - t_{нач}) \text{ ккал/ч,} \quad (41)$$

где  $t_{нач}$  — температура воздуха, забираемого для завесы.

При расположении воздухозабора для завесы в помещении у пола, вблизи ворот, можно считать  $t_{нач} = t_{см}$ ; при расположении воздухозабора на площадке над воротами  $t_{нач} = t_{вн}$  и при заборе воздуха для завесы из верхней зоны помещения  $t_{нач} = t_{ух}$ .

В случаях, когда  $t_{см} < t_{вн}$ , необходим дополнительный расход тепла, который восполняется системой отопления, он равен

$$Q_{доп} = G_{пр} \cdot 0,24 (t_{вн} - t_{см}) \text{ ккал/ч.} \quad (42)$$

## § 7. РАСЧЕТНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА И СКОРОСТИ ВЕТРА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС

Воздушные завесы как отопительное устройство следует проектировать на температуру наружного воздуха, расчетную для отопления.

Однако многие авторы рекомендуют рассчитывать завесы на более высокую температуру наружного воздуха исходя из следующих соображений.

Если в завесы с забором воздуха из помещения подавать объем воздуха, рассчитанный для минимальной температуры, при более высоких температурах, завесой будет выбрасываться наружу значительное количество теплого воздуха. При расчете завесы на минимальную температуру такой выброс теплого

воздуха будет происходить в течение почти всего отопительного сезона. Если же рассчитывать завесу на более высокую температуру наружного воздуха  $t_{расч.з}$ , то выброс теплого воздуха будет происходить меньшее время (только при  $t_n > t_{расч.з}$ ). Но при температуре наружного воздуха ниже принятой расчетной температуры для завесы  $t_{расч.з}$  в помещение будет врываться холодный воздух, на нагрев которого потребуется затратить большое количество тепла. Можно найти такую расчетную температуру наружного воздуха, при которой сумма потерь тепла на подогрев взрывающегося воздуха при  $t_n < t_{расч.з}$  и на выброс теплого воздуха при  $t_n > t_{расч.з}$  за время отопительного периода будет минимальна.

Такие расчеты были произведены в Трансэлектропроекте. Однако с этими расчетами нельзя согласиться. Так, если принять в качестве расчетной температуры более высокую, чем зимняя расчетная для отопления, то температура воздуха в помещении, около ворот, которая требуется санитарными нормами, не будет обеспечена. Для того чтобы избежать потери тепла завесой, необходимо осуществить автоматическое регулирование количества воздуха, подаваемого в завесу в зависимости от температуры наружного воздуха.

Как правило, воздушные завесы у ворот, дверей рассчитываются только на действие теплового напора, действие же ветра не учитывается. Это допустимо, так как обычно тепловой напор при расчетной для отопления температуре наружного воздуха значительно больше ветрового давления. Однако, когда здание стоит на открытой местности и скорость ветра значительна, необходимо учитывать действие ветра. В этом случае за расчетную скорость ветра следует принимать среднюю скорость за три наиболее холодных месяца.

## § 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА, ПРОХОДЯЩЕГО ЧЕРЕЗ ВОРОТА И ДВЕРИ, ЗАЩИЩЕННЫЕ ЗАВЕСОЙ, И КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА ДЛЯ ЗАВЕСЫ ПРИ СБАЛАНСИРОВАННЫХ РАСХОДАХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Количество воздуха, проходящего через ворота, защищенные завесой, определяется по формуле расчета аэрации зданий

$$G_{пр} = \mu F_a \sqrt{2g (P_2 - P_1) \gamma_{см}} \text{ кг/сек.} \quad (43)$$

Примем давление снаружи на высоте середины ворот ( $P_2$ ) за нулевое, а давление с внутренней стороны на том же уровне обозначим через  $P_x$  ( $P_1 = P_x$ ), как и при расчете аэрации, тогда

$$G_{пр} = \mu F_a \sqrt{2g (-P_x) \gamma_{см}} \text{ кг/сек.} \quad (44)$$

Величина разрежения ( $P_x$ ) находится из уравнения воздушного баланса.

В общем случае, когда, кроме ворот и фонаря, имеются еще другие приточные и вытяжные отверстия (двери, щели в окнах, открытые отверстия в наружных ограждениях), расположенные на разных высотах, здание обдувается ветром, и нет соответствия между притоком и вытяжкой, уравнение воздушного баланса по отношению к неизвестному  $P_x$  получается в третьей и даже в более высокой степени. Оно может быть решено только приближенно.

Для решения таких уравнений подставляют ряд значений  $P_x$  и находят такое его значение, при котором уравнение воздушного баланса превращается в тождество. Такой расчет может быть сведен в таблицу, так как это делается при расчете аэрации.

Рассмотрим случаи, когда расходы воздуха механической приточной и вытяжной вентиляции равны между собой:

$$G_{\text{выт}}^{\text{мех}} = G_{\text{прит}}^{\text{мех}} \quad (45)$$

и взрывание воздуха через ворота происходит только под действием теплового напора.

При заборе воздуха для завесы из помещения уравнение воздушного баланса будет иметь вид

$$G_{\text{пр}} + G_{\text{прит}} - G_{\text{выт}} - G_s = 0, \quad (46)$$

где  $G_{\text{прит}}$  и  $G_{\text{выт}}$  — количество воздуха, поступающего в помещение и уходящего из него через щели и отверстия естественным путем под действием теплового напора;

$G_{\text{прит}}^{\text{мех}}$  и  $G_{\text{выт}}^{\text{мех}}$  — количество воздуха, подаваемого и удаляемого из помещения механической вентиляцией.

Решим уравнение (46) для конкретных часто встречающихся случаев.

**1. Высокое здание с фонарями и окнами; зимой в зданиях избытков тепла нет, створки фонарей и окон в основном закрыты (рис. 29).**

Для упрощения расчетов будем считать, что середина окон, через щели которых поступает наружный воздух, находится примерно на высоте середины ворот. Такое упрощение не вызывает заметной ошибки, так как через щели, расположенные выше ворот, ближе к нейтральной зоне (см. линию А—А на рис. 29), проходит мало воздуха ввиду незначительной площади щелей и малого теплового напора. Поэтому в расчет вводится только площадь щелей окон, расположенных в рабочей зоне.

При ошибке в сторону увеличения количества воздуха (проходящего через ворота), не превышающей 5%, за среднюю скорость в воротах можно считать скорость, соответствующую разрежению на высоте середины ворот ( $P_x$ ).

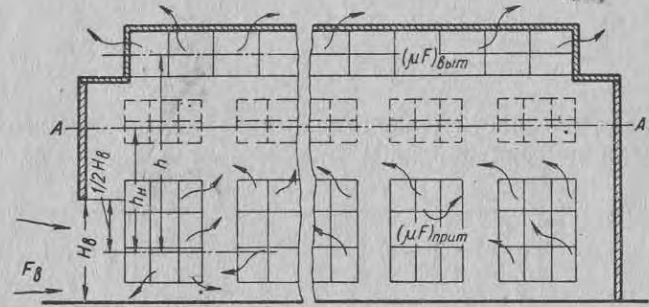


Рис. 29. Производственное здание с фонарями и окнами, створки которых в зимнее время закрыты

С учетом этого уравнение воздушного баланса (46) запишется в виде

$$\mu F_s \sqrt{2g(-P_x) \gamma_{сн}} + (\mu F)_{\text{прит}} \sqrt{2g(-P_x) \gamma_n} - (\mu F)_{\text{выт}} \sqrt{2g(h \Delta \gamma + P_x) \gamma_{yx}} - G_s = 0, \quad (47)$$

где  $h$  — расстояние от середины ворот до середины створки фонаря в м;

$(\mu F)_{\text{прит}}$  — суммарная площадь приточных отверстий и щелей в окнах, умноженная на коэффициент расхода, в м<sup>2</sup>;

$(\mu F)_{\text{выт}}$  — суммарная площадь вытяжных отверстий и щелей в створках фонаря в м<sup>2</sup>;

$\Delta \gamma = \gamma_n - \gamma_s$  — разность удельных весов наружного и внутреннего воздуха в кг/м<sup>3</sup>;

$P_x$  — разрежение в цехе на высоте середины ворот в кг/м<sup>2</sup>.

В данном случае, когда не учитывается действие ветра, может быть введено понятие нейтральной зоны, и величина  $P_x$  будет равна

$$P_x = -h_{н.с} \Delta \gamma, \quad (48)$$

где  $h_{н.с}$  — высота расположения нейтральной зоны над уровнем середины ворот в м.

Используя формулу (48) и обозначив  $q = \frac{G_s}{G_{np}}$ , после преобразований получим

$$\begin{aligned} & \left[ (1-q) \mu F_s \sqrt{\frac{\gamma_{см}}{\gamma_n}} + (\mu F)_{прит} \right] \sqrt{h_{н.з}} = \\ & = (\mu F)_{выт} \sqrt{(h - h_{н.з}) \frac{\gamma_{yx}}{\gamma_n}}. \end{aligned} \quad (49)$$

Возведя обе части равенства в квадрат, найдем высоту расположения нейтральной зоны

$$h_{н.з} = \frac{h}{\left[ \frac{\mu F_s}{(\mu F)_{выт}} (1-q) \sqrt{\frac{\gamma_{см}}{\gamma_n}} + \frac{(\mu F)_{прит}}{(\mu F)_{выт}} \right]^2 \frac{\gamma_n}{\gamma_{yx}} + 1} \text{ м.} \quad (50)$$

Зная высоту нейтральной зоны, можно легко определить расход воздуха, проходящего через ворота, защищенные завесой

$$G_{np} = 3600 \mu F_s \sqrt{2gh_{н.з} \Delta\gamma \cdot \gamma_{см}} \text{ кг/ч,} \quad (51)$$

и необходимый расход воздуха на завесу

$$G_s = q G_{np} \text{ кг/ч.} \quad (52)$$

Для упрощения расчетов во всех случаях, когда объемные веса воздуха входят в формулы как множители, могут быть приняты следующие их средние цифровые значения:  $\gamma_n = \gamma_{-26} = 1,429 \text{ кг/м}^3$ ;  $\gamma_{см} = \gamma_{+12} = 1,239 \text{ кг/м}^3$ ;  $\gamma_{yx} = \gamma_{+21} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ .

Как показали расчеты, при обычно возможном отклонении действительных объемных весов от указанных выше ошибка не превышает  $\pm 2\%$ . Исходя из этого уравнение (50) можно упростить, записав его в виде

$$h_{н.з} = \frac{h}{(1,052 B)^2 + 1} \text{ м,} \quad (50')$$

где  $B$  — отношение площади приточных проемов к площади вытяжных,

$$B = \frac{\mu F_s (1-q) + (\mu F)_{прит}}{(\mu F)_{выт}}. \quad (53)$$

Если забор воздуха для завесы производится снаружи, то

$$B = \frac{\mu F_s + (\mu F)_{прит}}{(\mu F)_{выт}}. \quad (54)$$

Для облегчения расчетов по формулам (50) и (51) составлена номограмма (см. рис. 30).

При расчетах по формулам (50) и (53) при определении

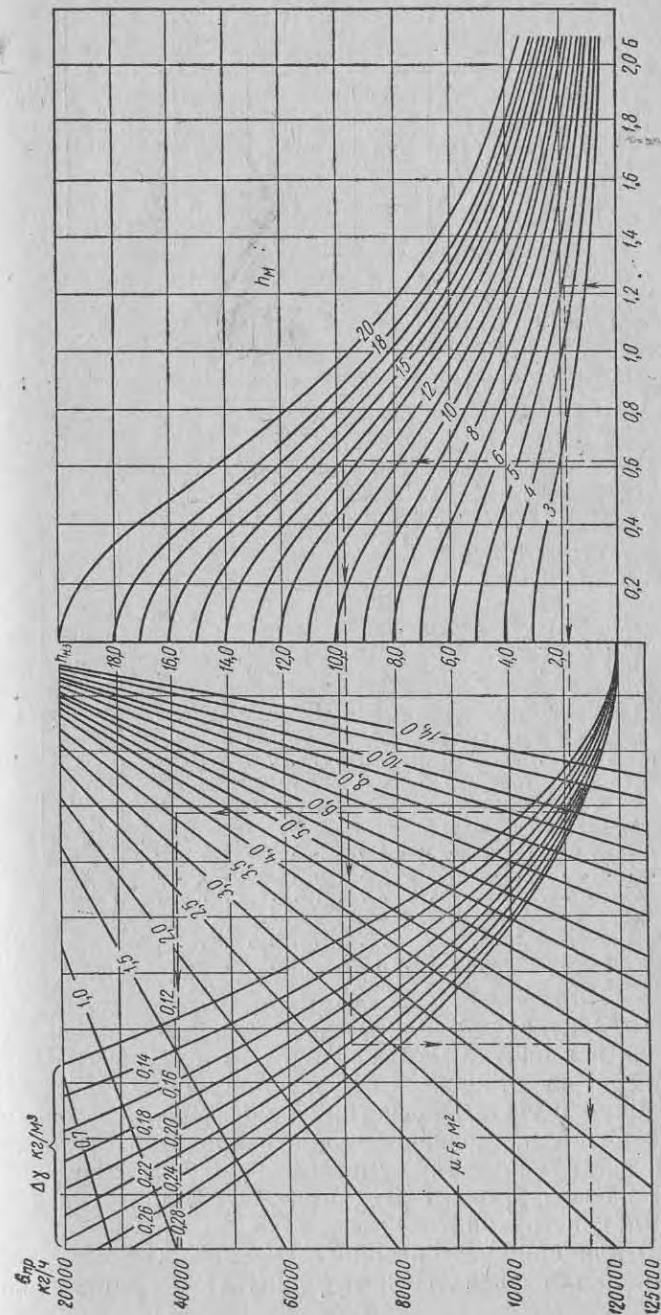


Рис. 30. Номограмма I для расчета воздушных завес при сбалансированных расходах приточной и вытяжной механической вентиляции при расположении нейтральной зоны выше ворот



Таблица 4

Деревянные рамы				Металлические рамы				Двери и ворота
Одинарные		Двойные		Одинарные		Двойные		
Окна в рабочей зоне	В верхнем свете и в фонарях	Окна в рабочей зоне	В верхнем свете и в фонарях	Окна в рабочей зоне	В верхнем свете и в фонарях	Окна в рабочей зоне	В верхнем свете и в фонарях	
0,003	0,005	0,002	0,003	0,002	0,004	0,0012	0,0025	0,010

Примечания: 1. Большие значения площадей щелей в фонарях и верхнем свете по сравнению с окнами в рабочей зоне приняты исходя из того, что последние обычно более тщательно закрываются на зиму, чем первые.  
2. Как показал опыт, для существующих зданий с плохим состоянием рам в окнах и фонарях величины, приведенные в табл. 4, нужно увеличивать в 1,5 — 2 раза.  
3. Без большой погрешности для упрощения расчетов можно не учитывать щели в окнах, расположенных вблизи нейтральной зоны АА (см. окна, изображенные пунктиром на рис. 29).

Таблица 5

Коэффициенты сопротивления  $\zeta$  и расхода воздуха  $\mu$  для наиболее распространенных типов фонарей и других отверстий

Тип отверстия	$\zeta$	$\mu$
П-образный фонарь с открытием створок:		
на 70°	5,8	0,42
на 35°	11,5	0,3
Фонарь КТИС	4,3	0,48
Приточные окна с одинарными среднеподвесными створками, открытыми:		
на 60°	3,2	0,56
на 30°	13,6	0,27
Приточные окна с двойными створками на верхнем и нижнем подвесах, открытые на угол:		
60°	3,6	0,53
30°	9,8	0,32
15°	31,0	0,18
Проемы в стенах:		
с острыми кромками	2,4	0,64
со скругленными кромками	1,55	0,80

$(\mu F)_{прит}$  и  $(\mu F)_{выт}$  следует учитывать щели в притворах створок в фонарях и в окнах, а также открытые при расчетной наружной температуре створки в фонаре и проемы в наружных стенах. В табл. 4 с учетом расчетных данных [20] и измерений, проведенных автором, приведены ориентировочные величины площади щелей в квадратных метрах на 1 пог. м притвора, умноженные на коэффициент расхода воздуха, для окон и дверей различных конструкций.

В табл. 5 для наиболее распространенных типов фонарей и других отверстий указаны коэффициенты сопротивления  $\zeta$

и коэффициенты расхода воздуха  $\mu$ , которые следует принимать при расчете.

В существующих зданиях суммарную площадь щелей в притворах окон и фонарей можно легко определить опытным путем, не прибегая при этом к чрезвычайно кропотливому измерению ширины щелей у каждой рамы (см. § 20).

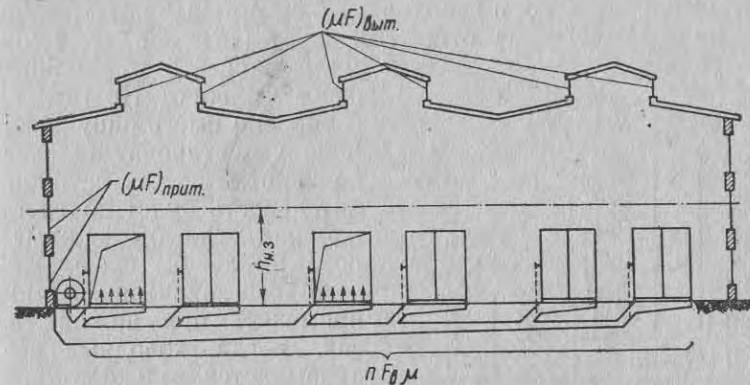


Рис. 31. Здание с несколькими воротами на одном фасаде

II. Высокое здание с фонарями и окнами; зимой в здании избытка тепла нет; створки фонарей и окон в основном закрыты. Здание имеет ряд ворот (рис. 31) значительной суммарной площади. Площадь щелей в приточных окнах и вытяжных отверстий во много раз меньше суммарной площади открытых ворот. Здание высокое, нейтральная зона проходит выше ворот, воздух входит в цех через всю площадь ворот.

Найдем формулу для суммарного количества воздуха, проходящего через все открытые ворота ( $\Sigma G_{пр}$ ). Преобразуем формулы (50) и (51) так, чтобы определяющим первым сомножителем была «живая» площадь вытяжных отверстий  $(\mu F)_{выт}$ :

$$\Sigma G_{пр} = (\mu F)_{выт} \times \sqrt{\frac{2gh \gamma_{см} \Delta \gamma}{\left[ (1-q) \sqrt{\frac{\gamma_{см}}{\gamma_n} + \frac{(\mu F)_{прит}}{n \mu F_v}} \right]^2 \frac{\gamma_n}{\gamma_{yx}} + \left[ \frac{(\mu F)_{выт}}{n \mu F_v} \right]^2}} \quad \text{кг/сек,} \quad (55)$$

где  $n$  — число открытых ворот.

Анализируя уравнение (55), устанавливаем, что если принимать значение  $q$  не больше 0,6 при заборе воздуха для завесы из помещения или производить для завесы забор наружного воздуха, то величины  $\frac{(\mu F)_{прит}}{n \mu F_v}$  и  $\frac{(\mu F)_{выт}}{n \mu F_v}$  будут малы по

сравнению с  $(1-q) \sqrt{\frac{\gamma_{см}}{\gamma_n}}$  и их можно не учитывать.

Следовательно, количество воздуха, проходящего в данный момент через все открытые ворота, будет пропорционально площади открытых вытяжных отверстий и будет мало зависеть от количества открытых ворот. Таким образом, количество воздуха, проходящего через все открытые ворота, будет почти таким же, как через одни, двое, трое или даже пять, шесть ворот. Следовательно, и необходимый суммарный объем воздуха, подаваемого в завесы у открытых ворот ( $\Sigma G_s = q \Sigma G_{np}$ ), будет

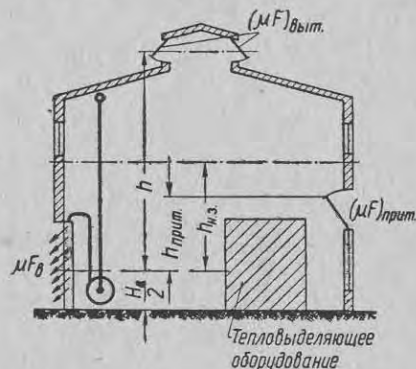


Рис. 32. Производственное здание с большими убытками тепла и с использованием аэрации в зимнее время

мало зависеть от количества открытых ворот. Поэтому целесообразно иметь одну вентиляционную установку на несколько ворот, так как ее производительность будет почти такой же, как если бы каждые ворота имели бы свою.

Малые значения  $q$  можно применять при нижних завесах, когда холодный воздух прорывается только в верхней части ворот. Забор воздуха для завесы снаружи также приводит к тому, что меньше меняется необходимый расход воздуха на завесу в зависимости от количества открытых ворот.

В § 14 в примере 3 разработан

данный случай и показано, что применение одной установки на несколько ворот значительно сокращает капитальные и эксплуатационные расходы.

Однако, если нейтральная зона находится в пределах высоты ворот, данные рассуждения не имеют силы. Необходимо также отметить, что при  $q$ , близком к единице, и заборе воздуха для завесы из помещения также не будет иметь место указанное явление.

**III. Высокое здание с окнами, фонарями или шахтами; избытки тепла в зимнее время значительны, и для их удаления применяется аэрация (рис. 32).**

Несмотря на значительные избытки тепла, имеющиеся в таких зданиях как мартеновские, прокатные, в отдельных кузнечных и литейных цехах в рабочей зоне у открытых ворот температура зимой опускается ниже нуля градусов. Это во многих случаях вызывает простудные заболевания рабочих, приводит к нарушению технологического режима цеха и выходу из строя оборудования, в котором имеются легко замерзающие жидкости (вода, масло и т. п.). Поэтому в этих цехах также необходимо устройство у ворот воздушных завес. Для притока чистого

воздуха в таких цехах створки в окна открываются на высоте 4—6 м в местах расположения тепловыделяющего оборудования, а для удаления нагретого и загрязненного воздуха — створки в фонаре (см. рис. 32).

В рассматриваемом случае приточные окна значительной площади расположены выше середины ворот, и поэтому пользоваться для расчета воздушных завес формулой (50) или (50') нельзя, так как они выведены из предположения, что приточные окна расположены на высоте середины ворот. Для данного случая простого алгебраического решения получить нельзя, и расчет надо производить, как это указывалось выше, подставкой ряда значений  $P_x$  до тех пор, пока уравнение воздушного баланса не превратится в тождество.

Но если площадь открытых приточных отверстий велика и  $(\mu F)_{прит} \gg \mu F_s (1 - q)$ , то при определении величины  $P_x$  или (что то же самое) при определении высоты нейтральной зоны можно не принимать во внимание величину  $\mu F_s (1 - q)$ . Тогда формула для нахождения высоты нейтральной зоны будет иметь вид

$$h_{н.з} = \frac{h - h_{прит}}{\left[ \frac{(\mu F)_{прит}}{(\mu F)_{выт}} \right]^2 \frac{\gamma_n}{\gamma_{yx}} + 1} + h_{прит} \quad (56)$$

где  $h_{прит}$  — высота расположения середины приточных окон над серединой ворот в м (см. рис. 32).

Беря, как и прежде, определенное значение удельных весов воздуха, когда они входят в формулу, как отношения, получим

$$h_{н.з} = \frac{h - h_{прит}}{\left[ 1,1 \frac{(\mu F)_{прит}}{(\mu F)_{выт}} \right]^2 + 1} + h_{прит} \quad (56')$$

В формулах (56) и (56'), кроме указанных выше величин,  $h_{прит}$  — высота расположения середины приточных створок над серединой ворот в м.

Площадь приточных проемов рекомендуется принимать больше площади вытяжных  $(\mu F)_{прит} \approx 1,5 (\mu F)_{выт}$ .

Проемы для притока воздуха открывать на высоте 4—6 м в местах расположения тепловыделяющего оборудования и отсутствия рабочих мест.

Формулы (56) и (56') дают несколько преувеличенные значения  $h_{н.з}$ ; ошибка тем меньше, чем  $(\mu F)_{прит}$  больше  $\mu F_s (1 - q)$ . При  $\mu F_{прит} \geq 20 \mu F_s (1 - q)$  ошибка в конечном результате при определении  $G_{np}$  будет меньше 5%.

IV. Здания с большими воротами и без фонарей (например, электровозные депо, гаражи, ангары и т. п.) (рис. 33).

В этом случае, как правило, даже при работе завесы с забором воздуха из помещения (рис. 34, а) нейтральная зона проходит через ворота и верхняя часть ворот работает на вытяжку.

Принимая, как и прежде, что объем механического притока соответствует объему механической вытяжки, напишем уравнение воздушного баланса для этого случая

$$G_{\text{нижн}} - G_{\text{верхн}} - G_s = 0. \quad (57)$$

Рассмотрим сначала случай с забором воздуха для завесы из помещения. Ввиду того, что нейтральная зона АА проходит

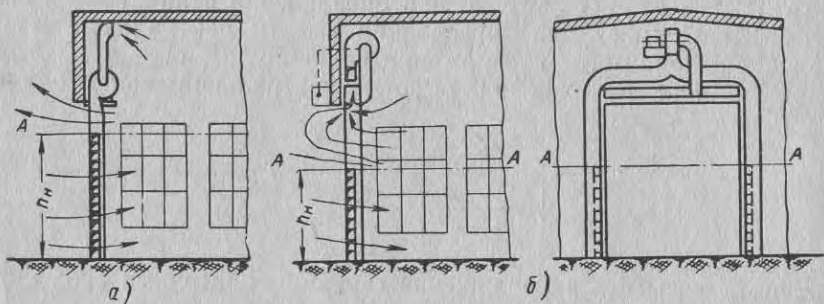


Рис. 33. Устройство воздушной завесы в низких зданиях без фонарей и верхнего света:

а — завеса с забором воздуха из верхней зоны помещения; б — завеса с забором воздуха на воротах

невысоко, близко к середине щелей в окнах, для упрощения расчетов можно пренебречь количеством воздуха, проходящего через эти щели.

В уравнении (57) через  $G_{\text{нижн}}$  обозначен расход воздуха, входящего в помещение через нижнюю часть ворот:

$$G_{\text{нижн}} = B \psi_{\text{нижн}} \int_0^{h'_{н.з}} \sqrt{2g(-P_x - h\Delta\gamma) \gamma_{см}} dh \text{ кг/сек}, \quad (58)$$

а через  $G_{\text{верхн}}$  — расход воздуха, выходящего через верхнюю часть ворот:

$$G_{\text{верхн}} = B \psi_{\text{верхн}} \int_{h'_{н.з}}^{H_в} \sqrt{2g(h\Delta\gamma + P_x) \gamma_{ух}} dh \text{ кг/сек}, \quad (59)$$

где  $B$  — ширина ворот;  $\psi_{\text{нижн}}$  и  $\psi_{\text{верхн}}$  — соответственно коэффициенты расхода воздуха для нижней и верхней частей ворот;

$h'_{н.з}$  — высота нейтральной зоны от уровня пола в м;  $P_x$  — давление в здании на уровне пола  $P_x = -h'_{н.з} \Delta\gamma$ .

Обозначим через

$$q = \frac{G_s}{G_{\text{нижн}}}; \quad (60)$$

тогда уравнение (57) видоизменится:

$$(1 - q) G_{\text{нижн}} - G_{\text{верхн}} = 0, \quad (61)$$

и после подстановки значений  $G_{\text{нижн}}$  и  $G_{\text{верхн}}$  из уравнений (58) и (59) получим

$$(1 - q) \psi_{\text{нижн}} \int_0^{h'_{н.з}} \sqrt{(-P_x - h\Delta\gamma) \gamma_{см}} dh - \psi_{\text{верхн}} \times \\ \times \int_{h'_{н.з}}^{H_в} \sqrt{(P_x - h\Delta\gamma) \gamma_{ух}} dh = 0.$$

Произведя интегрирование, найдем

$$(1 - q) \psi_{\text{нижн}} \left( \frac{\gamma_{см}}{\gamma_{ух}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(-P_x - h\Delta\gamma)^{\frac{3}{2}}}{\Delta\gamma} \Big|_0^{h'_{н.з}} - \psi_{\text{верхн}} \frac{(P_x - h\Delta\gamma)^{\frac{3}{2}}}{\Delta\gamma} \Big|_{h'_{н.з}}^{H_в} = 0.$$

Сделав подстановку пределов и значения  $P_x$ , определим высоту расположения нейтральной зоны:

$$h'_{н.з} = \frac{H_в}{1 + (1 - q)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\psi_{\text{нижн}}}{\psi_{\text{верхн}}} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\gamma_{см}}{\gamma_{ух}} \right)^{\frac{1}{3}}} \text{ м}. \quad (62)$$

Количество воздуха, входящего в цех через нижнюю часть ворот, будет равняться

$$G_{\text{нижн}} = \frac{2}{3} B h'_{н.з} \psi_{\text{нижн}} \sqrt{2g h'_{н.з} \Delta\gamma \gamma_{см}} \text{ кг/сек}, \quad (63)$$

и количество воздуха, которое надлежит подавать в завесу, составит

$$G_s = q G_{\text{нижн}}. \quad (64)$$

Принимая, как это было сделано выше, определенные значения величин объемного веса воздуха, когда эти величины

входят как множители и считая  $\mu_{\text{верхн}} = 0,6$ , можно существенно упростить формулы (62) и (63):

$$G_{\text{нижн}} = 11\,850 B \mu_{\text{нижн}} (h'_{\text{н.з}})^{3/2} (\Delta\gamma)^{1/2} \text{ кг/ч}, \quad (63')$$

где  $11\,850 = \frac{2}{3} \cdot 3600 \sqrt{2g\gamma_{\text{см}}} = \frac{2}{3} \cdot 3600 \sqrt{19,62 \cdot 1,239}$ ;

$$h'_{\text{н.з}} = \frac{H_{\theta}}{1 + 1,42E^{2/3}}, \quad (62')$$

где  $1,42 = \left(\frac{1}{0,6}\right)^{2/3} \left(\frac{\gamma_{\text{см}}}{\gamma_{\text{ух}}}\right)^{1/3} = \left(\frac{1}{0,6}\right)^{2/3} \left(\frac{1,239}{1,2}\right)^{1/3}$ ;

$E = (1 - q) \mu_{\text{нижн}}$  — при заборе воздуха для завес из помещения;

$E = \mu_{\text{нижн}}$  — при заборе воздуха для завесы снаружи.

На рис. 34 (номограмма II) дано графическое решение уравнений (62') и (63').

При заборе воздуха на завесу из помещения, когда  $q = 1$ , формула (63) упрощается,  $h'_{\text{н.з}} = H_{\theta}$ , количество воздуха, проходящего через ворота, будет равно

$$G_{\text{нижн}} = \frac{2}{3} B H_{\theta} \mu_{\text{нижн}} \sqrt{2gH_{\theta}\Delta\gamma\gamma_{\text{см}}}; \quad (63'')$$

$G_{\text{верхн}} = 0$  [см. уравнение (61)].

Но если  $q < 1$ , то через верхнюю часть ворот будет выходить воздух даже при действии завесы. Сделав забор воздуха для завесы снаружи над воротами (рис. 34, б) (воздуховод вычерчен пунктиром), можно использовать этот теплый воздух.

Так как забор воздуха в таком случае производится не из помещения, а снаружи, то формула (62) примет вид

$$h'_{\text{н.з}} = \frac{H_{\theta}}{1 + 1,42\mu_{\text{нижн}}^{2/3}}. \quad (65)$$

Величина  $h'_{\text{н.з}}$ , определенная по формуле (65), будет меньше, чем по формуле (62). Следовательно, будет меньше и количество воздуха, проходящего через нижнюю половину ворот, и необходимый расход воздуха, подаваемого в завесу.

С точки зрения аэродинамики не имеет значения, где расположить над воротами воздуховод для забора воздуха — снаружи или изнутри. В обоих случаях имеющийся в здании тепловой напор в такой же мере будет тратиться на создание скорости потока воздуха в верхней части ворот. Поэтому будем располагать этот воздуховод с внутренней стороны над воротами (см. рис. 34, б, воздуховод, обозначенный сплошной линией). При

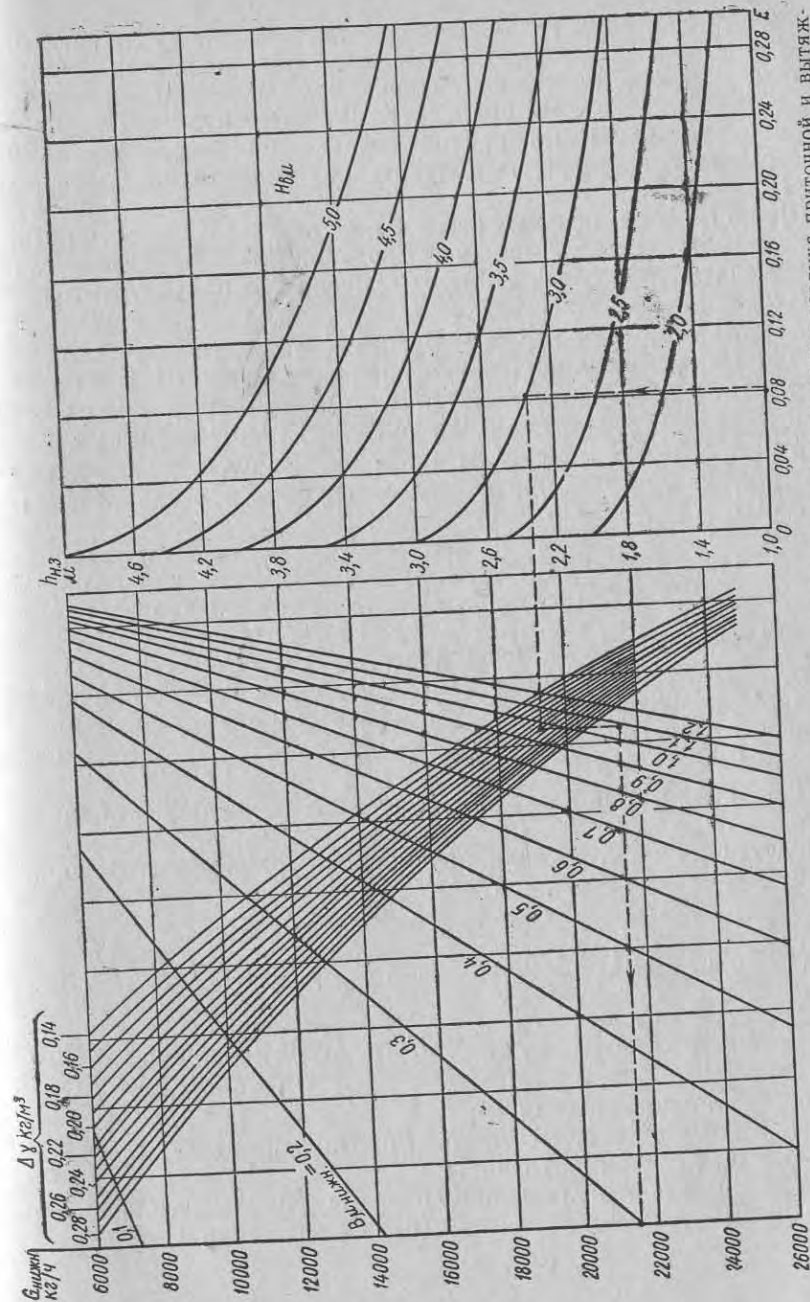


Рис. 34. Номограмма II для расчета воздушных завес при сбалансированных расходах воздуха приточной и вытяжной вентиляции и при расположении нейтральной зоны в пределах высоты ворот

таким расположении воздуховода создается лучшая защита от случайных порывов ветра, которые могут размыть поток теплого воздуха. Устройство забора воздуха над воротами в случае, когда верхняя их часть «работает на вытяжку», значительно уменьшает необходимый расход воздуха на завесу и, таким образом, дает возможность получить экономию тепла и электроэнергии.

При устройстве боковых завес в воротах, верхняя часть которых «работает на вытяжку», воздуховыпускные щели следует делать от пола до высоты расположения нейтральной зоны  $h'_{н.з}$ .

V. В низком здании с большими воротами имеются вытяжные шахты или фонари. Однако площадь вытяжных шахт или открытых фрамуг в фонаре невелика и нейтральная зона не выходит за пределы высоты ворот ( $h'_{н.з} < H_a$ ). Расходы воздуха механической приточной и вытяжной вентиляцией равны (рис. 35).

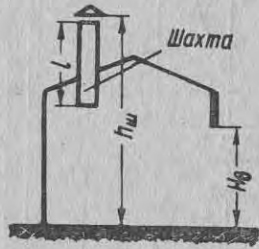


Рис. 35. Низкое здание с вытяжными шахтами и большими воротами

В данном случае воздух будет входить так же, как и в рассмотренном нами IV случае, только через нижнюю часть ворот, а выходить через верхнюю часть ворот и через шахты. Уравнение воздушного баланса будет иметь вид (при заборе воздуха для завесы из помещения)

$$G_{нижн} + G_{верхн} - G_{ш} - G_{з} = 0, \quad (66)$$

где  $G_{ш}$  — количество воздуха, удаляемого из цеха через шахты, в кг/ч.

Подставляя вместо величин, входящих в уравнение (66), соответствующие выражения, получим

$$\frac{2}{3} (1 - q) \mu_{нижн} B h'_{н.з} \frac{3}{2} \sqrt{2g\Delta\gamma \cdot \gamma_{см}} - \frac{2}{3} B \mu_{верхн} (H_a - h'_{н.з}) \frac{2}{3} \times \\ \times \sqrt{2g\Delta\gamma \cdot \gamma_{ух}} - \frac{F_{ш}}{\sqrt{\zeta_{ш}}} \sqrt{2g(h_{ш} - h'_{н.з})\Delta\gamma \cdot \gamma_{ух}} = 0, \quad (67)$$

где  $F_{ш}$  — площадь шахты в  $m^2$ ;

$\zeta_{ш}$  — коэффициент местного сопротивления шахты (включая потери на трение);

$h_{ш}$  — высота от пола цеха до верха шахты в м (см. рис. 35).

Разделим все члены уравнения (67) на выражение

$$\frac{2}{3} \frac{F_{ш} h'_{н.з}}{H_a \sqrt{\zeta_{ш}}} \sqrt{2g h'_{н.з} \Delta\gamma \cdot \gamma_{ух}}$$

Приняв следующие обозначения:  $\bar{h}'_{н.з} = \frac{h'_{н.з}}{H_a}$ ;  $\bar{h}_{ш} = \frac{h_{ш}}{H_a}$  и

$$\bar{F}_{ш} = \frac{F_{ш}}{\sqrt{\zeta_{ш}} F_a}, \text{ найдем}$$

$$(1 - q) \mu_{нижн} \sqrt{\frac{\gamma_{см}}{\gamma_{ух}} \frac{1}{F_{ш}} - \frac{\mu_{верхн}}{\bar{F}_{ш}} \left( \frac{1}{\bar{h}'_{н.з}} - 1 \right)^{\frac{3}{2}}} - \\ - \frac{3}{2 \bar{h}'_{н.з}} \sqrt{\frac{\bar{h}_{ш}}{\bar{h}'_{н.з}} - 1} = 0. \quad (67')$$

Принимая  $\gamma_{см} = 1,2 \text{ кг/м}^3$  и  $\gamma_{ух} = 1,428 \text{ кг/м}^3$ ,  $\mu_{верхн} = 0,6$ , получим

$$(1 - q) \frac{\mu_{нижн}}{\bar{F}_{ш}} - \frac{0,551}{\bar{F}_{ш}} \left( \frac{1}{\bar{h}'_{н.з}} - 1 \right)^{\frac{3}{2}} - \frac{1,376}{\bar{h}'_{н.з}} \sqrt{\frac{\bar{h}_{ш}}{\bar{h}'_{н.з}} - 1} = 0. \quad (68)$$

Дополнительно примем

$$A_1 = \frac{0,551}{\bar{F}_{ш}} \left( \frac{1}{\bar{h}'_{н.з}} - 1 \right)^{\frac{3}{2}}; \\ A_2 = - \frac{1,376}{\bar{h}'_{н.з}} \sqrt{\frac{\bar{h}_{ш}}{\bar{h}'_{н.з}} - 1}; \quad L = \frac{(1 - q) \mu_{нижн}}{\bar{F}_{ш}}$$

При заборе воздуха для завесы снаружи или изнутри над воротами

$$L = - \frac{\mu_{нижн}}{\bar{F}_{ш}}$$

Тогда получим

$$A_2 + L = A_1. \quad (68')$$

Это уравнение можно легко решить с помощью номограммы III (рис. 36).

На номограмме нанесены два семейства кривых  $A_1$ , зависящих от  $\bar{F}_{ш}$  и  $h'_{н.з}$ , и  $A_2$ , зависящих от  $\bar{h}_{ш}$  и  $h'_{н.з}$ , на оси ординат отложены значения  $\bar{h}'_{н.з}$ , а на оси абсцисс — величина  $L$ .

Искомое значение  $\bar{h}'_{н.з}$  определяем исходя из условия, при котором уравнение (68') превращается в тождество.

Легче всего решить уравнение (68'), если скопировать на кальку семейство кривых  $A_1$ . Сдвигая скопированный первый квадрант номограммы влево на определенную для каждого случая величину на пересечении кривых, соответствующих заданным  $\bar{F}_{ш}$  и  $\bar{h}_{ш}$ , находим точку, ордината которой определяет значение  $\bar{h}'_{н.з}$ .

Если имеются фонари с открытыми створками, то вместо  $\frac{F_{ш}}{\sqrt{\zeta}}$  принимаем  $(\mu F)_{выт}$ , а высоту  $h_{ш}$  считаем от пола до середины открытых створок фонаря.

Данной номограммой следует пользоваться в том случае, когда  $L > 1,376 \sqrt{\bar{h}_{ш}}$ . При  $L = 1,376 \sqrt{\bar{h}}$  — 1 нейтральная зона будет находиться на уровне верха ворот. Если  $L < 1,376 \sqrt{\bar{h}_{ш}}$ , то нейтральная зона будет расположена выше ворот, и для расчета надо пользоваться номограммой I. В этом случае на номограмме III кривая для данного значения  $\bar{F}_{ш}$  (на

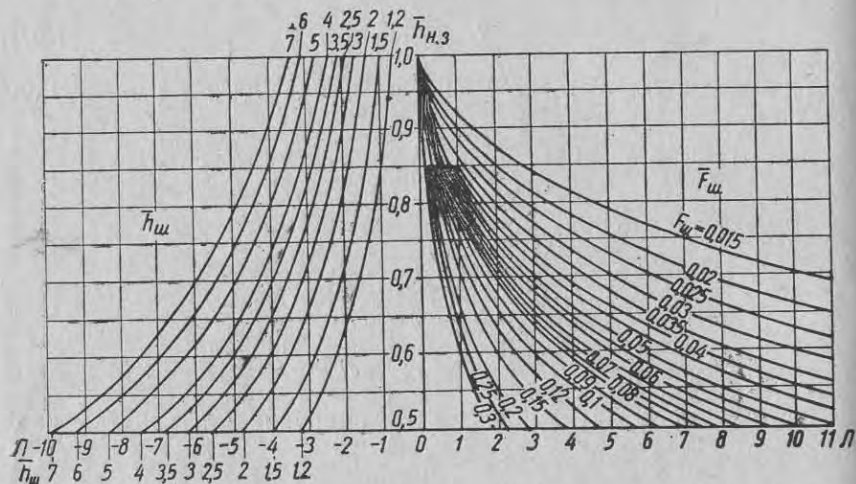


Рис. 36. Номограмма III для расчета воздушных завес в низких зданиях с вытяжными шахтами или фонарями при сбалансированных расходах механической вентиляции и при расположении нейтральной зоны в пределах ворот

кальке) не пересекается в пределах номограммы с кривой для заданного значения  $\bar{h}_{ш}$ .

Зная  $\bar{h}_{н.з}$ , легко определить высоту расположения нейтральной зоны  $\bar{h}_{н.з} = \bar{h}_{н.з} H_в$ .

Далее, во втором квадранте номограммы II (рис. 34) по данным  $\Delta\gamma$  и  $B_{\mu_{нижн}}$  можно определить количество воздуха, проходящего через ворота при действии завесы ( $G_{нижн}$ ), а также необходимое количество воздуха для завесы по формуле

$$G_з = qG_{нижн} \text{ кг/ч.}$$

Пример расчета по номограмме III приводится в гл. IV (примеры 5 и 6).

VI. Рассчитаем воздушную завесу, когда между приточными отверстиями (воротами и щелями в окнах) и вытяжными имеются сопротивления в виде перегородок с отверстиями (диаграммы) площадью  $F_{\text{диаф}}$ .

Сопротивления на пути прохода воздуха легко могут быть учтены, если воспользоваться формулами расчета об эквивалентных отверстиях.

В здании, изображенном на рис. 37, последовательные сопротивления имеются на выходе воздуха из помещения, в котором устраивается воздушная завеса. Площадь отверстия, эквивалентная по сопротивлению проходу воздуха в системе вытяжных отверстий, будет определяться по формуле

$$\frac{1}{F_{\text{эк}}^2} = \frac{1}{(\mu F)_{\text{выт}}^2} + \frac{1}{(\mu F)_{\text{диаф}_1}^2} + \frac{1}{(\mu F)_{\text{диаф}_2}^2} \quad (69)$$

Определенную по формуле (69) эквивалентную площадь вытяжных отверстий и следует подставлять в формулы (50) и (53).

Данный случай рассчитан в § 14 (пример 7).

VII. Для расчета воздушных завес в обычных с окнами и без фонарей многоэтажных зданиях, этажи которых сообщаются между собой и лестничными клетками, можно воспользоваться экспериментальными данными А. Н. Сканави и Ф. М. Староверова [21].

В случаях, когда окна зимой закрыты, высота расположения нейтральной зоны  $h_{н.з}^*$  будет в основном зависеть от величины сопротивления проходу воздуха через многодверные тамбуры, обычно устраиваемые в таких зданиях. В табл. 6 для случая сбалансированных расходов механической вентиляции даны опытные величины  $h_{н.з}^*$  для ряда конструкций входных дверей и усредненные значения коэффициентов расхода воздуха через входы  $\mu_0$ . Более подробные данные о значениях  $\mu_0$  для входов приведены в приложении 2.

Количество воздуха, проходящего через открытые двери, определяется по формуле (51). Дополнительно на основе экспериментальных данных А. Н. Сканави в эту формулу вводит коэффициент  $k_1$ , учитывающий место забора и место подачи воздуха для завесы (см. табл. 7).

Если принять среднюю скорость, равной скорости на высоте середины двери ( $\frac{H_{\text{дв}}}{2}$ ), то формула для определения расхода

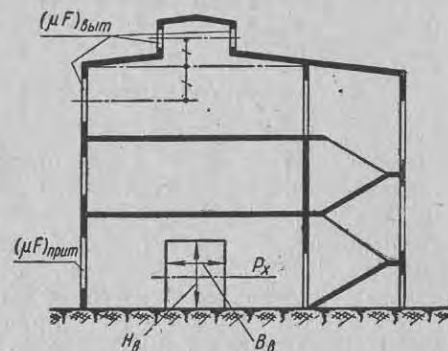


Рис. 37. К расчету воздушной завесы в многоэтажном здании