

ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ

ТЕМА: АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ
ВОЗДУХООБМЕНА В ПОМЕЩЕНИИ

ГУСЕВ К.П.

Лекция

6

8 Аэродинамические основы организации воздухообмена в помещении

8.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Вентилирование помещений любого назначения представляет собой процесс переноса определенных объемов воздуха, вытекающего из приточных отверстий. Скорость и направление истечения воздуха из отверстий, форма и количество отверстий, их расположение, а также температура воздуха в струе определяют характер воздушных потоков в помещении.

Приточные струи взаимодействуют между собой, с тепловыми струями, возникающими около нагретых поверхностей, и с потоками воздуха, образующимися вблизи вытяжных отверстий.

Строительные конструкции помещения (колонны, стены, пол, потолок) и технологическое оборудование при набегании на них потоков воздуха оказывают существенное влияние на скорость и направление их дальнейшего распространения. Кроме того, в производственных помещениях на скорость и направление движения воздуха большое влияние могут оказывать действие различных механизмов технологического оборудования, а также струи, истекающие из отверстий или неплотностей оборудования, находящегося под избыточным давлением.

Воздушные потоки — струи, образующиеся в помещении, — переносят поступающие в воздух вредные выделения (конвективное тепло, пары, газы и пыль) и формируют в объеме воздуха помещения поля скоростей, температур и концентраций.

«В распространении вредностей по помещению струям, иначе говоря, турбулентной диффузии (в противоположность молекулярной диффузии) принадлежит решающая роль».

При распределении приточного воздуха в вентилируемом помещении необходимо учитывать все особенности распространения приточных струй, с тем чтобы в рабочей или обслуживаемой зоне помещения обеспечить требуемые параметры воздуха: температуру, подвижность и допустимые концентрации вредных выделений (включая влажность).

Систематическое изучение струй началось около 60 лет назад и продолжается до настоящего времени. Столь большой интерес к струям объясняется применимостью их в различных областях техники.

Струей называют поток жидкости или газа с конечными поперечными размерами.

В технике вентиляции приходится иметь дело со струями воздуха, истекающего в помещение, также заполненное воздухом. Такие струи называют *затопленными*.

В зависимости от гидродинамического режима струи могут быть *ламинарными* и *турбулентными*. Приточные вентиляционные струи всегда турбулентны.

Различают струи *изотермические* и *неизотермические*. Струю называют изотермической, если температура во всем объеме ее одинакова и равна температуре окружающего воздуха. Для вентилирования помещений в подавляющем большинстве случаев применяются неизотермические струи.

Струю называют *свободной* если она истекает в достаточно большое пространство и не имеет никаких помех для своего свободного развития. Если на развитие струи ограждающие конструкции помещения оказывают какое-либо воздействие, то такую струю называют *несвободной*, или *стесненной*.

Вентиляционные приточные струи развиваются в помещениях ограниченных размеров и могут испытывать влияние ограждающих конструкций. При определенных условиях влияние ограждений на развитие приточных струй можно не учитывать и считать такие струи свободными.

Струя, истекающая из отверстия, расположенного вблизи какой-либо плоскости ограждения помещения (например, потолка), параллельно этой плоскости, будет настиляться на нее. Такую струю называют *настиляющейся*.

Все приточные струи можно разделить на две группы: 1 — с параллельными векторами скоростей истечения; 2 — с векторами скоростей истечения, составляющими между собой некоторый угол. Геометрическая форма приточного насадка определяет форму и закономерности развития истекающей из него струи. По форме различают струи компактные, плоские и кольцевые

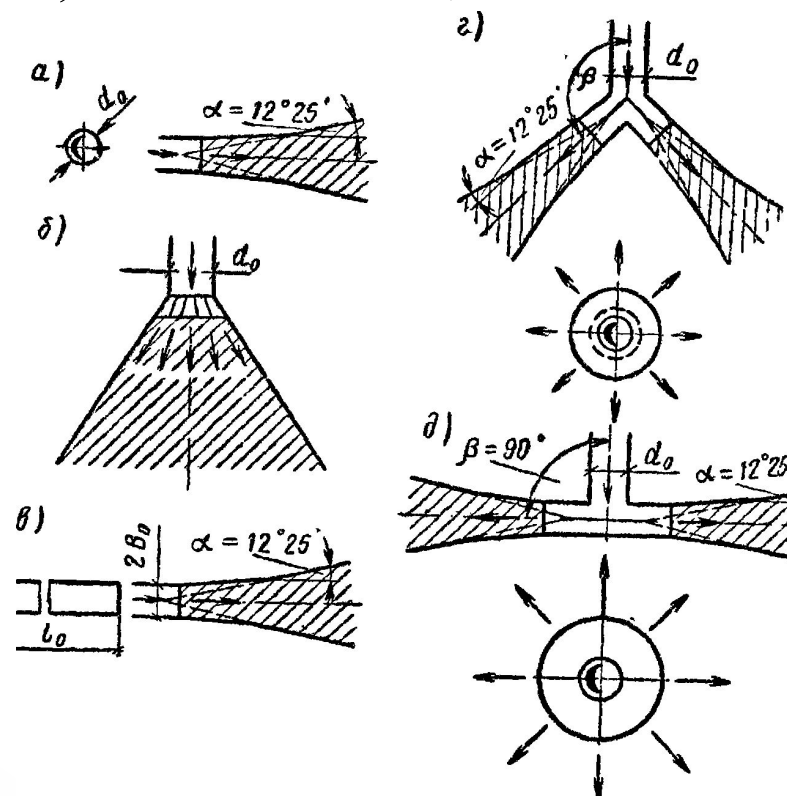


Рис. IX.1. Струи различной формы

a — компактная осесимметричная; *б* — коническая; *в* — плоская; *г* — кольцевая (полая коническая); *д* — полная веерная

Компактные струи образуются при истечении воздуха из круглых, квадратных и прямоугольных отверстий

При истечении воздуха из круглого отверстия с диффузорами для принудительного расширения образуется также компактная струя, которая будет осесимметрична по всей длине - такую струю называют *конической*.

Плоские струи образуются при истечении воздуха из щелевых отверстий бесконечной длины. Струя, истекающая из щели с соизмеримым соотношением сторон, не остается плоской, а постепенно трансформируется сначала в эллипсоидную и на некотором расстоянии в круглую.

Если струя истекает из кольцевой щели под углом к оси подводящего воздух канала $\beta < 180^\circ$, то ее называют *кольцевой*, при β около 135° — *полой конической*, при $\beta=90^\circ$ — *полной веерной*. У полных веерных струй угол распределения воздуха в пространство составляет 360° ; при меньшем угле распределения струя будет *неполной веерной*.

При угле $\beta \approx 160^\circ$ и большем может образовываться компактная струя. Независимо от формы все струи, у которых при истечении нет принудительного изменения их направления, на некотором расстоянии от насадка расширяются.

8.2 СВОБОДНЫЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ СТРУИ

Упрощенная схема свободной турбулентной изотермической струи представлена на рис. IX.2. Воздух, вытекая из отверстия, образует струю с криволинейными границами ABC и DEF, которые приближенно могут быть заменены прямыми AB, BC, DE и EF.

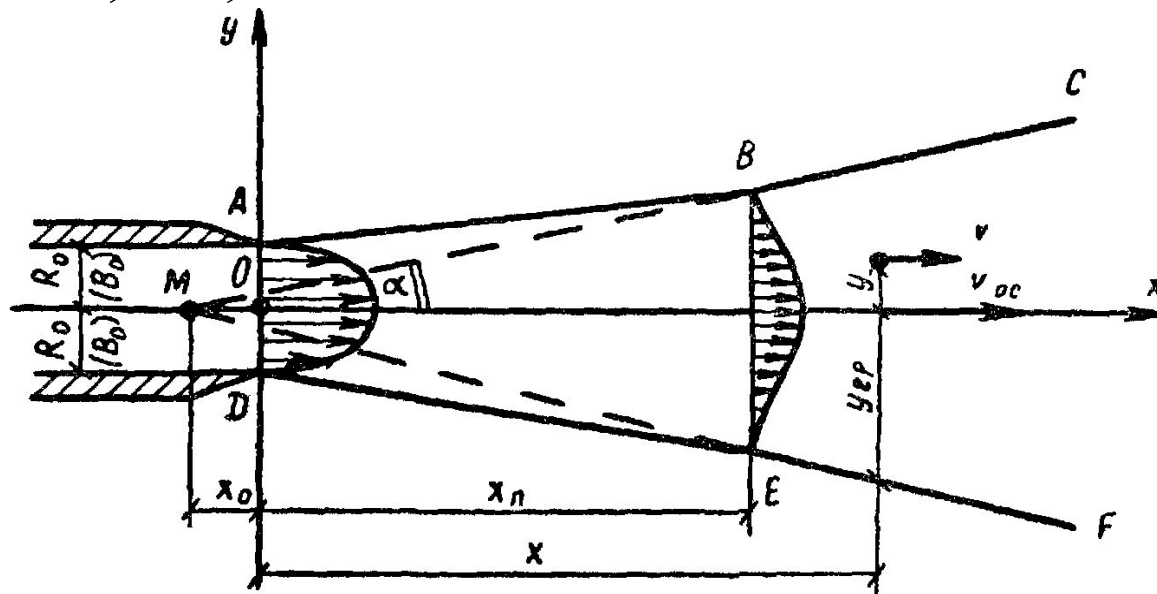


Рис. IX.2. Схема турбулентной струи

В струе различают два участка: *начальный* $ABED$ и *основной* $СВЕФ$. Сечение BE называют *переходным сечением*.

Границы основного участка струи BC и EF при их продолжении пересекаются в точке M , называемой полюсом струи. Положение полюса точно не установлено. Известно только, что при равномерном начальном поле скоростей точка M находится примерно в центре выходного отверстия.

Турбулентная струя, как и всякое турбулентное течение, характеризуется интенсивным поперечным перемещением частиц. Частицы воздуха, совершая кроме поступательного движения вдоль потока поперечные перемещения в составе вихревых масс, вовлекают в поток частицы окружающего воздуха, которые тормозят периферийные слои струи. В результате масса струи растет, площадь ее поперечного сечения увеличивается, а скорость уменьшается.

Перенос вихревых масс, обуславливающий изменение скоростей в струе, обуславливает также распределение в струе концентраций и температур (для неизотермических струй).

По внешнему периметру струи из заторможенных частиц потока и из частиц воздуха, вовлеченных в поток, образуется пограничный слой.

8.3 Свободные неизотермические струи

В неизотермических струях действуют инерционные и гравитационные силы; действие гравитационных сил искривляет струю вверх или вниз.

Характеристикой неизотермической струи служит безразмерный комплекс, предложенный В. В. Батуриным и И. А. Шепелевым, называемый критерием Архимеда:

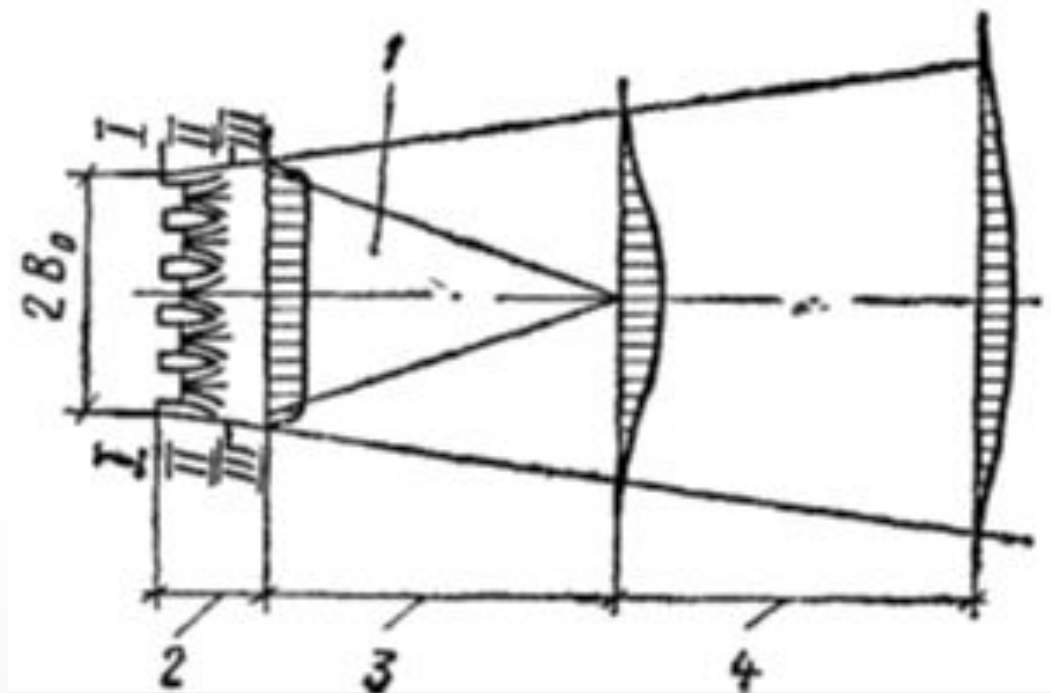
$$Ar = g \frac{R_0(t_0 - t_{\text{окр}})}{v_0^2 T_{\text{окр}}}, \quad (\text{IX.10})$$

где g — ускорение свободного падения; R_0 — радиус насадка; для щели принимается половина ширины щели B_0 ; t_0 и $t_{\text{окр}}$ — температура воздуха соответственно в начале струи и в окружающем пространстве; v_0 — начальная скорость струи; $T_{\text{окр}}$ — абсолютная температура воздуха в окружающем пространстве. Этот комплекс характеризует соотношение инерционных и гравитационных сил.

В слабо нагретых или в слабо охлажденных струях, для которых критерий Архимеда по абсолютному значению меньше 0,0005 ($Ar < 0,0005$), влияние гравитационных сил сказывается незначительно, и такие струи развиваются в пространстве без заметного искривления.

8.4 Струи, вытекающие через решетки

Схема струи, вытекающей через отверстие, закрытое решеткой, при соосном подводе воздуха представлена на рис. IX.12. При выпуске воздуха через решетку отдельные струйки после поджатия в сечении *I—I* начинают расширяться, смешиваясь с окружающим воздухом. В сечении *II—II* они сливаются, в сечении *III—III* формируются в сплошной поток. Промежуток между сечениями *I—I* и *III—III* называют участком формирования; за ним следует начальный участок и далее основной участок с уменьшающимися скоростями.



Статическое давление в начале участка формирования понижается до отрицательного, так как здесь происходит увеличение скорости и, следовательно, динамического давления, а в конце участка сравнительно быстро поднимается до положительного и постепенно выравнивается с давлением окружающей среды.

В плоских квадратных решетках длина участка формирования приблизительно равна стороне решетки. Площадь сформировавшейся струи на 20—30% больше площади решетки. Угол расширения струи 16—18°.

Расчетные формулы для основных параметров струи приводятся в работе М. И. Гримитлина. Во все расчетные величины входит коэффициент живого сечения решетки, поскольку оно оказывает большое влияние на формирование струи.

8.5 Струи, настилающиеся на плоскость

Струя, направленная на плоскость, растекается по ней и настиляется на нее.

При угле между плоскостью и осью струи $\alpha = 90^\circ$ растекание струи происходит равномерно во все стороны. С уменьшением угла α до 45° большая часть струи будет направлена в сторону более плавного поворота, а при $\alpha = 22^\circ 30'$ вся струя течет только в одну сторону. Это явление растекания струи, направленной на плоскость, изображено на рис. IX. 13.

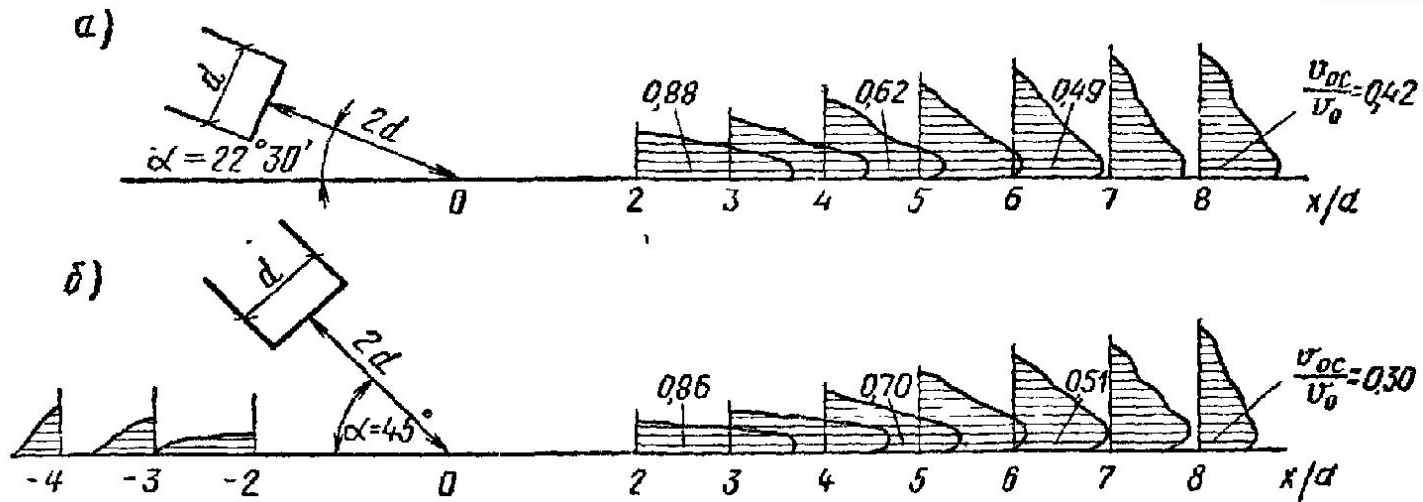


Рис. IX. 13. Профили скоростей струи

a — при угле между осью струи и плоскостью $\alpha = 22^\circ 30'$; b — то же, $\alpha = 45^\circ$

Неизотермические струи, настилающиеся на горизонтальные плоскости, при определенных условиях будут отрываться от них. Место отрыва струи от плоскости зависит от соотношения сил архимедовых, инерционных и вязкости.

Отрыв нагретой струи от плоскости при различных скоростях истечения из насадка лежит в диапазоне значений критерия Рейнольдса от 3100 до 19 000 и критерия Архимеда от 0,0023 до 0,054 происходит на различных относительных расстояниях.

При Ar от 0,0023 до 0,0097 струя не отрывается от плоскости на протяжении $x/d_0 = 22 \dots 25$, при Ar от 0,0127 до 0,0207 отрыв струи происходит на расстоянии $x/d_0 = 6 \dots 7$, а при $Ar=0,054$ ($Re=3100$) струя вообще не настиляется на плоскость и отрывается от нее в непосредственной близости от насадка.

8.6 Свободные конвективные потоки, возникающие у нагретых поверхностей — тепловые струи

Тепловые струи, так же как и приточные струи естественной или механической вентиляции, являются основными факторами, определяющими циркуляцию воздуха в производственных помещениях, распределение тепла и концентраций паров, газов и пыли.

Движение воздуха, возникающее вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц, называют *свободным*.

При соприкосновении с нагретой поверхностью воздух нагревается и становится легче. Вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц воздуха возникает подъемная сила, под действием которой нагретые частицы поднимаются; на их место поступают новые частицы — холодные, которые также нагреваются и поднимаются. Таким образом, образуется восходящий тепловой поток, определяемый наличием теплообмена у нагретой поверхности.

Чем больше передается тепла, тем интенсивнее движение воздуха. Так как количество переданного тепла пропорционально разности температур и площади нагретой поверхности, то и свободное движение воздуха определяется именно этими факторами. Температурным напором определяется разность плотностей и, следовательно, подъемная сила, а площадью поверхности — зона распространения процесса.



Рис. IX.15. Характер свободного движения воздуха около вертикальной нагретой поверхности

Движение воздуха около горизонтальных нагретых поверхностей отличается значительной сложностью и зависит от положения плиты и ее размеров. Когда нагретая поверхность обращена вверх, движение происходит по схеме рис. IX. 16, а. Если же при этом плита имеет большие размеры, то вследствие налипания с краев сплошного потока нагретого воздуха центральная часть плиты оказывается изолированной и воздух к ней будет подтекать только сверху (рис. IX. 16, б). Когда нагретая поверхность обращена вниз, движение воздуха происходит по схеме рис. IX.16, в. В этом случае по нагретой поверхности движется лишь тонкий слой воздуха, замещаемый встречным потоком, расположенным ниже.

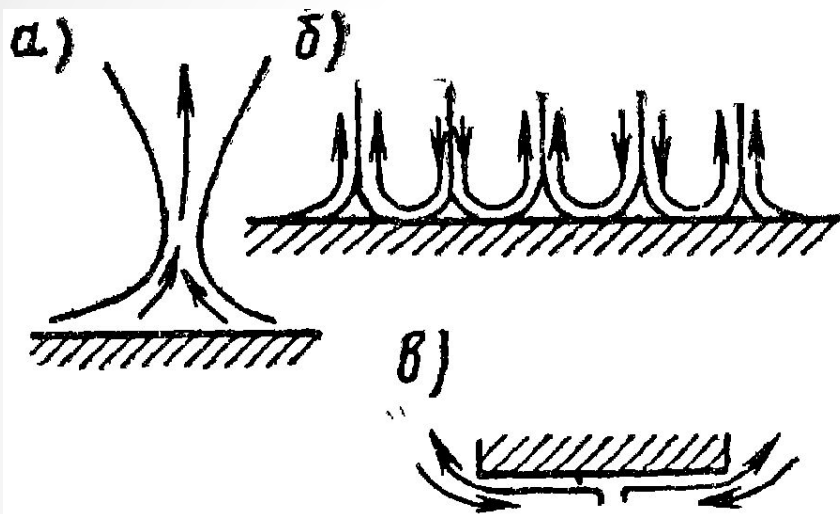


Рис. IX.16. Характер свободного движения воздуха около горизонтальных нагретых поверхностей

a — обращенных вверх; *б* — то же, при плитах большого размера; *в* — обращенных вниз

Схема тепловой струи, возникающей над нагретым горизонтальным источником, обращенным вверх приведена на рис. IX. 17.

Зоны:

I — пограничный слой, состоящий из ламинарного подслоя, расположенного непосредственно у поверхности нагретой пластины, и основного пограничного слоя;

II — разгонный участок;

III — переходный участок;

IV — основной участок.

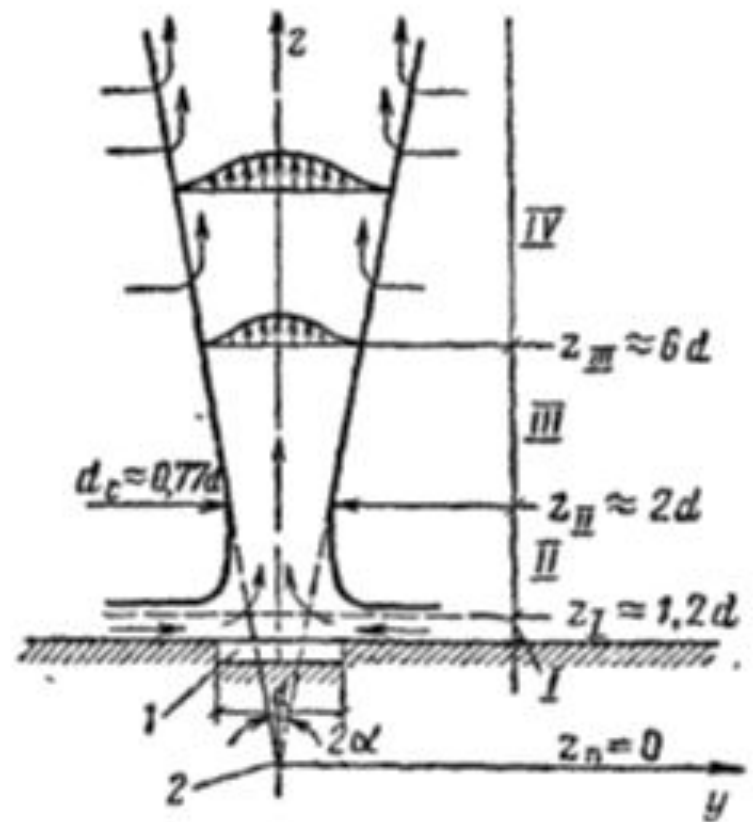


Рис. IX.17. Схема конвективной струи в неограниченном пространстве

1 — нагретая пластина; *2* — полюс струи;
I-IV — зоны

В разгонном участке в основном проявляются архимедовы силы, и под их действием скорость движения воздуха непрерывно возрастает, статическое давление уменьшается, что и приводит к уменьшению сечения струи. В конце разгонного участка струя имеет наименьшее сечение. Это сечение называют переходным или сжатым. Сжатое сечение находится на расстоянии примерно $2d$ от полюса струи.

Максимальная осевая скорость струи наблюдается несколько выше конца разгонного участка. В пределах этой части струи, а также во всей последующей ее части происходит подмешивание к ней окружающего воздуха, оказывающего тормозящее действие на скорость ее подъема.

В переходном участке происходит преобразование начальных поперечных профилей скоростей и избыточных температур в профили, характерные для основного участка. Во всех сечениях основного участка наблюдается подобие поперечных профилей скоростей и избыточных температур.

8.7 Струи, истекающие в ограниченное пространство

Приточные струи, подаваемые в вентилируемое помещение, в подавляющем большинстве случаев бывают стеснены плоскостями ограждений помещения.

На рис. IX. 18 представлена схема струи, истекающей в тупик. В помещении образуется прямой поток воздуха, создаваемый истечением из насадка, и обратный поток, направленный навстречу прямому. В начале, пока площадь поперечного сечения струи $F_{\text{стр}}$ мала по сравнению с площадью поперечного сечения помещения $F_{\text{п}}$, струя развивается как свободная. Начиная с сечения, где $F_{\text{стр}}^{\text{к}} = (0,2—0,25)F_{\text{п}}$ (его называют *первым критическим сечением*), струя начинает вести себя отлично от свободной: замедляется прирост площади поперечного сечения струи и расход воздуха в ней, уменьшается количество движения. После того как площадь поперечного сечения струи достигнет 40—42% площади поперечного сечения помещения (*второе критическое сечение*), струя начинает угасать: резко уменьшается количество движения, начинают уменьшаться расход воздуха в струе, поперечное сечение и осевая скорость.

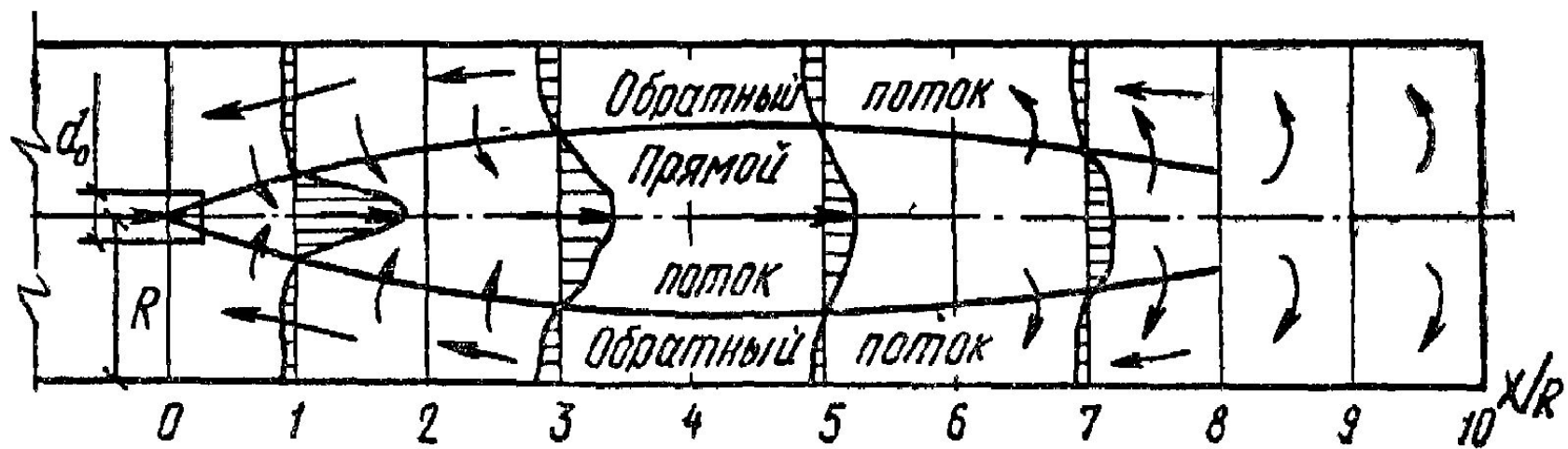


Рис. IX.18. Схема струи, истекающей в тупик

Обратный поток воздуха в помещении, образованный действием стесненной струи, занимает ту часть поперечного сечения помещения, которая не занята прямым потоком (струей).

В инженерных расчетах струю можно рассматривать как свободную на расстоянии

$$x_{кр} \leq 1,5\sqrt{F_{\Pi}} .$$

При нескольких параллельно направленных струях за F_{Π} считают ту часть площади поперечного сечения помещения, которая приходится на одну струю.

Наибольшая длина, на которую может распространиться стесненная струя, зависит только от площади поперечного сечения помещения и определяется уравнением

$$x_{макс} = (5 \dots 6)\sqrt{F_{\Pi}} .$$

Дальнобойность стесненной струи не может быть увеличена путем изменения параметров истечения, так как за пределами $x_{макс}$ струя распадается.

8.8 Движение воздуха около вытяжных отверстий

Картина движения воздуха около вытяжных и около приточных отверстий совершенно различна. При всасывании воздух подтекает к отверстию со всех сторон, а при нагнетании он истекает из отверстия в виде струи с углом раскрытия примерно 25° (рис. IX. 19).

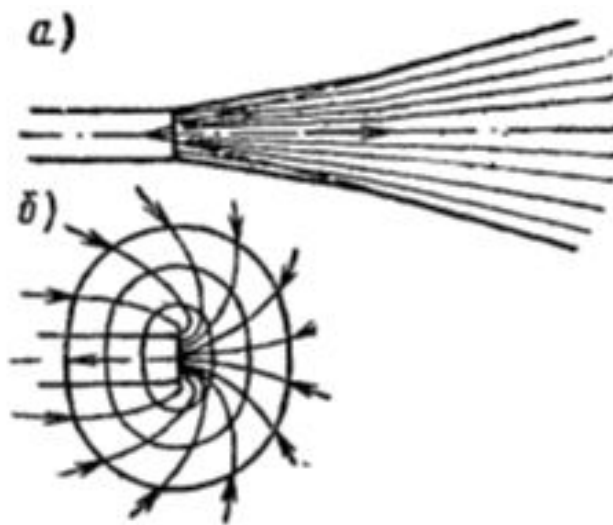


Рис. IX.19. Движение воздуха около приточного (а) и вытяжного (б) отверстий

Представим точку в пространстве, через которую в единицу времени удаляется количество воздуха L . Воздух к точке, очевидно, подтекает из всего окружающего пространства по радиусам (рис. IX.20), являющимися линиями тока. Через сферические поверхности радиусом r в единицу времени будет протекать (стекаться к точке) такое же количество воздуха, какое удаляется через точку, т. е. L . Сферические поверхности F_1, F_2, \dots, F_n будут поверхностями равных скоростей v_1, v_2, \dots, v_n . Расход воздуха через точку можно представить через расходы на сферических поверхностях: $L = F_1 v_1 = F_2 v_2 = \dots = F_n v_n$

Или $4\pi r_1^2 v_1 = 4\pi r_2^2 v_2 = \dots = 4\pi r_n^2 v_n,$

отсюда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \dots = \frac{r_n^2}{r_1^2},$$

т. е. при точечном стоке воздуха скорости изменяются обратно пропорционально квадратам радиусов.

При линейном стоке удаление воздуха происходит через линию бесконечно большой длины (рис. IX.21). В этом случае поверхностями равных скоростей будут боковые поверхности цилиндров F_1, F_2, \dots, F_n радиусом r_1, r_2, \dots, r_n . Расход воздуха через линию равен расходу через любую цилиндрическую поверхность:

$$L = 2\pi r_1 l v_1 = 2\pi r_2 l v_2 = \dots = 2\pi r_n l v_n ,$$

Отсюда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{r_2}{r_1} = \dots = \frac{r_n}{r_1} ,$$

т. е. при линейном стоке воздуха скорости изменяются обратно пропорционально радиусам.

8.9 Схемы движения воздуха в вентилируемых помещениях

Чтобы правильно расположить отверстия для подачи воздуха в помещение и для удаления его, необходимо выяснить влияние взаимного расположения этих отверстий на движение воздуха в помещении.

При рассмотрении свободной струи установлено, что количество воздуха в струе непрерывно увеличивается по мере удаления рассматриваемых сечений от приточного отверстия, а подтекание воздуха из окружающего пространства происходит по всей длине струи и охватывает некоторый контур «замкнутой системы»

Рис IX 27 Схема взаимодействия приточной струи и спектра всасывания

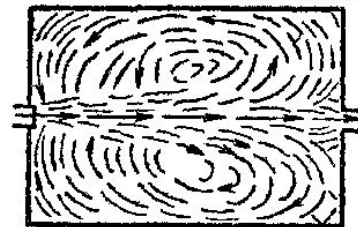
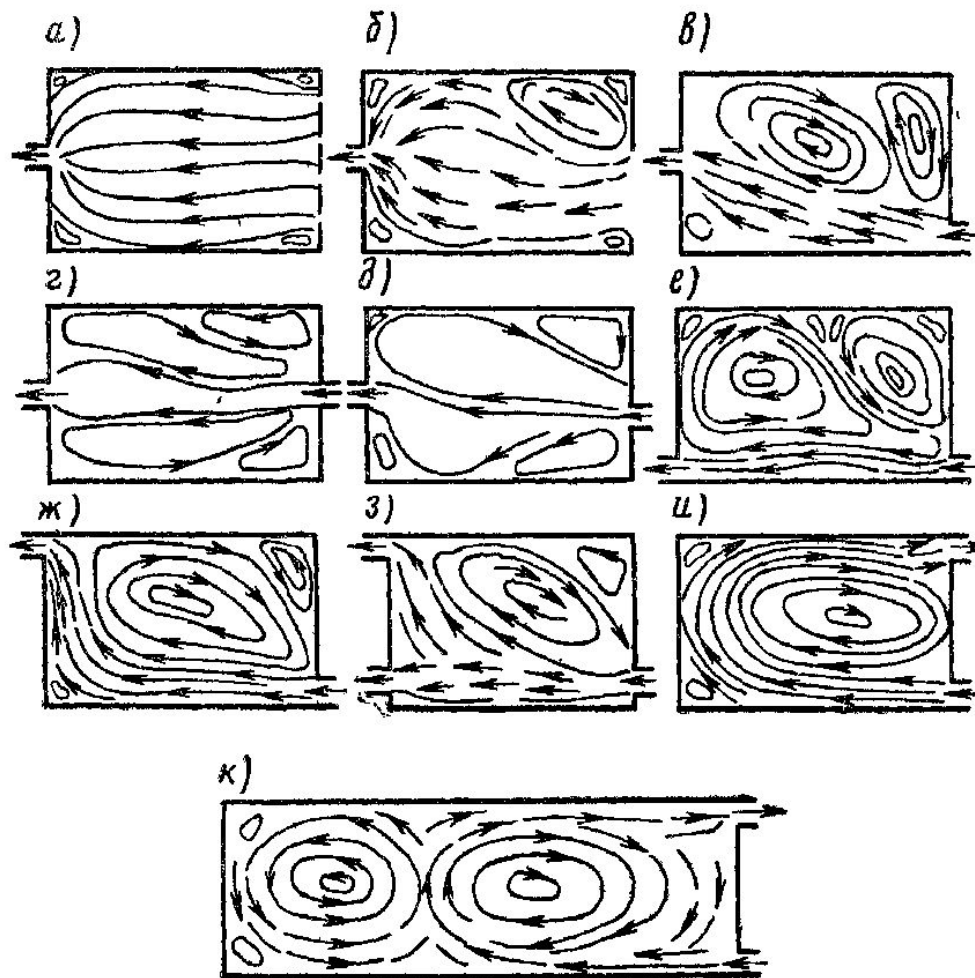


Рис. IX 28. Схемы движения воздуха в вентилируемом помещении



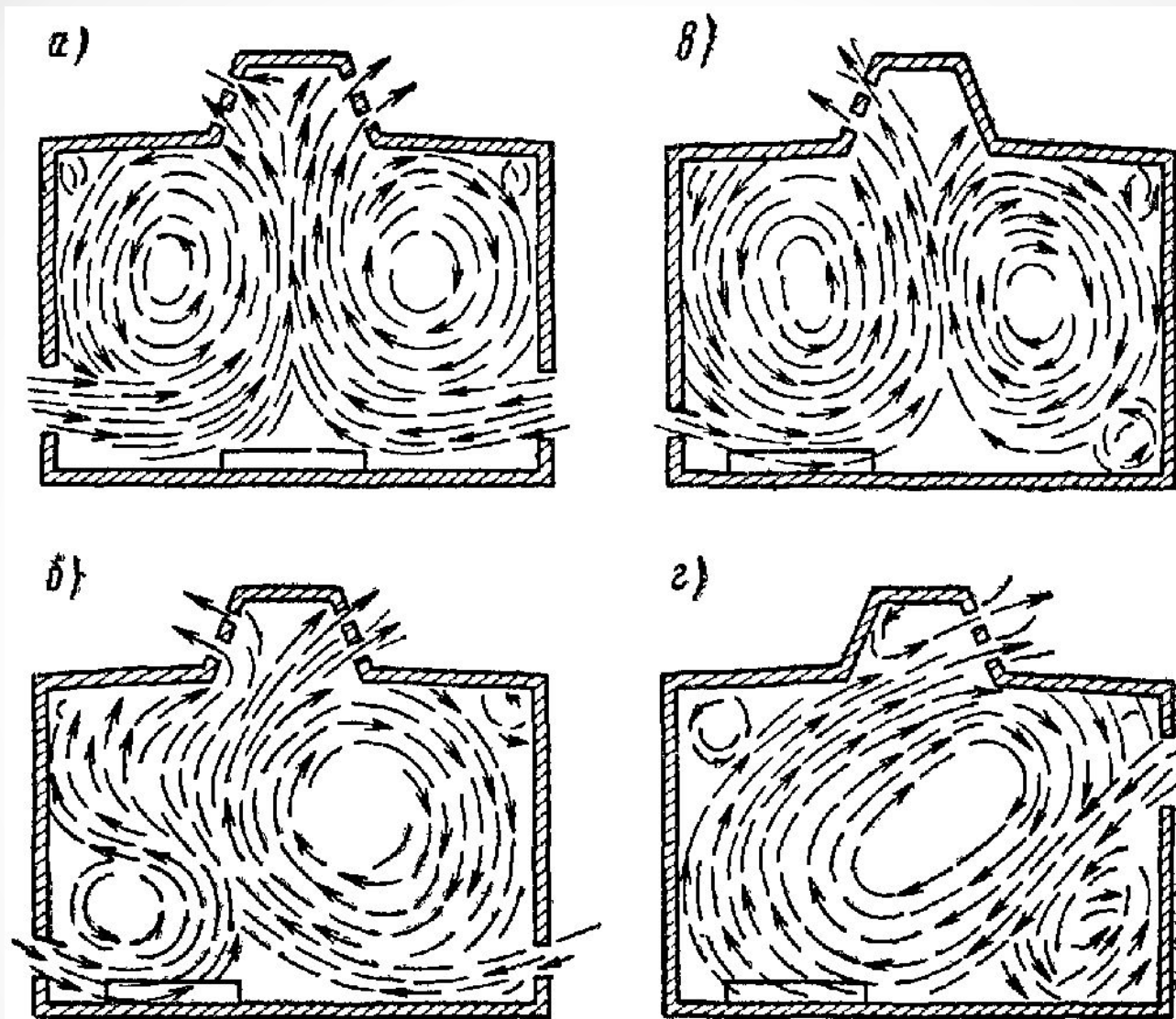


Рис. IX.29. Схемы циркуляции потоков воздуха в помещении при неизотермических условиях