

# 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

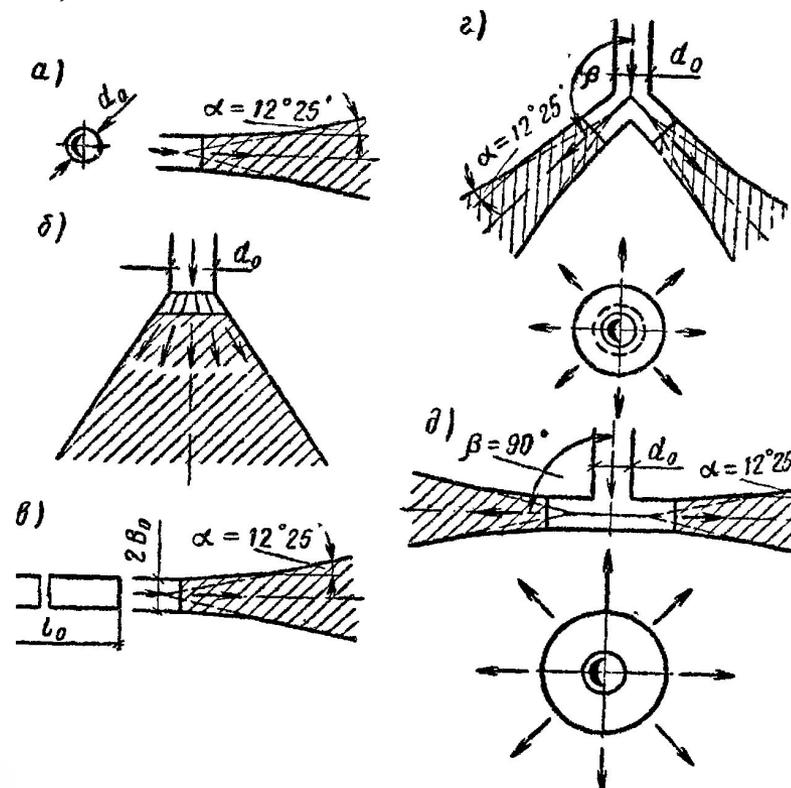


Рис. IX.1. Струи различной формы

*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 подводимого воздуха канала  $\beta < 180^\circ$ , то ее называют *кольцевой*, при  $\beta$  около  $135^\circ$  — *полой конической*, при  $\beta=90^\circ$  — *полной веерной*. У полных веерных струй угол распределения воздуха в пространство составляет  $360^\circ$ ; 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.

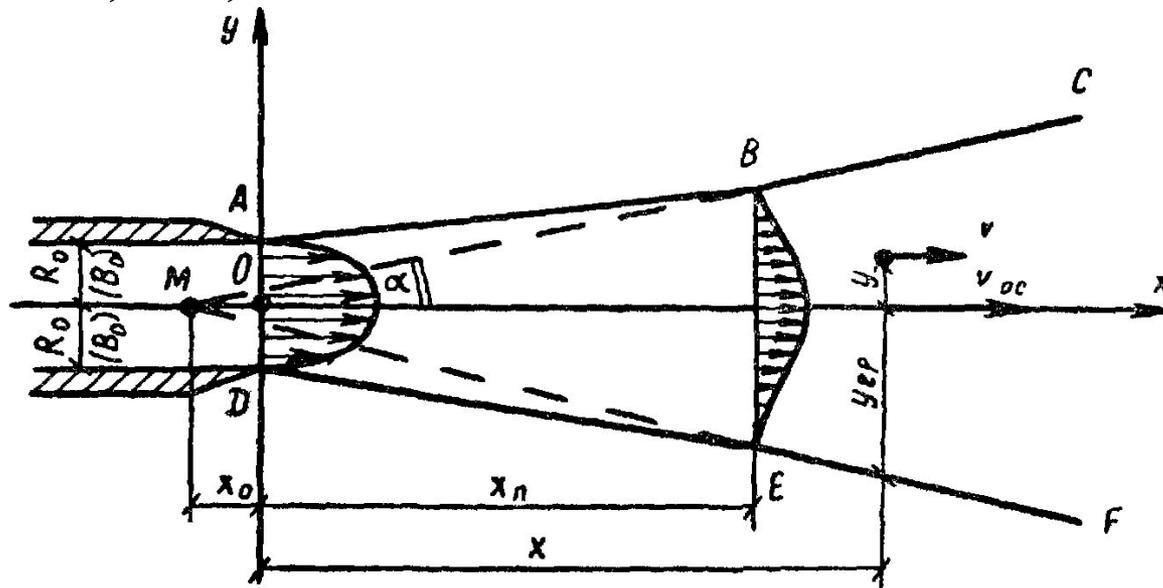


Рис. IX.2. Схема турбулентной струи

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:

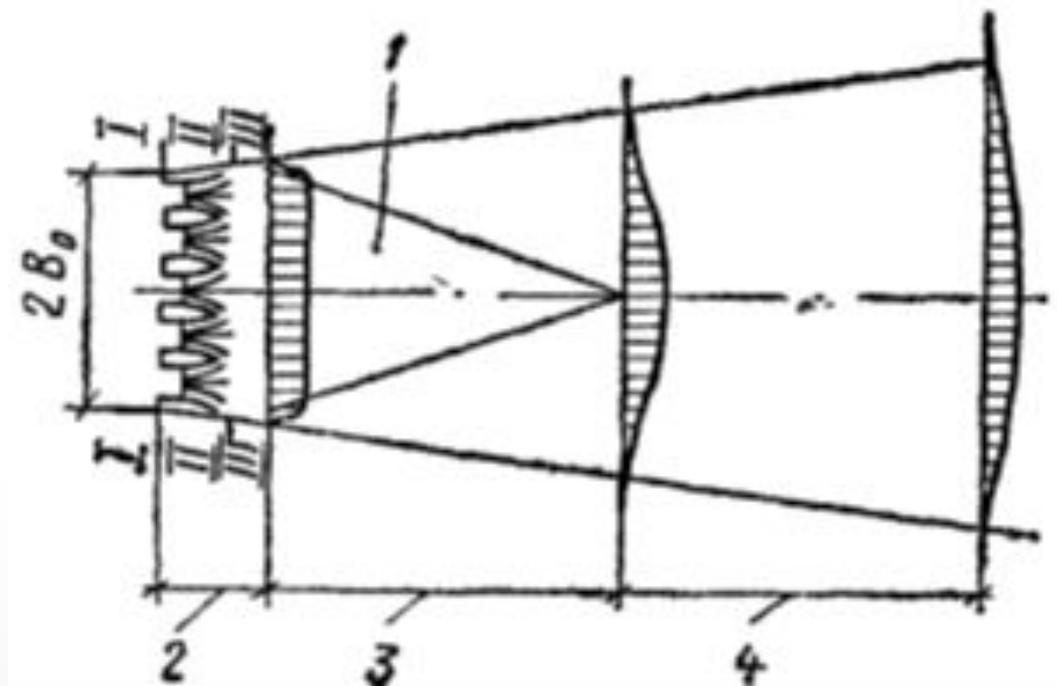
$$Ar = g \frac{R_0(t_0 - t_{\text{окр}})}{v_0^2 T_{\text{окр}}}, \quad (\text{IX.10})$$

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  $\alpha$  до  $45^\circ$  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.

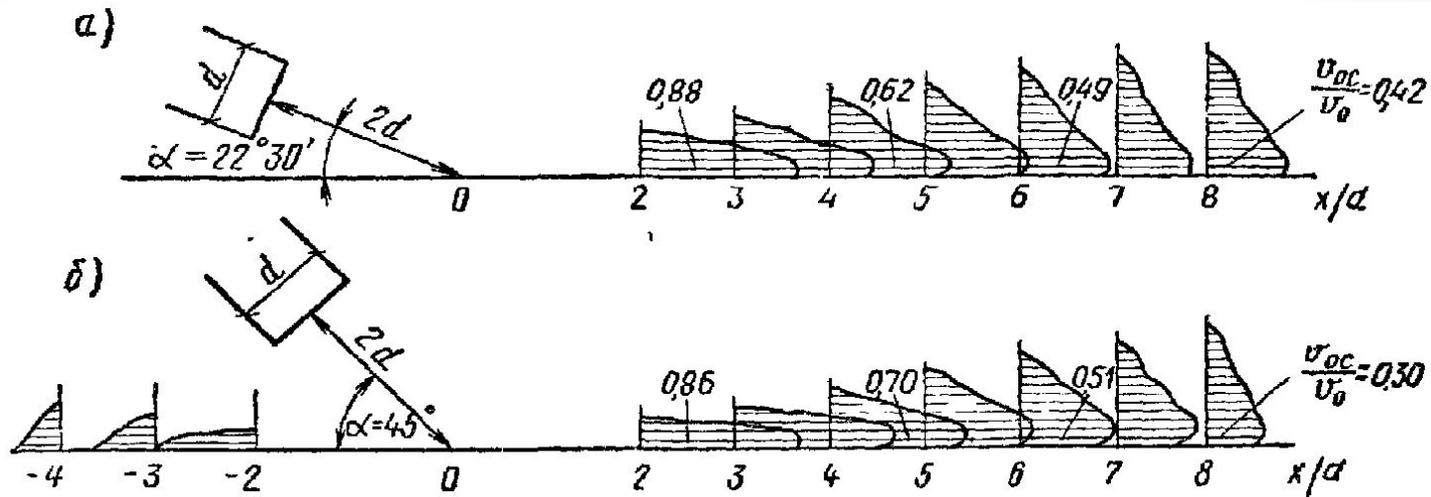


Рис. IX. 13. Профили скоростей струи

$a$  — 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.

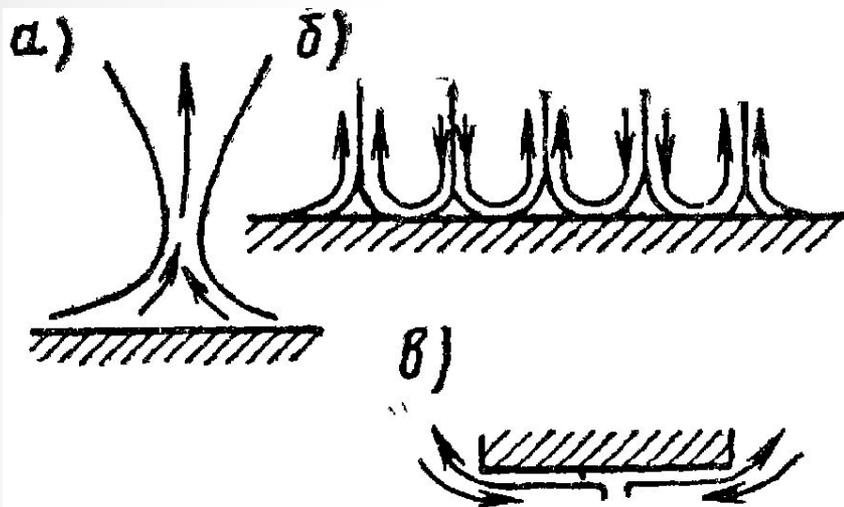


Рис. IX.16. Характер свободного движения воздуха около горизонтальных нагретых поверхностей

*a* — обращенных вверх; *б* — то же, при плитках 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.

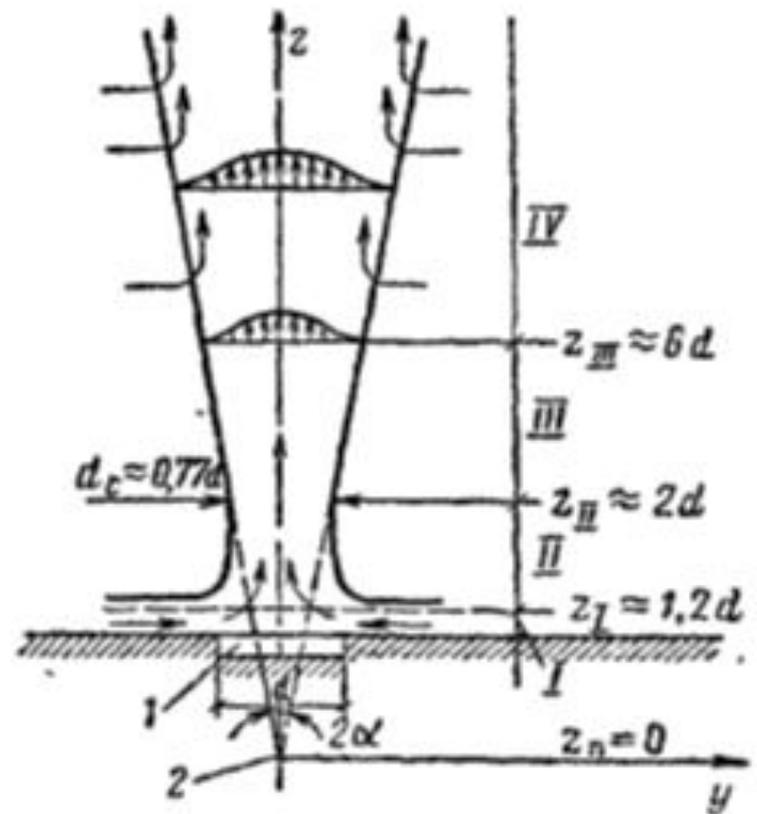


Рис. IX.17. Схема конвективной струи в неограниченном пространстве

*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.

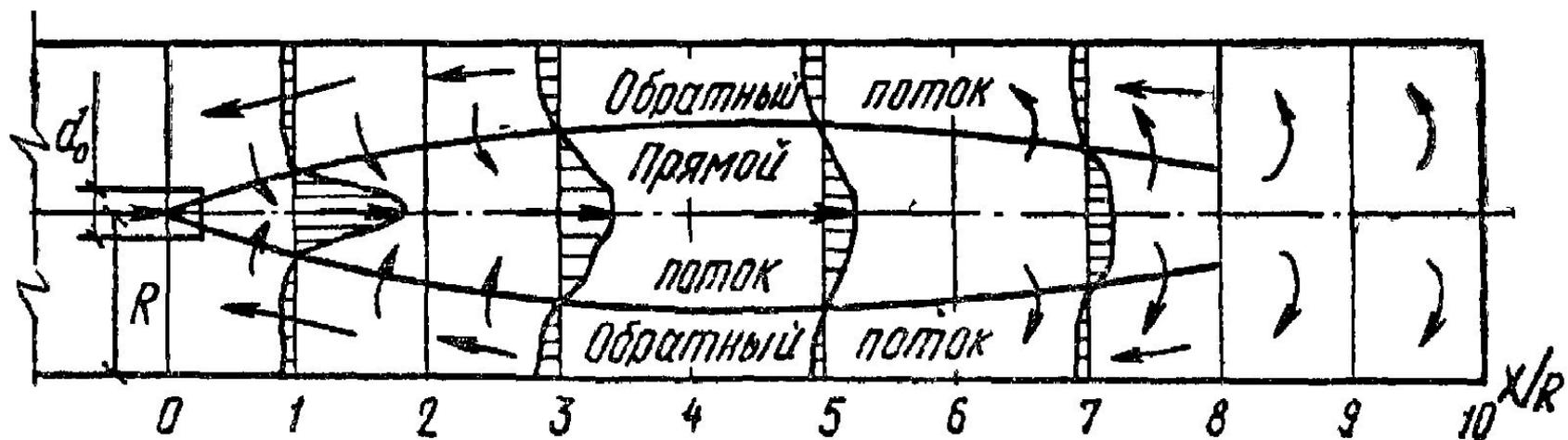


Рис. IX.18. Схема струи, истекающей в тупик

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  $F_{\Pi}$  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  $25^\circ$  (рис. IX. 19).

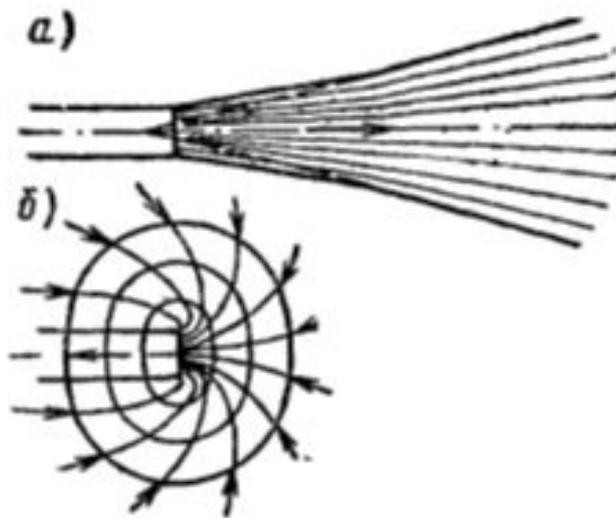


Рис. IX.19. Движение воздуха около приточного (а) и вытяжного (б) отверстий

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

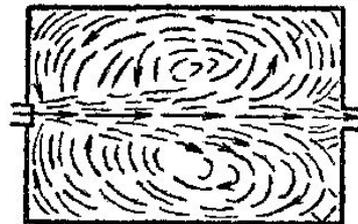
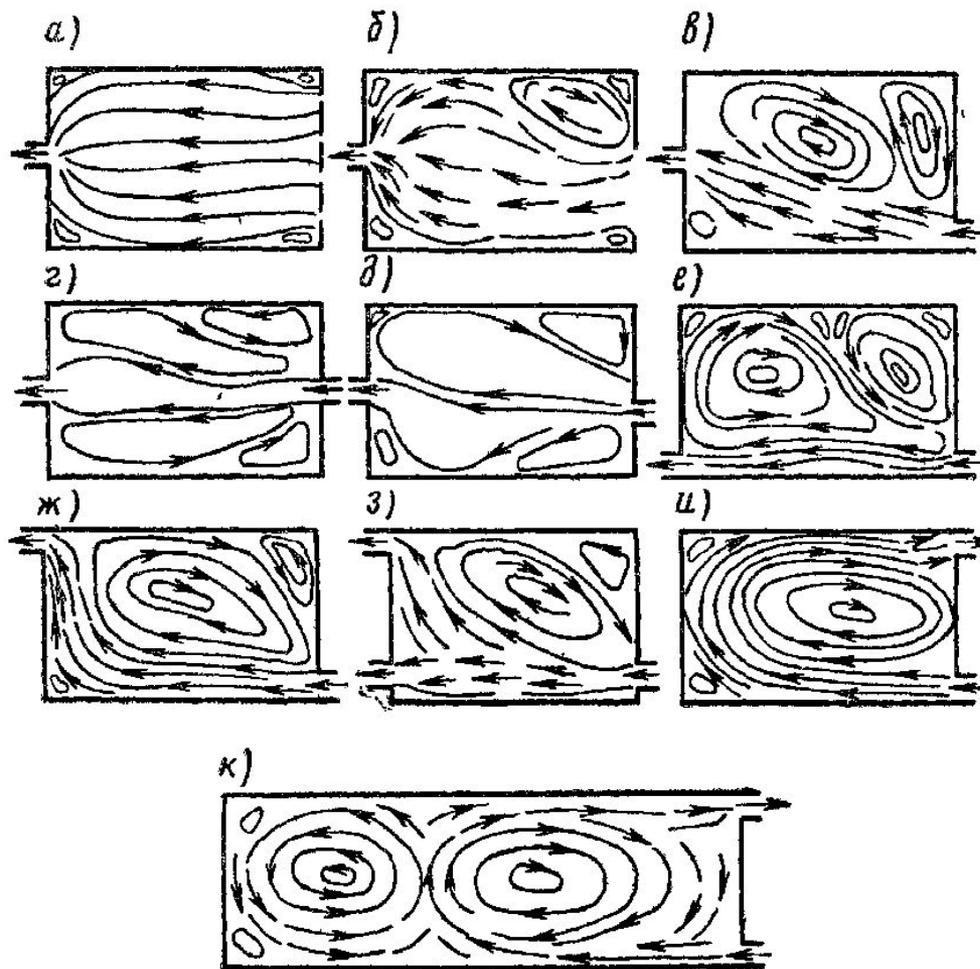


Рис. IX 28. Схемы движения воздуха в вентилируемом помещении



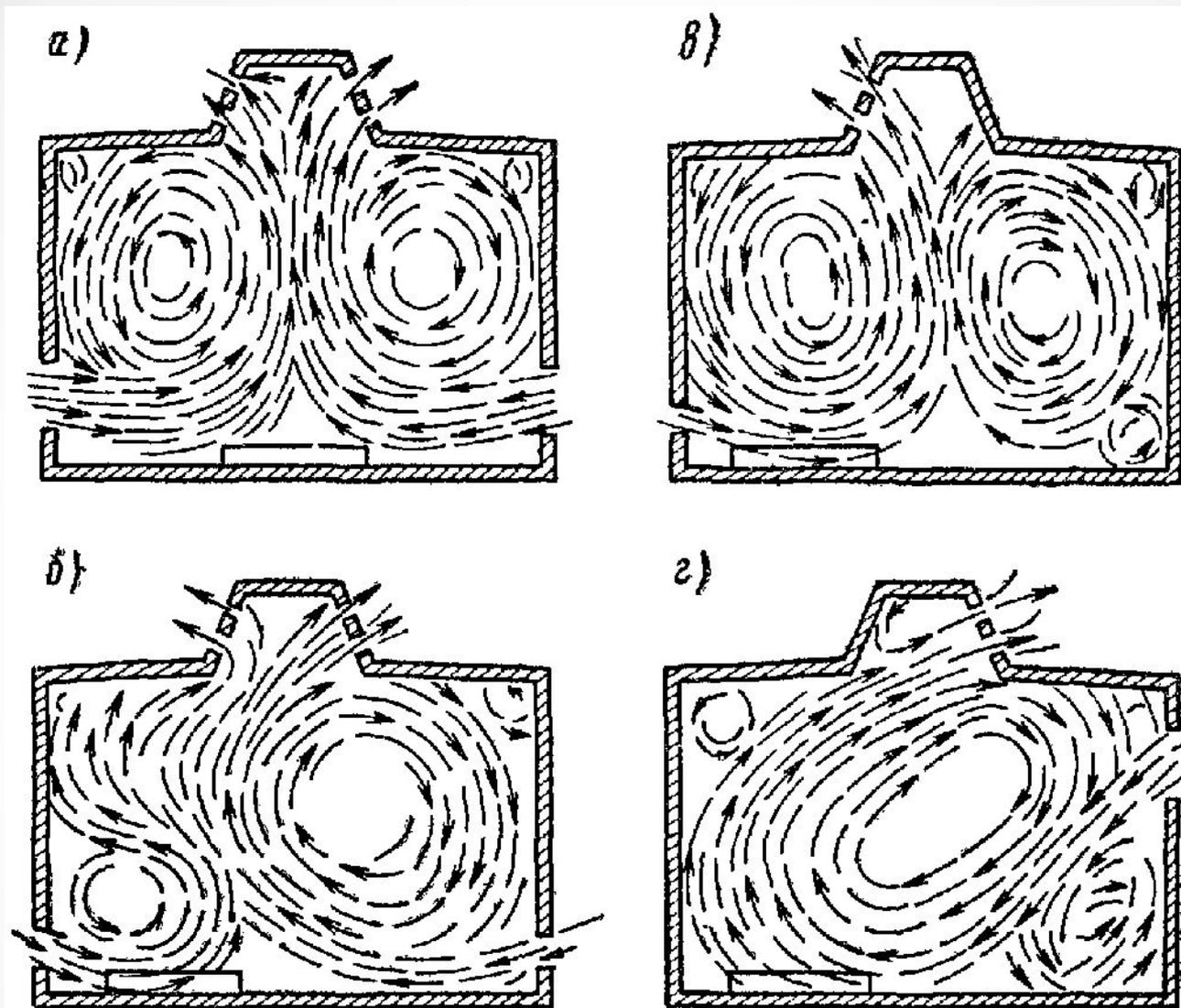


Рис. IX.29. Схемы циркуляции потоков воздуха в помещении при неизотермических условиях