

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Красноярский государственный аграрный университет

ХОЛОДИЛЬНОЕ И ВЕНТИЛЯЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ВОЗДУХОВОДАХ

Методические указания к лабораторным занятиям

Красноярск 2009

Рецензент

*Жукова О.П. – канд. техн. наук, доц. каф. машин и аппаратов
промышленных технологий Сибирского государственного технологического
университета*

Составители: В.Н. Невзоров, В.Н. Холопов

Невзоров, В.Н.

Холодильное и вентиляционное оборудование. Определение потерь давления в воздуховодах: метод. указания к лаборатор. занятиям / В.Н. Невзоров, В.Н. Холопов; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – 2009. – 23 с.

Представлена методика расчета потерь давления в воздуховодах, даны варианты заданий к лабораторным работам.

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 260601.65 «Машины и аппараты пищевых производств» направления 260600 «Пищевая инженерия».

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного аграрного университета

1. Основные параметры воздушной среды

Сухой атмосферный воздух представляет собой однородную смесь нескольких газов: 75,55 % по массе азота, 23,1 % кислорода, 1,35 % инертных и прочих газов. Смесь сухого воздуха с водяными парами называется влажным воздухом.

Барометрическое давление атмосферного воздуха $P_{\bar{o}}$ определяется как сумма парциальных давлений сухой его части $P_{cв}$ и водяного пара $P_{вп}$.

$$P_{\bar{o}} = P_{cв} + P_{вп}.$$

В международной системе единиц (СИ) давление выражают в паскалях. Один паскаль – давление возникающее при воздействии силы в 1Н на площадь размером 1 м^2 ($1\text{Па}=1\text{Н}/1\text{м}^2$). Находят также применение такие внесистемные единицы измерения давления, как техническая атмосфера ($1\text{ат}=1\text{кгс}/\text{см}^2=10^5\text{Па}$), миллиметр ртутного столба ($1\text{мм рт. ст.}=133,322 \text{ Па}$), миллиметр водяного столба ($1\text{мм вод. ст.}=10 \text{ Па}$).

Значение парциального давления компонента смеси в состоянии полного насыщения называют парциальным давлением насыщения P_n , или упругостью насыщения газов.

Относительная влажность в процентах паровоздушной смеси представляет собой отношение парциального давления водяных паров $P_{вп}$ при заданной температуре к парциальному давлению насыщения P_n при той же температуре и определяется по выражению

$$\varphi = \frac{P_{вп}}{P_n} 100\%.$$

Для насыщенного воздуха относительная влажность равна 100%. В помещениях относительную влажность нормируют.

Влагосодержанием воздуха ($\text{г}/\text{кг}$) называют количество водяного пара в граммах, приходящегося на 1 кг сухой части влажного воздуха, то есть

$$d = \frac{M_{вп}}{M_{cв}},$$

где $M_{вп}$ – масса водяных паров, г;

$M_{cв}$ – масса сухого воздуха, кг.

На влагосодержание паровоздушной смеси влияет барометрическое давление, при котором находится эта смесь.

$$d = 622 \frac{P_{вн}}{P_{б} - P_{вн}}.$$

Плотность влажного воздуха равна массе 1 м^3 смеси, состоящей из сухой части воздуха и водяных паров. Плотность водяных паров меньше плотности сухого воздуха при одинаковом барометрическом давлении и одинаковой температуре, но эта разница невелика.

Массовая теплоёмкость влажного воздуха представляет собой количество теплоты, которое необходимо затратить, чтобы нагреть на 1°С 1 кг сухой части влажного воздуха и приходящегося на его долю количества водяных паров.

При неизменном давлении массовая теплоёмкость воздуха

$$C_{вв} = \frac{(C_{св} + C_{вп})d}{1000},$$

где $C_{св}$ – массовая теплоёмкость сухого воздуха (для температур в интервале $0 \dots 100^{\circ} \text{С}$), $C_{св} = 1,0048 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$;

$C_{вп}$ – массовая теплоёмкость водяного пара, $C_{вп} = 1,8068 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$.

Для практических расчётов величиной $C_{вп}$ можно пренебречь.

Объёмная теплоёмкость влажного воздуха – это количество теплоты, которое необходимо затратить для нагрева на 1°С одного кубического метра влажного воздуха. При температуре 0°С и барометрическом давлении 10 МПа объёмная теплоёмкость влажного воздуха составляет $1,29 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} * \text{К}}$. С изменением температуры и давления объём-

ная теплоёмкость влажного воздуха меняется пропорционально его объёмной массе. Поэтому при определении расходов теплоты на нагрев воздуха или на его охлаждение удобнее пользоваться массовой теплоёмкостью.

Теплосодержание влажного воздуха $I_{вв} \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right)$ массой $1 + \frac{d}{1000}$ (кг) равно сумме теплоты, содержащейся в 1 кг сухой части влажного

воздуха $I_{cv} = C_{cv}t$ и в $\frac{d}{1000}$ кг водяных паров $I_{en} = \frac{r + C_{cv}t}{1000}d$, где t – температура смеси воздуха и пара, °С, $r = 2500 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right)$ – скрытая теплота парообразования 1 кг воды при температуре 0°С.

Подставив значения I_{en} и I_{cv} , получим

$$I_{вв} = 1,005t + \frac{2500 + 1,806t}{1000}d.$$

За начало отсчёта теплосодержания влажного воздуха условно принимают теплосодержание сухого воздуха при температуре 0°С. Это означает, что при температуре влажного воздуха ниже 0°С его теплосодержание может иметь отрицательное значение. Теплосодержание влажного воздуха зависит от его температуры и количества содержащейся в нём влаги.

Температурой точки росы влажного воздуха называется температура, до которой нужно охладить ненасыщенный воздух, чтобы он стал насыщенным при сохранении постоянного влагосодержания. При дальнейшем понижении температуры влажного воздуха начинается конденсация пара (выпадает роса), и в объёме паровоздушной смеси появляется туман.

Температура мокрого термометра – температура, которую принимает влажный воздух на стадии полного насыщения в процессе испарения воды без подвода теплоты извне при постоянном теплосодержании.

Температура является мерой нагрева рабочего тела и характеризует его внутреннюю энергию. Используются шкала Цельсия t и шкала Кельвина T . Температурная шкала Цельсия – за нуль принимается температура таяния льда. В температурной шкале Кельвина за нуль принимается температура, при которой полностью прекращается движение молекул.

$$T = 273,15 + t^{\circ}\text{C}.$$

На пищевом производстве могут выделяться ядовитые и вредные для человека газы, такие, как угарный газ (СО), углекислый газ (СО₂), сернистый газ (SO₂), аммиак (NH₃), водород (H₂) и другие. Некоторые из этих вредных газов способны гореть и взрываться.

В состав воздуха на пищевых и других производствах входит пыль, выделяющаяся в некоторых технологических процессах. Пыль

по своему происхождению может быть растительной, животной, минеральной, металлической и смешанного состава. Пыль вредна для здоровья человека. Длительное вдыхание пыли вызывает различные заболевания. Кроме этого, в зависимости от своего происхождения и размеров частиц пыль может быть как пожароопасной, так и способной при определённых условиях взрываться.

Для очистки воздуха в производственных помещениях от пыли и вредных газов, а также для создания таких параметров воздушной среды (влажность и температура), при которых человек будет чувствовать себя комфортно, применяются различные системы воздухообмена. В зависимости от конкретного назначения системы воздухообмена разделяются на простые вентиляционные установки, которые осуществляют только воздухообмен в производственном помещении; на системы кондиционирования воздуха, в которых наряду с воздухообменом изменяются параметры поступающего в помещение воздуха, и на аспирационные системы, которые удаляют пыль, выделяющуюся в технологическом оборудовании.

Существуют и системы воздухообмена, которые осуществляют и некоторые технологические операции, например, транспортирование различных грузов. В последнем случае такие системы называются пневмотранспортными.

Для перемещения воздуха в системах воздухообмена и в некоторых пневмотранспортных установках применяются воздуховоды, которые могут быть выполнены из различных материалов. Для проектирования и расчёта таких систем необходимо знать потери давления в воздуховодах (другими словами, гидравлическое сопротивление воздуховода). Некоторые способы определения потерь давления в воздуховодах показаны ниже.

2. Аналитическое определение потерь давления в воздуховодах

Потери давления в воздуховодах $H_{пт}$ (Па) обусловлены тем, что воздух преодолевает сопротивления, которые он встречает при движении.

Воздуховоды состоят из прямолинейных участков и фасонных частей. Потери давления (Па) в воздуховодах

$$H_{пт} = H_{пр} + H_{мс},$$

где $H_{пр}$ – потери давления в прямых участках воздуховодов обусловлены преодолением сопротивлений, возникающих при трении воздуха о стенки воздуховода, Па;

$H_{мс}$ – потери давления на местные сопротивления в фасонных частях воздуховодов, которые возникают в результате изменения скорости и направления движения воздуха, а также вследствие завихрений, ударов и срывов струй, Па.

При проведении расчётов необходимо обращать внимание на размерности входящих в расчётные формулы элементов.

Определение потерь давления проводить в следующей последовательности.

- Определяются диаметры воздуховодов (мм) на участках вентиляционной сети по следующей формуле:

$$D = 18,8 \sqrt{\frac{Q}{V}}, \quad (1)$$

где Q – заданный объемный расход воздуха в одном из последовательных сечений воздуховода, который принимается постоянным для всех сечений данного участка вентиляционной сети, м³/ч,

V – заданная скорость движения воздуха, м/с,

Затем принимается ближайший стандартный диаметр воздуховода, как правило, в сторону уменьшения значения диаметра. Диаметры воздуховодов стандартные (мм): 100, 110, 125, 140, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600. После этого уточняется скорость движения воздуха на каждом участке вентиляционной сети.

$$V = 353,44 \frac{Q}{D^2}. \quad (2)$$

▪ Определяются длины участков. Расчётная длина участка включает в себя, кроме длины прямых участков, длины отводов, диффузоров и конфузоров, если они имеются на данном участке.

$$l_{\text{участка}} = \sum l_{\text{пр}} + \sum l_{\text{отв}} + \sum l_{\text{дифф}} + \sum l_{\text{конф}}. \quad (3)$$

Длину отводов определяют по среднему радиусу отвода.

$$l_{\text{отв}} = \frac{2\pi R_o \alpha}{360},$$

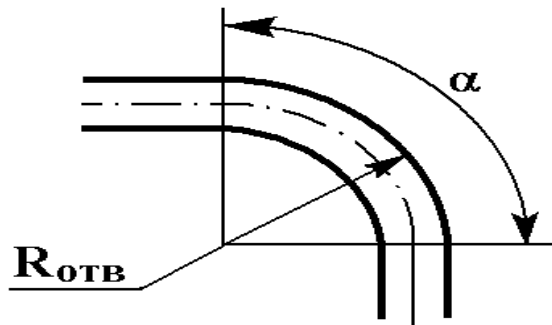


Рисунок 1 – Схема отвода

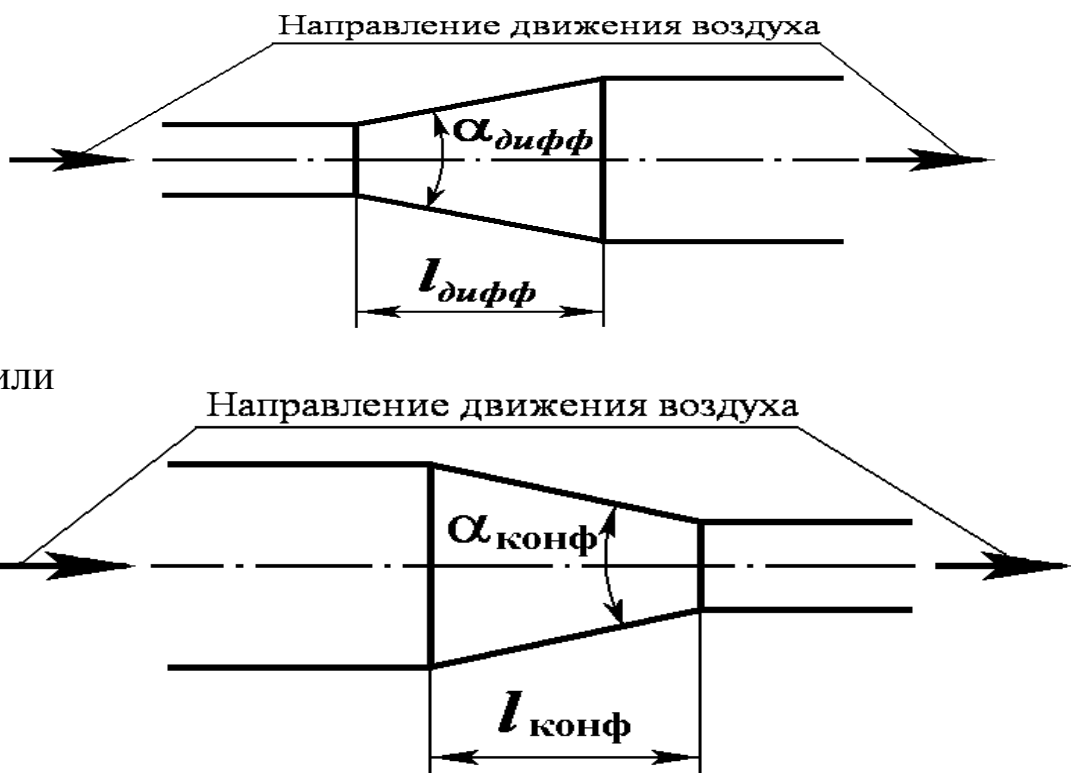


Рисунок 2 – Схемы диффузов

$$l_{отв} = R_o \alpha, \quad (4)$$

где α – угол поворота отвода

▪ Определяется коэффициент сопротивления прямолинейного воздуховода либо по таблицам, которые можно найти в соответствующей литературе, либо по формуле Альтшуля.

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

где D – диаметр воздуховода, мм;

k – абсолютная шероховатость внутренней поверхности воздуховода, мм;

Re – число (критерий) Рейнольдса.

Из формулы (5) видно, что для уменьшения потерь давления и экономии энергии необходимо проектировать воздуховоды с наибольшими диаметрами, наименьшими длинами воздуховодов и скоростями потоков.

Коэффициент сопротивления λ зависит от шероховатости поверхности воздуховода, если толщина ламинарного слоя δ_l , около стенки воздуховода меньше выступов абсолютной шероховатости k . Если толщина ламинарного слоя δ_l больше абсолютной шероховатости k , то шероховатость поверхности не влияет на сопротивление; такие воздуховоды рассматривают как гидравлически гладкие, без учета шероховатости.

Фактическая абсолютная шероховатость поверхности воздуховодов из новой оцинкованной листовой стали составляет 0,15 мм, из новой кровельной проолифленной стали 0,1...0,15 мм.

Стальные новые цельносварные трубы имеют абсолютную шероховатость 0,04...0,1 мм, оцинкованные – 0,07...0,1, чугунные – 0,25...1 мм, бетонные трубы – от 0,3...0,8 до 2,5...3 мм.

Число Рейнольдса определяют по формуле

$$Re = \frac{VD}{\nu_n} = 67VD, \quad (6)$$

где V – скорость воздуха, м/с;

D – диаметр воздуховода, мм;

ν_n – кинематическая вязкость воздуха при нормальных условиях, м²/с.

При ламинарных потоках, когда $Re < 2320$, коэффициент сопротивления

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (7)$$

- Определяются коэффициенты сопротивлений отводов.
Коэффициент сопротивления гладкого отвода

$$\zeta_{отв} = 0,008 \frac{\alpha^{0,75}}{n^{0,6}}, \quad (8)$$

где $n = \frac{R_{отв}}{D} > 1$;

$R_{отв}$ – радиус отвода;

D – диаметр воздуховода;

α – угол отвода, град.

- Определяется коэффициент сопротивления диффузора.
Потери давления в диффузоре

$$H_{n.диф} = \zeta_{диф} \frac{\rho V_1^2}{2}, \quad (9)$$

где V_1 – скорость воздуха в узком сечении диффузора, м/с;

$\zeta_{диф}$ – коэффициент сопротивления диффузора.

Коэффициент сопротивления диффузора $\zeta_{диф}$ определяется по формуле

$$\zeta_{диф} = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha_{диф}}{2}} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) + 4,8 \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha_{диф}}{2} \right)^{1,25} \left(1 - \frac{1}{n} \right)^2, \quad (10)$$

где λ – коэффициент сопротивления, который находят по среднему диаметру $D_{cp} = 0,5(D_1 + D_2)$, используя формулу Альтшуля (5);

$\alpha_{диф}$ – угол раскрытия диффузора, град;

n – степень расширения диффузора, равная отношению площадей выходного $S_{вых}$ и входного $S_{вх}$ воздуховодов, т.е. $n = \frac{S_{вых}}{S_{вх}} > 1$.

Чем больше угол раскрытия диффузора, тем больше коэффициент сопротивления. Наименьшие сопротивления получают при $\alpha_{диф}$

$< 10^0$; при $\alpha_{диф} > 10^0$ происходят нарушения симметричности поля скоростей, срывы струй и завихрения у стенок. На практике же обычно применяют углы раскрытия больше 10^0 , так как не хватает места для длинных диффузоров. Коэффициенты сопротивления диффузоров можно найти и в таблицах, приводимых в литературе.

- Определяется коэффициент сопротивления конфузора.
Потери давления в конфузоре (Па)

$$H_k = \zeta_k \frac{\rho V_2^2}{2}, \quad (11)$$

где ζ_k – коэффициент сопротивления конфузора;

V_k – скорость воздушного потока в узком сечении, м/с.

Коэффициент сопротивления конфузора может быть определён по следующей формуле (23):

$$\zeta_k = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha_{конф}}{2}} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) + 0,001 \alpha_{конф}. \quad (12)$$

Здесь λ – коэффициент сопротивления, который определяется по среднему диаметру по формуле Альтшуля (5);

$\alpha_{конф}$ – угол сужения конфузора, град;

n – степень сужения конфузора, $n = \frac{S_{ex}}{S_{вых}} > 2$.

Коэффициенты сопротивления конфузоров можно также найти и в таблицах, приводимых в литературе.

- Определяются коэффициенты сопротивлений в тройнике. Для этого необходимо вычислить следующие величины:

– площади воздухопроводов, соединяемых тройником,

$$S = \frac{\pi D^2}{4}; \quad (13)$$

– отношения площадей воздухопроводов

$$\frac{S_{np}}{S_{объед}}, \quad \frac{S_{бок}}{S_{объед}}; \quad (14)$$

– отношение расходов воздуха бокового и объединённого воздухопроводов

$$\frac{Q_{бок}}{Q_{объед}}. \quad (15)$$

На основе найденных величин по таблице (в приведённой ниже таблице коэффициенты сопротивлений даны для тройников с углом $\alpha_{тр} = 30^0$, причём коэффициент сопротивления бокового воздуховода приведён с учётом сопротивления отвода) определяются коэффициенты сопротивлений проходного и бокового воздухопроводов.

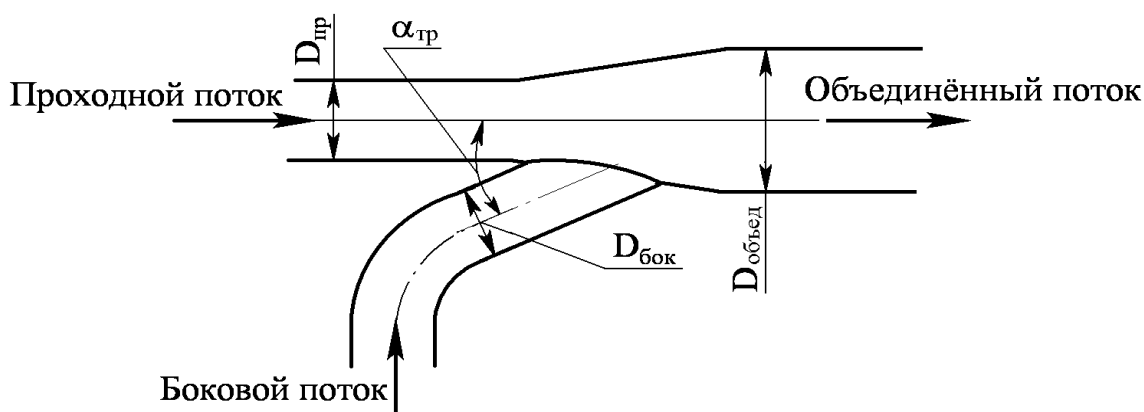


Рисунок 3 – Схема тройника

- Определяется сумма коэффициентов сопротивлений участка

$$\frac{\lambda}{D} l_{участка} + \sum \zeta. \quad (16)$$

- Определяется динамическое давление участка

$$H_{\partial} = \frac{\rho V_2^2}{2}, \quad (17)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 . Принимается стандартный воздух, у которого $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

- Определяются потери давления непосредственно на участке.

$$H_{нт} = \left(\frac{\lambda}{D} l_{участка} + \sum \zeta \right) \frac{\rho V_2^2}{2}. \quad (18)$$

- Определяются суммарные потери давления на участке.

Эти потери равны сумме сопротивления $H_{нт}$ непосредственно участка и потери давления Δp в предыдущих участках, включая и подсоединённое к воздухопроводу оборудование.

$$H_{\text{участка}} = H_{\text{нт}} + \Delta p. \quad (19)$$

Таблица 1

**Коэффициенты сопротивления тройников во всасывающих
воздуховодах с углом $\alpha_{тр} = 30^0$ [3]**

$\frac{S_{тр}}{S_{объед}}$	$\frac{S_{бок}}{S_{объед}}$	$Q_{бок}/Q_{объед}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,2	0,6	$\frac{0,3}{-150}$	$\frac{0,3}{-27}$	$\frac{0,3}{-8,0}$	$\frac{0,3}{-2,6}$	$\frac{0,3}{-0,6}$	$\frac{0,2}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,2}$	$\frac{-0,5}{0,4}$	$\frac{-4,0}{0,4}$
	0,7	$\frac{0,3}{-210}$	$\frac{0,3}{-39}$	$\frac{0,3}{-12}$	$\frac{0,3}{-4,0}$	$\frac{0,3}{-1,2}$	$\frac{0,3}{-0,1}$	$\frac{0,3}{0,2}$	$\frac{-0,1}{0,4}$	$\frac{-2,8}{0,4}$
	0,8	$\frac{0,4}{-292}$	$\frac{0,4}{-54}$	$\frac{0,4}{-17}$	$\frac{0,4}{-5,4}$	$\frac{0,4}{-1,7}$	$\frac{0,4}{-0,1}$	$\frac{0,4}{0,2}$	$\frac{0,3}{0,4}$	$\frac{-2,3}{0,4}$
0,3	0,5	$\frac{0,3}{-}$	$\frac{0,3}{-}$	$\frac{0,3}{-}$	$\frac{0,3}{-}$	$\frac{0,3}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{-0,1}{-}$	$\frac{-2,1}{-}$	$\frac{-15}{-}$
	0,6	$\frac{0,3}{-87}$	$\frac{0,3}{-15}$	$\frac{0,3}{-4,0}$	$\frac{0,3}{-1,2}$	$\frac{0,3}{-0,1}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{-0,1}{0,3}$	$\frac{-1,4}{0,4}$	$\frac{-11}{0,4}$
	0,7	$\frac{0,3}{-103}$	$\frac{0,3}{-18}$	$\frac{0,3}{-5,0}$	$\frac{0,3}{-1,4}$	$\frac{0,3}{-0,2}$	$\frac{0,2}{-0,1}$	$\frac{0,0}{0,3}$	$\frac{-1,0}{0,4}$	$\frac{-8,0}{0,4}$
	0,8	$\frac{0,4}{-160}$	$\frac{0,4}{-29}$	$\frac{0,4}{-8,0}$	$\frac{0,4}{-2,4}$	$\frac{0,4}{-0,4}$	$\frac{0,3}{0,1}$	$\frac{0,1}{0,3}$	$\frac{-0,6}{0,4}$	$\frac{-7,0}{0,4}$
0,4	0,5	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,1}{-}$	$\frac{0,0}{-}$	$\frac{-0,9}{-}$	$\frac{-4,6}{-}$	$\frac{-28}{-}$
	0,6	$\frac{0,2}{-65}$	$\frac{0,2}{-12}$	$\frac{0,2}{-3,2}$	$\frac{0,2}{-0,8}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,2}$	$\frac{-0,6}{0,4}$	$\frac{-3,2}{0,4}$	$\frac{-20}{0,4}$
	0,7	$\frac{0,2}{-76}$	$\frac{0,2}{-13}$	$\frac{0,2}{-3,3}$	$\frac{0,2}{-0,8}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,2}$	$\frac{-0,4}{0,3}$	$\frac{-2,4}{0,4}$	$\frac{-14}{0,4}$
	0,8	$\frac{0,2}{-103}$	$\frac{0,2}{-17}$	$\frac{0,2}{-4,6}$	$\frac{0,2}{-0,8}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,2}$	$\frac{-0,4}{0,3}$	$\frac{-2,4}{0,4}$	$\frac{-14}{0,4}$
0,5	0,3	$\frac{0,2}{-11,7}$	$\frac{0,2}{-1,0}$	$\frac{0,2}{0,6}$	$\frac{0,1}{0,8}$	$\frac{-0,3}{1,0}$	$\frac{-1,3}{1,0}$	$\frac{-5,4}{1,0}$	$\frac{-19}{1,0}$	$\frac{-100}{1,0}$
	0,4	$\frac{0,2}{-22,4}$	$\frac{0,2}{-2,4}$	$\frac{0,2}{0,5}$	$\frac{0,1}{0,8}$	$\frac{-0,1}{0,9}$	$\frac{-0,9}{0,9}$	$\frac{-3,4}{0,9}$	$\frac{-13,6}{0,9}$	$\frac{-75}{0,9}$
	0,5	$\frac{0,2}{-38}$	$\frac{0,2}{-6,3}$	$\frac{0,2}{-1,2}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,0}{0,5}$	$\frac{-0,5}{0,7}$	$\frac{-2,1}{0,7}$	$\frac{-8,1}{0,7}$	$\frac{-46}{0,7}$
	0,6	$\frac{0,2}{-52}$	$\frac{0,2}{-9,0}$	$\frac{0,2}{-2,5}$	$\frac{0,2}{-0,6}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{-0,1}{0,2}$	$\frac{-1,1}{0,3}$	$\frac{-4,7}{0,4}$	$\frac{-30}{0,4}$
	0,7	$\frac{0,2}{-70}$	$\frac{0,2}{-12}$	$\frac{0,2}{-3,0}$	$\frac{0,2}{-0,8}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{-0,1}{0,2}$	$\frac{-0,9}{0,3}$	$\frac{-4,1}{0,4}$	$\frac{-24}{0,4}$
	0,8	$\frac{0,2}{-77}$	$\frac{0,2}{-15}$	$\frac{0,2}{-4,0}$	$\frac{0,2}{-0,8}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,2}$	$\frac{-0,8}{0,3}$	$\frac{-3,8}{0,4}$	$\frac{-23}{0,4}$
0,6	0,2	$\frac{0,2}{-42}$	$\frac{0,2}{-0,2}$	$\frac{0,1}{0,6}$	$\frac{-0,1}{0,9}$	$\frac{-1,0}{1,0}$	$\frac{-3,0}{1,0}$	$\frac{-8,0}{1,0}$	$\frac{-26}{1,0}$	$\frac{-140}{1,0}$
	0,3	$\frac{0,2}{-10,4}$	$\frac{0,2}{-0,8}$	$\frac{0,2}{0,6}$	$\frac{0,0}{0,9}$	$\frac{-0,6}{1,0}$	$\frac{-2,1}{1,0}$	$\frac{-6,8}{1,0}$	$\frac{-23}{1,0}$	$\frac{-125}{1,0}$
	0,4	$\frac{0,2}{-18}$	$\frac{0,2}{-1,8}$	$\frac{0,2}{0,4}$	$\frac{0,1}{0,8}$	$\frac{-0,2}{0,9}$	$\frac{-1,5}{0,9}$	$\frac{-5,0}{0,9}$	$\frac{-17}{0,9}$	$\frac{-96}{0,9}$
	0,5	$\frac{0,2}{-30}$	$\frac{0,2}{-6,0}$	$\frac{0,2}{-0,1}$	$\frac{0,1}{0,5}$	$\frac{-0,1}{0,7}$	$\frac{-0,8}{0,7}$	$\frac{-2,5}{0,7}$	$\frac{-10}{0,7}$	$\frac{-57}{0,7}$
	0,6	$\frac{0,2}{-45}$	$\frac{0,2}{-8,1}$	$\frac{0,2}{-2,3}$	$\frac{0,2}{-0,6}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{-0,2}{0,2}$	$\frac{-1,2}{0,3}$	$\frac{-6,3}{0,4}$	$\frac{-40}{0,4}$
	0,7	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,1}{-}$	$\frac{-0,1}{-}$	$\frac{-1,2}{-}$	$\frac{-5,4}{-}$	$\frac{-36}{-}$
	0,8	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,2}{-}$	$\frac{0,1}{-}$	$\frac{0,0}{-}$	$\frac{-1,0}{-}$	$\frac{-4,5}{-}$	$\frac{-31}{-}$

$\frac{S_{пр}}{S_{объед}}$	$\frac{S_{бок}}{S_{объед}}$	$Q_{бок}/Q_{объед}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,7	0,2	$\frac{0,2}{-3,8}$	$\frac{0,2}{-0,1}$	$\frac{0,0}{0,7}$	$\frac{-0,4}{0,9}$	$\frac{-1,5}{1,0}$	$\frac{-4,0}{1,0}$	$\frac{-12}{—}$	$\frac{-38}{—}$	$\frac{-200}{—}$
	0,3	$\frac{0,2}{-9,0}$	$\frac{0,2}{-0,6}$	$\frac{0,2}{0,7}$	$\frac{0,0}{0,9}$	$\frac{-0,6}{1,0}$	$\frac{-2,5}{1,0}$	$\frac{-8,0}{1,0}$	$\frac{-28}{1,0}$	$\frac{-150}{1,0}$
	0,4	$\frac{0,2}{-16}$	$\frac{0,2}{-1,2}$	$\frac{0,2}{0,6}$	$\frac{0,1}{0,8}$	$\frac{-0,3}{0,9}$	$\frac{-1,9}{0,9}$	$\frac{-7,0}{0,9}$	$\frac{-25}{0,9}$	$\frac{-140}{0,9}$
	0,5	$\frac{0,2}{-25}$	$\frac{0,2}{-4,7}$	$\frac{0,2}{0,0}$	$\frac{0,1}{0,6}$	$\frac{-0,2}{0,7}$	$\frac{-1,3}{0,7}$	$\frac{-5,0}{0,7}$	$\frac{-16}{0,7}$	$\frac{-91}{0,7}$
	0,6	$\frac{0,2}{-40}$	$\frac{0,2}{-7,2}$	$\frac{0,2}{-2,0}$	$\frac{0,2}{-0,6}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{-0,3}{0,2}$	$\frac{-1,6}{0,3}$	$\frac{-7,0}{0,4}$	$\frac{-49}{0,4}$
0,8	0,2	$\frac{0,2}{-3,2}$	$\frac{0,2}{0,1}$	$\frac{0,0}{0,7}$	$\frac{-0,5}{0,9}$	$\frac{-2,0}{1,0}$	$\frac{-5,6}{1,0}$	$\frac{-16}{—}$	$\frac{-52}{—}$	$\frac{-278}{—}$
	0,3	$\frac{0,2}{-8,0}$	$\frac{0,2}{-0,4}$	$\frac{0,1}{0,7}$	$\frac{-0,1}{0,9}$	$\frac{-1,1}{1,0}$	$\frac{-3,4}{1,0}$	$\frac{-10,0}{1,0}$	$\frac{-35}{1,0}$	$\frac{-192}{1,0}$
	0,4	$\frac{0,2}{-14}$	$\frac{0,2}{-0,5}$	$\frac{0,2}{0,6}$	$\frac{0,0}{0,8}$	$\frac{-0,7}{0,9}$	$\frac{-2,8}{0,9}$	$\frac{-9,0}{0,9}$	$\frac{-30}{0,9}$	$\frac{-173}{0,9}$
	0,5	$\frac{0,2}{-23}$	$\frac{0,2}{-3,5}$	$\frac{0,2}{0,1}$	$\frac{0,1}{0,6}$	$\frac{-0,3}{0,7}$	$\frac{-1,8}{0,7}$	$\frac{-6,0}{0,7}$	$\frac{-20}{0,7}$	$\frac{-115}{0,7}$
	0,6	$\frac{0,2}{-36}$	$\frac{0,2}{-6,8}$	$\frac{0,2}{-1,8}$	$\frac{0,2}{-0,4}$	$\frac{0,1}{0,0}$	$\frac{-0,4}{0,2}$	$\frac{-2,3}{0,3}$	$\frac{-10}{0,4}$	$\frac{-64}{0,4}$
0,9	0,2	$\frac{0,2}{-2,5}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,0}{0,8}$	$\frac{-0,6}{1,0}$	$\frac{-2,8}{1,0}$	$\frac{-8,3}{1,0}$	$\frac{-23}{—}$	$\frac{-74}{—}$	$\frac{-387}{—}$
	0,3	$\frac{0,2}{-6,3}$	$\frac{0,2}{-0,1}$	$\frac{0,1}{0,8}$	$\frac{-0,2}{1,0}$	$\frac{-1,6}{1,0}$	$\frac{-5,3}{1,0}$	$\frac{-15}{1,0}$	$\frac{-48}{1,0}$	$\frac{-266}{1,0}$
	0,4	$\frac{0,2}{-12}$	$\frac{0,2}{-0,1}$	$\frac{0,2}{0,7}$	$\frac{0,0}{0,8}$	$\frac{-1,0}{0,9}$	$\frac{-3,5}{0,9}$	$\frac{-11}{0,9}$	$\frac{-36}{0,9}$	$\frac{-206}{0,9}$
	0,5	$\frac{0,2}{-19}$	$\frac{0,2}{-2,5}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,1}{0,6}$	$\frac{-0,3}{0,7}$	$\frac{-2,0}{0,7}$	$\frac{-7,0}{0,7}$	$\frac{-24}{0,7}$	$\frac{-137}{0,7}$
	0,6	$\frac{0,2}{-33}$	$\frac{0,2}{-5,9}$	$\frac{0,2}{-1,4}$	$\frac{0,2}{-0,2}$	$\frac{0,1}{0,1}$	$\frac{-0,4}{0,2}$	$\frac{-2,3}{0,3}$	$\frac{-12}{0,4}$	$\frac{-80}{0,4}$
1,0	0,2	$\frac{0,2}{2,0}$	$\frac{0,2}{0,3}$	$\frac{0,4}{0,9}$	$\frac{-1,8}{1,0}$	$\frac{-5,2}{1,0}$	$\frac{-13}{1,0}$	$\frac{-34}{—}$	$\frac{-105}{—}$	$\frac{-540}{—}$
	0,3	$\frac{0,2}{-5,4}$	$\frac{0,2}{0,2}$	$\frac{0,0}{0,9}$	$\frac{-0,8}{1,0}$	$\frac{-3,2}{1,0}$	$\frac{-8,4}{1,0}$	$\frac{-23}{1,0}$	$\frac{-71}{1,0}$	$\frac{-375}{1,0}$
	0,4	$\frac{0,2}{-10}$	$\frac{0,2}{-0,4}$	$\frac{0,1}{0,7}$	$\frac{-0,2}{0,9}$	$\frac{-1,6}{0,9}$	$\frac{-5,0}{0,9}$	$\frac{-14}{0,9}$	$\frac{-47}{0,9}$	$\frac{-255}{0,9}$
	0,5	$\frac{0,2}{-15}$	$\frac{0,2}{-1,4}$	$\frac{0,2}{0,3}$	$\frac{0,0}{0,6}$	$\frac{-0,5}{0,7}$	$\frac{-2,2}{0,7}$	$\frac{-8,0}{0,7}$	$\frac{-26}{0,7}$	$\frac{-155}{0,7}$
	0,6	$\frac{0,2}{-30}$	$\frac{0,2}{-5,0}$	$\frac{0,2}{-1,1}$	$\frac{0,2}{-0,1}$	$\frac{0,1}{-0,1}$	$\frac{-0,5}{0,3}$	$\frac{-2,8}{0,4}$	$\frac{-15}{0,4}$	$\frac{-100}{0,4}$

Примечание. Верхняя цифра в таблице 1 – коэффициент сопротивления проходного воздуховода, а нижняя – коэффициент сопротивления бокового воздуховода.

■ Определяется разница в общих давлениях соединенных тройником проходного и бокового воздуховодов. Эта разница в пределе должна быть равна нулю. Допускается разница в давлениях не

более 2%. Для уравнивания давлений может либо устанавливаться дополнительное сопротивление (например, диафрагма) на участке с меньшими потерями давления, либо увеличивается скорость воздуха на этом участке за счёт уменьшения диаметра воздуховода.

При выравнивании давлений с помощью диафрагмы следует выполнить следующее.

– По известной разнице давлений определяется коэффициент сопротивления диафрагмы

$$\zeta_{\text{диаф}} = \frac{\Delta H}{\frac{\rho V^2}{2}} . \quad (20)$$

– Выбирается тип диафрагмы.

– По таблицам, номограммам или графикам по найденному коэффициенту сопротивления определяются параметры диафрагмы.

В качестве примера в таблице 2 приведены коэффициенты сопротивления поворотной диафрагмы (заслонки).

Таблица 2

Коэффициенты сопротивления поворотной диафрагмы (заслонки) [3]

Сечение воздуховода	Угол поворота заслонки, град									
	5	10	20	30	40	45	50	60	70	90
Круглое	0,24	0,52	1,54	3,91	10,8	18,7	32,6	118	751	∞
Прямоугольное	0,28	0,45	1,34	3,54	9,27	16,0	24,9	77,4	368	∞

При выравнивании давлений с помощью увеличения скорости движения воздуха за счёт уменьшения диаметра воздуховода могут быть использованы соответствующие формулы и номограммы. При отсутствии номограмм задаются несколькими значениями скорости движения воздуха в том воздуховоде, в котором потери давления меньше. После чего производят расчёты диаметра и сопротивления методом перебора вариантов.

▪ Определяются потери давления в воздушном фильтре. Для этой цели необходимо определить тип фильтра, который будет использован в данной вентиляционной системе, после чего найти соответствующую этому фильтру величину коэффициента сопротивления в приводимых в литературе таблицах. Если в качестве такого фильтра

используется циклон, то нужно учесть 5% подсос воздуха в воздуховодах при определении расхода воздуха циклоном.

Потери давления в фильтре определяются по формуле

$$H_{\phi} = \zeta_{\phi} \frac{\rho V_{\phi}^2}{2}, \quad (21)$$

где ζ_{ϕ} – коэффициент сопротивления циклона, который зависит от его конструкции;

V_{ϕ} – скорость потока воздуха на входе в фильтр.

▪ Для последнего участка, в котором воздух из вентиляционной системы выпускается в атмосферу, определяется сопротивлением выхлопа.

$$H_{\text{вых}} = \frac{\rho V_{\text{вых}}^2}{2},$$

где $V_{\text{вых}}$ – скорость на выхлопе, м/с.

Потери давления на выхлоп равны динамическому давлению на выхлопе, а коэффициент сопротивления выхлопа $\zeta_{\text{вых}}$, следовательно, равен единице.

Для уменьшения потерь давления на выхлоп необходимо уменьшить скорость на выхлопе, т.е. установить диффузор. При этом потери давления в диффузоре будут несколько больше, чем на прямом участке, однако общие потери давления с учетом потерь на выхлоп значительно уменьшаются, что дает экономию энергии.

▪ Потери давления в вентиляционной сети определяются как сумма потерь давления на отдельных её участках.

3. Варианты заданий на определение потерь давления

В ВОЗДУХОВОДАХ*Таблица 3***Размеры прямолинейных участков воздухопроводов, м**

Вариант	Номер участка						
	п1	п2	п3	п4	п5	п6	п7
1	3	1	8	4	3	2	3
2	4	1	9	5	1	3	2
3	2	2	10	6	2	2	4
4	3	1	10	8	5	2	2
5	4	2	8	4	2	1	3
6	5	1	9	7	4	3	1
7	3	3	7	10	3	2	2
8	3	1	8	5	2	2	3
9	2	2	10	4	1	3	2
10	4	1	8	6	4	3	4
11	2	2	9	5	2	2	3
12	3	1	9	9	5	4	3
13	4	4	7	7	2	4	4
14	5	2	6	6	4	3	5
15	3	3	9	9	5	3	4
16	2	2	10	8	3	5	3
17	3	3	8	7	5	4	3

Первый столбец означает номер варианта, соответствующий номеру по списку в журнале.

Первая строка означает номер участка в соответствии с рисунком 1.

*Таблица 4***Размеры отводов**

Номер варианта	Номер отвода							
	n	α	n	α	n	α	n	α
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	30	3	40	3	50	2	30
2	1	35	2	45	3	55	4	35
3	1,5	40	2,5	50	3,5	60	3,5	40
4	2,5	45	3	55	4	65	4	45
5	3	50	3,5	60	4	70	3,5	50
6	2	35	2,5	40	3	45	2	50
7	1	40	1,5	45	2	45	2,5	60
8	1,5	30	2	35	2,5	40	1,5	50

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	3,5	45	3,5	45	2	30	2	35
10	2	30	2	35	2	35	1	40
11	2,5	35	2,5	30	2,5	45	1	70
12	3	40	3	30	2,5	45	2	60
13	1	45	1	45	2	30	3	55
14	1,5	45	2	45	1,5	45	2,5	30
15	2	45	2	30	2	30	1	30
16	2,5	30	1,5	30	2,5	50	2,5	50
17	3	35	3	35	3	45	2	30

Примечание. Первая строчка означает номер отвода в соответствии со схемой. Вторая строка включает в себя наименования параметров отвода: радиус закругления по средней части воздуховода и угол отклонения воздуховода. Радиус закругления задан в диаметрах воздуховода, то есть $R = nd_g$, где n – коэффициент, величина которого дана в таблице, а d_g – диаметр воздуховода.

Угол между соседними воздуховодами тройника принимаются равными во всех работах 30^0 .

Таблица 5

Расход воздуха ($\text{м}^3/\text{ч}$) и потери давления (Па) на входах 1 и 2

Номер варианта	Вход 1		Вход 2	
	Q	Δp	Q	Δp
1	560	100	720	100
2	600	105	800	100
3	650	110	850	105
4	700	115	900	110
5	750	100	950	100
6	800	105	1000	150
7	850	110	1100	150
8	900	100	1200	140
9	500	100	700	100
10	600	100	800	105
11	650	105	850	110
12	700	100	900	100
13	760	110	900	105
14	820	100	850	100
15	880	106	960	110
16	720	104	830	105
17	910	110	1000	100

Скорость воздуха в работах с нечётными номерами принимается равной 10 м/с, а с чётными – 11 м/с.

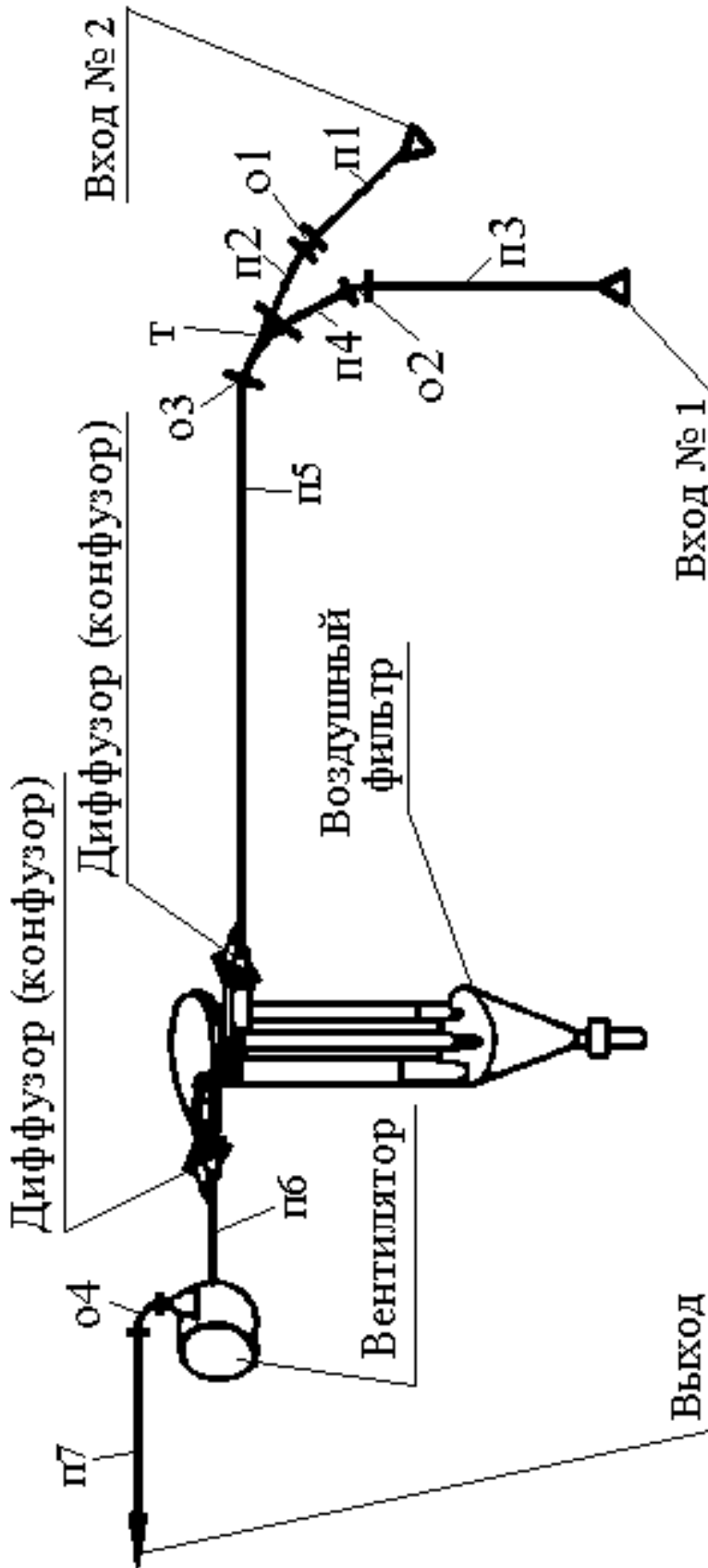


Рисунок 4 – Схема воздуховодов к «Заданию по расчёту потерь давления в воздуховодах»

4. Определение потерь давления в воздуховодах экспериментально

Цель работы:

- 1) практически изучить устройство лабораторной установки;
- 2) изучить и освоить методики экспериментального и расчётного определения потерь давления в воздуховоде;
- 3) оценить влияние скорости движения воздуха в воздуховоде на потери давления в нём.

Для экспериментального определения потерь давления в воздуховоде необходимы следующие инструменты и приборы: рулетка, штангенциркуль, угломер, уровень, микроманометр.

Потери давления в воздуховоде, диаметр которого для всех сечений воздуховода постоянен, определяется по перепаду статического давления между началом и концом воздуховода с помощью микроманометра. Схема измерения показана на рисунке 5.

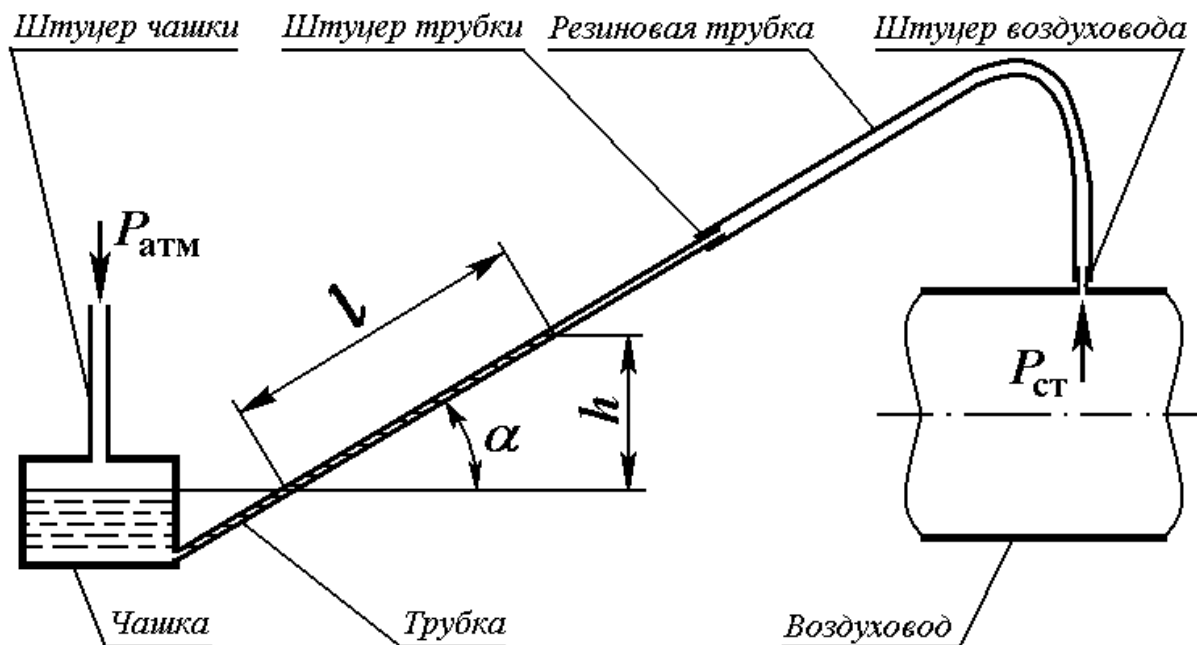


Рисунок 5 – Схема определения статического давления в воздуховоде с помощью микроманометра

Порядок проведения работы следующий.

- В начале воздуховода с помощью уровня устанавливается микроманометр.
- Определяется угол наклона трубки микроманометра с помощью угломера или с использованием других методов, которые предлагаются самим студентом.
- Определяется и фиксируется начальное положение жидкости в трубке микроманометра.
- С разрешения преподавателя включается вентилятор воздуховода.
- Определяется рабочее положение жидкости в трубке микроманометра и измеряется расстояние между её начальным и рабочим положениями с помощью штангенциркуля.

▪ Аналогичным образом определяется расстояние между начальным и рабочим положениями жидкости в трубке микроманометра в конце воздуховода.

▪ Рассчитываются величины статического давления в начале и конце воздуховода по следующей формуле:

$$H_c = l \sin \alpha \rho_{ж} g \frac{\rho_{вн}}{\rho_{визм}},$$

где l – расстояние между начальным и рабочим положением жидкости в трубке микроманометра, мм;

α – угол наклона трубки микроманометра;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости в трубке микроманометра, г/см³;

g – ускорение свободного падения. м/с²;

$\rho_{вн}$ – плотность воздуха при нормальных условиях,

$$\rho_{вн} = 1,2 \text{ кг/см}^3;$$

$\rho_{визм}$ – плотность воздуха при условиях измерения.

$$\rho_{визм} = 0,0034686 \frac{p_v}{273 + t_v},$$

где p_v – давление воздуха в момент измерения;

t_v – температура воздуха в момент измерения.

▪ Определяются потери давления в воздуховоде (гидравлическое сопротивление воздуховода).

$$\Delta H_c = H_{сн} - H_{ск}.$$

где $H_{сн}$ – статическое давление в начале воздуховода;

$H_{ск}$ – статическое давление в конце воздуховода.

▪ Указанные выше измерения и расчёты повторяются 3–5 раз, после чего проводится обработка полученных результатов с целью определения среднего значения потерь давления.

▪ Измеряются длина воздуховода и его диаметр, а также определяется материал, из которого сделан воздуховод и оценивается шероховатость его внутренней поверхности.

▪ Рассчитываются аналитически потери давления в данном воздуховоде по приведённой в главе 2 методики.

▪ Сравниваются значения потерь давления, полученные экспериментальным и аналитическим путём.

▪ 5–6 раз изменяется скорость движения воздуха в воздуховоде, и проводятся вышеприведённые экспериментальные работы и расчёты.

▪ Строится и анализируется график изменения потерь давления в воздуховоде в зависимости от скорости движения воздуха в нём.

Библиографический список

Основная литература

1. ЭУМК дисциплины «Холодильное и вентиляционное оборудование». – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2008.
2. Веселов, С.А. Вентиляционные и аспирационные установки / С.А. Веселов. – М.: Колос, 2004.
3. Орлов, К.С. Монтаж и эксплуатация санитарно-технических, вентиляционных систем и оборудования / К.С. Орлов. – М.: Изд. центр «Академия», 2004.
4. Гавриленков, А.М. Экологическая безопасность пищевых производств / А.М. Гавриленков, С.С. Зарцына, С.Б. Зуева. – СПб.: Гиорд, 2006.

Дополнительная литература

1. Веселов, С.А. Проектирование вентиляционных установок по хранению и переработке зерна / С.А. Веселов. – М.: Колос, 1974.
2. Веселов, С.А. Практикум по вентиляционным установкам / С.А. Веселов. – М.: Колос, 1974.
3. Донин, Л.С. Справочник по вентиляции в пищевой промышленности / Л.С. Донин. – М.: Пищ. пром-сть, 1977.

ХОЛОДИЛЬНОЕ И ВЕНТИЛЯЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ВОЗДУХОВОДАХ

Методические указания к лабораторным занятиям

Составители: В.Н. Невзоров, В.Н. Холопов

Редактор В.А. Сорокина

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.
Подписано в печать 2009. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 1962
Печать – ризограф. Объем п.л. Тираж 110 экз. Заказ №
Издательство Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117