

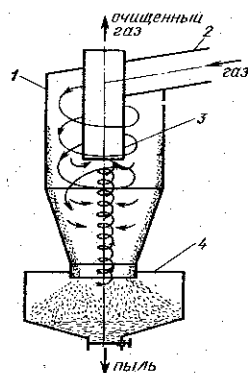
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

Стахановский инженерно-педагогический институт менеджмента

Кафедра технологии производства и охраны труда

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**к курсовому проектированию по дисциплине**  
**«ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ АТМОСФЕРЫ**  
**ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ»**

для студентов направления подготовки  
44.04.04 Профессиональное обучение (по отраслям)



*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом  
ГОУ ВО ЛНР «ЛГУ им. В. ДАЛЯ»  
(протокол № от г.)*

Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «**Технология и техника защиты атмосферы от вредных выбросов**» для студентов направления подготовки 44.04.04 **Профессиональное обучение (по отраслям)**. / Сост.: В.И.Сафонов. – **Стаханов**: ГОУ ВО ЛНР «ЛГУ им. В. ДАЛЯ», 2021. – 55 с.

Методические указания к курсовому проектированию по дисциплине «Технология и техника защиты атмосферы от вредных выбросов» предназначены для студентов всех форм обучения направления подготовки 44.04.04.

В методических указаниях приведены теоретические сведения процессов пылеулавливания, а также основные методики расчета циклонов, скрубберов Вентури и каплеуловителей, рукавных фильтров, даны примеры расчета и рекомендации по использованию и эксплуатации пылеулавливающего оборудования.

Предназначены для студентов магистерской программы «Безопасность технологических процессов и производств», «Горное дело. Подземная разработка пластовых месторождений», «Горное дело. Технологическая безопасность и горноспасательное дело».

Составитель:	доц. Сафонов В.И.
Ответственный за выпуск:	доц. Сафонов В.И.
Рецензент:	доц. Черникова С.А.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ .....	4
1.1 Общие понятия о пыли и ее классификация .....	4
1.2. Классификация пылеуловителей .....	4
2. ЦИКЛОНЫ .....	6
2.1 Теоретическая часть .....	6
2.2. Циклоны конструкции НИИОГАЗ .....	8
2.3. Методика расчёта циклонов .....	13
2.3.1 Практические рекомендации по выбору циклонов .....	13
2.3.2. Расчёт циклонов .....	14
2.4. Технологический расчёт мокрого циклона .....	23
2.5. Рекомендации по использованию и эксплуатации циклонов .....	25
3 АППАРАТЫ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ .....	27
3.1 Орошаемые газоходы .....	27
3.2 Промывочные камеры .....	27
3.4 Аппараты ударно-инерционного действия .....	30
3.6 Скоростные газопромыватели .....	33
3.7 Расчет скруббера Вентури .....	34
3.3 Конструктивные параметры трубы Вентури .....	35
4. КАПЛЕУЛОВИТЕЛИ .....	36
4.1 Теоретическая часть .....	36
4.2 Определение основных конструктивных параметров каплеуловителя .....	37
5. ПЫЛЕВЫЕ КАМЕРЫ .....	39
5.1. Теоретическая часть .....	39
5.2. Расчет пылевой камеры .....	41
6. РУКАВНЫЕ ФИЛЬТРЫ .....	41
6.1. Теоретическая часть .....	41
7. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	44
7.1. Требования к выполнению структурных элементов работы .....	45
7.2. Требования к объему и оформлению пояснительной записки .....	50
7.3. Графическая часть .....	53
ЛИТЕРАТУРА .....	55

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

## 1.1 Общие понятия о пыли и ее классификация

Пыль представляет собой дисперсную систему с газообразной дисперсионной средой и твердой дисперсной фазой, состоящей из частиц от квазимолекулярного до макроскопического размеров, обладающих свойством находиться во взвешенном состоянии более или менее продолжительное время.

Аэрозоли также представляют собой дисперсные системы с газообразной (воздушной) дисперсионной средой и твердой или жидкой дисперсной фазой. Скорость оседания частиц аэрозоля очень мала, и они могут неопределенно долгое время находиться во взвешенном состоянии. Наиболее тонкие частицы аэрозоля по размерам приближаются к наиболее крупным молекулам, а наиболее крупные достигают размера 1 мкм. В технической литературе термины грубый аэрозоль и пыль являются синонимами.

Пыли и аэрозоли обычно полидисперсны, т.е. частицы их дисперсной фазы имеют неодинаковый размер. В природе и технике монодисперсные пыли и аэрозоли встречаются крайне редко.

Масса частиц, содержащихся в единице объема газа или воздуха, называется концентрацией пыли, пылесодержанием или запыленностью [3].

Атмосферные частицы классифицируются по размерам следующим образом:

- крупные частицы (средний диаметр 20 мкм) – сосредоточены в нижнем слое тропосферы (до 3000 м), осаждаются под действием силы тяжести, но могут переноситься ветром на большие расстояния;

- полутонкая пыль (диаметр 0,1... 5 мкм) – осаждается с трудом или не осаждается вовсе. Частицы размером меньше 1 мкм служат ядрами конденсации водяного пара. Для частиц диаметром менее 0,1 мкм из-за броуновского движения осаждение в обычных условиях невозможно (эти частицы называются аэрозолем);

- тонкая (микроскопическая) неосаждающаяся пыль (диаметр менее 0,001 мкм), это так называемые частицы Айткена.

Большинство атмосферных частиц, удерживающихся в воздухе в течение длительного времени, имеют диаметр 0,1... 5 мкм. Тонкая и частично полутонкая пыль не осаждается в местах выброса при сухой атмосфере и поэтому может попасть в потоки региональных и глобальных загрязняющих веществ [2].

## 1.2. Классификация пылеуловителей

По назначению устройства для очистки газа (воздуха) от пыли подразделяются на пылеуловители и воздушные фильтры. Первые служат для санитарной очистки газов и воздуха перед их выбросом в атмосферу и для технологической очистки с целью улавливания и возврата ценных пылевидных продуктов или полуфабрикатов, а вторые – для очистки приточного воздуха, подаваемого вентиляционными установками в производственные и общественные здания. Пыле-

уловители делятся на две категории – аппараты без применения жидкости и с ее применением. Такое деление принято в ГОСТ 12.2.043-80 «Оборудование пылеулавливающее. Классификация».

Сухие пылеуловители делятся на гравитационные, инерционные, фильтрационные и электрические. По некоторым особенностям их действия или основному конструктивному признаку группы пылеуловителей делятся на подгруппы, а в зависимости от специфики конструктивного оформления на типы аппаратов.

Гравитационные пылеуловители – пылеосадочные камеры, в которых выпадение частиц из газового потока происходит под действием силы тяжести. Существуют полые и полочные камеры. Полки в камерах устанавливаются с целью осаждения более тонких частиц или чтобы иметь возможность увеличить скорость и, соответственно, расход газа в сечении камеры без снижения степени очистки.

В инерционных пылеуловителях выделение частиц из газового потока происходит под действием сил инерции, возникающих вследствие изменения направления или скорости движения газа. Они делятся на три подгруппы – жалюзийные (пластинчатые или конические), циклонные (возвратнопоточные, прямоточные и вихревые) и ротационные.

Фильтрационные пылеуловители – это устройства, в которых выделение частиц пыли из газового потока происходит вследствие его прохода через слой пористого материала. Эта группа состоит из следующих подгрупп: тканевые фильтры (каркасные и рукавные), волокнистые (рукавные, панельные, ячейковые), зернистые (насыпные, жесткие), сетчатые (ячейковые, барабанные).

Электрофильтры действуют на основе сообщения частицам в поле коронного разряда электрического заряда с последующим их осаждением на осадительных электродах. Электрофильтры делятся на две подгруппы – однозонные и двухзонные с осадительными электродами пластинчатыми и трубчатыми, подвижными и неподвижными.

Пылеулавливающие средства с применением жидкости можно объединить в три группы – инерционные, фильтрационные и электрические.

В группу инерционных мокрых пылеуловителей входят циклопы с водяной пленкой, ротационные, скрубберы и ударные аппараты.

К циклонам с водяной пленкой относятся циклоны типа ЦВП, центробежные скрубберы ВТИ, скоростные промыватели СИОТ. К ротационным – вентиляторные мокрые пылеуловители ВМП-ЛЮИОТ, ТБИОТ и НИИУглеобогащения, а также различного типа дезинтеграторы.

К подгруппе скрубберов следует отнести различной формы камеры с форсунками, полые, либо заполненные слоями насадки из кусков неправильной формы или реек, дисков, колец, либо с лопастями и другими деталями и конструкциями правильной геометрической формы. Кроме того, в эту подгруппу входят скрубберы с трубой Вентури, известные в технической литературе также под названием турбулентных промывателей, коагуляционных мокрых пылеуловителей и эжекторных скрубберов.

В подгруппу ударных инерционных мокрых аппаратов входит простейший пылеуловитель типа полый башни или ямы, в нижней части которых налита вода. Запыленный газ, выходящий из вертикально расположенного патрубка, уда-

ряется о зеркало воды. В эту подгруппу входят различного типа аппараты с импеллерами (направляющими лопастями) и самооборотом орошаемой воды: ротоклон Гипротяжмаша, пылеуловители типа ПМВК ВЦНИИОТ и ПМВ ЦНИИ-Промзданий.

К группе мокрых фильтрационных аппаратов, предназначенных для очистки пылевых выбросов, относятся различные пенные пылеуловители. В эту группу входят пенные пылеуловители с переливной и провальной решеткой (ПГС и ПГМ ЛТИ), струйно-пенные НИГМИ, ударно-пенные, циклоно-пенные и пенно-вихревые аппараты. К этой же группе можно отнести и барботажные пылеуловители без решетки и с подачей запыленного воздуха под утопленную в воде решетку.

Мокрые электрофильтры классифицируются так же, как и сухие, и отличаются от последних только применением воды в виде стекающей пленки на осадительных электродах. При отделении жидкой дисперсной фазы (например, тумана) уловленная жидкость стекает по электродам без применения воды [4].

## **2. ЦИКЛОНЫ**

### **2.1 Теоретическая часть**

Циклонные аппараты вследствие дешевизны и простоты устройства и эксплуатации, относительно небольшого сопротивления и высокой производительности является наиболее распространённым типом механического пылеуловителя.

Циклонные пылеуловители имеют следующие преимущества перед другими аппаратами:

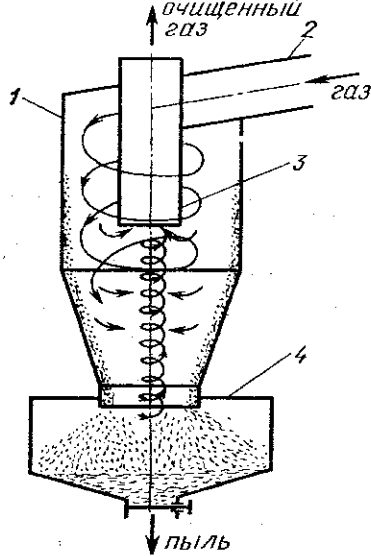
- отсутствие движущихся частей;
- надежная работа при температуре до 400 градусов без конструктивных перемен;
- пыль улавливается в сухом виде;
- возможность улавливания абразивных пылей, для чего активные поверхности циклонов покрываются специальными материалами;
- возможность работы циклонов при относительно высоких давлениях;
- стабильная величина гидравлического сопротивления;
- простота изготовления и возможность ремонта;
- повышение концентрации пыли не приводит к снижению фракционной эффективности аппарата.

К недостаткам можно отнести:

- высокое гидравлическое сопротивление, которое достигает 1250... 1500 Па;
- низкая эффективность при улавливании частиц размером меньше 5 мкм.

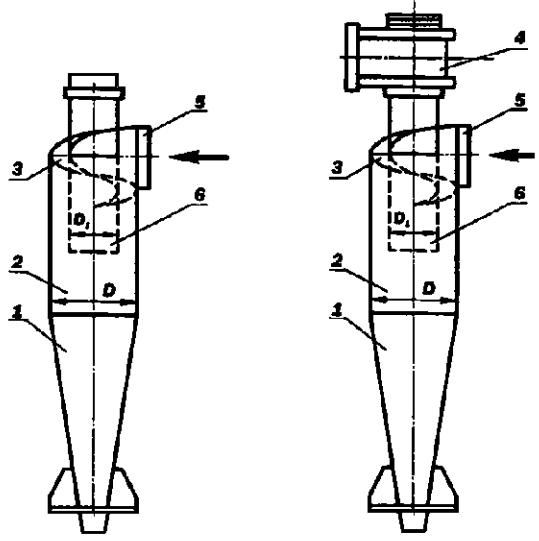
Работа циклона основана на использовании центробежных сил, которые возникают при вращении газопылевого потока внутри корпуса аппарата. Вращение достигается путем тангенциального введения потока в циклон. В результате действия центробежных сил частицы пыли, взвешенные в потоке, отбрасываются на стенки корпуса и выпадают из потока. Чистый газ, продолжая вращаться, делает поворот на 180° и выходит из циклона через расположенную по оси вы-

хлопную трубу (рис. 2.1).



1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – приемный бункер для пыли.

Рис. 2.1 – Циклон



1 – конус; 2 – корпус; 3 – спиральный вход; 4, 6 – выходной патрубок; 5 – входной патрубок.

Частицы пыли, которые достигают стенок корпуса, под действием потока, который перемещается в осевом направлении и сил собственного веса двигаются в направлении к выходному отверстию корпуса и выводятся из циклона. Из-за того, что решающим фактором, обуславливающим движение пыли, являются аэродинамические силы, а не силы веса, циклоны можно располагать наклонно и даже горизонтально. На практике циклоны устанавливаются, как правило, в вертикальном положении.

При движении во вращающемся криволинейном потоке газа частица пыли находится под действием силы веса, центробежной силы и силы сопротивления. Масса частицы обычно настолько мала, что ею пренебрегают, поэтому скорость частиц в циклоне без большой ошибки можно принять равной скорости вращения газопылевого потока.

Область циклонного процесса, или зона улавливания пыли, расположено между концом выхлопной трубы и пылеотводящим отверстием циклона. Часть этой зоны занимает корпусный патрубок. В нем образуется на выходе циклонный вихрь. В цилиндрическом циклоне (без корпусного патрубка) циклонный вихрь опирается на пылевой пласт в бункере аппарата. При этом частицы вторично выносятся из бункера, то есть происходит явление, аналогичное действию атмосферных вихрей на предметы, которые находятся на поверхности земли. Вторичный захват частиц возникает и тогда, когда выбран чрезмерно большой угол конусности нижнего патрубка циклона.

Бункер принимает участие в аэродинамике циклонного процесса, поэтому

использование циклонов без бункера или с уменьшенным бункером по сравнению с рекомендованным размером бункера (что снижает КПД аппарата) не рекомендуется. Существенное влияние на циклонный процесс оказывает турбулентность, которая во многом определяет степень очищения. Поток, который поступает в выхлопную трубу, продолжает интенсивно вращаться. Затухание этого вращения связано с невосполняемыми потерями энергии и происходит сравнительно медленно.

## 2.2. Циклоны конструкции НИИОГАЗ

Промышленностью выпускаются циклоны различных конструкций и типовых размеров:

- цилиндрические (типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15В, ЦН-24). Их характерные особенности: удлиненная цилиндрическая часть, угол наклона крышки и входного патрубка равны соответственно 11, 15, 24, одинаковое отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона, значение которого равно 0,59;

- конические (СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М). Их характерные особенности: длинная коническая часть, спиральный входной патрубок, малое отношение  $d$  выхлопной трубы и корпуса к их длине (соответственно 0,33 и 0,34).

Цилиндрические циклоны (рис. 2.2) относятся к высокопроизводительным аппаратам, а конические – к высокоэффективным. Диаметр цилиндрических циклонов не превышает 2000 мм, а конических – 3000 мм. Оптимальная скорость газа на входе в циклон 20–25 м/с. С увеличением диаметра циклона при постоянной тангенциальной скорости потока центробежная сила, которая влияет на пылевые частицы, уменьшается, и эффективность пылеулавливания снижается. При более высоких скоростях происходит ударение пыли о стенки циклона и обратное отражение пыли в поток газа, что также снижает эффективность очистки. Кроме того, установка одного высокопроизводительного циклона вызывает затруднение из-за его большой высоты. В связи с этим в технике пылеулавливания широкое применение нашли групповые и батарейные циклоны.

С увеличением диаметра циклона эффективность пылеулавливания снижается, т.к. уменьшается закручивание газового потока и, соответственно, снижается действие центробежных сил на частицы. В том случае, если количество газа, поступающего на очистку, требует установки циклона диаметром более 800 мм, циклон делается групповым, т.е. состоящим из группы циклонов меньшего диаметра. Таким образом, групповой циклон представляет собой группу параллельно подключенных по потоку газа циклонов меньших размеров по сравнению с одиночным циклоном. В групповых компоновках по нормам НИИОГАЗ применяются циклоны типа ЦН-15 и ЦН-11, которые устанавливаются попарно с общим числом циклонов 2... 8 или вокруг вертикального подводящего газохода по 10... 14 штук (рис. 2.3).

При количестве циклонов больше девяти следует применять батарейные циклоны.

При определении гидравлического сопротивления групповых установок к коэффициенту сопротивления одиночного циклона, отнесенному к скорости воздушного потока в горизонтальном сечении корпуса, при круговой компоновке следует прибавлять 60, при двурядной с отводом очищенного газа через улит-



ку – 28. Степень очищения в группе циклонов принимается равной степени очищения в одиночном циклоне, который входит в эту же группу.

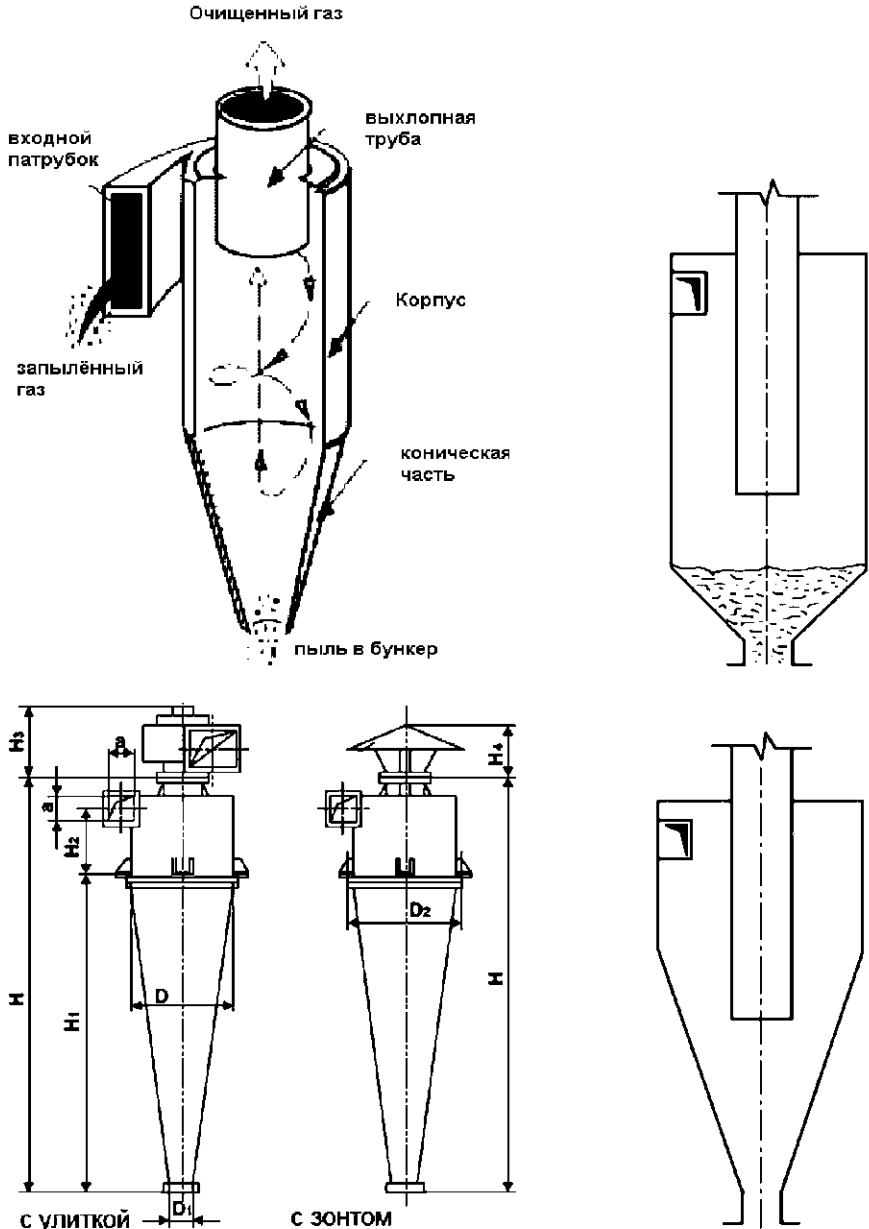


Рис. 2.2 – Циклон цилиндрический (вверху) и конический (внизу).

Конические циклоны при равных производительностях с цилиндрическими отличаются от последних большими габаритами и поэтому обычно не применя-

ются в групповом выполнении. Для подведения газа к отдельным циклонам при установке их в группу рекомендуется применять коллекторы. Обходные патрубки циклонов присоединяют к коллекторам с помощью фланцев. Коллектор выполняется из одного или нескольких патрубков, которые с одной стороны присоединяются к циклонам, а с другой стороны заканчиваются общей камерой.

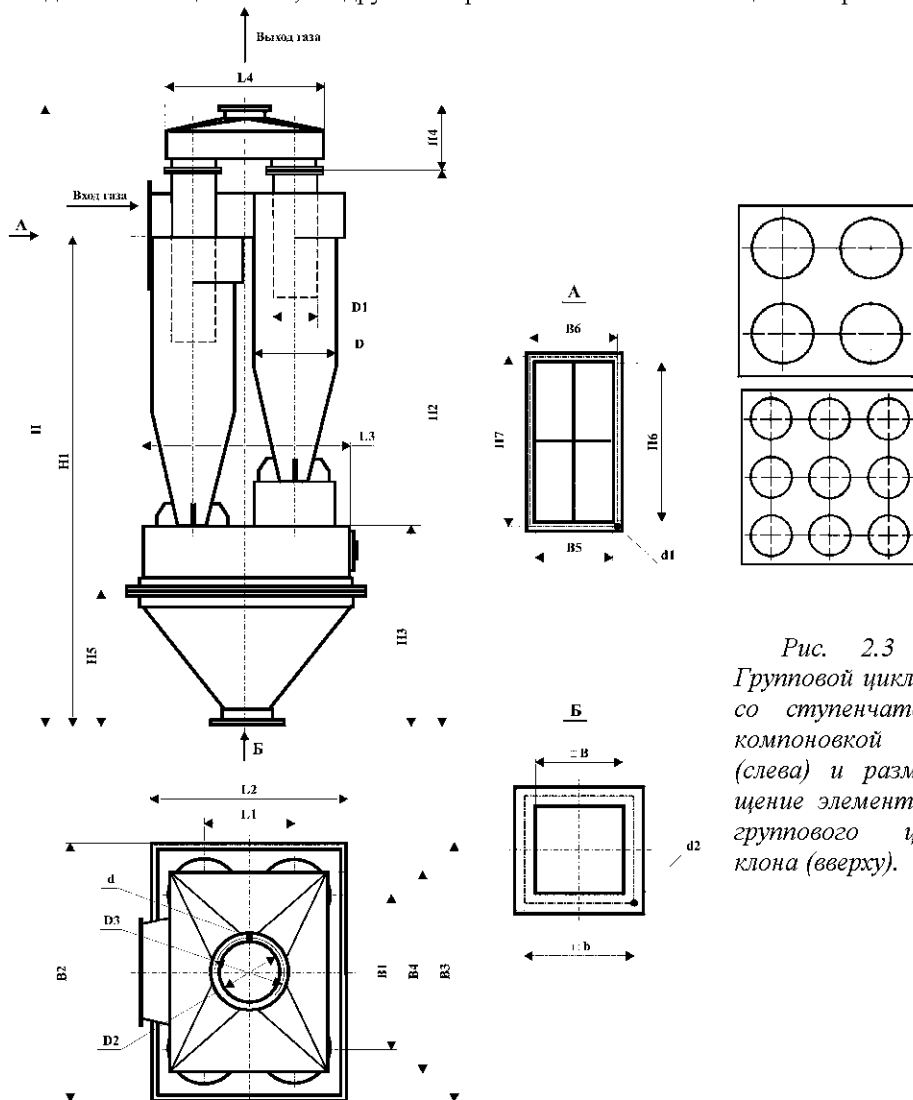


Рис. 2.3 – Групповой циклон со ступенчатой компоновкой (слева) и размещение элементов группового циклона (вверху).

Отвод очищенного газа в циклонах может осуществляться несколькими способами – с помощью улитки, которая служит для преобразования вращающегося движения газов в поступательное, колена, общего сборника для группы циклонов или через выхлопную трубу. Сечения выходного отверстия улитки и входного патрубка циклонов следует выполнять одинаковыми.

Группа циклонов обеспечивается общим бункером для сбора пыли. Диаметр пылевыпускного отверстия бункера подбирается с таким расчётом, чтобы выпуск уловленной пыли происходил без задержки, а размер фланца отвечал размеру устанавливаемого под ним пылевого затвора. Угол наклона стенок бункера принимается больше, чем угол естественного откоса пыли, который обычно составляет 55... 60°.

В группах циклоны компоуются в два ряда или имеют круговую компоновку согласно рекомендациям, приведенными в табл. 3 приложения. Рабочие объемы бункеров для групп циклонов рекомендуется принимать по табл. 4 приложения.

Для циклонов НИИОГАЗ принят следующий ряд диаметров: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000 мм, а для цилиндрических циклонов в одиночном выполнении – 1800 мм.

Бункера для одиночных циклонов выполняются цилиндрической формы. Диаметры принимаются согласно ГОСТу: для цилиндрического циклона  $D_{\text{БУНКЕРА}}=1,5D$ , для конического  $D_{\text{БУНКЕРА}}=(1,1... 1,2)D$ . Высота цилиндрической части бункера принимается равной  $0,8D$ , днище бункера выполняется с углом стенок 60°, где  $D$  – диаметр циклона.

Пылевые бункера циклонных групп могут иметь или круглую, или прямоугольную форму. Для групп из двух и четырёх циклонов применяются обе формы бункеров, а для групп из шести и восьми циклонов – только прямоугольные. Минимальное расстояние от оси циклона до стенки бункера должно быть не менее  $0,4D$ . Высота прямоугольной (или цилиндрической) части бункера должна быть не менее  $0,5D$ . Угол наклона стенок бункера к горизонту принимается не менее 60°.

Условное обозначение типоразмеров одиночного и группового циклонов типа ЦН-15: ЦН – циклон конструкции НИИОГАЗа; 15 – угол наклона оси входного патрубка относительно горизонтали, градусов; П(Л) – «правое» («левое») вращение газа в «улитке»; число после тире – внутренний диаметр цилиндрической части циклона, мм; следующая цифра – количество циклонов в группе;  $B$  – с камерой очищенного газа в виде сборника;  $П$  – пирамидальная форма бункера. Например, ЦН-15Г-600П и ЦН-15Л-600×2УП.

Условное обозначение типоразмера циклона типа СК-ЦН-34: СК – спиральный конический; ЦН – циклон конструкции НИИОГАЗ; 34 – отношение диаметра выхлопной трубы к диаметру цилиндрической части (равен 0,34);  $БП$  – с бункером и подогревателем;  $Б$  – с бункером без подогревателя (при отсутствии  $Б$  или  $БП$  – без бункера и подогревателя); последнее число – диаметр цилиндрической части циклона, мм;  $П$  или  $Л$  – «правое» или «левое» вращение пылегазового потока. Например, СК-ЦН-34БЦ-600Л, ЦН-34-600Г.

Для объединения в группы обычные циклоны плохо приспособлены. Поэтому групповая компоновка их ограничена и конструктивно весьма несовершенна. Даже при создании группы из восьми циклонов типа ЦН-15 ее пропускная способность не превысит 50000 м<sup>3</sup>/ч. В связи с этим возникла необходимость в простых циклонных элементах небольшого диаметра (см. рис. 2.4, а), т.е. имеющих высокую степень очистки и приспособленных для объединения в большие группы с высокой пропускной способностью [6]. Применяются циклонные эле-

менты с диаметром цилиндрической части корпуса 100, 150, 250 мм. В целях удобства объединения и компактности установки придание газовому потоку вращения достигается обычно не тангенциальным подводом газа, а размещением внутри циклонного элемента специального устройства, представляющего собой либо двухлопастной винт (рис. 2.4, б), либо розетку, состоящую из лопаток, установленных к оси под углом  $\alpha=25...30^\circ$  (рис. 2.4, в).

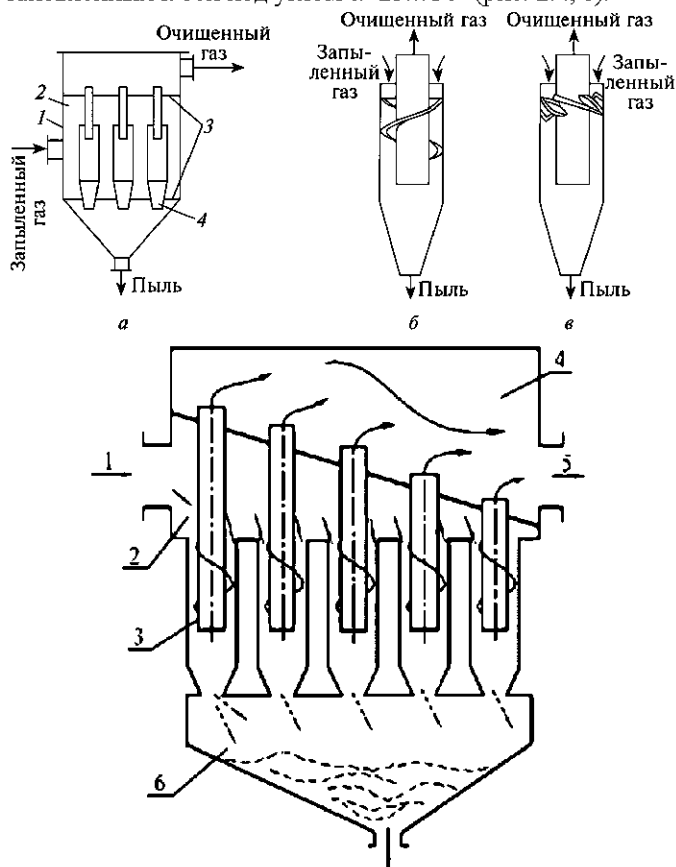


Рис. 2.4. Элементы батарейных циклонов: 1 – корпус батареи; 2 – распределительная камера; 3 – решетки; 4 – циклонный элемент; элемент с направляющим аппаратом типа «винт» (б) и типа «розетка» (в)

1 – подводящий патрубок запыленного газа; 2 – распределительная камера; 3 – элемент батарейного циклона с винтовым подводом газа; 4 – камера очищенного газа; 5 – патрубок для очищенного газа; 6 – бункер для сбора уловленной пыли.

Розетки работают эффективнее, однако они чувствительнее к засорению, и поэтому их не рекомендуется использовать при чрезмерно высокой запыленности газа и слипающейся пыли. В некоторых типах батарейных циклонов применяется улиточный и полуулиточный подвод газа.

Очищаемые газы вводятся через входной патрубок в общую распределительную камеру, откуда распределяются по отдельным элементам. Далее из сборной камеры очищенный газ через выходной патрубок, направленный в сторону, выводится из аппарата. Во избежание абразивного износа наружной поверхности на выхлопных трубах первых рядов укрепляются специальные защитные щитки, выполненные из половинок труб несколько большего диаметра.

Пыль, осаждающаяся в циклонных элементах, ссыпается в общий для всех элементов бункер. Пространство между циклонными элементами засыпается

шлаком. Большое число циклонных элементов, объединенных общим пылевым бункером, требует равномерного распределения газа по циклонным элементам. Последние должны быть строго одинаковых размеров, смонтированы с одинаковыми допусками и одинаковым гидравлическим сопротивлением.

Число циклонных элементов, объединенных общим пылевым бункером, не должно превышать 8 в ряду по ходу газов и 12 в ряду, перпендикулярном ему. При устройстве в бункере поперечной перегородки, ограничивающей перетекание газов, число элементов может быть увеличено до 10 в ряду по ходу газов и до 16 в ряду, перпендикулярном этому ходу.

Для равномерного распределения газа по элементам подвод к распределительной камере следует осуществлять с помощью диффузора с углом раскрытия не более  $15^\circ$  и шириной выхода, равной ширине камеры. Высота распределительной камеры определяется из условия, что скорость газов в живом сечении первого по ходу газов ряда труб не должна превышать 10... 14 м/с.

Неравномерное распределение газа по циклонным элементам приводит к перетеканию газа из одних элементов в другие через общий пылевой бункер. Подсос в слабозагруженные элементы газа из бункера резко ухудшает процесс осаждения в них пыли. Кроме того, неравномерное распределение газа по элементам создает предпосылки для забивания пылью завихряющих устройств.

Преимущества батарейных циклонов перед одиночными состоят в том, что батарейные циклоны могут быть рассчитаны на расход газов, который слишком велик для группы одиночных циклонов; при одном и том же расходе газа батарейный циклон значительно компактнее группы одиночных циклонов.

По сравнению с одиночными батарейные циклоны имеют следующие недостатки: повышенную металлоемкость, составляющую 200... 500 кг металла на очистку  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  газа, т.е. примерно вдвое большую, чем одиночные циклоны; меньшую надежность в эксплуатации из-за возможности неравномерного распределения газа между циклонными элементами и подсоса воздуха через общий бункер; возможность засорения завихрителя при начальной запыленности газа более  $100 \text{ г}/\text{м}^3$ .

Наиболее частыми причинами нарушения нормальной работы батарейных циклонов являются засорение завихряющих устройств отдельных циклонных элементов, а также прохождение газа мимо циклонных элементов вследствие износа выхлопных труб или нарушения герметичности опорных решеток. И та, и другая причины вызывают изменение сопротивления циклона, за которым нужно тщательно следить в процессе эксплуатации.

## **2.3. Методика расчёта циклонов**

### **2.3.1 Практические рекомендации по выбору циклонов**

Выбор типа и размера циклона производится на основании заданного расхода газов, физико-механических свойств пыли, необходимого коэффициента очищения, габаритов установки, эксплуатационной надежности и стоимости очищения. При очищении больших объемов газов одиночные циклоны типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 объединяются в группы по 2, 4, 6, 8 элементов, расположенных в два ряда, и по 10, 12, 14 элементов при круговом компоновании. Диаметр циклонов типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15В, объединенных в группы с прямоуголь-

ным компонованием, не должен превышать 1800 мм, а при круговом компоновании – 1000 мм.

При обеспылевании газа объемом больше 80000... 100000 м<sup>3</sup>/ч и при высоких требованиях к очищению следует применять батарейные циклоны. Батарейные циклоны имеют меньшие габариты, чем групповые, но требуют для своего изготовления большей затраты металла и стоимость их выше стоимости групповых циклонов. При выборе циклона следует обращать внимание на надежность работы системы, особенно в тех случаях, когда ремонт или ревизия системы газоочистки невозможны без остановки технологического оборудования. Широкий диапазон типоразмеров циклонов позволяет удовлетворять множеству требований, в том числе и по надежности. Наиболее характерными нарушениями нормальной работы циклонов являются истирание стенок циклонов абразивной пылью и залипание пыли. С увеличением диаметров циклонов и снижением скорости газового потока на входе истирание стенок и залипание уменьшаются. Вследствие этого для улавливания абразивной пыли рекомендуется применять циклоны типа СК-ЦН-34, которые способны обеспечивать высокую степень очищения при сравнительно небольшой скорости пылегазового потока на входе. При одинаковой эффективности наиболее высокие технико-экономические показатели имеют циклоны типа ЦН-11.

При выборе сквозного циклона особое внимание следует обращать на то, что эффективность пылеочистки в сквозном циклоне тем выше, чем больше объем подаваемого пылегазового потока и чем больше перепад давления между подводящим газом и циклоном.

Для сквозного циклона существует взаимосвязь: чем больше его диаметр, тем выше перепад давления.

Также можно выделить для циклонов различного диаметра диапазон размеров частиц пыли, в котором их эффективность наивысшая:

- для циклонов диаметром более 2000 мм – 50... 1000 мкм;
- для циклонов диаметром 1000... 2000 мм – 10... 1000 мкм;
- для циклонов диаметром менее 1000 мм – 1... 1000 мкм;

### 2.3.2. Расчёт циклонов

Исходными данными для расчёта циклона являются следующие параметры:

–  $\rho_0$  – плотность газа при нормальных условиях или  $\rho_{0C}$  – плотность сухого газа при нормальных условиях ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 101300$  Па), кг/м<sup>3</sup>, и  $W$  – влагосодержание газа, кг/м<sup>3</sup>;

–  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>;

–  $d_{\text{ч}}$  – медианный диаметр частиц пыли, мкм;

–  $P_{\text{БАР}}$  – барометрическое давление, Па;

–  $P_{\text{Г}}$  – разрежение в циклоне, Па;

–  $t_{\text{ВХ}}$  – температура газа, поступающего в циклон, °С;

–  $Q_{\text{ВХ}}$  – расход газа при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/ч;

–  $C_{\text{ВХ}}$  – концентрация пыли в газе, поступающем в циклон, г/м<sup>3</sup>;

–  $\mu_{\text{ВХ}}$  – вязкость газа, Па·с;

–  $C_{\text{ПДК}}$  – допустимая концентрация пыли в очищенном газе, г/м<sup>3</sup>.

Расчет циклонов производится методом последовательных приближений в следующем порядке.

Если дана плотность сухих газов при нормальных условиях  $\rho_{0C}$ , то плотность влажных газов при тех же условиях составит

$$\rho_0 = \frac{0,804(\rho_{0C} + W)}{0,804 + W}.$$

Определяется плотность газа при рабочих условиях,  $\text{кг/м}^3$ ,

$$\rho_{BX} = \rho_0 \frac{273 \cdot (P_{BAR} \pm P_{Г})}{(273 + t_{BX}) \cdot 1,013 \cdot 10^5}.$$

Расход газа при рабочих условиях,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$$Q = \frac{Q_{BX} \cdot \rho_0}{3600 \cdot \rho_{BX}}.$$

Задаётся тип циклона и определяется оптимальная скорость газа  $V_{OPT}$  в сечении циклона диаметром  $D$  с учётом значения оптимальной скорости и дисперсного состава пыли, улавливаемой циклонами (группой) по табл. 2.1 или батареей циклонов – по табл. 2.2.

Таблица 2.1 – Параметры  $V_{OPT}$ ,  $\lg(\sigma)$  и  $d_{50}^T$  циклонов

Наименование параметра	Типы циклонов						
	Цилиндрические циклоны				Конические циклоны		
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Оптимальная скорость, $V_{OPT}$ , м/с	3,5	3,5	3,5	4,5	2,0	1,7	2,0
Дисперсный состав пыли, $\lg(\sigma)$	0,352	0,283	0,352	0,308	0,364	0,308	0,340
$d_{50}^T$ , мкм	3,65	6,0	4,5	8,5	2,31	1,95	1,13

Прим.: дисперсный состав пыли приведен для следующих условий работы:  $D_T=0,6$  м;  $\rho=1930$   $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu=22,2 \cdot 10^{-6}$   $\text{Н·с/м}^2$ ;  $V=3,5$  м/с.

Таблица 2.2 – Параметры для расчета батарейных циклонов

Параметры	«Винт»	«Розетка»	
Угол $\alpha$ , град	–	25	30
$d_{50}^T$ , мкм	4,5	3,85	5,0
$\lg \sigma_{\eta}$	0,46	0,46	0,46

Прим.: дисперсный состав пыли приведен для следующих условий работы:  $D_T=250$  мм;  $V_T=4,5$  м/с;  $\mu_T=22,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с;  $\rho_{гТ}=2200$   $\text{кг/м}^3$ .

*Прим.:* для пыли, склонной к слипанию, применяется направляющий аппарат типа «винт», который менее подвержен забиванию пылью. Диаметр циклонного элемента принимается в зависимости от запыленности поступающего на очистку газа (см. табл. 2.3).

Таблица 2.3 – Допустимая запыленность поступающего на очистку газа ( $г/м^3$ ) в зависимости от диаметра циклонного элемента

Тип направляющего аппарата	Диаметр циклонного элемента, мм		
	100	150	250
«винт»	25	50	100
«розетка»	15	35	75

Определяется диаметр циклона  $D$ , м,

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_{\text{опт}} n}},$$

где  $n$  – количество параллельно установленных циклонов; при первом ориентировочном расчёте принимается  $n = 1$ .

Полученное значение  $D$  округляется до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона (200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000 мм). Если расчетный диаметр циклона превышает его максимально допустимое значение, то необходимо применить два или более параллельно установленных циклонов (т.е.  $n=2, 3, 4, \dots$ ), при этом необходимо руководствоваться правилами компоновки элементов в группе или батарее и также каталожными данными.

По выбранному диаметру циклона определяется действительная скорость движения газа в циклоне, м/с,

$$V = \frac{4Q}{\pi n D^2}.$$

Действительная скорость  $V$  в циклоне не должна отклоняться от оптимальной  $V_{\text{опт}}$  более чем на 15%, т.е. должно выполняться условие:

$$\Delta V = \left| \frac{V_{\text{опт}} - V}{V_{\text{опт}}} \right| \cdot 100 < 15\%.$$

Если это условие не выполняется, то принимается  $n$  параллельно установленных циклонов (т.е. корректируется выше принятое значение  $n$ ) с учётом правил компоновки элементов в группе или батарее, и расчёт повторяется до выполнения условия  $\Delta V < 15\%$ , начиная с определения значения  $D$ . При необходимости возможна окончательная корректировка значения количества параллельно установленных в батарее циклонов  $n$  и их диаметра  $D$  с учётом каталожных данных.

Определяется коэффициент гидравлического сопротивления циклона (группы циклонов):

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500} + K_3,$$



где  $K_1$  – поправочный коэффициент на диаметр циклона (табл. 2.4);

$K_2$  – поправочный коэффициент на запыленность газа (табл. 2.5);

$\zeta_{500}$  – коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (табл. 2.6);

$K_3$  – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу прямоугольной компоновки. Для прямоугольной компоновки, при организованном подводе запыленного газа, если циклонные элементы располагаются в одной плоскости, то  $K_3=65$ , а при отводе очищенного газа из общей камеры  $K_3 = 35$ . Для одиночного циклона  $K_3 = 0$ .

Для батарейного циклона коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta=85$  для циклонов с винтовыми завихрителями, с розеточными завихрителями –  $\zeta=65$  и  $\zeta=90$  при  $\alpha=30$  и  $25^\circ$  соответственно.

Таблица 2.4 – Значение коэффициента  $K_1$  для циклона диаметром  $D$ , мм

Тип циклона	Диаметр циклона $D$ , мм				
	200	300	400	500	>500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-24	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 2.5 – Значение коэффициента  $K_2$  в зависимости от входной концентрации пыли  $C_{вх}$  г/м<sup>3</sup>

Тип циклона	Входная концентрация пыли $C_{вх}$ , г/м <sup>3</sup>						
	0	10	20	40	80	120	$\geq 150$
ЦН-11	1,0	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	–
ЦН-15	1,0	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-24	1,0	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1,0	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1,0	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,9

Таблица 2.6 – Значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\zeta_{500}$  одиночного циклона диаметром 500 мм

Параметр	Тип циклона					
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-22
$d/D$	0,59	0,59	0,59	0,33	0,34	0,22
$\zeta_{500}$ с выходом в сеть	245	155	75	520	1050	2000

$\zeta_{500}$ с выходом в атмосферу	250	163	80	600	1150	2000
-------------------------------------	-----	-----	----	-----	------	------

Определяется гидравлическое сопротивление циклона (группы или батареи), Па,

$$\Delta P = 0,5 \zeta \rho_{BX} V^2.$$

### 2.3.3. Расчет эффективности циклонов

Большой опыт, накопленный при испытаниях циклонов в промышленных условиях и на специальных стендах, позволил разработать методы расчета циклонов, основанные на полученных экспериментальных данных. Для облегчения расчетов широко используют графические методы с применением специально построенных графиков и номограмм. Однако наиболее обобщенным и надежным является расчет эффективности с использованием элементов теории вероятностей.

Как известно, в вероятностно-логарифмических координатах дисперсный состав большинства пылей аппроксимируется прямой линией и характеризуется двумя параметрами: среднемедианным размером  $d_M$  и среднеквадратическим отклонением  $\lg(\sigma_{II})$  функции распределения. Среднемедианный размер  $d_M$  представляет собой такой размер частицы, при котором суммарная масса всех частиц размером более  $d_M$  равна суммарной массе всех частиц размером менее  $d_M$ . Среднеквадратическое отклонение  $\lg(\sigma_{II})$  находится из следующего соотношения, которое является свойством интеграла вероятности:

$$\lg(\sigma_{II}) = \lg\left(\frac{d_{84,1}}{d_M}\right) = \lg\left(\frac{d_M}{d_{15,9}}\right),$$

где  $d_{84,1}$  и  $d_{15,9}$  – абсциссы точек, ординаты которых имеют значения соответственно 84,1 и 15,9 % и определяются по заданному распределению пыли по размерам (рис. 2.4).

Кривые парциальной эффективности циклонов также могут быть охарактеризованы двумя аналогичными параметрами  $d_{50}^T$  и  $\lg(\sigma_{\eta})$ , численные значения которых для различных типов циклонов конструкции НИИОгаза могут быть приняты по табл. 2.7.

Таблица 2.7 – Значения  $d_{50}^T$  и  $\lg(\sigma_{\eta})$  для циклонов конструкции НИИОгаза

Параметр	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-22	СЦН-40
$d_{50}^T$	8,50	6,00	4,50	3,65	2,31	1,95	1,13	1,0
$\lg(\sigma_{\eta})$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340	0,308

Приведенные данные соответствуют следующим условиям работы циклонов (значения табличные, что отражено индексом «Т»):  $V_T = 3,5$  м/с;  $D_T = 0,6$  м;  $\rho_{чТ} = 1930$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с.

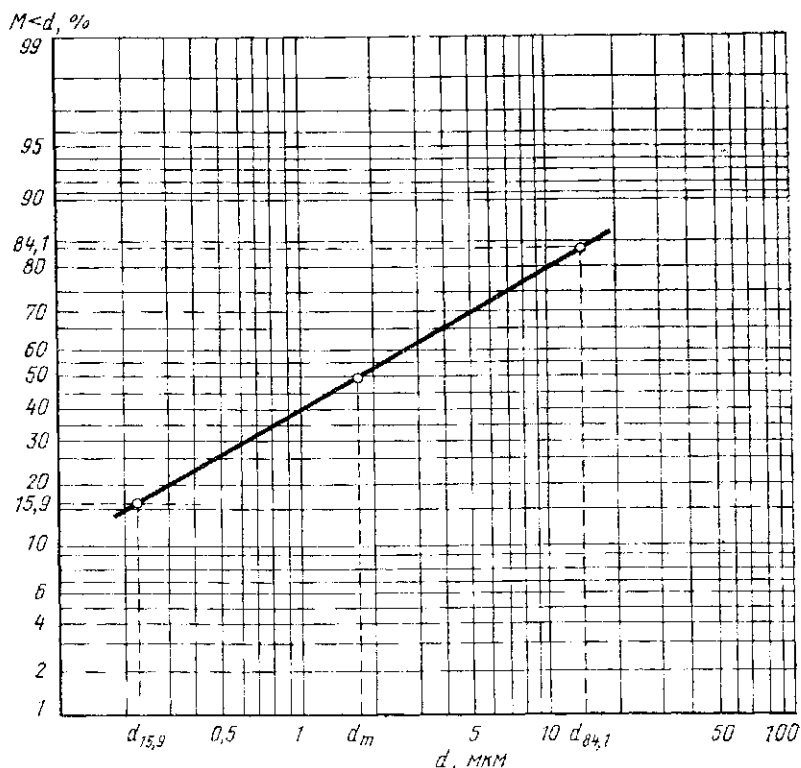


Рис. 2.4. График распределения частиц пыли по размерам

На основании математической обработки уравнения для вероятностных функций получено следующее выражение для полной очистки в циклоне:

$$\eta = \Phi(x).$$

Величина  $x$  применительно к циклонам может быть определена по следующей формуле

$$x = \frac{\lg \left( \frac{d_M}{d_{50}} \right)}{\sqrt{(\lg \sigma_\eta)^2 + (\lg \sigma_\zeta)^2}}.$$

С учётом выше приведенных табличных значений последняя формула примет вид:

$$x = 0,81 \cdot \lg \frac{d_{50}}{d_{50}^T}.$$

Значения  $d_{50}^T$  для различных циклонов приведены в табл. 2.7.

Входящая в формулу величина  $d_{50}$ , мкм, представляет собой размер частиц, осаждаемых при фактических условиях работы выбранного циклона с эффек-

тивностью 50 %. Эта величина может быть определена из выражения

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \cdot \frac{\rho_{\text{чТ}}}{\rho_{\text{ч}}} \cdot \frac{\mu_{\text{ВХ}}}{\mu_T} \cdot \frac{V_T}{V}},$$

где  $D_T$ ,  $\rho_{\text{чТ}}$ ,  $\mu_T$ ,  $V_T$  – параметры, соответствующие условиям, при которых получены табличные значения  $d_{50}^T$  и  $\lg(\sigma_{\eta})$ , подставив их значения в формулу, получим

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{0,6} \cdot \frac{1930}{\rho_{\text{ч}}} \cdot \frac{\mu_{\text{ВХ}}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{V}} = 22520 \cdot d_{50}^T \sqrt{\frac{D \cdot \mu_{\text{ВХ}}}{\rho_{\text{ч}} \cdot V}},$$

где  $D$ ,  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $\mu$ ,  $V$  – параметры, соответствующие фактическим условиям работы циклона.

Полученное значение  $d_{50}$  должно быть меньше  $d_{\text{ч}}$ . Если это условие не выполняется, необходимо выбрать другой циклон с меньшим значением  $d_{50}^T$ .

Численное значение функции  $\Phi(x)$  определяется в зависимости от полученной величины  $x$  по табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Значения нормальной функции распределения

$X$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$
-2,70	0,0035	-1,28	0,1003	-0,44	0,3300	0,40	0,6554	1,26	0,8962
-2,60	0,0047	-1,26	0,1038	-0,42	0,3372	0,42	0,6628	1,28	0,8997
-2,50	0,0062	-1,24	0,1075	-0,40	0,3446	0,44	0,6700	1,30	0,9032
-2,40	0,0082	-1,22	0,1112	-0,38	0,3520	0,46	0,6772	1,32	0,9066
-2,30	0,0107	-1,20	0,1151	-0,36	0,3594	0,48	0,6844	1,34	0,9099
-2,20	0,0139	-1,18	0,1190	-0,34	0,3669	0,50	0,6915	1,36	0,9131
-2,10	0,0179	-1,16	0,1230	-0,32	0,3745	0,52	0,6985	1,38	0,9162
-2,00	0,0228	-1,14	0,1271	-0,30	0,3821	0,54	0,7054	1,40	0,9192
-1,98	0,0239	-1,12	0,1314	-0,28	0,3897	0,56	0,7123	1,42	0,9222
-1,96	0,0250	-1,10	0,1357	-0,26	0,3974	0,58	0,7190	1,44	0,9251
-1,94	0,0262	-1,08	0,1401	-0,24	0,4052	0,60	0,7257	1,46	0,9279
-1,92	0,0274	-1,06	0,1446	-0,22	0,4129	0,62	0,7324	1,48	0,9306
-1,90	0,0288	-1,04	0,1492	-0,20	0,4207	0,64	0,7389	1,50	0,9332
-1,88	0,0301	-1,02	0,1539	-0,18	0,4286	0,66	0,7454	1,52	0,9357
-1,86	0,0314	-1,00	0,1587	-0,16	0,4364	0,68	0,7517	1,54	0,9382
-1,84	0,0329	-0,98	0,1635	-0,14	0,4443	0,70	0,7580	1,56	0,9406
-1,82	0,0344	-0,96	0,1685	-0,12	0,4522	0,72	0,7642	1,58	0,9429

$X$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$
-1,80	0,0359	-0,94	0,1736	-0,10	0,4602	0,74	0,7703	1,60	0,9452
-1,78	0,0375	-0,92	0,1788	-0,08	0,4681	0,76	0,7764	1,62	0,9474
-1,76	0,0392	-0,90	0,1841	-0,06	0,4761	0,78	0,7823	1,64	0,9495
-1,74	0,0409	-0,88	0,1894	-0,04	0,4840	0,80	0,7881	1,66	0,9515
-1,72	0,0427	-0,86	0,1949	-0,02	0,4920	0,82	0,7939	1,68	0,9535
-1,70	0,0446	-0,84	0,2005	0,00	0,5000	0,84	0,7995	1,70	0,9554
-1,68	0,0465	-0,82	0,2061	0,02	0,5080	0,86	0,8051	1,72	0,9573
-1,66	0,0485	-0,80	0,2119	0,04	0,5160	0,88	0,8106	1,74	0,9591
-1,64	0,0505	-0,78	0,2177	0,06	0,5239	0,90	0,8159	1,76	0,9608
-1,62	0,0526	-0,76	0,2236	0,08	0,5319	0,92	0,8212	1,78	0,9625
-1,60	0,0548	-0,74	0,2297	0,10	0,5398	0,94	0,8264	1,80	0,9641
-1,58	0,0571	-0,72	0,2358	0,12	0,5478	0,96	0,8315	1,82	0,9656
-1,56	0,0594	-0,70	0,2420	0,14	0,5557	0,98	0,8365	1,84	0,9671
-1,54	0,0618	-0,68	0,2483	0,16	0,5636	1,00	0,8413	1,86	0,9686
-1,52	0,0643	-0,66	0,2546	0,18	0,5714	1,02	0,8461	1,88	0,9699
-1,50	0,0668	-0,64	0,2611	0,20	0,5793	1,04	0,8508	1,90	0,9713
-1,48	0,0694	-0,62	0,2676	0,22	0,5871	1,08	0,8599	1,92	0,9726
-1,46	0,0721	-0,60	0,2743	0,24	0,5948	1,10	0,8643	1,94	0,9738
-1,44	0,0749	-0,58	0,2810	0,26	0,6026	1,12	0,8686	1,96	0,9750
-1,42	0,0778	-0,56	0,2877	0,28	0,6103	1,14	0,8729	1,98	0,9761
-1,40	0,0808	-0,54	0,2946	0,30	0,6179	1,16	0,8770	2,00	0,9772
-1,38	0,0838	-0,52	0,3015	0,32	0,6255	1,18	0,8810	2,10	0,9821
-1,36	0,0869	-0,50	0,3085	0,34	0,6331	1,20	0,8849	2,20	0,9861
-1,34	0,0901	-0,48	0,3156	0,36	0,6406	1,22	0,8888	2,40	0,9918
-1,32	0,0934	-0,46	0,3228	0,38	0,6480	1,24	0,8925	2,60	0,9953

Определяется фактическая эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta = 0,5 \cdot (1 + \Phi(x)).$$

При очистке газов с высокой концентрацией пыли ( $C_{BX} > 10 \text{ г/м}^3$ ) степень очистки газа в циклоне обычно несколько увеличивается и определяется по следующей эмпирической зависимости:

$$\eta' = \eta + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - \eta) \cdot C_{BX} \cdot \lg(C_{BX}),$$

где  $\eta$  – степень очистки газа в циклоне при начальной запыленности  $10 \text{ г/м}^3$ , значение которой можно принять равной выше полученному  $\eta$ .

Концентрация пыли в газе после очистки

$$C_{Oч} = C_{BX} (1 - \eta),$$

или при очистке газов с высокой концентрацией пыли ( $C_{BX} > 10 \text{ г/м}^3$ )

$$C_{Oч} = C_{BX} (1 - \eta').$$

Если  $C_{Oч} > C_{ПДК}$ , т.е. полученная в результате расчета эффективность оказывается недостаточной, то необходимо повторить расчёты циклона (п. 2.3.2) и эффективности очистки (п. 2.3.3), уменьшив его диаметр, что позволит повысить эффективность очистки. Если и этого окажется недостаточно, то следует переходить на другой, более эффективный тип циклона, например с ЦН-24 на ЦН-15 или с ЦН-15 на ЦН-11.

#### 1.4. Пример расчета циклона

Выбрать циклон типа ЦН-15, определить его гидравлическое сопротивление и эффективность при следующих исходных данных:

- расход газа при нормальных условиях  $C_{BX} = 40000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- плотность газа при нормальных условиях  $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ;
- медианный размер частиц пыли  $d_{\text{ч}} = 10 \text{ мкм}$ ;
- температура газа  $t_{BX} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- вязкость газа  $\mu_{BX} = 24,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;
- барометрическое давление  $P_{БАР} = 101,3 \text{ кПа} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;
- разрежение в циклоне  $P_{\Gamma} = 100 \text{ Па}$ ;
- начальная концентрация пыли в газе  $C_{BX} = 25 \text{ г/м}^3$ ;
- допустимая концентрация пыли в очищенном газе  $C_{Oч} = 10 \text{ г/м}^3$ ;
- характеристика дисперсного состава пыли:  $d_{\text{ч}} = 10 \text{ мкм}$ ;  $\lg \sigma_{\text{ч}} = 0,7$ ;
- плотность частиц пыли  $\rho_{\text{ч}} = 3000 \text{ кг/м}^3$ ;
- допустимая концентрация пыли в очищенном газе  $C_{ПДК} = 5 \text{ г/м}^3$ .

Циклон должен работать в сети без раскручивателя.

Решение.

$$\rho_{\Gamma} = \rho_{BX} \frac{273(P_{БАР} \pm P_{\Gamma})}{(273 + t_{BX})1,013 \cdot 10^5} = 1,29 \frac{273(1,013 \cdot 10^5 - 100)}{(273 + 250) \cdot 1,013 \cdot 10^5} = 0,673 \text{ кг/м}^3.$$

$$Q = \frac{Q_{BX} \rho_{BX}}{3600 \cdot \rho_{\Gamma}} = \frac{40000 \cdot 1,29}{3600 \cdot 0,673} = 21,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_{\text{ОПТ}} n}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 21,3}{\pi \cdot 3,5 \cdot 1}} = 2,78 \text{ м}.$$

Так как диаметр циклона слишком велик, необходимо выполнить установку из шести циклонов ЦН-15.

Уточненный диаметр циклона:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 21,3}{\pi \cdot 3,5 \cdot 6}} = 1,14 \text{ м}.$$

Примем ближайший стандартный диаметр 1200 мм и определим действительную скорость газа в циклоне:

$$V = \frac{4Q}{\pi n D^2} = \frac{4 \cdot 21,3}{\pi \cdot 6 \cdot 1,2^2} = 3,15 \text{ м/с.}$$

$$\Delta V = \left| \frac{3,55 - 3,15}{3,55} \right| 100 = 11,3\%$$

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500} = 1 \cdot 0,92 \cdot 155 + 35 = 178.$$

$$\Delta P = \zeta_{ГЦ} \frac{V_{ГЦ}^2 \rho_{Г}}{2} = 178 \frac{3,15^2 \cdot 0,673}{2} = 590 \text{ Па.}$$

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D \rho_{чТ} \mu}{D_T \rho_{ч} \mu_T} \frac{V_{Г}}{V}} = 4,5 \sqrt{\frac{1,2 \cdot 1930 \cdot 24,8 \cdot 10^{-6}}{0,6 \cdot 3000 \cdot 22,2 \cdot 10^{-6}} \frac{3,5}{3,15}} = 5,7 \text{ мкм.}$$

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{(\lg \sigma_{\eta})^2 + (\lg \sigma_{\varphi})^2}} = 0,312.$$

$$x = 0,81 \cdot \lg \frac{d_{50}}{d_{50}^T}.$$

$$\Phi(x) = \Phi(0,312) = 0,6225.$$

$$\eta = 0,5 \cdot (1 + 0,6225) = 0,81125.$$

$$C_{оч} = C (1 - \eta) = 25 (1 - 0,81125) = 4,72 \text{ г/м}^3.$$

Т.к. ( $C_{цнк} = 5 \text{ г/м}^3$ ) < ( $C_{оч} = 4,72 \text{ г/м}^3$ ), то расчёт удовлетворяет поставленным требованиям.

## 2.4. Технологический расчёт мокрого циклона

Расчёт мокрого циклона выполняется аналогично расчёту сухого циклона. Пример расчёта мокрого циклона приведен ниже.

**Пример.** Требуется определить размеры, гидравлическое сопротивление центробежного циклона, эффективность очистки, а также расход воды на неё по следующим данным:

– количество вентиляционного воздуха при рабочих условиях  $V=28000 \text{ м}^3/\text{ч} = 7,778 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

– температура воздуха  $t=20^\circ\text{C}$ ;

– воздух в трубопроводе на входе в циклон находится под избыточным давлением  $P=300 \text{ Па}$ ;

– барометрическое давление  $P_{бар} = 101325 \text{ Па}$ ;

– начальная запыленность воздуха  $z_1 = 1,0 \text{ г/м}^3$ ;

– плотность пыли  $\rho_n = 2 \text{ г/см}^3$ ;

– дисперсный состав пыли характеризуется следующими данными:

Размер частиц, мкм	0... 5	5... 10	10... 15	15... 20	20... 30	30... 40	>40
Средний размер частиц, мкм	3,0	7,5	12,5	17,5	25,0	35,0	45,0

Содержание, % (по массе)	2,0	18,0	15,0	25,0	15,0	10,0	15,0
Содержание, доли единицы	0,02	0,18	0,15	0,25	0,15	0,10	0,15

Расчёт. Принимается, в соответствии с рекомендациями, скорость воздуха в цилиндрической части циклона  $v=4$  м/с и определяем его диаметр по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi v n}},$$

где  $V$  – количество газа, подлежащего очистке при рабочих условиях, м<sup>3</sup>/с;  
 $v$  – средняя скорость газа в сечении цилиндрической части аппарата, м/с;  
 $n$  – число циклонов.

Примем  $n=1$ , тогда

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 7,778}{\pi \cdot 4 \cdot 1}} = 1,574 \text{ м.}$$

Ввиду того, что циклон не следует делать диаметром более 1200 мм, примем к установке два циклона и рассчитаем диаметр каждого, считая, что воздух будет поступать в них параллельно:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 7,778}{\pi \cdot 4 \cdot 2}} = 1,113 \text{ м.}$$

Остальные размеры циклона определяются по следующим зависимостям.

Высота цилиндрической части циклона принимается в 6,5 раза больше его диаметра:

$$H=6,5 \cdot D=6,5 \cdot 1,113=7,23 \text{ м.}$$

Высота бункера принимается равной половине диаметра циклона:

$$H_б=0,5 \cdot D=0,5 \cdot 1,113=0,557 \text{ м.}$$

Площадь входного и выходного патрубков циклона определяются из рекомендованной скорости воздуха в них  $v_n=21$  м/с:

$$S_n=V/(n \cdot v_n)=7,7778/(2 \cdot 21)=0,185 \text{ м}^2,$$

где  $n$  – число циклонов.

Высота патрубков для входа и выхода газа определяются из соотношения

$$h_n=0,8 \cdot D=0,8 \cdot 1,113=0,89 \text{ м.}$$

Тогда ширина патрубка будет равна

$$b_n=S_n/h_n=0,185 \cdot 0,89=0,207 \text{ м.}$$

Определяется значение гидравлического сопротивления циклона. При диаметре циклона  $D=1,113$  м коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi=2,84$ .

Плотность воздуха  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, при рабочих условиях определяется по формуле

$$\rho = \rho_0 \frac{273(P_{бар} \pm p)}{(273+t)101325},$$

где  $p_{бар}$  – барометрическое давление, Па;

$p$  – избыточное давление (разрежение), Па;

$t$  – температура воздуха, °C;

$\rho_0$  – плотность воздуха при нормальных условиях,  $\rho_0=1,293$  кг/м<sup>3</sup>.



Отсюда

$$\rho = 1,293 \frac{273(101325 + 300)}{(273 + 100)101325} = 1,208 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Тогда } \Delta p = \xi \rho v^2/2 = 2,84 \cdot 1,208 \cdot 20^2/2 = 756 \text{ Па.}$$

Расход воды на орошение стенок циклона составит:

$$M_B = 0,14 \pi D = 0,14 \cdot \pi \cdot 1,113 = 0,49 \text{ л/с} = 1764 \text{ л/ч.}$$

Расход воды на два циклона составит 3528 л/ч. На промывку циклона расход воды принимается в 1,5 раза больше, чем на орошение, т.е. для промывки одного циклона потребуется воды  $1,5 \cdot 1764 = 2646$  л/ч. Вода к соплам поступает из уравнительного бачка под давлением 19,6 кПа.

Определяется степень очистки газа в циклоне. Ниже приведены сводные данные, использованные в дальнейшем расчёте.

Средний размер частиц пыли, $d$ , мкм	3	7,5	12,5	17,5	25	33	45
Скорость витания частиц, см/с	0,1	0,3	0,75	1,8	3,8	7,5	11,5
Фракционная эффективность, $\mathcal{E}_\phi$ , %	85	85	90,3	90,3	92,8	94,3	95,5
Фракционная эффективность, доли единицы	0,85	0,85	0,903	0,903	0,928	0,943	0,955

Для полидисперсного аэрозоля общая степень улавливания (эффективность)  $\eta$  определяется для  $N_\Phi$  фракций по формуле

$$\eta = \sum_{i=1}^{N_\Phi} \eta_{\phi,i} \Phi_i,$$

где  $N_\Phi$  – число фракций;

$\eta_{\phi,i}$  – степень улавливания частиц  $i$ -ой фракции;

$\Phi_i$  – отношение массы пыли  $i$ -ой фракции к массе всей пыли.

Общая степень очистки воздуха в циклоне диаметром 1 м составит

$$\eta = (85 \cdot 0,02 + 85 \cdot 0,18 + 90,3 \cdot 0,15 + 92,8 \cdot 0,25 + 94,3 \cdot 0,10 + 95,5 \cdot 0,15) = 0,9081 = 90,81 \text{ \%}.$$

Для рассчитанного диаметра циклона действительное значение степени очистки воздуха составит

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta) \sqrt{D} = 1 - (1 - 0,9081) \sqrt{1,113} = 0,903 = 90,3 \text{ \%}.$$

Конечное содержание пыли в очищенном воздухе

$$z_2 = z_1(1 - \eta) = 1 - (1 - 0,903) = 0,097 \text{ г/м}^3 = 97 \text{ мг/м}^3.$$

## 2.5. Рекомендации по использованию и эксплуатации циклонов

В процессе эксплуатации циклонные установки следует подвергать систематическим осмотрам, наружные осмотры необходимо производить несколько раз в смену. Результаты осмотров записывают в журнал начальника смены. Внутренние осмотры выполняют во время остановки основного технологического оборудования. В батарейных циклонах обращают внимание на степень изношенности элементов, наросты пыли на направляющих лопатках, герметичность

затворов и питателей.

С повышением крупности частиц и ее плотности эффективность очистки возрастает. Повышение температуры газов, которое обуславливает увеличение их вязкости, а также увеличение диаметра цилиндрической части циклона вызывает снижение эффективности очистки.

С повышением скорости газового потока улучшается улавливание пыли в циклоне. Однако при больших скоростях рост КПД замедляется, а при переходе некоторого предела, зависящего от конструкции циклона и дисперсного состава улавливаемой пыли, начинает даже снижаться. Это вызвано возникновением завихрений, срывающих уже осевшие частицы пыли, и дроблением скоагулированных пылевых агрегатов. Эффективные скорости входа газа в циклон колеблются от 20 до 25 м/с, но не менее 15 м/с.

Поток, поступающий в выхлопную трубу, продолжает интенсивно вращаться. Затухание этого вращательного движения происходит медленно. Для устранения вращательного движения на выходе из циклона и уменьшения гидравлических потерь, иногда применяют специальные устройства, например раскручиватели.

Бункер участвует в аэродинамике циклонного процесса, поэтому использование циклонов без бункера или с уменьшенными размерами по сравнению с рекомендуемыми, снижает КПД аппаратов.

Основные требования при эксплуатации циклонов:

1. Своевременное освобождение бункеров циклонов от пыли. При нерегулярном выпуске пыли происходит переполнение бункера, что недопустимо, так как уменьшается степень очистки в результате выноса уловленной пыли из бункера и возможно забивание циклона пылью. Для циклонов ЦН слой пыли в бункере при наибольшем его заполнении должен быть ниже пылевых выпускных отверстий не менее чем на высоту двух диаметров этих отверстий.

2. Контроль величины газодинамического сопротивления циклона. Увеличение сопротивления с одновременным ухудшением очистки указывает на вероятность замазывания мокрой пылью аппаратов либо является результатом повышения расхода газов. Уменьшение сопротивления с одновременным ухудшением очистки является результатом того, что газопылевой поток проходит через щели, минуя циклоны.

Для предупреждения забивания аппаратов улавливаемым продуктом при очистке газов от сильно слипающихся пылей устанавливают вибраторы на бункерах, а иногда и на конической части циклонов, которые включаются периодически в зависимости от характеристики пыли. При установке вибраторов желательно предусмотреть компенсаторы между циклонами и примыкающими участками газоходов (для предотвращения поломки частей по сварным швам).

3. Предварительное отделение наиболее крупных частиц. Резко снижается скорость износа стенок циклонов при улавливании высокоабразивной пыли. Если позволяют размеры аппарата, то желательна футеровка его изнутри керамической плиткой.

Снижение начальной запыленности газов. Для обеспечения надежной работы циклонов при очистке газов от среднеслипающихся пылей допустимая запыленность должна быть уменьшена в 4 раза, а для сильно слипающихся в 8...10

раз.

4. Установка сигнализаторов уровня пыли. Циклонные установки должны снабжаться сигнализаторами уровня пыли в бункере. При их отсутствии проверяют уровень пыли путем легкого обстукивания стенок бункера по звуку.

### 3 АППАРАТЫ МОКРОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ

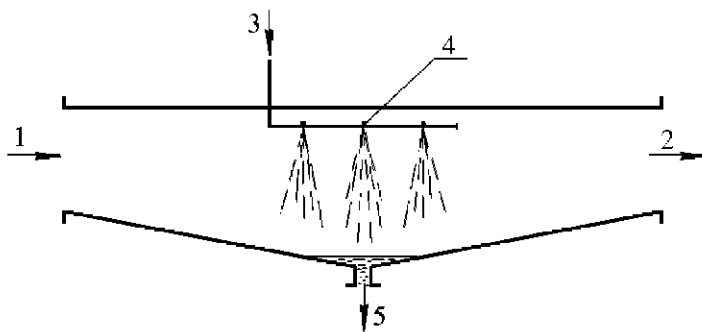
Для повышения эффективности очистки газа от мелкодисперсной пыли прибегают к коагуляции (укрупнению) частичек пыли. В аппаратах мокрой очистки коагуляция достигается смачиванием пыли. При мокрой очистке в запыленный поток газа вводится жидкость, обычно – вода, которая смачивает пыль, что способствует слипанию частичек пыли между собой, т.е. укрупнению пыли.

В том случае, если очищаемый от пыли газ высокотемпературный, вода охлаждает газ. При наличии вредных газообразных компонентов в газе, например  $SO_2$  или  $SO_3$ , вода связывает эти компоненты с образованием сернокислотных соединений.

В число наиболее распространенных аппаратов мокрой очистки входят орошаемые газоходы, промывочные камеры, скрубберы, аппараты ударно-инерционного действия, тарельчатые и скоростные газопромыватели.

#### 3.1 Орошаемые газоходы

Встроенные в орошаемый газоход форсунки создают водяную завесу (см. рис. 3.1). Для исключения значительного уноса воды скорость газа в газоходе не должна превышать 3 м/с. Удельный расход воды – 0,1... 0,3 кг/м<sup>3</sup>.



*Рисунок 3.1*  
– Схема орошаемого газохода: 1 – вход запыленного газа; 2 – выход очищенного газа; 3 – подвод воды на очистку газа; 4 – ярус форсунок для создания водяных завес; 5 – отвод шлама.

#### 3.2 Промывочные камеры

Промывочные камеры обычно применяются для очистки воздуха от пыли в системах вентиляции и кондиционирования воздуха (см. рис. 3.2).

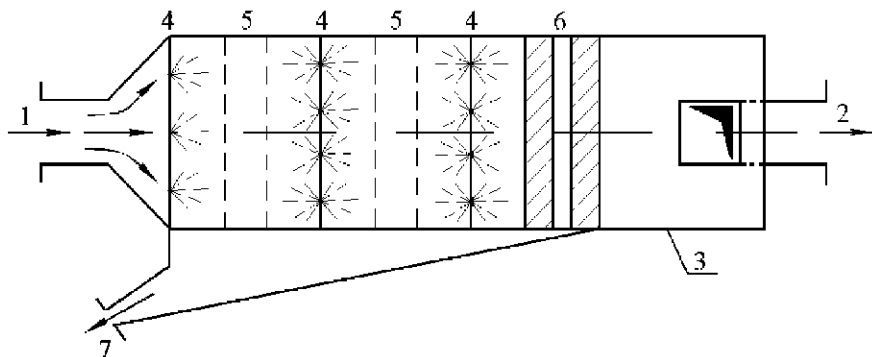


Рисунок 3.2 – Схема промывочной камеры: 1 – подвод запыленного газа; 2 – отвод очищенного газа; 3 – корпус камеры; 4 – форсуночные ряды для создания водяных завес; 5 – сетки или перфорированные листы для уравнивания скорости движения газа; 6 – каплеуловитель в виде жалюзийных решеток; 7 – отвод шлама.

Размеры камеры выбираются таким образом, чтобы скорость движения газов составляла в них 1,5... 2,5 м/с, а время пребывания газов в камере – не менее 3 с. Удельный расход воды – 0,2... 1,0 кг/м<sup>3</sup>.

### 3.3 Скрубберы

Скрубберы разделяют на полые и насадочные. На рис. 3.3 представлена схема полого скруббера. Обычно это вертикальный полый цилиндр диаметром до 6... 8 м, высотой до 20... 30 м.

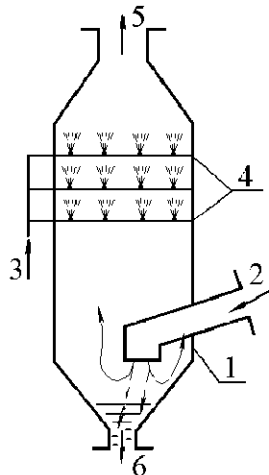


Рисунок 3.3 – Схема полого скруббера: 1 – цилиндрический корпус; 2 – подвод запыленного газа; 3 – подвод воды на орошение; 4 – ярусы орошающих форсунок; 5 – отвод очищенного газа; 6 – отвод шлама.

Патрубок для подвода запыленного газа несколько смещен от оси скруббера, что улучшает равномерность распределения газа. Отверстие подводящего патрубка направлено к зеркалу воды, чем обеспечивается ударный контакт газа с водой. В результате удара газа о воду происходит инерционное отделение наи-

более крупных частиц пыли.

Форсунки обычно размещаются в несколько ярусов. Факел распыливания воды из форсунки может быть направлен вверх, вниз или под углом.

В скруббере происходит также охлаждение газа. Максимально допустимая температура газа на входе в скруббер – 300 °С. При более высокой температуре газа из-за интенсивного испарения воды исключается или снижается эффект коагуляции пыли.

Скорость газа в скруббере принимается в пределах 0,5... 1,5 м/с. При более высокой скорости происходит унос капель, что приводит к отложению шлама в последующих за скруббером газоходах. При менее высоких скоростях газа возрастают размеры скруббера и несколько снижается эффективность очистки вследствие уменьшения турбулизации потока газа, которая способствует лучшему перемешиванию газа с водой.

Полые скрубберы обеспечивают довольно высокую степень очистки (свыше 80%) при улавливании частиц размером более 10 мкм и малоэффективны при улавливании частиц менее 5 мкм.

Внутренняя поверхность скруббера для исключения коррозии (например сернокислотной) облицовывается керамической плиткой.

Насадочные скрубберы представляют собой полые цилиндры заполненные насадкой (рис. 3.5). Насадка засыпается без определенного порядка или укладывается на опорную решетку в определенном порядке (регулярная насадка). Применяются различные типы насадок – кольца Рашига, кольца с перегородкой, хордовые насадки и др.

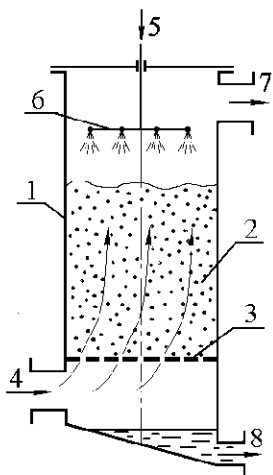


Рисунок 3.5 – Схема насадочного скруббера: 1 – корпус скруббера; 2 – насадка; 3 – опорная решетка; 4 – вход запыленного газа; 5 – подача воды на орошение; 6 – ярус орошающих форсунок; 7 – выход очищенного газа; 8 – отвод шлама.

Применение в технике пылеулавливания насадочных скрубберов ограничено из-за частого забивания насадки пылью.

Эффективность очистки в насадочных скрубберах может достигать 90% при улавливании частиц размером свыше 2 мкм.

В центробежных скрубберах (рис. 3.7) достигается комбинированное действие при улавливании пыли – коагуляция пыли водой и действие на пыль центро-

бежных сил в закрученном потоке газа.

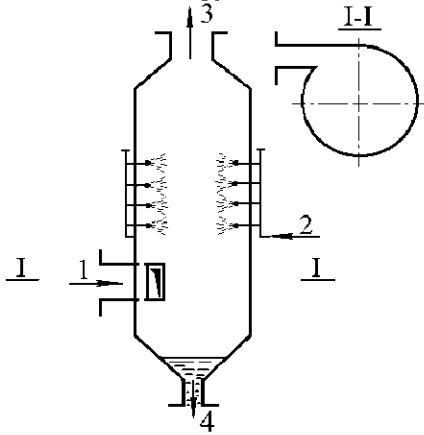


Рисунок 3.7 — Центробежный скруббер: 1 — тангенциальный подвод запыленного газа; 2 — подвод воды на форсуночное орошение; 3 — отвод очищенного газа; 4 — отвод шлама.

Форсунки размещаются вдоль стенок скруббера. Над форсунками предусматривается зона, свободная от подачи воды. Это дает возможность отбросить капли орошения на стенки скруббера, прежде чем газовый поток достигнет выходного патрубка.

Удельный расход воды на очистку —  $0,4... 1,3 \text{ кг/м}^3$ .

Степень очистки газов для частиц размером свыше 1 мкм может составить более 97%.

Высокая степень очистки газа достигается вследствие многократной промывки газа водой во вращающемся потоке.

В центробежных скрубберах одновременно с очисткой газа от пыли и охлаждением газа происходит абсорбция из газов оксидов серы. Степень улавливания оксидов серы может составить до 40... 50%.

### 3.4 Аппараты ударно-инерционного действия

К аппаратам ударно-инерционного действия относится группа мокрых пылеуловителей, в которых газовый поток ударяется о поверхность жидкости на большой скорости, что приводит к частичному удалению пыли в результате углубления пыли в жидкость.

Наиболее простой конструкцией пылеуловителя ударно-инерционного действия является вертикальная колонна (рис. 3.8), в верхней части которой установлен центральный входной газопровод, имеющий конфигурацию трубы Вентури, а в нижней части колонна заполнена водой.

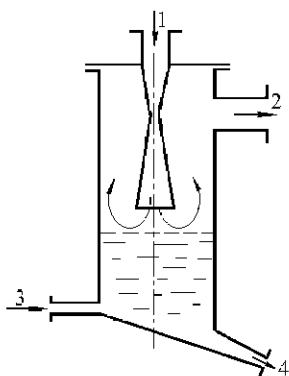


Рисунок 3.8 – Ударно-инерционный пылеуловитель с центральным верхним подводом газа: 1 – подвод запыленного газа; 2 – отвод очищенного газа; 3 – подвод воды; 4 – отвод шлама.

Скорость очищаемого газа, направленного на поверхность воды, составляет до 20... 30 м/с. При ударе газа о воду крупные частицы пыли углубляются в воду, смачиваются и выпадают на днище аппарата в виде шлама. После удара о воду направление движения газа изменяется на  $180^\circ$ .

При повороте газа на  $180^\circ$  оставшиеся в газе частицы пыли вследствие инерции отделяются от газа и также улавливаются водой. Аппарат улавливает частицы более 20 мкм. Шлам из аппарата удаляется непрерывно или периодически. Для удаления уплотненного шлама со дна применяются смывные сопла.

К аппаратам ударно-инерционного действия относится скруббер Дойля (см. рис. 3.9).

Скруббер Дойля представляет собой заполненный водой резервуар. Подвод запыленного газа осуществляется через вертикальную трубу, в нижней части которой установлен конус для сужения потока газа, что ускоряет его перед контактом с водой. В щели кольцевого зазора на выходе из трубы скорость газа составляет 35... 55 м/с. Газовый поток ударяется о поверхность жидкости, создавая завесу из капель жидкости.

Ударно-инерционное проникновение пыли вглубь воды, а также коагулирование пыли в капельной завесе, обеспечивают улавливание пыли.

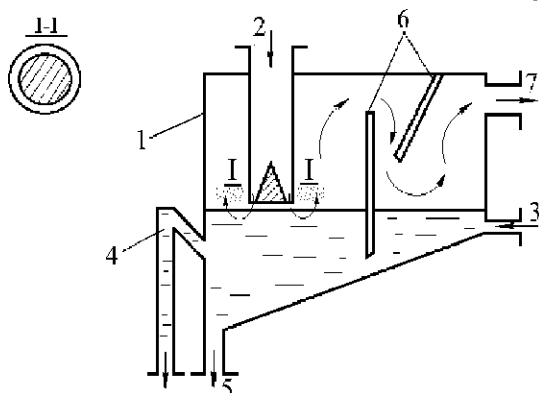


Рисунок 3.9 – Скруббер Дойля: 1 – корпус скруббера; 2 – подвод запыленного газа; 3 – подвод воды в полость скруббера; 4 – перелив для отвода избытка воды; 5 – отвод шлама; 6 – перегородки для удаления капель; 7 – отвод очищенного газа.

Перелив для отвода избытка воды выполняет функцию гидрозатвора. Перегородки, размещенные в полости скруббера, обеспечивают многократное изменение направления движения газа при выходе его из скруббера, что способствует

ет инерционному отделению капель уносимой влаги. Перегородки могут быть выполнены перфорированными или в виде жалюзей.

Удельный расход воды на очистку – 0,1... 0,2 кг/м<sup>3</sup>. В скруббере эффективно улавливаются частицы более 10... 15 мкм.

Особенностью аппаратов ударно-инерционного действия является отсутствие средств для перемещения воды. Необходимая для очистки развитая поверхность контакта газа и воды создается за счет энергии ударяющегося о воду газа. В связи с этим пылеуловители ударно-инерционного действия называются аппаратами с внутренней циркуляцией жидкости.

### 3.5 Тарельчатые газопромыватели

Тарельчатые газопромыватели представляют собой вертикальные полые цилиндры (рис. 3.10), внутри которых установлены горизонтальные перегородки с отверстиями (тарелки).

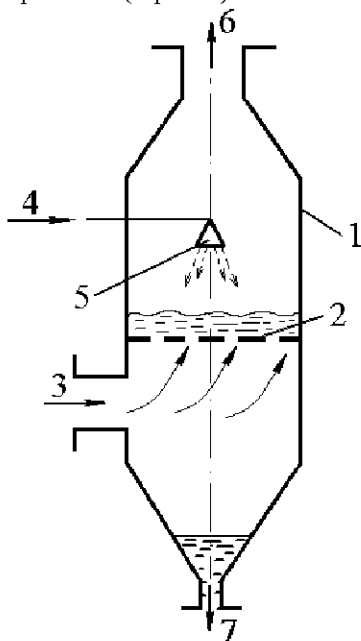


Рисунок 3.10 - Схема газопромывателя с провальными тарелками: 1 – корпус газопромывателя; 2 – провальная тарелка; 3 – подвод запыленного газа; 4 – подача воды на орошение; 5 – орошающее устройство; 6 – выход очищенного газа; 7 – отвод шлама.

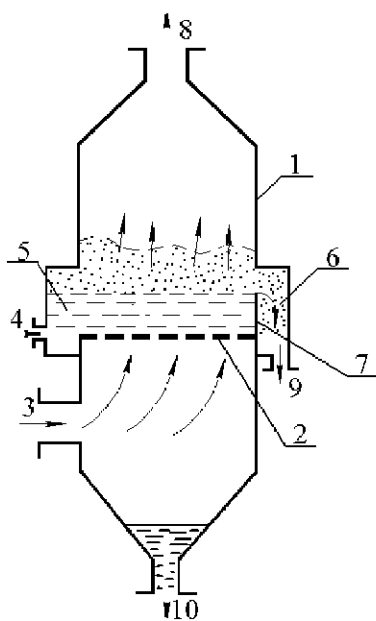


Рисунок 3.11 – Схема газопромывателя с переливными тарелками: 1 – корпус газопромывателя; 2 – тарелка; 3 – подача запыленного газа; 4 – подача воды; 5 – приемная камера; 6 – сливная камера; 7 – порог регулирующий уровень воды на тарелке; 8 – выход очищенного газа; 9 и 10 – отвод шлама.

Тарельчатые газопромыватели в зависимости от конструкции тарелки разделяются на две группы – с провальными тарелками и переливными тарелками.



Подвод газа в зону контакта с жидкостью осуществляется через отверстия в тарелке, которые могут быть щелевыми или круглыми.

В пылеуловителях с переливными тарелками (см. рис. 3.11) обычно устанавливаются тарелки с диаметром отверстий 2... 8 мм. Скорость газа в свободном сечении аппарата 1...3 м/с. Основной режим работы газопромывателя с переливными тарелками – пенный.

Недостатками газопромывателей с переливными тарелками являются образование отложений на поверхности тарелок вследствие менее интенсивного перемещения воды на поверхности тарелки и брызгоунос вследствие пенного режима работы, что ограничивает применение газопромывателей с переливными тарелками.

### 3.6 Скоростные газопромыватели

Скоростные газопромыватели наиболее эффективны аппараты мокрой очистки газа, их применяют в основном для очистки газа от микронной и субмикронной пыли (десятые доли мкм).

В скоростных газопромывателях основным фактором, обеспечивающим очистку газа, является подача воды на очистку в высокоскоростной поток запыленного газа, что способствует эффективному диспергированию воды и последующей промывке газа водой в турбулентном режиме движения газа. Высокие скорости очищаемого газа обеспечивают трубы Вентури. В связи с этим скоростные газопромыватели называют также скрубберами Вентури.

В целом скрубберы Вентури представляют собой сочетание труб Вентури и последующих за трубами каплеуловителей. Вода поступает в наиболее скоростную часть труб Вентури (в конфузор или горловину).

Элементы скруббера могут быть смонтированы раздельно (рис. 3.12) или в одном корпусе (рис. 3.13).

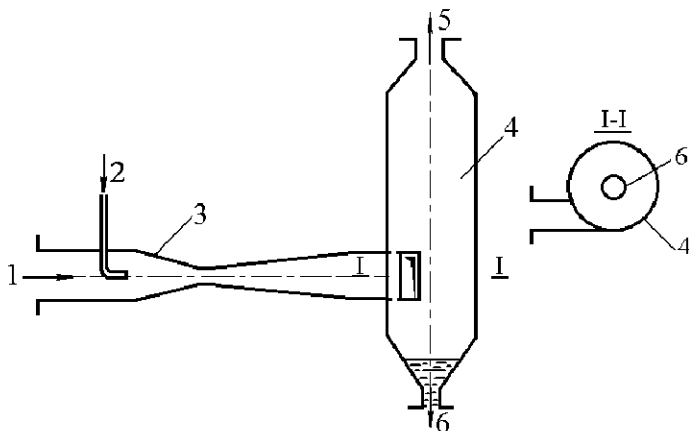
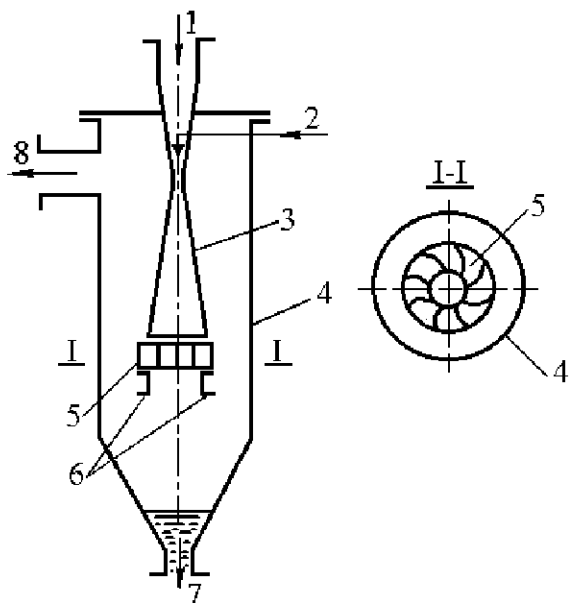


Рисунок 3.12 – Скруббер Вентури с выносным каплеуловителем: 1 – вход запыленного газа; 2 – подвод орошающей жидкости; 3 – труба Вентури; 4 – циклон-каплеуловитель; 5 – отвод очищенного газа; 6 – отвод шлама.

Таким образом, принцип действия скруббера Вентури заключается в интенсивном дроблении жидкости, подаваемой на очистку газа в высокоскоростной

газовой поток (40... 150 м/с), в коагуляции пыли жидкостью в турбулентном режиме движения газа и в последующем улавливании капель жидкости, образующих с пылью шлам.



*Рисунок 3.13  
– Скруббер Вентури со встроенным каплеуловителем: 1 – подвод запыленного газа; 2 – подвод орошающей жидкости; 3 – труба Вентури; 4 – корпус каплеуловителя; 5 – центробежный завихритель; 6 – патрубок для концентрации шлама; 7 – отвод шлама; 8 – выход очищенного газа.*

Применение трубы Вентури для ускорения газа позволяет сделать процесс дробления жидкости с минимальными гидравлическими потерями.

Плавное сужение конфузора, а затем плавное расширение диффузора делают трубу Вентури с аэродинамической точки зрения наиболее предпочтительной для распыления орошающей воды.

В конфузоре газ развивает большую скорость, что способствует дроблению воды на мельчайшие капли, а в диффузоре вследствие снижения скорости происходит укрупнение капель воды с пылью, что облегчает их отделение в каплеуловителе.

В качестве каплеуловителя обычно используются простейшие аппараты инерционного типа или циклоны.

В целом эффективность работы скрубберов Вентури определяется оптимальным соотношением между гидравлическим сопротивлением и удельным расходом орошающей жидкости. Оптимальное соотношение зависит от конструкции скруббера, характеристики частиц пыли и их дисперсного состава.

Количество орошающей жидкости для скрубберов Вентури в зависимости от особенностей конструкции скруббера составляет 0,5... 1,5 кг/м<sup>3</sup>.

### **3.7 Расчет скруббера Вентури**

Расчёт скруббера Вентури выполним на примере расчёта его эффективности применения для очистки от пыли производственных выбросов.

Исходные данные:

Загрязнитель – конвекторная пыль  $B = 9,88 \cdot 10^{-2}$ ;  $n = 0,4663$ .

Плотность газа в горловине  $\rho_g = 0,9 \text{ кг/м}^3$ .

Скорость газа в горловине  $W_g = 135 \text{ м/с}$ .

Массовый расход газа  $M_g = 0,9 \text{ кг/с}$ .

Массовый расход орошающей жидкости  $M_{жк} = 0,865 \text{ кг/с}$ .

Удельный расход жидкости  $m = 1,5 \text{ л/м}^3$ .

Давление жидкости  $\rho_{жк} = 300 \text{ кПа}$ .

Плотность жидкости  $\rho_{жк} = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Коэффициент гидравлического сопротивления сухой трубы  $\zeta_C = 0,15$ .

Требуемая эффективность очистки от пыли не менее 0,9.

Расчет:

Определяем гидравлическое сопротивление сухой трубы Вентури,

$$\Delta p_C = \frac{\zeta_C \cdot W_g^2 \cdot \rho_g}{2} = \frac{0,15 \cdot 135^2 \cdot 0,9}{2} = 1230 \text{ Па.}$$

Расчитываем гидравлическое сопротивление, обусловленное введением орошающей жидкости,

$$\Delta p_{жк} = \frac{\zeta_{жк} \cdot W_g^2 \cdot \rho_{жк} \cdot m}{2} \text{ Па,}$$

где  $\zeta_{жк}$  – коэффициент гидравлического сопротивления трубы, обусловленный вводом жидкости

$$\zeta_{жк} = 0,63 \cdot \zeta_C \cdot \left( \frac{M_{жк} \cdot \rho_g}{M_g \cdot \rho_{жк}} \right)^{-0,3} = 0,63 \cdot 0,15 \cdot \left( \frac{0,865 \cdot 0,9}{0,9 \cdot 1000} \right)^{-0,3} = 0,78;$$

$$\Delta p_{жк} = \frac{0,78 \cdot 135^2 \cdot 1000 \cdot 1,5}{2} = 10661625 \text{ Па.}$$

Находим гидравлическое сопротивление трубы Вентури, Па,

$$\Delta p = \Delta p_C + \Delta p_{жк} = 1230 + 10661625 = 10662855 \text{ Па.}$$

Находим суммарную энергию сопротивления  $K_T$ , Па,

$$K_T = \Delta p + p_{жк} \left( \frac{V_{жк}}{V_g} \right)$$

где  $V_{жк}$  и  $V_g$  – объемные расходы жидкости и газа соответственно,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$$V_{жк} = M_{жк} / \rho_{жк} = 0,865 / 1000 = 8,65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$V_g = M_g / \rho_g = 0,9 / 0,9 = 1 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$K_T = 10662855 + 300 \cdot 10^3 \cdot (8,65 \cdot 10^{-4} / 1) = 10663114 \text{ Па.}$$

Определяем эффективность скруббера Вентури:

$$\eta = 1 - e^{-B \cdot K_T^n} = 1 - e^{-0,0988 \cdot 10663114^{0,4663}} = 0,99.$$

Эффективность скруббера Вентури, полученная в результате расчетов (величина  $\eta$ ), удовлетворяет заданному условию, т.е. обеспечивает очистку газов от пыли с эффективностью не менее 0,9.

### 3.3 Конструктивные параметры трубы Вентури

Определим конструктивные параметры диффузора, горловины и конфузора (рис. 3.14):

$$\alpha_1 = 15 \dots 28^\circ;$$

$$\alpha_2 = 6 \dots 8^\circ;$$

$$l_1 = \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1/2)};$$

$$l_2 = 0,15 \cdot d_2;$$

$$l_3 = \frac{d_3 - d_2}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2/2)};$$

$$d_K = (2 \dots 2,2) d_2; \quad d_T = \sqrt{\frac{4F_T}{\pi}};$$

$$d_3 = (1,6 \dots 1,8) d_T.$$

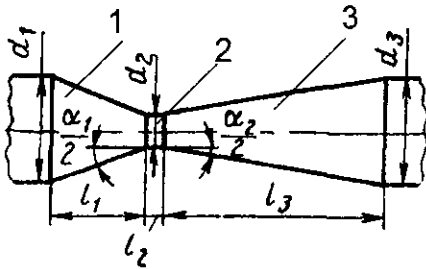


Рис. 3.14 – Схема скруббера Вентури

Примем параметры скруббера, соответствующие параметрам скруббера Вентури СВ-210/120-1200:  $d_T = 0,25$  м,  $\alpha_1 = 20^\circ$ ,  $\alpha_2 = 8^\circ$ .

Тогда

$$d_3 = 1,8 \cdot 0,21 = 0,378 \text{ м};$$

$$d_K = 2,2 \cdot 0,21 = 0,462 \text{ м};$$

$$l_1 = \frac{0,378 - 0,21}{2 \cdot \operatorname{tg}(20/2)} = 0,48 \text{ м};$$

$$l_2 = 0,15 \cdot 0,21 = 0,0315 \text{ м};$$

$$l_3 = \frac{0,462 - 0,21}{2 \cdot \operatorname{tg}(8/2)} = 1,8 \text{ м}.$$

## 4. КАПЛЕУЛОВИТЕЛИ

### 4.1 Теоретическая часть

Применяются различные каплеуловители, выбор которых определяется размером улавливаемых капель при скорости 120 м/с. В трубе Вентури образуются капли со средним размером 50 мкм. В качестве каплеуловителей наиболее часто применяются циклоны, а также коленные сепараторы (рис. 4.1), сепараторы с закручивающими элементами и разделительные емкости. Иногда после трубы Вентури устанавливают пустые и насадочные скрубберы, пенные аппараты и электрофильтры. Для более полного очищения используются двухступенчатые каплеуловители (грубого и тонкого очищения). В качестве каплеуловителей грубого очищения применяются разделительные емкости, в которых большие капли под действием сил гравитации падают на дно, а поток газа выходит сверху очищенным. Также применяются коленные сепараторы. Для тонкого очищения используются циклоны (прямоточные циклоны НИИОГАЗ).

Коленные сепараторы представляют собой колено (поворот потока на  $90^\circ$ ). Вследствие инерции большие капли отбрасываются к стенке колена в нижнюю его часть, где есть емкость для отвода жидкости. Для усиления сепарации капель в колене иногда устанавливаются продольные лопатки. Коленные сепараторы относятся к каплеуловителям грубого очищения, они более компактные, чем разделительные емкости.

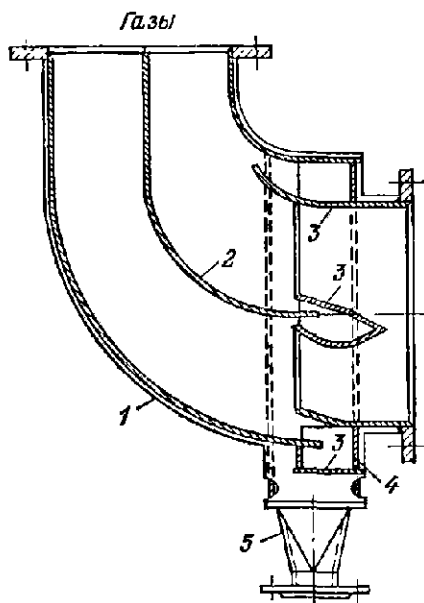


Рис. 4.1. Коленный сепаратор: 1 – корпус; 2 – лопатки; 3 – сливные карманы; 4 – труба для сбора уловленной жидкости; 5 – устройство для вывода жидкости

Компактностью отличаются также центробежные каплеуловители с лопаточным завихрителем цилиндрической или конической формы. Центробежные каплеуловители устанавливаются непосредственно после трубы Вентури. Газо-жидкостный поток входит снизу через узкое сечение конуса и закручивается с помощью лопаток. Исходящие из конуса капли под действием центробежных сил отбрасываются к стенке и оседают на ней в виде пленки жидкости, стекают в сборник, откуда через штуцер удаляются. Очищенный газ выходит сверху. Центробежные каплеуловители обеспечивают улавливание капель диаметром больше 10 мкм с эффективностью до 99 %. Скорость движения газа в сепараторах достигает 15 м/с. При улавливании капель суспензии и растворов межлопастные каналы забиваются. Поэтому эффективно использовать каплеуловители с несколькими секциями по высоте. Причем, число лопаток в завихрителях увеличивается сверху вниз.

При больших удельных расходах орошающей жидкости, а также при очистке в скрубберах Вентури переменных объемов газов применяют двухступенчатую сепарацию влаги: грубую и тонкую. В качестве первой ступени для улавливания основного количества жидкости обычно используют разделительные емкости и коленные сепараторы (рис. 4.1), а в качестве второй ступени для доулавливания капельной влаги – циклонные сепараторы (рис. 4.2). Это обеспечивает высокую эффективность улавливания капель и осевших на них частиц пыли во всем диапазоне изменения производительности по газу.

#### 4.2 Определение основных конструктивных параметров каплеуловителя

Конструктивные параметры каплеуловителя можно определить, пользуясь расчетной схемой (см. рис. 4.3).

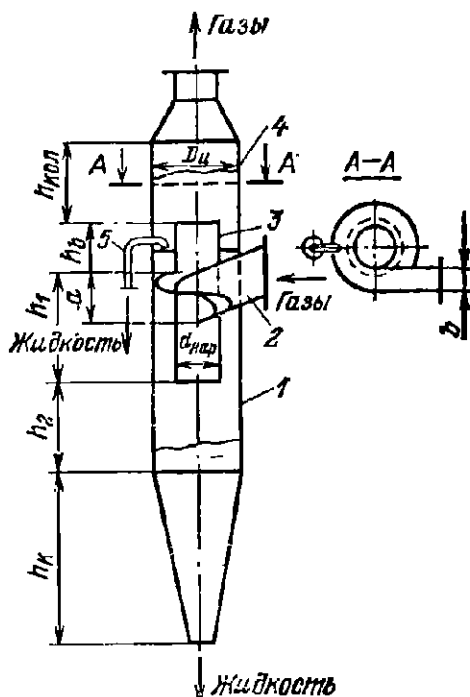


Рис. 4.2. Циклон ЦН-24 с разрывом в выхлопной трубе: 1 – корпус; 2 – устройство для ввода газов; 3 – выхлопная труба; 4 – верхняя камера циклона; 5 – устройство для отвода жидкости из верхней камеры циклона

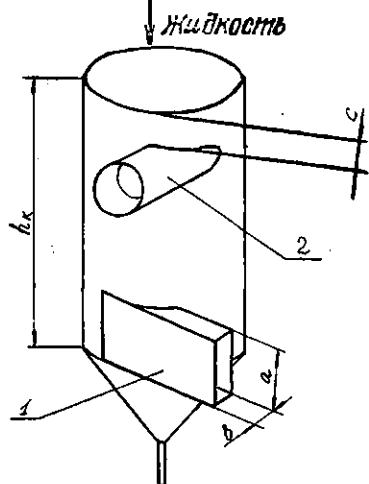


Рис. 4.3 – Расчетная схема каплеуловителя: 1 – входной патрубков; 2 – выходный патрубок;  $h_K$  – высота каплеуловителя;  $a, b$  – габариты входного патрубков;  $c$  – расстояние от выходного патрубков до крышки каплеуловителя.

Скорость газа в каплеуловителе рекомендуется принимать равной 4,5...5,5 м/с.

Определим диаметр каплеуловителя, м,

$$W_K = \frac{Q_{\Gamma}^{ВЫХ}}{0,785 \cdot 3600 d_K^2} \Rightarrow d_K = \sqrt{\frac{Q_{\Gamma}^{ВЫХ}}{0,785 \cdot 3600 W_K}}$$

Высота каплеуловителя

$$h_K = 1,5 d_K$$

Из рекомендованного соотношения высоты входного патрубков  $a$  к его ши-

рине  $b$ , равном  $a/b=3$ , определим ширину входного патрубка, равную диаметру горловины скруббера, то есть  $a=d_c$ . Тогда  $b=a/3$ ;  $F_{BX} = ab$ .

Из рекомендованного соотношения площадей выходного и входного патрубков  $\frac{F_{ВЫХ}}{F_{BX}} = 1,7$  определим площадь выходного патрубка,  $m^2$ ,

$$F_{ВЫХ} = 1,7 F_{BX}.$$

Расчетное расстояние между выходным патрубком и верхней крышкой каплеуловителя, м,

$$C = 0,1 d_K.$$

## 5. ПЫЛЕВЫЕ КАМЕРЫ

### 5.1. Теоретическая часть

Пылевые камеры представляют собой конструкции прямоугольного сечения, выполненные из металла или бетона (кирпич). Схема пылевой камеры представлена на рисунке 1.1.

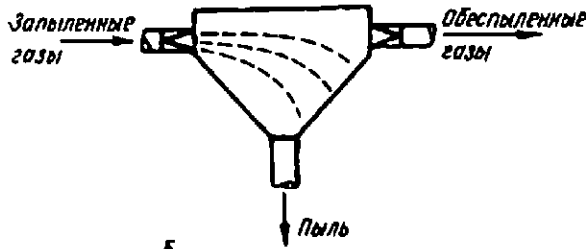


Рисунок 5.1 – Схема пылевой камеры

При входе в пылевую камеру скорость пылегазового потока резко уменьшается за счет увеличения площади поперечного сечения в пылевой камере. Скорость газа составляет  $1... 2$  м/с, при этом частицы пыли в условиях ламинарного движения под действием силы тяжести движутся вниз и выпадают на дно камеры. Диаметр осаждаемых частиц зависит от конструктивных параметров пылевой камеры. Главным условием эффективной работы пылевой камеры является то, что время осаждения частиц должно быть меньшим времени проскока частиц через длину пылевой камеры вместе с газовым потоком. В самых неблагоприятных условиях находятся частицы, которые попадают в верхнюю часть пылевой камеры,

Рассмотрим связь между параметрами частиц и пылевой камеры, которые обеспечивают ее эффективную работу.

Осаждение частицы под действием силы тяжести и с учетом сопротивления среды определяется формулой Стокса

$$v_{ВИТ} = \frac{d^2 g \rho}{18\mu},$$

где  $v_{ВИТ}$  – скорость осаждения частицы;

$d$  – диаметр частицы пыли;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\rho$  – плотность вещества пылевой частицы;

$\mu$  – динамическая вязкость газа.

С учетом высоты пылевой камеры время осаждения равно

$$t_{OC} = \frac{a}{v_{ВИТ}},$$

где  $a$  – высота камеры.

Время прохождения  $t_{ПР}$  частицей пылевой камеры по длине  $L$  определяется формулой

$$t_{ПР} = \frac{L}{v_{ПР}};$$

$$v_{ПР} = \frac{V}{S} = \frac{V}{a \cdot b},$$

где  $v_{ПР}$  – скорость движения газа в пылевой камере;

$V$  – расход газа;

$S$  – площадь поперечного сечения.

Окончательно имеем

$$t_{ПР} = \frac{Lab}{V}.$$

Условием осаждения частицы, поступающей в верхнюю часть пылевой камеры, является выражение

$$t_{OC} = t_{ПР} \Leftrightarrow \frac{a}{v_{ВИТ}} = \frac{Lab}{V},$$

где  $Lb = S_{ОСН}$  – площадь основания камеры.

$$V = S_{ОСН} v_{ВИТ}$$

или

$$V = S_{ОСН} = \frac{d^2 g \rho}{18 \mu};$$

$$d = \sqrt{\frac{18 \mu V}{S_{ОСН} \rho g}}.$$

Из последней формулы следует, что эффективность пылевой камеры тем больше, чем меньше расход газа, больше плотность вещества и частицы и больше площадь основания камеры.

Частицы, которые попали не в верхнюю часть пылевой камеры, а в средние и нижние слои осаждаются быстрее или, можно сказать, что из средних и нижних слоев пылегазовых потоков успевают опасть частицы меньших размеров. Размер таких частиц определяется по формуле

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18 \mu V}{S_{ОСН} \rho g} \frac{h}{d}},$$

где  $h$  – высота от основания пылевой камеры до частицы в момент входа ее в камеру.

Пылевые камеры имеют размеры длиной  $L=25 \dots 40$  м,  $a=8 \dots 12$  м,  $b=10 \dots 20$  м. Из-за больших размеров пылевые камеры используют также для охлаждения пылегазовых потоков.

Эффективность пылевой камеры по улавливанию частиц размером  $20 \dots 50$



мкм, составляет 35... 40%.

## 5.2. Расчет пылевой камеры

Исходные данные для расчета (пример):

Скорость запыленного газа по сечению камеры – 1,0 м/с.

Наименьший диаметр частицы осаждаемой пыли –  $55 \cdot 10^{-6}$  м.

Вязкость газа –  $18,2 \cdot 10^{-6}$  Н·с/м.

Расход газа – 21000 м<sup>3</sup>/ч.

Плотность вещества пыли – 2600 кг/м<sup>3</sup>.

При выполнении данного расчета требуется определить размер пылевой камеры для осаждения частиц требуемого размера. При этом принимается, что давление газа в камере составляет 20 °С и давление газа близко к атмосферному.

Вначале определяем скорость витания частиц  $v_{ВИТ}$ . Для этого используется формула:

$$v_{ВИТ} = (d^2 \rho g) / (18\mu) = [(55 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2600 \cdot 9,8] / (18 \cdot 18,2 \cdot 10^{-6}) = 0,235 \text{ м/с},$$

где  $d$  – наименьший диаметр улавливаемых частиц, м;

$\rho$  – плотность пыли, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;

$\mu$  – динамическая вязкость газов, Н·с/м<sup>2</sup>.

Определим площадь основания камеры:

$$S_{ОСН} = V / v_{ВИТ} = 21000 / (3600 \cdot 0,235) = 24,82 \text{ м}^2,$$

где  $V$  – объем газа, проходящего через камеру, м<sup>3</sup>/с, определяется площадью основания пылевой камеры.

По известной горизонтальной скорости газа в камере  $v_g$  определяют площадь вертикального сечения пылевой камеры:

$$S_B = V / v_g = 21000 / (3600 \cdot 1) = 5,83 \text{ м}^2.$$

Ширина и высота пылевой камеры обычно выбираются близкими по значению. В случае квадратного сечения  $a=b$  и

$$a = b = (S_B)^{0,5} = (5,83)^{0,5} = 2,42 \text{ м}.$$

И, наконец, определяем длину пылевой камеры  $L$ , пользуясь уравнением:

$$L = S_{ОСН} / b = 24,82 / 2,42 = 10,26 \text{ м}.$$

## 6. РУКАВНЫЕ ФИЛЬТРЫ

### 6.1. Теоретическая часть

Рукавные фильтры широко применяются для очистки газов от пыли и возгнов, обладая высокой эффективностью обеспыливания. Технологическим устройством для очистки в этих аппаратах являются специальные ткани, обладающие следующими свойствами: химической стойкостью к агрессивным составляющим газов, механической прочностью, низкой величиной коэффициента линейного расширения, высокой пылеемкостью и воздухопроницаемостью, легким пылеотделением при регенерации, низким влагопоглощением.

Степень очистки в рукавных фильтрах достигает 99 %. В системах газоочистки широко применяются аппараты нескольких типов: ФВ, с импульсной продуккой (тип ФРКН), одно- и двухрядные типа РФГ, УРФМ, ФРО, ФР и другие.

Аппарат, фильтрующий воздушные потоки с помощью рукавных фильтров, может содержать более 200 рукавов, материал которых зависит от основных физико-химических характеристик запыленного газа и его температуры. Гидравлическое (аэродинамическое) сопротивление фильтров разных типов составляет от 80 до 3000 Па.

### Расчёт рукавного фильтра.

Пример. Необходимо очистить от пыли газы объемом  $Q_{\Gamma} = 210000 \text{ м}^3/\text{ч}$  (при рабочих условиях). Температура газов  $t_{\Gamma} = 140^{\circ}$ ; газы находятся под избыточным давлением  $P_{CT} = 294 \text{ Па}$  и требуют охлаждения до  $t_{CM} = 90^{\circ}$  (по условиям эксплуатации фильтровальной ткани), что обеспечивается подсосом воздуха. В результате подсоса воздуха и воздуха, с помощью которого осуществляется продувка рукавов при регенерации пыли, общий объем газов увеличивается на 25 %. Разрежение на входе в рукавный фильтр равно 145 Па, а сопротивление воздухопроводов до входа в фильтр равно 200 Па. В воздуховоде перед фильтром газы охлаждаются на  $10^{\circ}$ . Барометрическое давление  $B=98700 \text{ Па}$ .

Решение.

Приняв наихудшие условия (летнее время, температура окружающего воздуха  $t_B = 30^{\circ}$ ) и учитывая, что в воздуховоде до фильтра подсосов нет, определяем увеличение начального объема газов, отнесенного к нормальным условиям

$$\frac{t_{\Gamma} - t_{CM}}{t_{CM} - t_B} = \frac{(140 - 10) - 90}{90 - 30} = 0,67.$$

Рассчитываем начальный объем газов до подсоса воздуха при нормальных условиях

$$Q_{\Gamma}^0 = Q \frac{273 \cdot (B + P_{CT})}{(273 + t_{\Gamma}) \cdot 101384} = 210000 \frac{273 \cdot (98700 + 294)}{(273 + 140) \cdot 101384} = 135540 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где 101384 – нормальное атмосферное давление, Па; 273 – нормальная температура.

Находим количество воздуха для охлаждения за счет подсоса

$$Q_B^0 = 135540 \cdot 0,67 = 90800 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Определяем общий объем газов, поступающих в фильтр, при нормальных условиях

$$Q_{\text{ОБЩ}} = Q_{\Gamma}^0 + Q_B^0 = 135540 + 90800 = 226340 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

В рабочих условиях этот объем составит

$$Q'_{\text{ОБЩ}} = \frac{226000 \cdot (273 + 90) \cdot 101384}{(98700 - 145) \cdot 273} \approx 310000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Рассчитаем необходимую площадь фильтрации. Поскольку фильтр используется для улавливания пыли и возгонов, скорость фильтрации должна лежать в пределах  $a=0,60 \dots 1,00 \text{ м}/\text{мин}$ . Примем  $a=0,9 \text{ м}/\text{мин}$ , тогда площадь фильтрации

$$F = \frac{Q_{\text{ОБЩ}}}{60a} = \frac{310000}{60 \cdot 0,9} = 5741 \text{ м}^2.$$

Выбираем тип фильтра и определяем их необходимое количество. С этой целью воспользуемся табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Технические характеристики рукавных фильтров

Тип фильтра	Площадь фильтрования $F$ , м <sup>2</sup>	Число секций/рукавов	Диаметр рукава, м	Высота рукава, м	Гидравлическое сопротивление, Па
ФВ-90М	90	6/108	0,135	2,09	450
ФВК-90	90	6/108	0,135	2,09	80... 900
ФРКН-20	220	6/216	0,135	2,40	–
РФГ-1-112	112	4	0,22	3,10	–
РФГ-1-168	168	6	0,22	3,10	–
РФГ-1-224	224	8	0,22	3,10	–
РФГ-1-280	280	10	0,22	3,10	–
РФГ-2-224	224	8	0,22	3,10	–
РФГ-2-336	336	12	0,22	3,10	–
РФГ-2-448	448	16	0,22	3,10	–
РФГ-2-560	560	20	0,22	3,10	–
ФРУ	2,5...50	1... 4	0,125	0,9;1;	–
ФРВ-20	20	2	0,13	1,5;2;2,5	–
ФРН-30	30	2	0,13	1,63	2000... 3000
ФРО-2400-1	2400	12	0,20	1,63	2000... 3000
ФРО-6000-2	6000	12	0,20	8	2000... 3000
ФРО-2000-3	2000	10	0,30	10	700... 1500
УРФМ-ШМ	2300	20	0,22	10	700... 1500
УРМ-Ш	1610	14	0,22	4,1	–
ФР-250	281	4	0,135	4,1	–
ФР-518	518	6	0,127	2,3	–
ФР-5000	5000	8	0,127	3	–

Окончательно выбираем рукавный фильтр типа ФРО-6000-2 с 12 секциями; диаметр рукава 300 мм, высота 10 м. Количество фильтров – 1.

Определяем объем газов после фильтрования, учитывая, что  $Q_{ОБЦ}=226000$  м<sup>3</sup>/ч, а количество воздуха на продувку рукавов при регенерации составляет 25% от  $Q_{ОБЦ}$ , т.е.

$$Q_B^{O1} = 0,25 \cdot Q_{ОБЦ} = 0,25 \cdot 226000 = 56500 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Отсюда искомым объем газов при нормальных условиях

$$Q_G^O + Q_B^O + Q_B^{O'} = 135540 + 90800 + 56500 = 282840 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Находим значение температуры газов после фильтрации, воспользовавшись уравнением

$$\frac{t_{CM} - x}{x - t_B} = 0,25.$$

Рассчитываем гидравлическое сопротивление на входе из фильтров. Сопротивление наиболее распространенных шерстяных фильтровальных тканей зависит от скорости фильтрации: для скоростей до 0,2 м/мин оно составляет 196 Па, а при больших скоростях – 883 Па.

Принимаем сопротивление фильтровальной ткани равным 883 Па, а на входе и выходе из фильтров примем 245 Па. Поскольку разрежение на входе в рукава составляет 145 Па (по условию примера), на выходе из фильтра оно будет равно  $145 + 883 + 245 = 1273$  Па.

Находим объем газов на выходе из рукавных фильтров при рабочих условиях

$$Q_G^{O''} = \frac{Q_G^O \cdot (273 + 78) \cdot 101384}{273 \cdot (98700 - 1273)} \approx 380000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Принимая вентилятор производительностью  $Q = 400000 \text{ м}^3/\text{ч}$  при  $H_{полн} = 2275$  Па при  $t = 90^\circ$ , и учитывая, что дополнительным сопротивлением являются патрубки, изгибы воздуховода и т.п., принимаем 10 вентиляторов общей производительностью  $400000 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

## 7. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Проект выполняется на листах писчей бумаги формата А4 (297×210 мм). При необходимости (размещение таблиц, иллюстраций и приложений) допускается использовать формат А3 (297×420 мм).

На листах должны быть размещены рамка (поля левое – 20 мм, нижнее, верхнее и правое – 5 мм) и основная надпись.

Листы проекта нумеруются арабскими цифрами в соответствующем поле основной надписи. Нумерация листов выполняется сквозной для всего документа. На титульном листе номер не ставится, но он включается в общую нумерацию листов.

Текст выполняется на одной стороне листа одним из способов:

– машинным (с помощью компьютерной техники) – кегль 14 через интервал от одного до полутора, шрифт Times New Roman.

– рукописным – четким, разборчивым почерком или чертежным шрифтом с высотой букв и цифр не менее 3,5 мм. Плотность записи должна быть одинаковой.

Допускаются отдельные разделы и элементы текста выполнять способом, который отличается от основного.

Ошибки, описки и графические неточности, выявленные в процессе выполнения документа, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой

краской (корректором) и нанесением на том же месте исправленного текста.

Опечатки, ошибки, описки и графические неточности, обнаруженные в процессе подготовки работы, допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской (корректором) и нанесением на том же месте исправленного текста (графики) машинописным способом или рукописным способом.

## **7.1. Требования к выполнению структурных элементов работы**

### **Общие требования.**

Курсовая работа может выполняться рукописным или печатным способом, на одной стороне листа белой бумаги формата А4 через один интервал.

При рукописном способе работа выполняется чернилами черного или синего цвета на одной стороне листа. Не допускается применение в одной работе чернил разного цвета. Размер строчных букв в тексте не менее 3,5 мм. В формулах высота букв и цифр должна быть 6... 8 мм – прописных и 3... 4 мм – строчных.

При печатном способе применяется шрифт – обычный Times New Roman, кегль 14. Текст следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: правое и верхнее – 10 мм, левое – 25 мм, нижнее – 25 мм (кроме листа «Реферат»).

Абзацный отступ в пределах текста должен быть одинаковым и равен пяти знакам – 12,5 мм.

Основные требования к стилю изложения содержания КП (КР):

- использование научного языка;
- строгое определение терминов и понятий;
- соблюдение единообразия терминологии и условных обозначений;
- стилистически правильное и понятное построение отдельных фраз, предложений и текста в целом;
- ясность и четкость формулировок;
- точность и лаконичность изложения мысли;
- отсутствие орфографических, пунктуационных и стилистических ошибок в тексте;
- использование общепринятых сокращений слов и аббревиатур;
- наличие в тексте работы ссылок на используемые источники и литературу, которые должны присутствовать в общем списке источников и литературы.

Разрешается использовать компьютерные возможности акцентирования внимания на определенных терминах, формулах, теоремах, применяя шрифты разной гарнитуры.

**Не разрешается использовать** в тексте курсового проекта (работы) **сканированные графики, схемы, таблицы и др.**

Нормоконтроль осуществляется руководителем курсового проекта (работы) и (или) преподавателем, назначенным в соответствии с протоколом кафедры, на которой выполняется работа.

Название и содержание основных разделов, подразделов состоящих из нескольких пунктов, определяется руководителем и студентом в соответствии с рассматриваемой темой курсового проекта (работы) и отведенным на выполнение временем. Содержание разделов, подразделов и пунктов определяется осо-

бенностями профиля подготовки.

Образец основной надписи листа «Реферат» приведен на рис. 7.1. Образец основной надписи листов пояснительной записки к курсовому проекту (работе) приведен на рисунке 7.2.

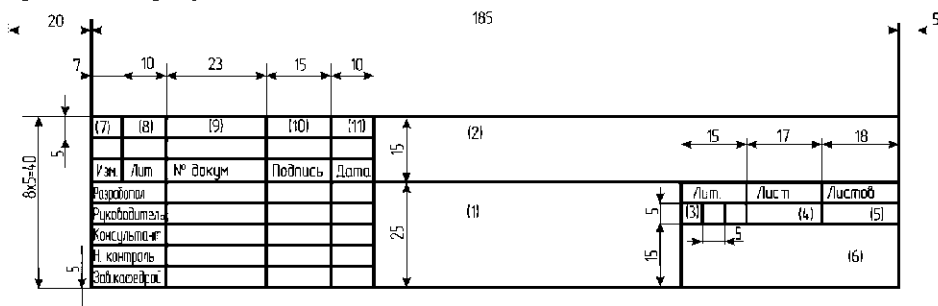


Рисунок 7.1 – Образец штампа реферата пояснительной записки КП (КР)

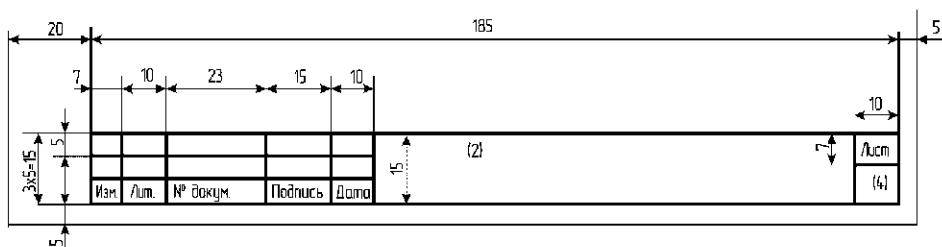


Рисунок 7.2 – Образец штампа листов пояснительной записки к КП (КР)

В графах основной надписи указываются:

- в графе 1 – тема курсового проекта (работы) в соответствии с приказом;
- в графе 2 – обозначение шифра документа в соответствии с примером, приведенным в табл. 7.1;
- в графе 3 – для курсового проекта (работы) литера – У;
- в графе 4 – порядковый номер листа;
- в графе 5 – общее количество листов в работе, без приложений;
- в графе 6 – сокращенное название института, кафедры;
- в графы 7, 8 – не заполняются;
- в графе 9 – Фамилия И.О. автора работы и должностных лиц, подписывающих лист;
- графы 10 – подписи автора работы и должностных лиц;
- в графе 11 – даты подписей.

Таблица 7.1 – Пример заполнения графы 2.

<p><b>КП 44.04.04 20 001 21 002 ПЗ</b>  <b>КП 44.04.04 20 001 21 002 ГЧ</b></p>
<p>Вид работы КП (КР)</p>

код направления: 44.04.04 (Профессиональное обучение);
Шифр профиля: 20 (Безопасность технологических процессов);
Три последние цифры № зачетки (например, 001);
Год выполнения КП (КР) (две последние цифры, например, 21);
Порядковый номер раздела (главы, например, 002);
Обозначение документа (ПЗ – пояснительная записка или ГЧ – графическая часть).

Разделы, подразделы, пункты должны иметь заголовки. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов. Заголовки разделов печатаются большими буквами по середине листа, подразделы (пункты) следует печатать с абзацного отступа с заглавной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Подразделы внутри одного раздела разделяются между собой отступом в одну пустую строку.

Заголовки разделов, подразделов выделяются жирным шрифтом. Структурные элементы проекта должны начинаться с новых страниц.

Разделы КП (КР) должны иметь порядковые номера в пределах всей ПЗ, обозначенные арабскими цифрами без точки и записанные с абзацного отступа. Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Разделы, как и подразделы, могут состоять из одного или нескольких пунктов.

Если ПЗ не имеет подразделов, то нумерация пунктов в нем должна быть в пределах каждого раздела, и номер пункта должен состоять из номеров раздела и пункта, разделенных точкой. В конце номера пункта точка не ставится.

Наименование элементов «РЕФЕРАТ», «СОДЕРЖАНИЕ», «ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ», «ВВЕДЕНИЕ», «ВЫВОД», «СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ», «ПРИЛОЖЕНИЕ» служат их заголовками, располагаются симметрично текста (по центру), не нумеруются, выполняются прописными буквами полужирным шрифтом без точки в конце и не подчеркиваются.

### **Титульный лист.**

Титульный лист является первым листом работы, но номер на нём не проставляется. Форма титульного листа должна отвечать установленной ведущей кафедрой.

При выполнении проекта рукописным способом титульный лист выполняется чертежным шрифтом.

На титульном листе не допускаются исправления и перенос текста.

### **Бланк задания.**

Бланк задания является вторым листом записки. Лист бланка задания печатается

тается на одном листе с обеих сторон. Номер листа проставляется лишь на первой его стороне.

Задание, содержит тему курсовой работы (проекта), исходные данные к работе, содержание пояснительной записки, перечень графического материала, дату выдачи задания, срок сдачи работы с подписями руководителя и исполнителя, план-график работы над КП (КР).

### **Реферат.**

Реферат – короткое изложение содержания документа, который включает основные сведения и выводы, необходимые для первоначального ознакомления с работой – актуальность рассмотренной темы, цель работы, результаты проведенного анализа или исследования.

Аннотация должна содержать сведения об объеме документа, перечень ключевых слов. Объем аннотации не должен превышать одной страницы. Текст реферата на пункты не делится.

В сведения об объеме работы включаются количество страниц, количество иллюстраций, таблиц, источников информации и приложений.

Перечень ключевых слов должен давать представление о содержании работы и включать от 5 до 15 слов (словосочетаний) в именительном падеже, выполненных в строку через запятую прописными буквами.

Ключевым словом называется слово или словосочетание из текста работы, которое с точки зрения информационного поиска несет смысловую нагрузку.

Лист «Реферат» является третьим листом записки.

### **Содержание.**

Содержание – перечень разделов и других составных частей проекта для случая, когда работа содержит не менее двух разделов или один раздел и приложение при общем количестве страниц не менее десяти. Первый лист содержания является четвертым листом пояснительной записки.

В содержании структурные элементы проекта включаются в такой последовательности: перечень условных обозначений (если необходимо), введение, наименование разделов, подразделов и, при необходимости, пунктов и подпунктов основной части, вывод, список использованных источников, приложения с их обозначением и наименованием.

Наименование элементов проекта записываются строчными буквами с первой прописной буквы, наименование разделов, подразделов и пунктов (подпунктов) указываются вместе с их порядковыми номерами.

Номера страниц, на которых размещается начало элементов, должны быть расположены один под другим. Слово «страница» или его сокращение не пишется. Окончание наименований элементов отделяются от номеров страниц многоточиями.

### **Перечень условных обозначений.**

Если в тексте документа применяются условные обозначения, сокращение, символы, единицы измерения, не предусмотренные действующими стандартами, а также специфическая терминология, то их перечень можно представить в виде отдельного списка.

Перечень должен располагаться столбцом, в котором слева в алфавитном порядке приводятся условные обозначения, сокращение и т.п., а справа от них –



их детальная расшифровка.

Перечень приводят в такой последовательности: сокращение (в том числе аббревиатурные); условные (буквенные) обозначения; символы химических элементов и соединений; единицы измерения; термины.

Для буквенных обозначений установлен следующий порядок записи: сначала должны быть приведены в алфавитном порядке условные обозначения русского алфавита, затем – латинского и последним – греческого.

### **ВВЕДЕНИЕ.**

Во введении необходимо дать краткую характеристику современного состояния научной (технической) проблемы (вопроса), которому посвящена работа, отметить актуальность разрабатываемой темы, задачи работы, отметить основные источники информации, на которых базируется работа. Исторические справки, описание прежде опубликованных работ и общеизвестные положения во введении не приводятся.

### **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.**

Содержание основной части работы должно отвечать назначению работы и её тематике.

### **РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ.**

Содержание расчётной части работы включает необходимые расчеты, в которых приводятся формулы, по которым производится вычисления, и объяснение к ним. Расчеты должны быть записаны для каждого объекта.

### **ВЫВОД.**

В выводе должны быть приведены короткие выводы по результатам выполненной работы (по всем её разделам) и предложения по её использованию, а также дана оценка технико-экономической эффективности от научного результата работы и ее внедрения.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.**

Список использованных источников – это перечень цитируемых, рассмотренных, упоминаемых и используемых источников информации.

Источниками информация являются книги, статьи, нормативно-технические документы, отчеты о научно-исследовательской работе, диссертации, технико-экономические нормативы и нормы, прейскуранты, рефераты и рецензии, опубликованные в виде отдельных документов.

В список источников включаются только те, на которые даны ссылки в тексте, а также, при необходимости, а также такие, которые были использованы при разработке документа, но на них нет ссылок.

В перечне источников, на которые даны ссылки в тексте, источники располагаются в порядке появления на них ссылок. В перечень источников, на которые нет ссылок в тексте, может быть включено не больше десяти источников.

Нумерация источников выполняется сквозной.

Библиографическое описание, включаемое в список, выполняется языком оригинала согласно ГОСТ и вносится в список только один раз.

### **ПРИЛОЖЕНИЯ.**

Иллюстративный материал, таблицы, промежуточные математические выводы, формулы и расчеты, текст вспомогательного характера, а также самостоятельно выпущенные документы могут быть оформлены как приложения.

Приложениями могут быть копии самостоятельных документов, которые не отличаются от оригинала. В этом случае перед копией следует поместить лист, на котором посередине пишется слово «ПРИЛОЖЕНИЕ (буква)» и его наименование.

Приложения не нумеруются. Каждое приложение должно начинаться с новой страницы.

Приложения, как правило, выполняются на листах формата А4. Допускается использовать формат А3.

Приложения последовательно обозначаются прописными буквами русского алфавита, за исключением букв З, Й, Ц, Ъ, Ы, Ь. Допускается обозначать приложения буквами латинского алфавита (в случае использования всех букв русского алфавита). Буквенные обозначения присваиваются в алфавитном порядке без повторения и, как правило, без пропусков. Например, ПРИЛОЖЕНИЕ А, ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

При использовании всех букв обеих алфавитов допускается обозначать приложения арабскими цифрами после буквенного обозначения. Например, ПРИЛОЖЕНИЕ А.1, ПРИЛОЖЕНИЕ А.2.

Если приложение одно, оно также обозначается – ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Слово «ПРИЛОЖЕНИЕ» располагается симметрично тексту.

Приложение должно иметь заголовок, который располагается под словом «ПРИЛОЖЕНИЕ» симметрично текста и выполняется строчными буквами с первой прописной.

Текст каждого приложения может быть разделен на разделы, подразделы, пункты и подпункты, которые нумеруются в пределах приложения. Например: А.3 (третий раздел приложения А).

Заголовки разделов, подразделов, пунктов и подпунктов в приложениях выполняются по общим правилам.

Иллюстрации, таблицы и формулы нумеруются в пределах каждого приложения. Если приложение разделено на разделы, то нумерация иллюстраций, таблиц, формул должна быть также в пределах приложения. Если в приложении одна таблица, рисунок, формула, то они также нумеруются.

Примеры: Рис. А.1 – первый рисунок приложения А. Таблица В.4 – четвертая таблица приложения Б. Формула (Д.5) – пятая формула приложения Д.

При ссылке в тексте приложений на рисунки, таблицы и формулы следует писать: «... на рис. А.2», «... в табл. Б.3», «... по формуле (В.4)».

Перечисление, примечания и сноски в тексте приложений оформляются по общим правилам.

На все приложения должны быть ссылки в тексте работы. Все приложения должны быть перечислены в содержании.

## **7.2 Требования к объему и оформлению пояснительной записки**

Иллюстрации и таблицы, расположенные на отдельных листах, включаются в общую нумерацию страниц. Иллюстрации и таблицы на листах формата А3 учитываются как одна страница.

Числовой материал должен оформляться в виде таблиц, которые применяются для лучшей наглядности и удобства сравнения показателей. Нумерация

таблиц должна двойной арабскими цифрами, первое число которой соответствует номеру раздела, второе – порядковому номеру таблицы в разделе.

Названия таблиц должны отражать их содержание, быть точным, кратким. Название таблицы следует помещать над таблицей на следующей строке после слов «Таблица 1.1».

Таблицу следует располагать в работе непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые или на следующей странице.

На все таблицы должны быть ссылки в работе. При ссылке следует писать «Табл.» с указанием номера. Например, (см. табл. 1.1).

Таблицы нумеруются арабскими цифрами порядковой нумерацией в пределах раздела.

Заголовки граф и строк таблицы следует писать со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с заглавной буквы, если они имеют самостоятельное значение.

Если повторяющийся в разных строках (графах) таблицы текст состоит из одного слова, то его после первого написания допускается заменять кавычками, если из двух и более слов – то при первом повторении его заменяют словами «То же», а далее – кавычками. Ставить кавычки вместо повторяющихся цифр, марок, знаков, математических и химических символов не допускается. Если цифровые или иные данные в какой-либо строке таблицы не приводятся, то в ней ставится прочерк.

Таблицы слева, справа и снизу ограничиваются линиями. Допускается изменять размер шрифта в таблице меньший, чем в тексте (кегель 10... 12).

Заголовки граф, как правило, записываются параллельно строкам таблицы. При необходимости допускается перпендикулярное расположение заголовков граф. Головка таблицы должна быть отделена линией от остальной части таблицы.

Между строкой с названием таблицы и текстом, расположенным выше и ниже таблицы, оставляется одна пустая строка.

Иллюстративный материал является обязательной частью курсовой работы (проекта). Его количество, состав и содержание определяется руководителем работы.

Основными видами иллюстративного материала (рисунков) являются чертеж, схема, фотография, диаграмма и график.

Иллюстрации следует располагать в работе непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые или на следующей странице. Иллюстрации могут быть в компьютерном исполнении, в том числе и цветные. На все иллюстрации должны быть даны ссылки в работе.

Иллюстрации нумеруются арабскими цифрами порядковой нумерацией в пределах раздела.

Если рисунок один, то он обозначается «Рисунок 1».

При ссылках на иллюстрации следует писать «... в соответствии с рис. 2.1».

Иллюстрацию следует выполнять на одной странице. Если иллюстрация не помещается на одной странице, то ее можно переносить на другие страницы, при этом название иллюстрации помещают на первой странице, поясняющие данные – к каждой странице и под ними указывают «Рисунок... лист...».

Расстояние между рисунком и текстом, расположенным выше и ниже рисунка, должно составлять одна «пустая» строка.

В электронном виде рисунки оформляются в форматах png, jpeg, bmp, pdf, Word, Excel, Visio, CorelDraw, Компас, AutoCAD.

В документе следует применять стандартизированные единицы физических величин, их наименования и обозначения в соответствии с ГОСТ 8.417.

Наряду с единицами СИ, при необходимости, в скобках указываются единицы ранее применявшихся систем, разрешенных к применению. Применение в данном проекте (работе) разных систем обозначения физических величин не допускается.

В тексте числовые значения величин с обозначением единиц физических величин и единиц счета следует писать цифрами, а числа без обозначения единиц физических величин и единиц счета от единицы до десяти – словами. Например: Провести испытания пяти образцов, каждый длиной 200 мм и отобрать десять образцов для определения прочности материала.

Единица физической величины одного и того же параметра в пределах одного документа должна быть постоянной. Если в тексте приводится ряд числовых значений, выраженных в одной и той же единице физической величины, то ее указывают только после последнего числового значения, например – 1,50; 1,75; 2,00 м.

Если в тексте приводится диапазон числовых значений физической величины, выраженных в одной и той же единице физической величины, то обозначение единицы физической величины указывается после последнего числового значения диапазона. Например: От 1 до 5 мм. От 10 до 100 кг. От плюс 10 до минус 40 °С. От плюс 10 до плюс 40 °С.

Недопустимо отделять единицу физической величины от числового значения (переносить их на разные строки или страницы), кроме единиц физических величин, помещаемых в таблицах.

Приводя наибольшие и наименьшие значения величин следует применять словосочетания «должно быть не более (не менее)».

Приводя допустимые значения отклонений от указанных норм, требований, следует применять словосочетание «не должно быть более (менее)».

Например, массовая доля углекислого натрия в технической кальцинированной соде должна быть не менее 99,4 %.

Числовые значения величин в тексте следует указывать со степенью точности, которая необходима для обеспечения требуемых свойств изделия, при этом в ряду величин осуществляется выравнивание числа знаков после запятой.

Округление числовых значений величины до первого, второго, третьего и т.д. десятичного знака для различных типоразмеров, марок и т.п. изделий одного наименования должно быть одинаковым. Например, если градация толщины горячекатаной ленты 0,25 мм, то весь ряд толщины ленты должен быть указан с таким же количеством десятичных знаков, например: 1,50; 1,75; 2,00.

Дробные числа необходимо приводить в виде десятичных дробей, за исключением размеров в дюймах, которые следует записывать 1/4"; 1/2" (но не

$\frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ ).

При невозможности выразить числовое значение в виде десятичной дроби, допускается записывать в виде простой дроби в одну строчку через косую черту, например, 5/32.

При оформлении в пояснительной записке формул в тексте следует предварительно пояснить значение искомого параметра с указанием единицы измерения. Единицы измерения параметра необходимо указывать в тексте, выделяя единицу измерения запятыми.

Формулы и уравнения следует отделять от текста одной пустой строкой. Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяются запятой или точкой с запятой.

Пояснение значений символов и числовых коэффициентов приводятся непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле. Знак каждого символа и числового коэффициента приводятся с новой строки. Первую строку пояснения начинается со слова «где» без двоеточия.

Формулы нумеруются порядковой нумерацией в пределах раздела арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке только в том случае, если на них есть ссылки в тексте.

Если уравнение не помещается в одну строку, то оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (-), умножения ( $\times$ ), деления ( $:$ ) или других математических знаков, причем знак в начале следующей строки повторяется.

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например, в формуле (3.1).

Не допускать произвольных сокращений слов. Применять только общепринятые сокращения, например, «и т.д.», «и т.п.», «и др.».

Фамилии, названия организаций, название изделий и другие имена собственные первый раз в работе приводятся на языке оригинала.

Ссылки на литературу в тексте, согласно ГОСТ 7.32-91, заключаются в квадратные скобки, например, [15], [38], [16, т.1], [10, с. 37]. Ссылаться можно на документ в целом или на его разделы и приложения.

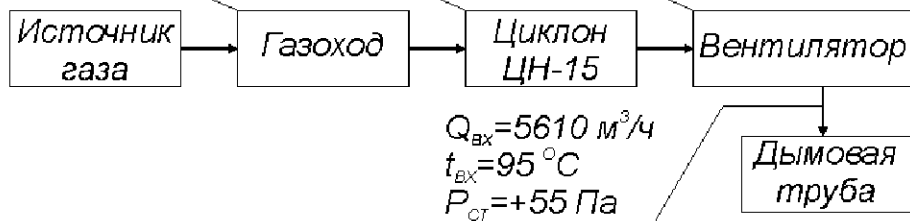
### **7.3. Графическая часть.**

Графическая часть представляется на листе формата А3 или А2, на которой представляются чертёж разработанного аппарата очистки воздуха с указанием размеров, технологическая схема фильтровальной сети и в табличной форме – расчётные показатели.

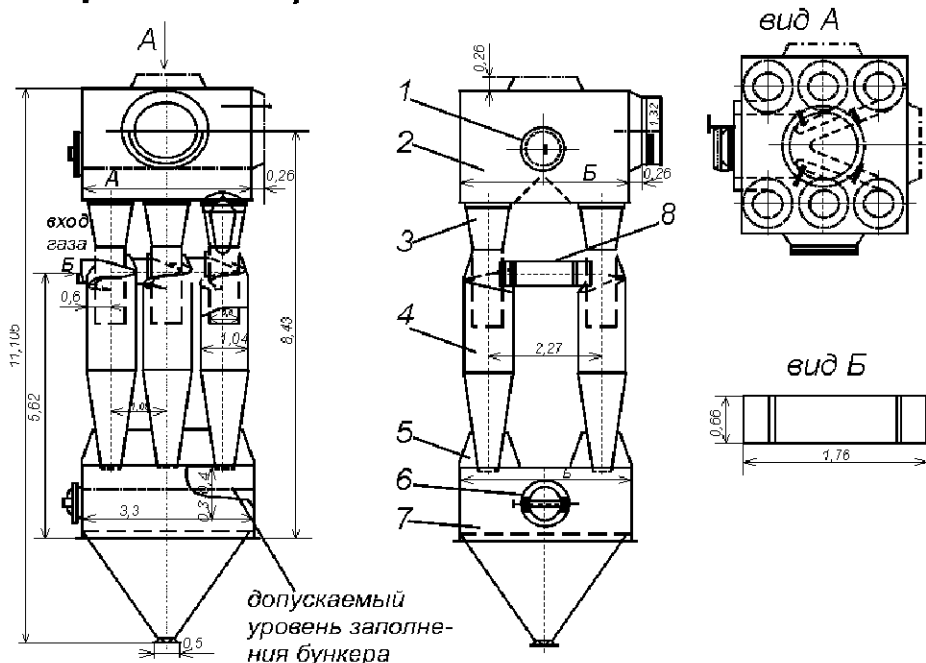
Ниже в качестве примера приведены фрагменты графической части.

## Технологическая схема фильтровальной сети

$Q_{вх} = 5500 \text{ м}^3/\text{ч}$     $Q_{вх} = 5580 \text{ м}^3/\text{ч}$     $Q_{вх} = 5600 \text{ м}^3/\text{ч}$   
 $t_{вх} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$     $t_{вх} = 132 \text{ }^\circ\text{C}$     $t_{вх} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $P_{от} = +120 \text{ Па}$     $P_{от} = +85 \text{ Па}$     $P_{от} = +35 \text{ Па}$   
 $Q_{подс.} = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$     $Q_{подс.} = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$     $Q_{подс.} = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$



## Циклон ЦН-15 из 6 элементов



1 - заглушка, 2 - сборник чистого газа, 3 - кольцевой диффузор, 4 - циклон,  
 5 - крышка, 6 - люк, 7 - бункер, 8 - коллектор входа газа

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тверовский Б.З. Очистка промышленных газов в черной металлургии. Справочное пособие. – К.: Техника, 1993. – 151 с.
2. Тверовский Б.З. Розрахунки пристроїв для очищення промислових газів від пилу: Навч. посібник. – К.: НМК ВО, 1991. – 89 с.
3. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: Учебник для вузов. 2-е изд.: М.: Металлургия. 1990. – 400 с.
4. Алиев Г.М. – А. Техника пылеулавливания и очистка промышленных газов от пыли: Справ. изд. М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
5. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в черной металлургии / А.И. Толочко, О.В. Филиппев, В.И. Славин и др. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
6. Пылеулавливание в металлургии: Справ. изд. / В.М. Алешина, А.Ю. Вальдберг, Г.М. Гордон и др. – М.: Металлургия, 1984. – 336 с.
7. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. – М.: Энергоавтомиздат, 1983. – 312 с.

Учебное издание

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к курсовому проектированию по дисциплине  
«ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ АТМОСФЕРЫ  
ОТ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ»**

для студентов направления подготовки  
44.04.04 Профессиональное обучение (по отраслям)

Составитель:  
Валентин Иванович Сафонов

Печатается в авторской редакции.  
Компьютерная верстка и оригинал-макет автора.

Подписано в печать \_\_\_\_\_  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага типограф. Гарнитура Times  
Печать офсетная. Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_  
Тираж 100 экз. Изд. № \_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_. Цена договорная.

Издательство Луганского национального  
университета имени Владимира Даля

*Свидетельство о государственной регистрации издательства  
МИ-СРГ ИД 000003 от 20 ноября 2015 г.*

**Адрес издательства:** 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а  
**Телефон:** 8 (0642) 41-34-12, **факс:** 8 (0642) 41-31-60  
**E-mail:** [uni@snu.edu.ua](mailto:uni@snu.edu.ua) **http:** [www.snu.edu.ua](http://www.snu.edu.ua)