

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА**

---

1. Требования к уровню освоения содержания дисциплины  
( указы, основные требования в виде знаний, умений, навыков)

На уровне изучаемой дисциплины специалист должен овладеть знаниями основ гравитационных, инерционных, электростатических и фильтрующих (через волокнистые, тканые, пористые и зернистые элементы) методов эффективной очистки аэрозолей, включая методы улавливания газообразных токсических выбросов путем абсорбции, адсорбции, десорбции, термического и каталитического обезвреживания. Освоить принципы действия и конструктивные особенности высокоэффективных аппаратов.

Слушатель должен овладеть методиками анализа для выбора рациональных методов, систем и аппаратов очистки с учетом технологических процессов и оборудования при обеспечении высокоэффективного коэффициента очистки и минимальных выбросов токсичных веществ в окружающую среду.

Слушатель должен знать стандарты качества окружающей среды (предельно-допустимые концентрации вредных веществ окружающей среды (ПДК), предельно-допустимые нагрузки и т.д.), а также нормативы: предельно-допустимые выбросы вредных веществ в окружающую среду (ПДВ), регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях.

Слушатель должен иметь навыки расчета приземных концентраций загрязняющих веществ от источника выбросов ручным методом и с использованием ЭВМ, определяя вещества, по которым необходимо вести расчеты по защите окружающей среды, а также доли концентраций расчетного вещества по направленности воздействия.

Слушатель должен определять классификацию предприятий в соответствии с санитарной классификацией и овладеть навыками определения размера санитарно-защитной зоны (СЗЗ) в зависимости от направления ветра.

**2. Содержание курса**

№ п/п	Разделы.
1.	Пыль и ее свойств. Понятие пыли и аэрозолей. Классификация пыли. Основные свойства пыли и их определение: дисперсность, плотность, удельная поверхность, слипаемость, сыпучесть, гигроскопичность, смачиваемость, абразивность,

	горючесть и взрываемость. Коагуляция пыли. Определение содержания пыли в воздухе.
2	Теоретические основы очистки воздуха от пыли. Основные закономерности движения и осаждения пыли. Гравитационное и инерционное осаждение. Осаждение под действием центробежной силы. Осаждение частиц пыли в электрическом поле. Фильтрация через пористые материалы. Мокрая очистка. Термофорез.
3	Классификация и основные характеристики пылеулавливающего оборудования. Воздушные фильтры. Классификация устройств для очистки воздуха от пыли, основные характеристики пылеулавливающего оборудования, общая характеристика воздушных фильтров. Виды воздушных фильтров: ячейковые, самоочищающиеся масляные, рулонные, фильтры высокой эффективности. Очистка воздуха в помещениях с высокими требованиями к воздушной среде в соответствии с технологическими требованиями. Области применения воздушных фильтров.
4	Пылеуловители для очистки выбросов в атмосферу. Общая характеристика пылеуловителей. Физические основы устройства гравитационных, инерционных, центробежных аппаратов очистки (пылеосадочные камеры, инерционные пылеуловители, циклоны, батарейные циклоны, ротационные, вихревые пылеуловители): принцип действия, конструкции, параметры и особенности эксплуатации, области применения.
5	Аппараты и системы мокрой очистки. Классификация, принцип действия, особенности конструкций и основные показатели работы. Диапазон использования аппаратов мокрой очистки в зависимости от свойств аэрозолей.
6	Физические основы фильтрования газов через перегородки. Классификация фильтров в зависимости от типа фильтровального материала. Процесс фильтрования через волокнистые, пористые, зернистые воздушные фильтры. Основные свойства текстильных волокон и фильтровальных тканей, применяемых при фильтровании. Область применения фильтров.
7	Аппараты и системы осаждения аэрозолей в электрическом поле коронного разряда. Основные показатели процесса осаждения аэрозольных частиц. Конструкция электрофильтра. Классификация электрофильтров. Выбор аппарата с учетом физико-химических свойств аэрозолей. Высоковольтная установка, питающая электрофильтр, ее основные части и особенности.
8	Термические методы обезвреживания промышленных газов. Основные способы очистки выбросов в атмосферу от газовых загрязнений. Методы абсорбции. Схемы установок. Конструкции аппаратов и их показатели работы. Области использования и особенности эксплуатации. Методы адсорбции. Схемы. Области применения. Адсорбенты. Десорбция. Методы каталитического восстановления. Схемы. Виды катализаторов.
9	Управление качеством окружающей среды. Экологическая экспертиза проектов при строительстве производственных и вентиляционных систем с учетом экологических требований к процессам и оборудованию. Экологические стандарты качества окружающей среды. Инвентаризация загрязняющих веществ от их источников выделения.
10	Состав, содержание и методические рекомендации по выполнению курсовой работы «Охрана воздушного бассейна».

### 3. Перечень основной и дополнительной литературы.

#### Основная литература.

- Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистка промышленных газов. Справочник. - М.: Металлургия, 1986, 543с.
- Брылов С.А., Штроуп И.К. Охрана окружающей среды: Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 1985.
- Банит Ф.Г., Мальгин А.Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов.- М.: Стройиздат., 1983, 351 с.
- Белевицкий А.М. Проектирование газоочистных сооружений. -Л.: Химия, 1990,288 с.
- Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки.- М.: Татполиграф, 1998.
- Штокман Е.А. Очистка воздуха. - М.: АСВ, 1999, 319 с.

#### Дополнительная литература.

- Рихтер Л.А., Волков Э.П., Покровский В.Н. Охрана водного и воздушного бассейнов От выбросов тепловых электростанций: Учебник для вузов.-М.: Энергоиздат, 1985, 296 с.
- ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ Общие стандарты. Санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. - М.: Госстандарт, 1984.
- ОНД-86 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. - Л.: Гидрометеиздат, 1987.
- Руководящий документ регулирования выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях. - Л.: Гидрометеиздат,1987.
- Руководство по проектированию санитарно-защитных зон промышленных предприятий. -М.: Стройиздат, 1984.

## Курс лекций

### ОХРАНА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА

#### 1. Источники загрязнений

1. Промышленные предприятия – химические, нефтехимические, металлургические заводы – 15-20%;
2. Теплогенерирующие установки теплоэлектростанций, котельные – 60%;
3. Автотранспорт – 20-25%
4. Причина загрязнения воздуха – несовершенство технологического оборудования на производствах.

#### 1.1 Вредные вещества и их воздействие на организм

Аэрозоли различного происхождения – пыль, туман, дым, органические и неорганические химические соединения – CO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>, бензол, толуол, эфиры, спирты и пр.

Вредные вещества поступают в организм человека через:

- легкие человека имеют площадь 90-100м<sup>2</sup>,
- желудок,
- кожу.

#### 1.2 Общая характеристика вредных веществ

- Пыль и аэрозоли оказывают механическое воздействие на органы дыхания, химическое и бактериологическое воздействие на организм человека

5 мкм и меньше - проникают к альвеолам

5-10 мкм и более – задерживаются в верхних дыхательных путях.

Пыль влияет на органы дыхания, зрение, кожу, на пищеварительный тракт.

Пыль приводит к коррозии технологического оборудования.

- CO – угарный газ – без запаха – вызывает удушье, соединяется с гемоглобином крови.
- Цианиды – нарушает поступление кислорода в кровь (имеет место на производстве каучука, органического стекла и пр.)
- H<sub>2</sub>S – сероводород – поражает центральную нервную систему;
- NO,
- Бензол
- Тяжелые металлы

ГОСТ 12.1.005-88 – в данном документе даны ПДК более 1300 вредных веществ

#### 1.3 последствие загрязнения воздушной среды.

- Санитарно-гигиенические – неблагоприятное влияние на здоровье человека,
- Экологические - неблагоприятное влияние на природу,
- Экономические – материальные потери в экономике до 3-5% от загрязнения окружающей среды.

Количество пыли от металлургического завода:

1 км – 3000 мг/м<sup>2</sup> за 24 часа

4км – 900 мг/м<sup>2</sup> за 24 часа

Сокращение солнечной радиации:

В запыленном воздухе затруднено проникание солнечного света:

При  $0,1 \text{ мг/м}^3$  – до 10%,

При  $1 \text{ мг/м}^3$  – до 55%.

Запыленный воздух разрушает строительные конструкции зданий, сооружений, памятников культуры.

## **2. Пыль и ее свойства.**

Аэрозоль – до 100, 200, 500 мкм – взвешенное состояние, дисперсная система.

Дисперсная система состоит из дисперсной среды – воздуха и дисперсной фазы – твердые или жидкие частицы.

Дисперсные аэрозоли получают при измельчении (диспергировании) твердых или жидких веществ.

Конденсационные аэрозоли – конденсация насыщенных паров или газовые реакции.

Пыль – аэрозоли, состоящие из твердых частиц (дисперсионные аэрозоли).

Туман – газообразная среда состоящая из жидких частиц (конденсационные аэрозоли).

Дым – среда, состоящая из твердых и жидких частиц (совокупность конденсационных и дисперсных аэрозолей).

Большая часть аэрозолей состоят из частиц разного размера и являются полидисперсными.

Монодисперсные аэрозоли – это применяемые для калибровки пылеизмерительных приборов.

Пыль бывает естественного и промышленного происхождения.

Естественное происхождение пыли – это эрозия почвы, песчаные бури, пылящие горные породы и пр.

Промышленная пыль бывает:

органическая пыль – растительного и животного происхождения;

неорганическая пыль – минерального и металлического происхождения.

Часто бывает, что имеет место смесь пыли – органическая и неорганическая,

Минеральная и металлическая.

Получить точную информацию о пыли необходимо для выбора наиболее эффективного метода очистки.

### **2.1 Основные свойства пыли.**

#### **Отбор проб пыли из газового потока.**

Существуют два способа для отбора проб пыли из газового потока:

1. Внешней фильтрации – используют закрытый аллонж с фильтром, расположенным вне воздуховода.
2. Внутренней фильтрации - используют открытый аллонж с фильтром, расположенным в воздуховоде.

При отборе проб пыли необходимо, что бы скорость воздуха в воздуховоде была равной скорости воздуха во входном отверстии пылеотборного устройства (изокинетичность).

При размерах пыли менее 5 мкм точное соблюдение изокинетичности не требуется.

#### **Дисперсность пыли.**

Дисперсность – это степень измельчения вещества.

Дисперсный состав – распределение частиц пыли по размерам в процентном соотношении.

Дисперсность определяет свойства пыли, так как при измельчении вещества многократно растет его суммарная поверхность.

Тело размером  $20 \times 10 \times 10$  мм имеет поверхность  $600 \text{ мм}^2$ , а если его разделить на кубики размером 1 мкм, то оно станет иметь суммарную поверхность  $6 \text{ м}^2$ , т.е. увеличиться в 10000 раз.

Увеличенная площадь приводит к росту физической и химической активности, т.е. быстрее растворяется и окисляется.

Пыль поглощает влагу, пары кислот и щелочей – это приводит к изменению свойств пыли по сравнению с исходным материалом (до измельчения).

Мелкодисперсная пыль оседает медленнее, чем крупнодисперсная, а сверхмелкодисперсная пыль не оседает никогда.

Эффективность пылеулавливания зависит от учета дисперсности при подборе оборудования. Отбор проб пыли проводят на прямолинейных круглых вертикальных участках воздухопроводов длиной 8-10 диаметров со скоростью воздуха не менее 4 м/с, пробы отбирают в различных сечениях, разбив его на равновеликие кольца радиусами  $R_0$ ,  $R_0 \times 0,914$ ,  $R_0 \times 0,707$ ,  $R_0 \times 0,409$ , при прямоугольном сечении воздуховода его сечение разбивают на клетки размером 150×200мм, проделывают на воздуховоде отверстия приваривают штуцера, закрываемые крышками.

Дисперсный состав определяют в лаборатории, а так как частицы имеют неправильную форму, то размер по диаметру определяют по размерам ячеек сита, по наибольшему линейному размеру.

Эквивалентный диаметр – это диаметр шара, объем которого равен объему частицы.

Седиментационный диаметр – это диаметр шара, скорость оседания и плотность которого равна скорости оседания и плотности частицы шарообразной формы.

Интервал дисперсности от  $10^{-7}$  до  $10^{-1}$  см.

Диапазон размеров частиц разбивают на фракции.

Фракция – частицы размером одного интервала шкалы: 1-1,3-1,6-2-2,5-3,2-4-5-6-8-13-16-20-25-32-40-50-63 мкм.

### Методы определения дисперсного состава пыли.

Выбор метода зависит от требуемой точности, вида пыли и др.

- Ситовый анализ – используется набор сит с отверстиями различного размера.
- Седиментометрия – осаждают пыль в жидкой или газообразной среде.
- Микроскопический анализ - с помощью оптического или электронного микроскопа – трудоемок.
- Центробежная сепарация - разделение на фракции с помощью центробежных сил, не применяется для слипающей и волокнистой пыли.
- Фотоэлектрический метод – экспресс анализ от 1 до 300000 частиц в литре воздуха при их размерах 0,4-10 мкм, точность  $\pm 20\%$ .

Согласно ГОСТ 12.2.043-80 – пыль разделена на 5 групп:

1. наиболее крупнодисперсная пыль;
2. крупнодисперсная пыль;
3. средне дисперсная пыль;
4. мелкодисперсная пыль;
5. наиболее мелкодисперсная пыль;

### Плотность частиц пыли.

Истинная плотность пыли – это масса единицы объема вещества, из которого образована пыль.

Кажущаяся плотность пыли – это масса единицы объема пыли с объемом пор.

Насыпная плотность пыли – это масса единицы объема уловленной пыли свободно насыпанной в емкость.

### Удельная поверхность пыли.

Площадь поверхности всех частиц ( $m^2$ ) отнесенная к объему ( $m^3$ ) или массе (г).

От удельной поверхности зависят многие свойства пыли, например, горение пылевидного топлива, прочность бетона.

Определяют удельную поверхность пыли на основе метода, основанного на зависимости воздухопроницаемости от слоя пыли при постоянном или непостоянном расходе воздуха.

### Слипаемость пыли.

Взаимодействие пылевых частиц между собой называют **аутогезией** (слипаемость) на основе молекулярных, электрических и капиллярных сил.

Аутогенное воздействие – образование конгломератов пыли.

Адгезия – взаимодействие пыли с поверхностью.

Устойчивая работа пылеулавливающего оборудования зависит от слипаемости пыли.

Показатель слипаемости показывает прочность пылевого слоя на разрыв в Па, по которому пыль делится на четыре группы:

1. неслипающаяся < 60Па,
2. слабослипающаяся 60-300Па,
3. среднеслипающаяся 300-600Па,
4. сильнослипающаяся > 600Па

Для влажной пыли степень слипаемости должна быть увеличена на один уровень. Слипаемость возрастает с уменьшением размера частиц.

#### **Сыпучесть пыли.**

Сыпучесть пыли характеризует подвижность частиц пыли относительно друг друга и их способность перемещаться под действием внешней силы.

Сыпучесть зависит от размера частиц, влажности и степени уплотнения.

Сыпучесть используется для определения угла наклона стенок бункеров, применяющихся для накопления пыли.

Статический угол естественного откоса (угол обрушения) – это угол образующийся при обрушении слоя при удалении подпорной стенки.

Динамический угол естественного откоса образуется при падении частиц на плоскость с образованием конуса.

Статический угол больше динамического.

#### **Гигроскопичность пыли.**

Данное свойство характеризует способность пыли поглощать влагу из воздуха, что влияет на электропроводимость, слипаемость и сыпучесть пр.

Зависимость между влажностью воздуха и пыли характеризует изотерма сорбции, что необходимо для определения поведения пыли в оборудовании.

Гигроскопичную влагу определяют путем высушивания пыли до постоянной массы путем нагревания.

#### **Смачиваемость пыли.**

Эффективность улавливания пыли повышается при смачивании пыли водой (мокрое пылеулавливание, мокрая пылеуборка производственных помещений).

Смачиваемость пыли определяют методом пленочной флотации, который заключается в следующем: в сосуд с дистиллированной водой помещают навеску пыли и определяют количество затонувшей пыли.

Плохая смачиваемость при < 3-%

Средняя смачиваемость – 30-80%

Хорошая > 80%

#### **Абразивность пыли.**

Абразивность пыли – это способность пыли вызывать истирание стенок конструкций и аппаратов от потока пыли – зависит от твердости и плотности вещества, размера частиц, формы частиц и скорости потока.

Коэффициент абразивного износа определяется по формуле:

$$K_a = V \times \Delta G,$$

Где V – постоянная прибора,

$\Delta G$  – потеря массы образца в кг.

#### **Электрические свойства пыли.**

Удельное электрическое сопротивление пыли характеризует электрическую проводимость слоя пыли.

По величине удельного электрического сопротивления пыль подразделяется на три группы:

Хорошо проводящая пыль <  $10^2$  Ом×м

Пыль со средней проводимостью  $10^2$ - $10^9$  Ом×м

Высокоомная пыль >  $10^9$  Ом×м

Электрические свойства пыли зависят от поверхностной и объемной проводимости.

Поверхность отличается от основной массы вещества, так как на ней адсорбируются влага и газы. При повышении температуры растет энергия электронов и повышается объемная проводимость.

Зная зависимость температуры на сопротивление пыли, воздействуют на проводимость пыли для увеличения эффективности пылеуловителей.

Удельное электрическое сопротивление так же зависит от химического состава, размеров и упаковки частиц.

Электрический заряд пылевой частицы может иметь один или несколько электрических зарядов или быть нейтральной.

Соотношение количества частиц, имеющих положительный, отрицательный заряды, или являющихся нейтральными определяет суммарный заряд системы.

Пылевые частицы получают заряд, в момент образования, находясь во взвешенном состоянии при взрыве, от взаимного трения, при трении о воздух, при адсорбции ионов при нахождении в ионизированной среде, что является основным. Получившие заряд частицы могут его отдать, при этом нейтрализуясь. Электрические свойства пыли сильно влияют на устойчивость аэрозоля и на характер воздействия на человека. Заряженные частицы в 2 раза труднее выводятся из организма по сравнению с нейтральными частицами.

При взрыве может образоваться заряд статического электричества, который образуется от совокупности частиц каждая из которых несет заряд, что делает необходимым производить заземление технологического оборудования, воздухопроводов, труб.

Часто не металлические частицы заряжены положительно и металлические частицы отрицательно.

Заряженные частицы ведут себя по закону Кулона, т.е. одинакового знака притягиваются и разного знака отталкиваются.

### **Горючесть и взрываемость пыли.**

Смесь пыли с воздухом образует взрывопожароопасную смесь.

Горение – это физико-химический процесс с выделением тепла и света.

Возгорание – это начальная стадия горения, происходит от источника зажигания.

Воспламенение – возгорание с появлением пламени.

Самовозгорание – это возгорание при отсутствии источника зажигания может иметь тепловую, химическую и микробиологическую природу.

Нижний концентрационный предел распространения пламени  $г/м^3$  по пылевоздушным смесям – это минимальное содержание пыли в воздухе, при котором происходит взрыв.

Верхний концентрационный предел распространения пламени  $г/м^3$  по пылевоздушным смесям – это максимальное содержание пыли в воздухе, при котором взрывообразование прекращается из-за нехватки кислорода.

Между нижним и верхним пределами концентрация пыли носит взрывоопасный характер.

Нижний предел определяется химическим составом пыли и ее дисперсностью.

Рост влажности пыли уменьшает взрывопожароопасность.

Повышение скорости движения пыли до 5м/с повышает нижний предел взрывоопасности в 2-3 раза.

ГОСТ 12.032-81 – методы определения нижнего предела взрывоопасности пыли.

По ГОСТУ определены 4 класса взрывопожароопасности пыли.

1. Наиболее пожароопасная пыль при нижнем пределе до  $15г/м^3$ ,
2. Взрывоопасные пыли  $15-25 г/м^3$ ,
3. Наиболее пожароопасные пыли имеют температуру воспламенения до  $250^{\circ}C$ ,
4. Пожароопасные пыли с температурой воспламенения более  $250^{\circ}C$ .

### **Коагуляция пыли (агрегирование, коагуляция).**

Коагуляция пыли – это укрупнение пыли при взаимодействии от различных физических факторов – в этом процессе главное влияние оказывают молекулярные и электрические силы.

Для обеспылевания воздуха коагуляция очень полезна.

Частицы слипаются при столкновении, при действии гравитационных сил, сил инерции, броуновского движения, от взаимного притяжения и пр.

Процесс коагуляции усиливается при росте количества мелких частиц и при росте концентрации пыли.

Естественная коагуляция происходит под действием естественных сил.

Искусственная коагуляция происходит под действием ионизации, акустической обработки, которые увеличивают процесс коагуляции во много раз.



Вопросы для самоконтроля.

1. Свойства пыли.
2. Источники образования пыли.
3. Методы определения дисперсности пыли.
4. Дисперсность пыли.

### 3. Теоретические основы очистки воздуха от пыли.

#### 3.1 Гравитационное осаждение происходит под действием силы тяжести.

Сопротивление среды по закону Ньютона

$$F_c = \zeta_{\text{ч}} \times S_{\text{ч}} \times \frac{v_{\text{ч}}^2 \times \rho_{\text{г}}}{2}$$

$S_{\text{ч}}$  - площадь поперечного сечения частицы,  $\text{м}^2$ ,

$v$  - скорость частицы  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,

$\zeta_{\text{ч}}$  - аэродинамический коэффициент сопротивления частицы

$$\zeta_{\text{ч}} = f(\text{Re})$$

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{ч}} \times d_{\text{ч}} \times \rho_{\text{г}}}{\mu_{\text{г}}}$$

$\mu_{\text{г}}$  - динамическая вязкость воздуха,  $\text{Па} \times \text{с}$ ,

$d_{\text{ч}}$  - диаметр частицы.

При  $\text{Re} \leq 2$  ламинарное движение

$$\zeta_{\text{ч}} = 24 / \text{Re}$$

При  $10^{-3} \leq \text{Re} \leq 1$  по закону Стокса сила сопротивления движения частицы равна

$$F_c = 3\pi \times \mu_{\text{г}} \times d_{\text{ч}} \times v_{\text{ч}}$$

По закону Стока при ламинарном движении частиц сила сопротивления движения частицы для частиц 0,2 – 2 мкм равна

$$F_c = 3\pi \times \mu_{\text{г}} \times d_{\text{ч}} \times v_{\text{ч}} / C_k$$

$C_k$  - поправка Кенингема  $90 \div 1 = f(d_{\text{ч}})$

Броуновское движение происходит от ударов молекул частиц малых размеров 0,5 мкм и ниже, перемещение частиц в броуновском движении по Эйнштейну равно

$$\Delta X = \sqrt{2 \times D_{\text{ч}} \times T_{\text{г}}}$$

$D_{\text{ч}}$  - коэффициент диффузии частицы,  $\text{м}^2/\text{с}$

$T_{\text{г}}$  - абсолютная температура воздуха,  $\text{С}$

Если частица шарообразная, то вводится динамический коэффициент формы, который умножается на аэродинамический коэффициент сопротивления частицы  $\zeta_{\text{ч}} \times f$

$f$  - динамический коэффициент формы,  $f=1$  при шаровой форме,  $f=5$  при пластинчатой форме,

$$f = d_{\text{экв}}^3 / d_{\text{ч}}^3$$

$d_{\text{экв}}$  - эквивалентный диаметр частицы, равный диаметру шара, объем которого равен объему частицы,  $\text{м}$

В движении частицы, осаждающейся под действием силы тяжести в неподвижной среде, различают три стадии: продолжительность которых очень мала:

1. начальный момент падения,
2. движение с увеличением скорости,
3. движение с постоянной скоростью.

Скорость воздуха в восходящем потоке, при которой скорость частицы равна нулю, называется скоростью витания частицы.

Постоянная скорость осаждения частицы в неподвижном воздухе равна её скорости витания.

Скорость витания важна для аспирации, пневмотранспорта, пылеуловителей, работающих на принципе гравитации

**3.2 Центробежное осаждение частиц** - это более эффективный метод, чем гравитационное осаждение, т.к. центробежная сила во много раз больше чем сила частицы.

$$F_c = m_c \times \frac{v_\omega^2}{r}$$

$m_c$  - масса частицы, кг

$v_\omega$  - скорость вращения потока вокруг неподвижной оси, м/с

$r$  - радиус частицы

Скорость осаждения частицы

$$v_c = \frac{d_c^2 \times \rho_r \times v_\omega}{18 \times \mu_r \times r}$$

при равенстве  $v_c = v_c$  разделив скорость движения частицы на скорость осаждения частицы получаем критерий Стокса, который характеризует режим осаждения частиц.

$$St = \frac{d_c^2 \times \rho_c \times v_\omega}{18 \times \mu_r \times r}$$

Существует два принципиальных конструктивных решения:

1. Пылегазовый поток вращается в неподвижном корпусе аппарата — циклон,
2. Поток движется во вращающемся аппарате — ротационный пылеуловитель.

**3.3 Инерционное осаждение**, при котором движущийся в одном направлении запылённый поток изменяет направление движения. Движущиеся с большой скоростью частицы стремятся сохранить первоначальное направление движения и оседают.

Активность осаждения частиц характеризует критерий Стокса, который получен как соотношение сил инерции и сил сопротивления среды.

$$St = \frac{d_c^2 \times \rho_c \times v_c}{\mu_r \times L}$$

$L$  - геометрическая характеристика аппарата, м.

**3.4 Осаждение частиц в электрическом**, поле при котором происходит зарядка частиц и осаждение под действием электрического поля.

В обычных условиях большая часть молекул газа нейтральна.

Факторы, влияющие на рост заряженных молекул:

1. сильный нагрев,
2. радиоактивное излучение,
3. трение,
4. бомбардировка электронами и ионами и др.

Если между электродами создается электрическое поле, то носители зарядов — ионы и электроны получают значительное ускорение и при столкновении с молекулами происходит их ионизация — **ударная ионизация**.

Пространство около коронирующего электрода называется коронирующей областью - здесь происходит ударная ионизация. При коронном разряде имеет место выделение озона и окислов азота. Процесс ионизации носит лавинообразный характер. Частицы получают заряд и перемещаются к электродам, оседая на них. Закон взаимодействия электрических зарядов характеризует закон Кулона.

$$F = k_1 \times \frac{q_1 \times q_2}{r^2}$$

$q_1, q_2$  - величины взаимодействующих зарядов,

$r$  - расстояние между зарядами, м.

$k_1 > 0$  - коэффициент пропорциональности, который зависит от электропроводящих свойств среды.

$$F = \frac{q_1 \times q_2}{4\pi \times \epsilon_0 \times \epsilon \times r^2}$$

$\epsilon_0$  - электрическая постоянная равная  $8,85 \times 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \times \text{м}^2)$ ,

$\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды, для вакуума  $\epsilon = 1$ .

Характеристикой электрического поля является напряжённость электрического поля  $E$ .

Коронный разряд возникает при напряжённости электрического поля, равной  $E_{кр}$  — критическое напряжение.

Для отрицательной полярности электрода

$$E_{кр} = 3,04 \times (\beta + 0,0311 \times \sqrt{\beta / r}) \times 10^6$$

$\beta$  - отношение плотности газа в рабочих условиях к плотности газа в стандартных условиях ( $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $P = 1,013 \times 10^5 \text{ Па}$ )

$$\beta = \frac{B \pm P_r \times (273,15 + 20)}{1,013 \times 10^5 \times (273,15 + t)}$$

$B$  - барометрическое давление, Па,

$P_r$  - величина разряжения или абсолютное давление газов, Па,

$t$  - температура газов,  $^\circ\text{C}$ ,

$r$  - радиус коронирующего электрода.

Предельный заряд частиц диаметром более 1 мкм и с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,5$  равен

$$q_{пред} = n \times e = 0,19 \times 10^{-9} \times r^2 \times E$$

$e$  - величина элем заряда  $1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$ ,

$n$  - число элементарных зарядов,

$r$  - радиус частицы, м,

$E$  - напряженность электрического поля, В/м,

гипс  $\epsilon = 4$ ; окисленный металл  $\epsilon = 12-18$ , металлы  $\epsilon = \infty$

Если  $\epsilon \neq 2,5$ , то  $q_{пред} \times D_{\epsilon=m} / D_{\epsilon=2,5}$

$$D = 1 + 2 \times (\epsilon - 1) / (\epsilon + 2)$$

При  $\epsilon = 2,5$   $D = 1,66$ ,  $\epsilon = 1$   $D = 1$

Скорость движения частиц пыли более 1 мкм в электрическом поле, м/с.

$$v_d = \frac{10^{-11} \times E^2 \times r}{\mu_r}$$

$r$  - радиус частицы, м,

$E$  - напряжение электрического поля, В/м

$\mu_r$  - динамическая вязкость газа, Па·с.

для частиц менее 1 мкм верна следующая формула

$$v_d = \frac{0,17 \times 10^{-11} \times E^2 \times r}{\mu_r}$$

Степень эффективности очистки воздуха в электрофилт্রে может быть определена по формуле

$$\eta = 1 - \exp(-v_d \times f)$$

$f$  - удельная поверхность осаждения электродов для осаждения на 1 м<sup>3</sup>/с очищаемого газа, м<sup>2</sup>.

**3.5 Фильтрация через пористые материалы** — это пропуск аэрозоля через фильтровальные перегородки, пропускающие воздух, но задерживающие аэрозольные частицы.

Процесс фильтрации можно представить как движение частиц вблизи цилиндров из волокнистого материала, расположенных поперек потока, движение воздуха безвихревое.

Задерживаются частицы силами межмолекулярного взаимодействия, а расстояние между цилиндрическими волокнами в 5-10 раз больше размеров частиц.

При фильтрации через пористые материалы имеют место следующие явления:

- сетевой эффект,
- инерционное столкновение,
- броуновская диффузия,
- касание,

- гравитационные силы,
- электрические силы.

Главное при фильтрации это столкновение с волокнами и нитями фильтровального материала. Вероятность столкновения частиц пыли с волокнами фильтровального материала определяет критерий Стокса.

$$St = \frac{d_c \times \rho_c \times v_\Gamma \times C_k}{18 \times \mu_\Gamma \times d_\phi}$$

$d_c$  - диаметр частицы, м

$\rho_c$  - плотность частицы кг/м<sup>3</sup>,

$d_\phi$  - диаметр волокна фильтровального материала, м

$v_\Gamma$  - скорость газового потока, м/с

$\mu_\Gamma$  - динамическая вязкость, Па·с

$C_k$  — поправка Кенингема для частиц диаметром близком к длине свободного пробега молекул газа (при  $d_c=0,003$  мкм  $C_k = 90$ , при  $d_c=0,03$  мкм  $C_k = 7,9$ , при  $d_c=0,1$  мкм  $C_k = 2,9$ , при  $d_c=1$  мкм  $C_k = 1,16$ ).

Чем  $St$  выше, тем выше вероятность столкновения частиц с поверхности фильтруемого материала (90% при  $St = 7$ )

$\varepsilon_\phi$  - эффективность осаждения частиц при броуновском движении при  $t_{\text{потока}} < 100^\circ\text{C}$ .

$$\varepsilon_\phi = \frac{1,35 \times 10^{-2}}{\sqrt{v_\Gamma \times d_c \times d_\phi}}$$

$\varepsilon_\varepsilon$  - эффективность осаждения под действием электрических сил.

$$\varepsilon = \frac{\kappa_\varepsilon \times E \times d_c^2}{6 \times v_\Gamma \times \mu_\Gamma \times d_\phi}$$

$E$  — напряженность электрического поля вокруг волокна В/м

$\kappa_\varepsilon$  — коэффициент, учитывающий диэлектрические свойства пыли

При отложении частиц на фильтровальном материале растет гидравлическое сопротивление слоя осевшей пыли, которое можно определить по формуле Козени-Кармана, Па:

$$\Delta P = \kappa_c \frac{\mu \times v_\Gamma \times G \times (1 - m \times n)}{d_c^2 \times m_n^3 \times \rho_c}$$

$\kappa_c=240$  для  $d_c < 6$  мкм,

$m_n$  - пористость пыли слоя,

$m_n = (\rho_c - \rho_n) / \rho_c$ ,

$\rho_n$  - плотность насыпного слоя, кг/м<sup>3</sup>,

$\rho_c$  - плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>,

$G$  - масса пыли в порах фильтровального материала кг/м<sup>2</sup>, на единицу площади,

$d$  - диаметр частиц.

Для тонких фракций гидравлическое сопротивление сильно увеличивается.

### 3.6 Мокрая очистка

Мокрые аппараты для обеспыливания газов бывают:

- 1 с распылением жидкости,
- 2 барботажные,
- 3 пенные,
- 4 плёночные.

Осаждение частиц на каплях — распространенный способ обеспыливания газов.

При обтекании шаровой капли траектория газа и частиц пыли расходятся вследствие сил инерции.

При  $St \geq 0,1$

Эффективность осаждения частиц пыли на каплях определяют по формуле

$$\varepsilon_{st} = \frac{St^2}{(St + 0,125)^2}$$

В зависимости от диаметра частицы кроме инерции работают силы электрические и броуновское движение.

**3.7 Термофорез** — это отталкивание частиц нагретыми телами.

Неровно нагретые частицы в газе приводит к слипанию частиц.

От более нагретой стороны частицы отлетают сильнее, чем от менее нагретой.

Частицы оседают на наружной стене за отопительным прибором.

Вопросы для самоконтроля.

1. Инерционное осаждение пыли.
2. Гравитационное осаждение пыли.
3. Электрическое осаждение пыли.
4. Мокрая пылеочистка.
5. Фильтрация через пористые материалы.

#### 4. Классификация устройств для очистки воздуха от пыли

1. по назначению
2. по основному способу действия
3. по эффективности
4. по конструктивным соображениям.

ГОСТ 12.2.043 – 80 Оборудование пылеулавливающее. Классификация.

Существуют два типа пылеулавливающего оборудования:

1. воздушные фильтры - оборудование для очистки от пыли в системах приточной вентиляции, кондиционирования, воздушного отопления.
2. пылеуловители - оборудование для очистки от пыли воздуха, выбрасываемого в атмосферу системами вытяжной вентиляции.

Применяются два типа исполнения оборудования:

1. улавливание пыли **сухим способом**,
2. улавливание пыли **мокрым способом**

Последовательное пылеулавливание в несколько ступеней с разным принципом действия называют комбинированным.

#### 5. Основные характеристики пылеулавливающего оборудования.

1. **Эффективность (степень)** очистки воздуха от пыли это отношение массы пыли, уловленной в аппарате, к массе пыли, поступившей в него.

$$\varepsilon = \frac{G_y}{G_{ex}} \times 100\% = \frac{C_{ex}}{C_{вых}} \times 100\%$$

При отсутствии подсоса воздуха в аппарат:

$$\varepsilon = \frac{1 - G_{вых}}{G_{ex}} \times 100\%$$

При подсосе воздуха (например, в рукавных фильтрах):

$$\varepsilon = \left( 1 - \frac{G_{вых} \times L_{вых}}{G_{ex} \times L_{ex}} \right) \times 100\%$$

При последовательной установке нескольких аппаратов (каскадная, многоступенчатая очистка) применяемой для более полной очистки воздуха

$$\varepsilon = [1 - (1 - \varepsilon_1) \times (1 - \varepsilon_2) \times (1 - \varepsilon_3) \times \dots \times (1 - \varepsilon_n)] \times 100\%$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_n$  - эффективность очистки каждого из аппаратов, входящих в каскад, в долях единицы.

2. **Фракционная эффективность аппарата** показывает долю уловленной пыли по каждой фракции.

$$\varepsilon_{\phi n} = \frac{g_n}{G_n}$$

$g_n$  - уловленная пыль,

$G_n$  - поступившая в аппарат пыль.

Общую эффективность аппарата по фракционной эффективности определяют следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{G_1 \times \varepsilon_{\phi 1} + G_2 \times \varepsilon_{\phi 2} + \dots + G_n \times \varepsilon_{\phi n}}{G_1 + G_2 + \dots + G_n}$$

$G_1, G_2 \dots G_n$  - масса пыли соответствующих фракций, поступивших в аппарат,

$\varepsilon_{\phi 1}, \varepsilon_{\phi 2}, \varepsilon_{\phi n}$  - фракционная эффективность,

$\delta_1 = G_1/G, \delta_2 = G_2/G, \delta_n = G_n/G$

$G$  - общее количество пыли,

Общая эффективность

$\varepsilon = \delta_1 \times \varepsilon_{\phi 1} + \delta_2 \times \varepsilon_{\phi 2} + \dots + \delta_n \times \varepsilon_{\phi n}$

**3. Производительность аппарата** это количество воздуха, которое очищается за 1 час ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) через фильтрующий слой ( $\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ )

**4. Гидравлическое сопротивление аппарата** влияет на мощность потребляемую вентилятором на преодоление сопротивления.

$H = A \cdot v \cdot n$

$H$  - напор, создаваемый вентилятором, Па,

$v$  - скорость, м/с,

$A, n$  - экспериментальные коэффициенты.

**5. Расход электроэнергии** зависит от гидравлического сопротивления аппарата.

При одноступенчатой очистки расход энергии колеблется от 0,035 до 1 кВт×ч/1000м<sup>3</sup> воздуха.

#### **6. Стоимость очистки**

Если стоимость очистки в циклоне принять за 100%, то

в скруббере ВТИ	155%
электрофильтр	220%
тканевые фильтры до	270%
батарейный циклон	125%
циклон с водой	140%
циклон с электрофильтром	340%

#### **7. Цель очистки приточного и рециркуляционного воздуха**

1. Растут требования к очистке чистоте воздуха (электроника, тонкое машиностроение).

2. Рост загрязнения атмосферы.

Очистка воздуха от пыли проводится для:

1. Снижение запылённости ниже ПДК,

2. Защиты теплообменников, оросительных устройств, автоматики и другого оборудования,

3. Защиты помещений, отделки, оборудования от запыления,

4. Поддержание чистоты воздуха в соответствии с технологическими требованиями.

Остаточное содержание пыли в очищенном атмосферном воздухе не должно превышать:

- ПДК в атмосферном воздухе населенных пунктов при подаче воздуха в жилые и общественные здания,

- 30% ПДК в воздухе рабочей зоны при подаче его в помещения производственных и административно-бытовых зданий,

- 30% ПДК в воздухе рабочей зоны с частицами пыли не более 10 мкм при подаче его в кабины крановщиков, в зону дыхания работающих, при воздушном душировании,

- допустимых концентраций по техническим условиям на вентиляционное оборудование.

Если запылённость наружного или рециркуляционного воздуха подаваемого в производственные помещения не превышает 30% ПДК в рабочей зоне, то воздух не очищают, кроме случаев оговоренных в технологических требованиях.

Можно не очищать приточный воздух от механической системы вентиляции, если 50% и более воздуха подаётся через открытые проёмы.

## 5. Характеристика воздушных фильтров

Воздушные фильтры применяются для очистки приточного воздуха. Воздушные фильтры по эффективности делятся на 3 класса с эффективностью, не менее %:

I класс - частицы всех размеров - 99%,

II класс - более 1 мкм - 85%,

III класс - от 10 до 50 мкм - 60%.

ПДК = 0,5 мг/м<sup>3</sup> для атмосферного воздуха

I класс - волокнистые, сухие ФЯЛ –2, ФЯЛ – 1, ЛАИК,

II класс - ФЯКП,

III класс - ФР ( ФРЗ; ФРУ; ФР5).

Перед фильтром I-го класса устанавливают фильтры II или III класса. Перед фильтром II класса устанавливают фильтр III класса.

Начальное пылесодержание воздуха объекта принимают по следующим данным

Чистый воздух - с/местность со среднесуточной концентрацией пыли в воздухе до 0,15 мг/м<sup>3</sup>.

Слабозагрязнённый воздух - жилые районы промышленных городов до 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

Сильнозагрязнённый воздух - индустриальные районы промышленных городов до 1 мг/м<sup>3</sup>,

Чрезвычайно загрязнённый воздух - территория промышленных предприятий до 3 мг/м<sup>3</sup> и более.

Дисперсность атмосферной пыли находится между IV и V группами.

При очистке значительных объектов воздуха (20-30 тыс. м<sup>3</sup>/час) запылённостью 0,5 мг/м<sup>3</sup> и при фракциях пыли 10 мкм и более применяют самоочищающиеся фильтры. При меньших объёмах применяются ячейковые фильтры. Необходимо учитывать трудоёмкость обслуживания устанавливаемых фильтров. Для воздуха с концентрацией пыли до 0,5 — 1 мг/м<sup>3</sup> — могут быть применены смоченные рулонные волокнистые фильтры при для больших объёмов очищаемого воздуха, при небольших объёмах очищаемого воздуха применяют ячейковые фильтры.

Электрофильтры могут применяться при любой начальной запылённости.

При применении масляных фильтров необходимо учитывать возможность замасливания воздуха.

Фильтры ФРП и ФРПМ применяют для рециркуляционного воздуха в системах вентиляции текстильных предприятий, где воздух очищают от волокнистой пыли.

## 6. Виды воздушных фильтров

### 1. Ячейковые фильтры

а) ФЯР (фильтр Река) - фильтрующий слой металлические гофрированные сетки, которые промасливаются специальными маслами (висциновым и др.) Регенерация осуществляется путём промывки запылённости ячеек в содовом растворе.

б) ФЯВ — гофрированные винипластовые сетки, могут быть замасленным или сухими.

в) ФЯП — фильтрующий материал, губчатый пенополиуретан, обработанный в растворе щелочи, для придания ему воздухопроницаемости, у данного фильтра меньше пылеемкость, чем ФЯВ, но очищается промывкой водой, что упрощает эксплуатацию фильтра.

г) ФЯУ — заполнен упругим стекловолокнистым фильтрующим материалом ФСВУ, пылеемкость меньше ФЯР и ФЯВ, фильтрующий материал подлежит замене, ячейки бывают плоские или V-образные.

### 2. Самоочищающиеся масляные фильтры

Самоочищающиеся масляные фильтры не надо промывать вручную, более компактны и имеют большую производительность по воздуху, чем ячейковые. Фильтрующий материал: пружинная сетка и сетчатые шторы.

Пружинная сетка, которая приводится в движение от электродвигателя. Необходимо иметь равномерную скорость движения воздуха до 3 м/с. При движении пружинных сеток они перемещаются через ванну, заполненную маслом и самоочищаются от пыли. Масло надо периодически сменять. Применяют масло: висциновое, веретенное, трансформаторное, турбинное, и др. Сорт масла зависит от времени года и от рекомендации завода изготовителя. Фильтры выпускались как часть секции конденсата КТ; КД

Самоочищающийся фильтр с сетчатыми шторками, прикрепленными к втулочным цепям, надетым на приводные шестерни. Шторки движутся периодически через 12 минут. Шторки проходят через ванну с маслом и промываются. Рекомендуемая скорость движения воздуха 2,5 – 2,6 м/с

### **Смачивателя для масляных фильтров.**

Масла для смачивания масляных фильтров должны соответствовать температурным условиям, чтобы сохранить необходимую вязкость во всём интервале возможных температур очищаемого воздуха. Используют натуральные синтетические и натуральные (нефтяные) масла. Не соблюдение температурных условий ведёт к загустению или повышенному испарению масла, что приведет к появлению запаха в очищаемом воздухе.

### **3. Рулонные фильтры**

ФРУ для воздуха с запылённостью менее  $0,5 \text{ мг/м}^3$  и для производительности вентиляционных систем 20-120 м<sup>3</sup>/ч. Две катушки с фильтрующим материалом вращаются через электродвигатель, фильтрующий материал — стекловолокно толщиной 30-50 мм промасленное и пропитанное связующими веществами. Длина фильтровального материала надетого на две катушки - 15 м. Скорость перемещения материала около 0,5 м/мин, которая контролируется значениями приборов, контролирующих гидравлическое сопротивление.

### **4. Воздушные фильтры высокой эффективности с материалом ФП**

Материалы ФП разработаны в физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова. ФП — это очень равномерные слои ультратонких полимерных волокон а, т.к. сам материал не прочен, то его наносят на ткань (марля, перкаль и др.). Материалы ФП стойки к химической коррозии и выдерживают температуру до 250-270 градусов Цельсия. Волокна ФП имеют вид ленты, шириной в 3-5 раз больше толщины. ФП – фильтр Петрянова. Выпускают фильтры Петрянова из перхлорвиниловых волокон шириной: ФПП – 15, ФПП – 25, ФПП – 70, толщина волокон у этих фильтров соответственно 1,5; 2,5; 7,0 мкм. Материал ФП может удерживать электрические заряды, что повышает его эффективность.

Очистка приточного воздуха и не токсичных вентиляционных выбросов проводится фильтрами ФПП – 70- 0,2 с  $\eta = 90-99\%$ ,

Очистка от токсичных, радиоактивных и аэрозольных выбросов проводится фильтрами ФПП – 15-3 и ФПП – 25-3 с  $\eta = 99,99\%$ ,

Очистка от особоопасных веществ от горячих камер проводится фильтрами ФПП – 15-4,5 с  $\eta = 99,995\%$ .

ФП — дорогой и высокоэффективный фильтровальный материал применяется для фильтров тонкой очистки (1 класс эффективности) и для респираторов. Фильтры тонкой очистки должны обеспечивать очистку воздуха от любых аэрозолей до любой степени. Наиболее распространены материалы ФП из полихлорвинила, которые применяются в диапазоне температур от 60°C до 150°C, из ацетилцеллюлозы и триацетилцеллюлозы (растворяются в сильных кислотах) применяются в диапазоне температур до 150-200°C, из полиакрилов стойких к кислотам и щелочам рабочие температуры до 270-230°C. Химически стойкими являются материалы из фторополимеров с рабочей температурой до 120°C. ФП применяют при концентрации пыли перед фильтром не более  $0,5 - 1 \text{ мг/м}^3$ , при такой распылённости и фильтрации со скоростью 2 см/с при нагрузке  $72 \text{ м}^3/(\text{ч} \times \text{м}^2)$  за год на  $1 \text{ м}^3$  фильтровального материала накопится 630 г уловленной пыли. Масса  $1 \text{ м}^2$  фильтровального материала не превышает 30 грамм. Накопление пыли не должно превышать  $50-100 \text{ г/м}^2$ , что повышает сопротивление на 50-100 Па. Регенерация фильтра происходит путём замены фильтровального материала. Распространён фильтр тонкой очистки — рамочный фильтр ЛАИК (лаборатория института им Карпова) в  $1 \text{ м}^3$  фильтра расположено до  $100 \text{ м}^2$  фильтрующего материала.

### **5. Воздушные электрические фильтры**

Воздушный электрический фильтр — двухзонный.

1 зона — решётка из металлических пластин с натянутыми между ними коронирующими электродами из проволоки. К электродам подведен ток 13-15 кВ положительного знака.

2 зона — осадительная зона, состоящая пакета металлических пластин, расположенных параллельно друг другу на расстоянии 8-12 мм, к каждой второй пластине подведён ток 6,5 – 7,5 кВ положительного знака. Пыль осажается на заземлённых пластинах, к которым ток не



подведён. Вокруг коронирующего электрода происходит электрический разряд, от которого образуются  $O_3$  и окислы азота при силе тока 0,8 мА и мощности на единицу расхода запыленного воздуха 10 Вт/ 1000 м<sup>3</sup>/ч воздуха.

В электрических пылеуловителях подводится ток в 80-100 Вт и коронирующие электроды работают с током отрицательного знака. Вредные вещества выделяются сильнее в 8 раз  $O_3$  и окислы азота.

Фракционная эффективность электрического фильтра при частицах диаметром:  
0,5 мкм — 89,9%, 2 мкм — 96,6 %.

Электрический фильтр может снабжаться противоуносным фильтром с материалом из пенополиуретана.

## **6. Воздушные фильтры иностранных фирм.**

1. Фильтры тонкой очистки ХЕПА (ХЕРА), ULPA и UHSL применяются для улавливания микронных и сублимационных частиц в атомной энергетике, электронной и фармацевтической промышленности, в лечебных заведениях, в пищевой промышленности и др. Фильтрующий материал — тончайшие нити из стекловолокна, которое уложено в фильтровальную пачку и фиксируется разделительными прокладками из алюминия.

Фракционная эффективность фильтров при частицах диаметром: ХЕПА — 0,3 мкм 99,97%, УЛПА — 0,3 мкм 99,999%, VNSL — 0,12 мкм — 99,9995%, удельная воздушная нагрузка до 2300 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>×ч), гидравлическое сопротивление до 300 Па, изготавливают около 30 типоразмеров фильтров, параметры среды, при которых происходит эксплуатация фильтров:  $t = 19-60^{\circ}C$ ,  $\varphi=80\%$ .

2. Алюминиевые фильтры — для средней, грубой очистки и предварительной очистки воздуха, фильтры могут работать при высокой влажности. Поверхность покрыта липким составом; регенерация осуществляется промывкой водой, температура обрабатываемого воздуха до 66<sup>o</sup>C, эффективность фильтров до 50-60%. Разработано более 20 типоразмеров фильтров. Начальное гидравлическое сопротивление - 18 Па, конечное – 125 Па при глубине 25 мм, а при глубине 50 мм начальное сопротивление 30 Па, конечное 250 Па.

3. Карманные фильтры, например, “Вайхтоилма” — финский фильтр тонкой, средней и грубой очистки

для тонкой очистки применяется стекловолокно, эффективность фильтра более 98%, для частиц диаметром 0,2 мкм – 60%, 3 мкм – 100%. Гидравлическое сопротивление фильтра изменяется в пределах 50-280 Па, пылеемкость 580 г/м<sup>2</sup>, для средней и грубой очистки применяется фильтровальный материал полиэфирные волокна, эффективность очистки 87-95 %, гидравлическое сопротивление изменяется в пределах 50-180 Па, при 180 Па необходима замена фильтра, пылеемкость фильтра 1300 г/м<sup>3</sup>.

4. Рулонные фильтры применяются при температуре очищаемых газов  $t = 70-150^{\circ}C$ , изготовлен из синтетических волокон, эффективность очистки 75-90%.

5. Угольные фильтры применяются для очистки воздуха от паров, газов, дыма, неприятных запахов, применяются на прямотоке и при рециркуляции воздуха, эффективность по запахам 33 – 16 %.

## **7. Чистые помещения**

Современная техника позволяет ограничить нахождение в чистом помещении частиц, размером свыше 1 мкм, не более 10 частиц в 1 м<sup>3</sup>.

ЧПП - чистые производственные помещения,

БЧП - биологически чистые помещения.

В ЧПП нормируют допустимое число частиц в объёмной единице воздуха и диаметр частиц — электронная промышленность, биохимическая промышленность. Если между элементами микросхем зазор 1 мкм, то в воздушной среде не должно быть частиц более 0,5 — 0,3 мкм, иначе будет иметь место замыкание. Источники частиц в ЧП — деятельность людей. Человек за 1 мин. в зависимости от характера и интенсивности действий генерирует от 10<sup>5</sup> до 10<sup>7</sup> частиц пыли диаметром 0,3 мкм и более. Если человек сидит неподвижно, то выделяется 10<sup>5</sup> частиц за 1 мин.

Загрязнителями воздуха в помещении являются:

- пыль, проникающая снаружи через двери, окна, с персоналом на обуви, одежде, с материалами и др.
- пыль и ворс от одежды;
- от износа конструкций зданий и оборудования,
- при ведении технологических процессов от материалов, жидкостей и газов,
- от человека — частицы волос, кожи и пр.

Воздух очищается в 2-3-4-х ступенях, на последней ступени применяют фильтры ЛАИК с ФП.

## 8. Пылеуловители для очистки выбросов в атмосферу.

Пылеуловители для очистки выбросов в атмосферу от систем вытяжной вентиляции делятся на 5 классов в зависимости от размеров эффективно улавливаемых частиц.

**I класс** – частицы более 0,3 – 0,5 мкм, пыль по дисперсности - IV класса - 99,9 – 80% и V класса - < 80%

**II класс** - более 2 мкм, пыль по дисперсности - III класс - 99,9 – 92% и IV класс - 92 – 45%.

**III класс** - более 4 мкм, пыль по дисперсности - II класс - 99,9 – 99% и III класс - 99 – 80%.

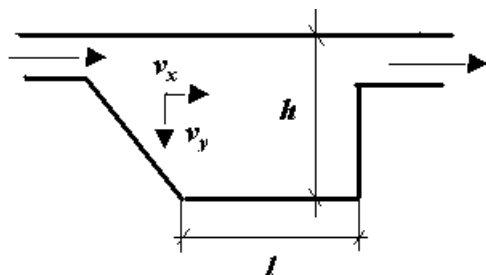
**IV класс** - более 8 мкм, пыль по дисперсности - I класс - 99,99% и II класс - 99,9 - 95%.

**V класс** - более 20 мкм, пыль по дисперсности I > 99

Эффективность ориентировочная, т.к. зависит от концентрации  $\text{мг/м}^3$ , от слипаемости, волокнистости пыли.

Эффективность улавливания — более 95 %

1. **Пылеосадочные камеры** — гравитационное оборудование.

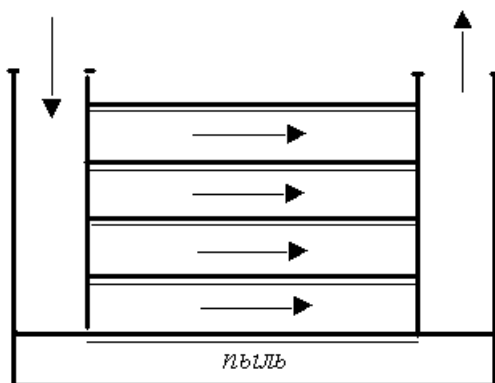


$\tau$  - время пребывания частицы в камере, с,  $v_x$  - скорость движения частицы в горизонтальном направлении, м/с,  $v_y$  - скорость движения частиц в вертикальном направлении, м/с,  $l$  – длина камеры, м,  $h$  – высота камеры, м.

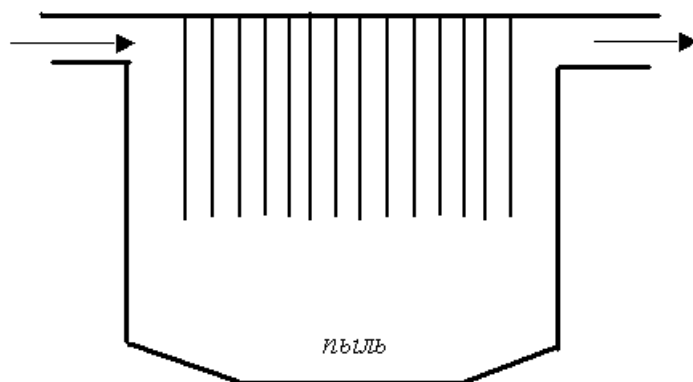
$$l = v_x \times \tau, h = v_y \times \tau, l = h \times v_x / v_y$$

Чем ниже камера, тем быстрее частица достигнет дна.

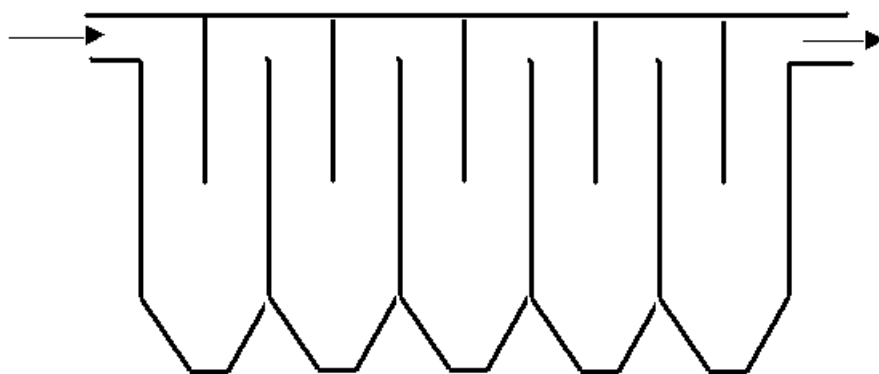
а) **Полочная пылеосадочная камера** — полки наклонные или поворотные



Для осаждения пыли необходимо ламинарное движение воздуха, что бы достичь такого движения нужно строить камеру огромных размеров по длине, а отсутствие требуемой площади по камеру приводит к сокращению длины и в итоге реально движение воздуха турбулентное или переходный между ламинарным и турбулентным течением воздуха режим. Для увеличения эффективности пылеосадочных камер располагают цепи, стержни поперек пути движения пыли, что усиливает процесс пылеосаждения.



Наиболее эффективным видом осадочной камеры является камера лабиринтного типа конструкции В.В. Батурина.



Бывают камеры с мокрой очисткой, например, для сахарной пыли. Максимальная скорость движения воздуха через камеру  $v=3$  м/с. Изготавливают из кирпича, бетона и из других не корродирующих материалов. Гидравлическое сопротивление пылеосадочной камеры  $P = 20 - 15$  Па. Такие камеры могут уловить только крупную пыль, а мелкая пыль не улавливается. Пылеосадочная камера занимает много места, эффективность очистки 50 – 60 %, применяют для предварительной очистки от крупнодисперсной пыли с большой плотностью, для взрывопожароопасной пыли не используется.

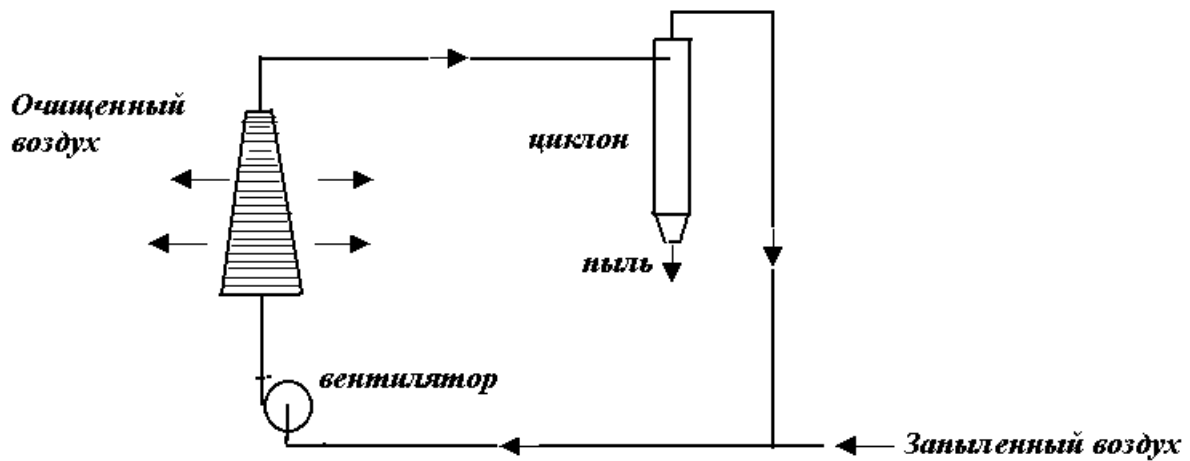
## 2. Инерционные пылеуловители.

Работа инерционных пылеуловителей заключается в изменении направления движения частиц, для последующего их осаждения. К этому виду аппаратов относятся:

1. Пылеотделитель ИП,
2. Жалюзийный пылеуловитель ВТИ,
3. Пылевой мешок и др. (простейший вид).

Такие пылеуловители улавливают крупную пыль 20-30 мкм с эффективностью 60-95 %, применяются для 1 ступени очистки воздуха, стоимость оборудования небольшая, выгодным обстоятельством является простота устройства.

а) ИП — инерционный пылеуловитель — конус с коническими кольцами уменьшающегося диаметра, воздух входит в основание конуса со скоростью 18 м/с и движется. Воздух выходит через щели колец, а пыль движется дальше с ростом концентрации, у вершины конуса остаётся 5 – 10% воздуха и пылевоздушная смесь поступает в циклон, применяется двухступенчатая обработка воздуха — общая эффективность достигает 90%.



б) Жалюзийный пылеуловитель ВТИ аналогичен ИП: для газов с высокой температурой, выполняется из чугуна или жаропрочной стали. Гидравлическое сопротивление 100-500 Па.

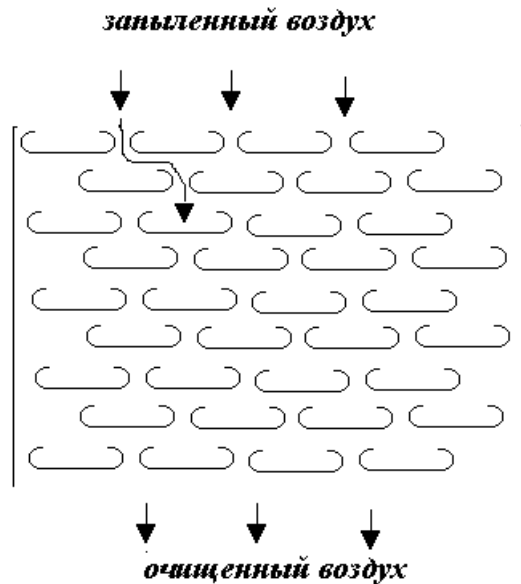
в) Мешок.

В данном пылеуловителе воздух поворачивает на  $180^\circ$  и пыль по инерции оседает на дно мешка. Скорость потока на входе - 10 м/с и 1 м/с - в мешке. Улавливаются частицы размером более 30 мкм в пределах 65-80 %. Гидравлическое сопротивление мешка  $P = 150 - 390$  Па,



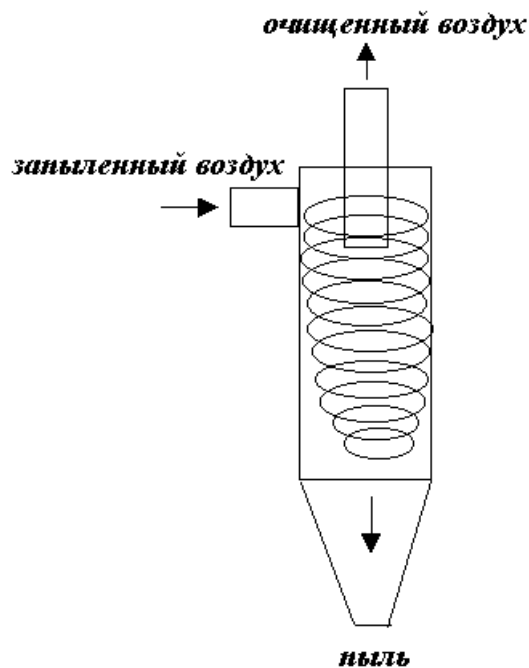
применяется данное устройство для предварительной очистки воздуха от пыли, например, в черной металлургии.

г) Экранный инерционный пылеуловитель



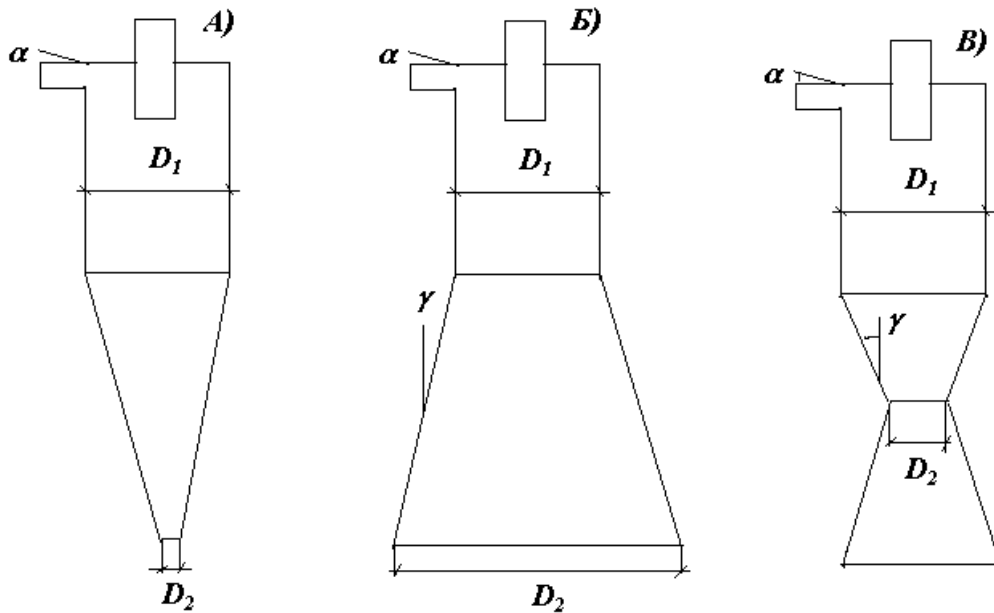
Гидравлическое сопротивление  $P = 25 - 100$  Па, для газа с запыленностью  $20-70$  г/м<sup>3</sup> эффективность пылеулавливания  $80-91$  %, для частиц размером более  $10$  мкм эффективность пылеулавливания  $62$  %.

### 3. Циклоны.



В циклонах используется центробежная сила. Преимущества циклона: простота устройства, надёжность, небольшие капитальные затраты, позволяет проводить грубая и средняя очистка от сухой и неслипающейся пыли. У циклона мала эффективность при частицах размером до  $5 - 10$  мкм, а при размерах - до  $10$  мкм  $80\%$  и более, при этом образующийся в циклоне турбулентный поток не даёт оседать мелкодисперсной пыли. Циклоны бывают при соотношении высоты цилиндра и конуса: цилиндрические  $H_{ц} > H_{к}$ , конические  $H_{к} > H_{ц}$ , где  $H_{к}$  и  $H_{ц}$  — высота конической и цилиндрической частей циклона. Циклоны бывают с тангенциальным и спиральным (более эффективны) подводом потока воздуха. Скорость потока воздуха входящего в циклоны  $v = 14 - 20$  м/с.

Применяют циклоны правые (по часовой стрелке закручивание потока) и левые (против часовой стрелки). Конусообразная часть циклона может быть в форме прямой конус (А), обратный конус (Б), комбинированный конус (В).



#### 4. Расчёты циклонов

Теория центробежной сепарации рассмотрена в трудах П.А. Коузова, А.И. Пирумова. Пылегазовый поток поступает с большой скоростью по касательной в цилиндрическую часть корпуса циклона и совершает движение по нисходящей спирали. Отделение пыли происходит в конической части корпуса. Центробежная сила, действующая на частицу:

$$F_{\text{ц}} = \frac{m \times v_T^2}{R}$$

Сила сопротивления среды:

$$F = 3 \times \pi \times v_p \times d \times \mu$$

$v_T$  - тангенциальная скорость пылевой частицы, принимаемая равной скорости газового потока при входе в циклон, м/с,

$v_p$  - скорость движения частицы в радиальном направлении, м/с

$R$  - расстояние от центра вращения газового потока (оси циклона) до частицы, м,

$m$  - масса шаровой частицы  $(\pi d^3 \rho) / 6$ , кг,

$d$  - диаметр частицы, м,

$\mu$  - вязкость газа, Н×с/м<sup>2</sup>,

Через некоторое время после входа газового потока в циклон силы  $F_{\text{ц}}$  и  $F$  уравновешиваются.

$$v_p = \frac{d^2 \times v_T^2 \times \rho}{18 \times R \times \mu}$$

Наибольший путь пройдёт частица, которая ближе была к оси циклона (у выхлопной трубы), ее путь равен  $R_2 - R_1$ .

$$\frac{R_2 - R_1}{v_p} = \tau$$

$\tau$  - время прохождения этого пути, с,

$R_1$  - радиус выхлопной трубы циклона, м,

$R_2$  - радиус цилиндрической части циклона, м,

$R = (R_2 + R_1) / 2$  - принимаем, т.к.  $R$  - переменная величина,

Находим диаметр самых маленьких частиц, которые успеют пройти путь  $(R_2 - R_1)$  за время нахождения частицы в циклоне.

$$d_{\text{min}} = \sqrt{\frac{9 \times \mu \times (R_2 - R_1)}{\pi \times \rho \times v_T \times n}}$$

$n$  - число оборотов, которые совершает поток в циклоне,  $n = 2$ ,

Допущение: в приведенных формулах не учитывается коагуляция и другие сложные процессы, поэтому они дают примерные значения.

Рост скорости может привести не к увеличению улавливания, а к уменьшению, что можно рассчитать по формулам.

Коагуляция — желательное явление, т.к. улучшается улавливание пыли, применяют искусственную предварительную коагуляцию.

## 5. Конструкции циклонов

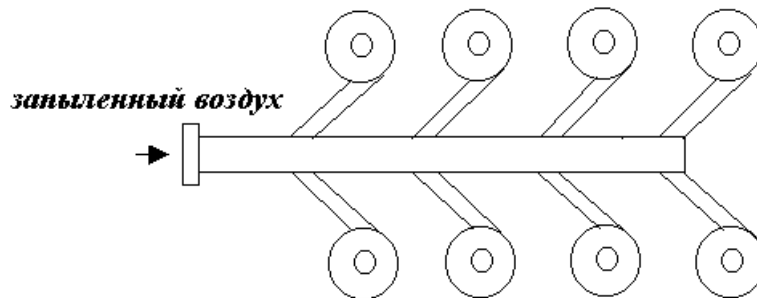
1. НИИОГаз — институт, который разработал циклоны различных модификаций. В основном это цилиндрические и конические циклоны.

ЦН -11, ЦН -15 ЦН - 15у, ЦН – 24.

11.,15,...24 — угол наклона крышки и патрубка, подводящего утепленный поток. Данные циклоны с удлиненной цилиндрической частью корпуса.

15у – с укороченной конической частью корпуса, он имеет худшие показатели, чем у 15, данный циклон применяют при ограничении по высоте. ЦН-11 предназначен для улавливания сухой, не слипающейся не волокнистой пыли. Наиболее эффективной конструкцией циклонов по сравнению с другими является ЦН-11.

Для улавливания взрывоопасной пыли циклоны выполняют по специальным чертежам, не имеют узлов, где могла бы скапливаться пыль и оборудованы нужным количеством взрывных клапанов. ЦН - могут работать одиночно или в группах по 2,4,6,8...



Фракционная эффективность для пыли размером 1-2 мкм – 50%, для пыли размером 20 мкм и более - 99,9%.

Конические циклоны НИИОГАЗ - СДК-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М, в которых удлиненная коническая часть, эти циклоны улавливают мелкодисперсную пыль, например, сажу.

2. Циклон СИОТ (Свердловский институт охраны труда).

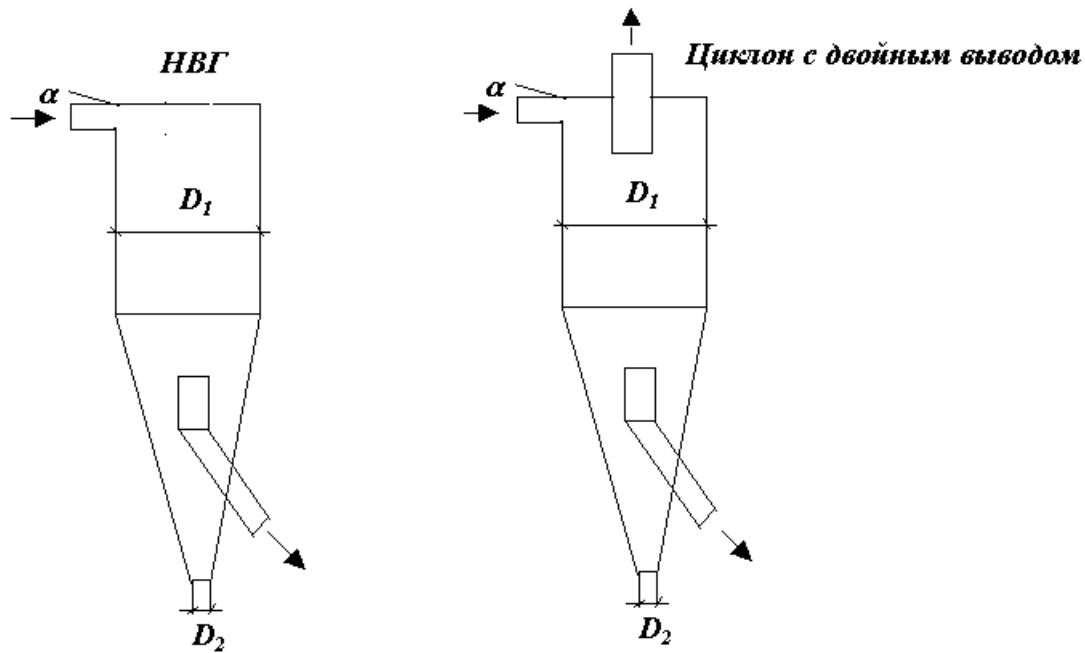
Имеют типоразмеры от № 1 до 7, лишены цилиндрической части, используются для не волокнистой, не слипающейся пыли.

3. Циклоны ВЦНИИОТ г.Москвы.

Применяют для улавливания сухой, не слипающейся, не волокнистой, абразивной пыли, например, сажи, тальк.

4. Циклоны с нижним и двойным выводом очищенного потока воздуха.

НВГ – нижний вывод газов, данный тип циклонов применяется при производстве синтетических моющих средств, при наличии пыли кокса в литейном производстве.



Циклоны с двойным выводом исследовались в г. Семибратово в филиале НИИОГаза, применение этого циклона приводит к снижению энергозатрат на очистку газов.

5. Циклоны, специально разработанные для определенных видов пыли.

а) Циклоны с коагулятором ЦКК, б) регулируемый циклон РЦ, в) циклоны с внутренней рециркуляцией ЦВР, разработанные в РИСИ (г. Ростов государственный строительный университет).

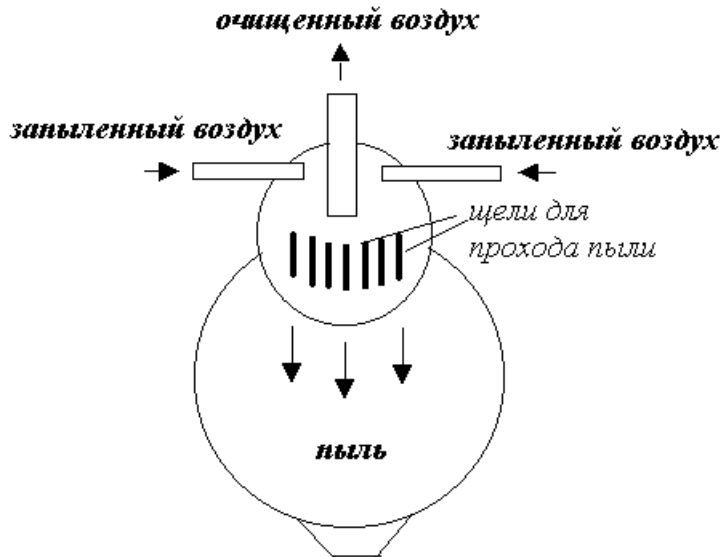
**а) ЦКК** - циклон с коагулятором применяется для улавливания волокнистой пыли (хлопок, деревообрабатывающее производство), эффективность 99% , выпускается 11 типоразмеров, конструкция циклона комбинированная - прямой конус, переходящий в обратный конус.

**б) РЦ** - регулируемый циклон, применяется для улавливания слипающейся, маслянистой пыли. Конструкция циклона представляет собой обратный конус с регулирующим устройством, влияющим на воздушный режим аппарата (направляющая лопатка под заданным углом). С помощью направляющей лопатки можно очищать внутреннюю поверхность циклона, поворачивая её несколько раз вверх на угол 135 градусов.

**в) ЦВР** – циклон с внутренней рециркуляцией, позволяет улавливать пыль сои, мелкодисперсная пыль, конструкция выполнена на базе циклона ЦН-15, в выхлопной трубе имеется винтообразная направленная лента. Через щелевое отверстие насыщенная пылью часть потока направляется на рециркуляцию и повторную очистку. Из-за внутренней циркуляции повышается эффективность циклона. Выпускаются типоразмеры от 1 до 10.



г) **Сферический циклон** – это циклон, корпус которого имеет сферическую форму, два патрубка в верхней части подводят запылённый воздух, в стенке сферы предусмотрены щели для выхода пыли в пылесборник. Пылесборник выполнен в виде сферы радиусом в 1,4 раза больше радиуса сферы главного корпуса. Эффективность - 98-99 % для пыли с размером частиц 10-50 мкм. При пылеулавливании происходит интенсивная коагуляция частиц.



### 6. Выбор и расчёт циклонов.

Выбирают циклоны по расчётной производительности аппарата и расчётной скорости газа (воздуха) при входе в циклон. Потери давления в циклоне определяются по формуле:

$$\Delta P = \zeta_{\text{вх}} \frac{v_{\text{вх}}^2 \rho}{2}$$

$v_{\text{вх}}$  - скорость воздуха во входном патрубке, м/с,

$\zeta_{\text{вх}}$  - коэффициент гидравлического сопротивления циклона.

Общее гидравлическое сопротивление циклона находят по условной скорости газа в циклоне -  $v_0$ , отнесённой к площади свободного сечения циклона (цилиндрической части).

$$\Delta P_{\text{ц}} = \zeta_0 \frac{v_0^2 \rho}{2}$$

$v_0 = 3-3,5$  м/с,

$\zeta_0$  - коэффициент гидравлического сопротивления циклона.

Для большинства циклонов  $\zeta_0$  постоянно и не зависит от  $Re$ , для ряда циклонов коэффициент гидравлического трения равен:

ЦН-11 -  $\zeta_0 = 250$

ЦН-15 -  $\zeta_0 = 160$

ЛИОТ -  $\zeta_0 = 460$

Для расчёта циклонов необходимы следующие исходные данные:

1. Расход газа (воздуха) подлежащего очистке  $L_p$ , м<sup>3</sup>/с,
2. плотность газа при рабочих условиях  $\rho_g$ , кг/м<sup>3</sup>,
- 3, Динамическая вязкость газа при рабочей температуре  $\mu_g$ , Па·с,
4. Дисперсный состав пыли:  $d_m$  и  $lg\sigma_c$ :  $d_m$  - такой размер пыли, при котором количество частиц крупнее  $d_m$  равно количеству частиц мельче  $d_m$ ,  $lg\sigma_c$  - среднее квадратичное отклонение в функции распределение частиц по размерам,
5. Запылённость газа  $c_{\text{вх}}$ , г/м<sup>3</sup>,
6. Плотность частиц  $\rho_c$ , кг/м<sup>3</sup>
7. Требуемая эффективность очистки газа  $\varepsilon$ , %

### 7. Последовательность расчёта циклонов:

1. Задаются типом циклона. Определяют оптимальную скорость  $v_{\text{опт}}$ .
2. Определяют необходимо площадь сечения циклона,  $\text{м}^2$ :

$$F = \frac{L_p}{v_{\text{опт}}}$$

3. Определяют диаметр циклона, м, задаваясь количеством циклонов  $N$ :

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,786 \times N}}$$

$D$  - округляют до целой величины.

4. Рассчитывают действительную скорость газа в циклоне:

$$v = \frac{L_p}{0,786 \times N \times D^2}$$

Скорость газа не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15 %.

5. Принимают коэффициент гидравлического трения. Вносят нужные поправки
6. Определяют потери давления в циклоне, Па

$$\Delta P = \zeta_{\text{ex}} \frac{v^2 \rho_{\Gamma}}{2}$$

Если потери давления приемлемы, то продолжают расчёт.

7. Принимая по таблицам значения  $d_{50}^T$  и  $\lg \sigma_{\varepsilon}^T$  для табличных условий, определяют значения при рабочих условиях (диаметр циклона, скорость потока, плотность пыли, динамическая вязкость газа) по уравнению:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{(D / D_T)(\rho_{\text{чт}} / \rho_{\text{ч}})(\mu / \mu_{\text{ч}})(v_T / v)}$$

8. Определяют параметр  $X$  по формуле:

$$X = \frac{\lg(d_m / d_{50})}{\lg^2 \sigma_{\varepsilon} + \lg^2 \sigma_{\text{ч}}}$$

9. По таблицам по параметру  $X$  находят значение  $\Phi(X)$ , которое представляет собой эффективность очистки газа в долях единицы, сравнивают полученное значение с требуемым и если не годится, берут другой циклон и повторяют расчет.

### 8. Батарейные циклоны (мультициклоны).

Состоят из большого количества циклонов небольшого диаметра, расположенных в одном корпусе с единым подводом и отводом газа (воздуха) и общим бункером, разделены на секции, которые могут отключаться или включаться по необходимости. Диаметры циклонов 100, 150, 250 мм. Подключение циклонов проводят по схеме, «винт» или «розетка». Подключение «розетка» более эффективна, но быстрее забивается пылью, чем «винт». Эффективность аппарата малого диаметра выше, чем большого, поэтому чаще применяют батарейный циклон, так как его габариты меньше, чем нескольких обычных циклонов. Недостаток батарейного циклона большой расход металла, неравномерное распределение очищаемого воздуха, что снижает эффективность. Применяется мультициклон для слабо и средне слипающей пыли, например, зола, цемент, доломит, известняк, шамот и др. Температура, при которой работает батарейный циклон до 400°C. Батарейный циклон БЦ - 2 включает в себя от 20 до 56 чугунных литых циклонных элемента диаметром 250 мм с направляющим аппаратом розетка,  $\xi_{\text{ц}}=90-85$ , допустимая концентрация пыли 15-100 г/м<sup>3</sup> в зависимости от диаметра и направляющего аппарата («винт» или «розетка»)

### 9. Ротационные пылеуловители.

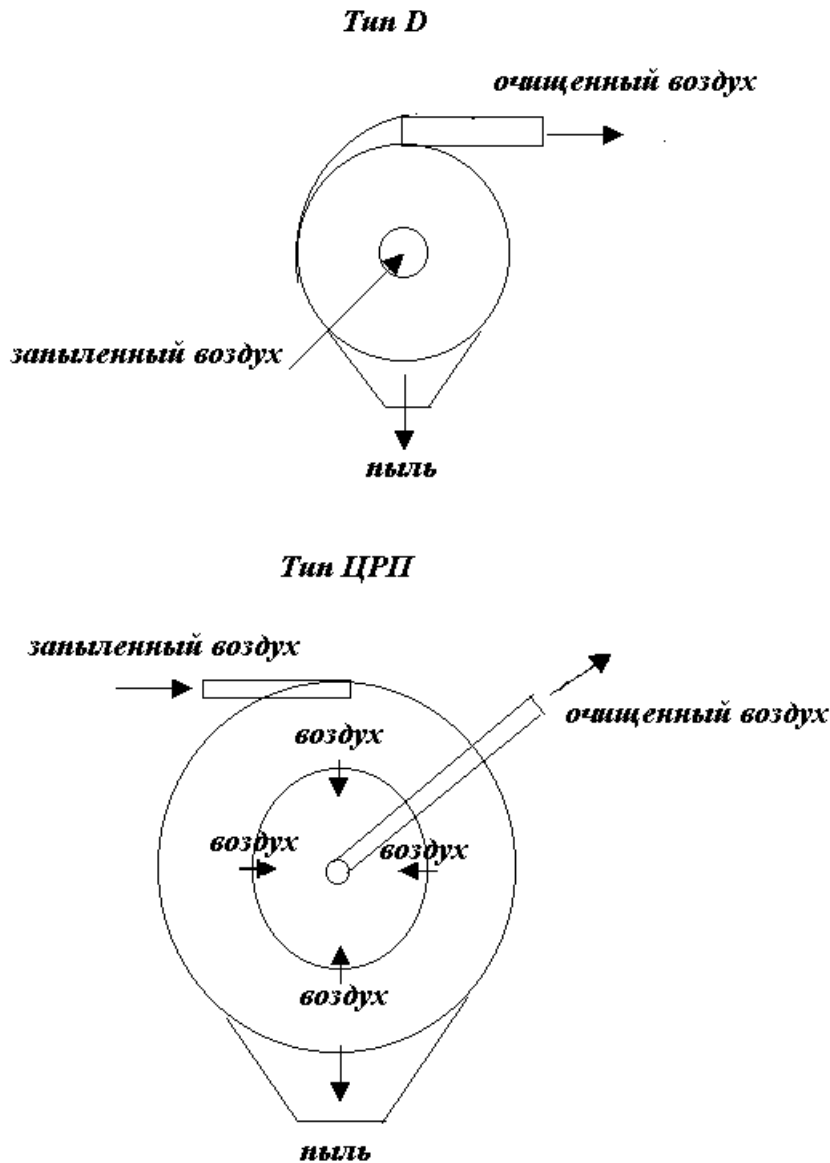
В ротационных пылеуловителях используются центробежные силы и силы Кориолиса, возникающие при вращении рабочего колеса аппарата. В одном аппарате совмещены вентилятор (побудитель) и пылеуловитель, поэтому аппарат достаточно компактен.

а) Ротационный пылеуловитель типа D работает так: поток поступает в центральную часть колеса, вращающегося в кожухе, пылевые частицы отбрасываются на периферию диска и поступают в пылесборник.

б) Ротационный пылеуловитель ЦРП (центробежный ротационный пылеуловитель) – загрязненный воздух поступает в барабан, который вращается. Улавливаемые частицы перемещаются в направлении обратному движению газов.

Применяется конструкции ротационных пылеуловителей с водой, где поток воздуха проходит через воду.

Ротационные пылеуловители применяют для не слипающейся и слабо слипающейся пыли, для пыли размером 8-12 мкм эффективность пылеулавливания 83%, для - 20 мкм эффективность пылеулавливания 97 %.

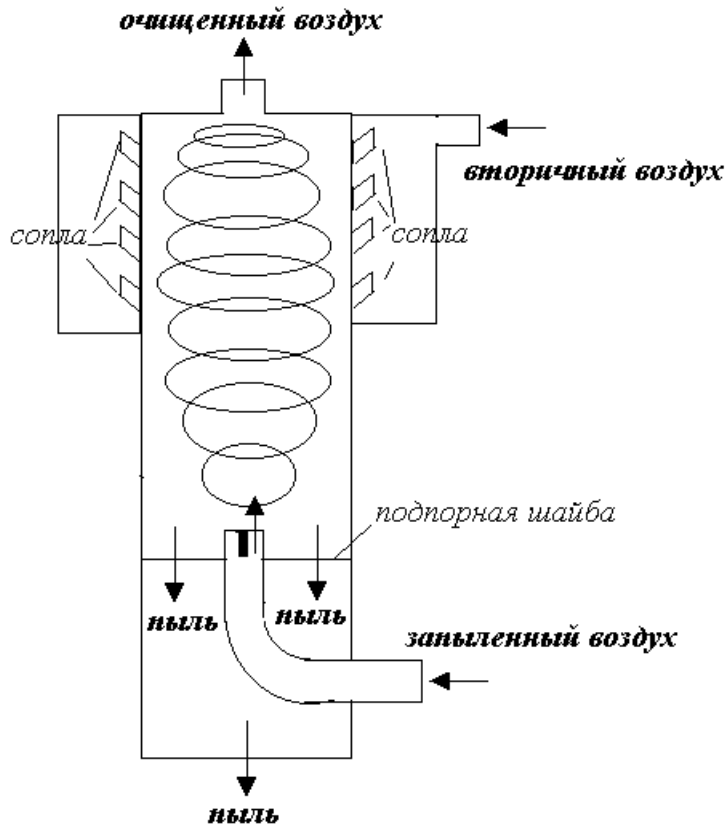


## 10. Вихревые пылеуловители.

Работа вихревых пылеуловителей основана на работе центробежных сил, отличаются от циклонов наличием вспомогательного вихревого потока.

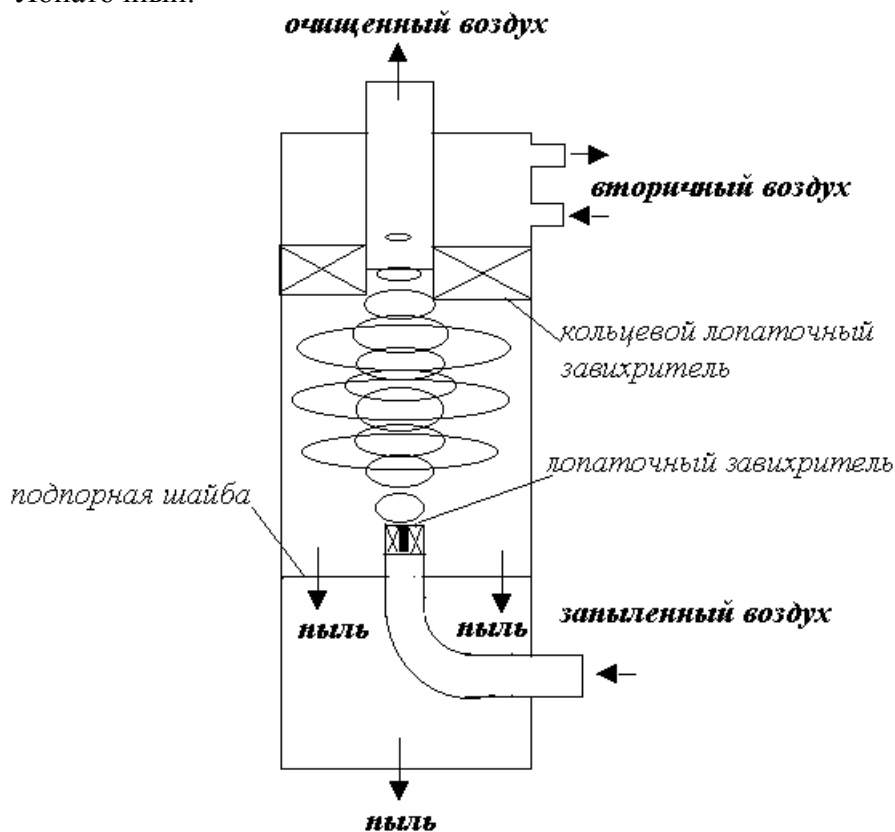
Существуют два вида ротационных пылеуловителей: 1) сопловые и 2) лопаточные.

## 1) Сопловой.



Отброшенные к стенкам корпуса частицы захватываются спиральным потоком вторичного воздуха (газа) и вместе с ним движутся в бункер, где отделяются, частицы поступают в бункер, а воздух снова поступает на очистку. Давление вторичного воздуха больше на 30-40 кПа атмосферного. Сопла для вторичного воздуха располагают по нисходящей спирали.

## 2) Лопаточный.



В аппарате лопаточного типа вторичный воздух, отобранный с периферии очищенного потока, подаётся кольцевым направляющим аппаратом с наклонными лопатками, более эффективен, чем сопловой. Применяют для очистки от мелкодисперсной пыли в химической, нефтехимической, пищевой, горнорудной промышленности. Аппарат более компактен, чем сопловой пылеуловитель, температура воздуха до 700°С. Износа аппарата не наблюдается из-за особенностей его воздушного режима. Эффективность пылеулавливания для пыли размером 4 мкм – 98%, для пыли - 32 мкм – 99,8%. В аппарате происходит сухая очистка газов. Пригоден для очистки от: синтетического порошка, целлюлозы, стирального порошка, карбоната кальция, эпоксидной смолы, полиакрилонитрила и др., производительность от 300 до 30000 м<sup>3</sup>/ч.

### 11. Фильтрационные пылеуловители.

Фильтрация запыленного воздуха происходит при прохождении газа через слой пористого материала, фильтрующий слой: ткань, гравий, кокс и др.

Фильтры бывают: 1) волокнистые, 2) тканевые, 3) зернистые.

**1) Волокнистые фильтры** состоят тонких волокон, которые могут улавливать мелкодисперсную и особомелкодисперсную пыль с концентрацией 0,5 – 5 мг/м<sup>3</sup>.

Волокнистые фильтры бывают: тонковолокнистые, глубокие, грубоволокнистые.

**Тонковолокнистые** фильтры служат для улавливания высокодисперсной пыли и других аэрозольных частиц размером 0,05 – 0,1 мкм с эффективностью не менее 99%. Фильтровальный материал фильтр Петрянова ФП - ПФТС — 500, производительность 200-1200 м<sup>3</sup>/ч, сопротивление 200-1000 Па, температура более 60°С. Недосток - короткий срок службы.

**Глубокие** фильтры рассчитаны на 10-20 лет службы, состоят из нескольких слоёв фильтровальных материалов, первый слой состоит из грубых волокон, а последний слой состоит из тонких волокон, применяют в медицинской промышленности, стерилизуют данные фильтры острым паром, сушат сухим воздухом.

**Грубоволокнистые** фильтры, выполняют роль предфильтров, устанавливают их перед тонковолокнистыми фильтрами, из-за чего снижается стоимость очистки, т.к. стоимость грубоволокнистых фильтров в 10 раз ниже стоимости тонковолокнистых. фильтров и их легче заменять или регенерировать. Состоит грубоволокнистый фильтр из смеси волокон диаметром от 1 до 20 мкм.

**2. Фильтры-туманоуловители.** Туманы образуются при испарении масел, кислот, хлора и др. Жидкие частицы в тумане имеют размер менее 10 мкм. Применяют волокнистые фильтры туманоуловители с непрерывным выводом уловленной жидкости. Существуют два типа фильтров-туманоуловителей: а) низкоскоростные фильтры — грубые и тонкие волокна между двумя проволочными сетками, а между ними волокна; б) высокоскоростные фильтры-туманоуловители, состоящий из каркаса с поддоном, куда стекает жидкость. Фильтрующий слой — иглопробивные материалы — войлоки: полипропиленовый войлок толщина слоя 3-12 мм, диаметр волокон 20-75 мм, гидравлическое сопротивление 500 Па, эффективность 3 мкм и более 100 %.

**3.Тканевые фильтры.** Применяются тканевые рукавные фильтры, которые могут обрабатывать большие объемы воздуха со значительной концентрацией пыли. Может улавливать частицы размером, менее 1 мкм. Данный вид фильтров является одним из основных видов пылеулавливающего оборудования. Применяются рукавные фильтры в черной и цветной металлургии, химической промышленности, в промышленности строительных материалов, в пищевой промышленности, в энергетических установках и пр. Выпускаются **всасывающие** рукавные фильтры — их устанавливают до вентилятора, их недостаток - значительные подсосы воздуха.

Разработаны и применяются **нагнетательные** рукавные фильтры, которые устанавливают после вентилятора, их недостаток в том, что пыль может попадать в помещение из-за неплотностей в рукавах.

### 4. Фильтровальные ткани.

Чистая ткань не дает эффективную очистку. Несколько циклов (запыление-регенерация) дает ткани рабочее состояние. Процесс «утомления» ткани имеет место при накоплении в ткани грубых и острых частиц. При сочетании циклон — рукавные фильтры

растёт срок службы ткани. Ткань должна обладать рядом свойств: 1- воздушная нагрузка, 2 - высокая пылеемкость, 3 - способность регенерации, 4 - высокая долговечность, 5 - невысокой стоимостью, 6 - стойкость к химическим веществам, 7 - стойкость и высокой температуры.

Виды волокон в тканях:

1. шерстяные - применяют при температуре газов до 70-80°C, химически не стойки,
2. льняные,
3. хлопчатобумажные - применяют при температуре газов до 120-130°C, химически не стойки,
4. межовые,
5. лавсан - применяют при температуре газов до 120-130 °C, химически стойки,
6. нитрон - применяют при температуре газов до 120-130 °C, химически стойки,
7. капрон,
8. хлорит,
9. асбест - применяют при температуре газов до 600 °C, химически стойки,
10. стеклоткань - применяют при температуре газов до 150-160°C,
11. металлоткань.

Пример рукавный фильтр с механической регенерацией и обратной продувкой -ГЧ – БФМ.

**5. Индивидуальный обеспыливающий агрегат ЗИЛ - 900** , применяется для очистки воздуха от шлифовальных и заточных станков, в нем применена двухступенчатая очистка воздуха - циклон с рукавным фильтром.

**6. Зернистые фильтры.** В данных фильтрах применяются зёрна сферической или другой формы, разрешается использовать при высоких температурах до 500 – 800°C и с агрессивной средой.

Разработаны два вида зернистых фильтров – насыпные и жесткие.

**Насыпные** фильтры, где элементы не связаны жестко, применяются следующие материалы (песок, гравий, шлак, кокс, крошки резины, пластмасса).

**Жесткие** фильтры, в которых элементы связаны путём спекания, прессования, склеивания, могут быть керамические, металлокерамические. Недостаток таких фильтров высокая цена, высокое гидравлическое сопротивление, трудность с регенерацией.

### **7. Мокрые пылеуловители.**

При контакте с раздробленной жидкостью или с плёнкой жидкости происходит осаждение пыли. Мокрая очистка более эффективна, чем сухая, при этом улавливаются частицы размером менее 1 мкм.

Мокрые пылеуловители бывают следующего типа:

1. полые скрубберы,
2. насадочные скрубберы,
3. барабанные и пенные аппараты,
4. аппараты ударно-инерционного действия (ротокланы),
5. аппараты центробежного действия,
6. Скоростные аппараты.

#### **1. Скрубберы**

а) В полых скрубберах диаметр зоны орошения одной форсунки 500 мм, расход жидкости 2-2,5 л/м<sup>3</sup> воздуха, гидравлическое сопротивление  $P = 200 - 250$  Па, применяются в металлургии.

б) В насадочных скрубберах применяются насадки в виде колец из керамики, фарфора, кокса, кварца и др. Наличие насадок приводит к увеличению поверхности контакта газа с жидкостью.

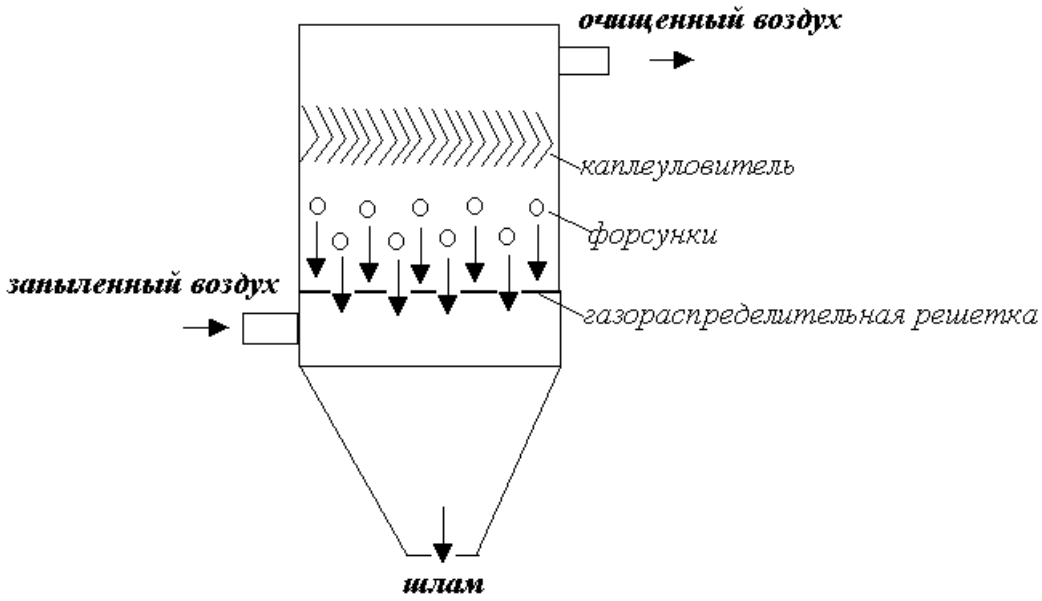
Сопротивление насадки можно определить по формуле:

$$\Delta P = \zeta_n \frac{H \times v^2 \times \rho_{\Gamma}}{2 \times S_o^2 \times d_o}$$

H - высота слоя насадки, м,

v - скорость газа, м/с,

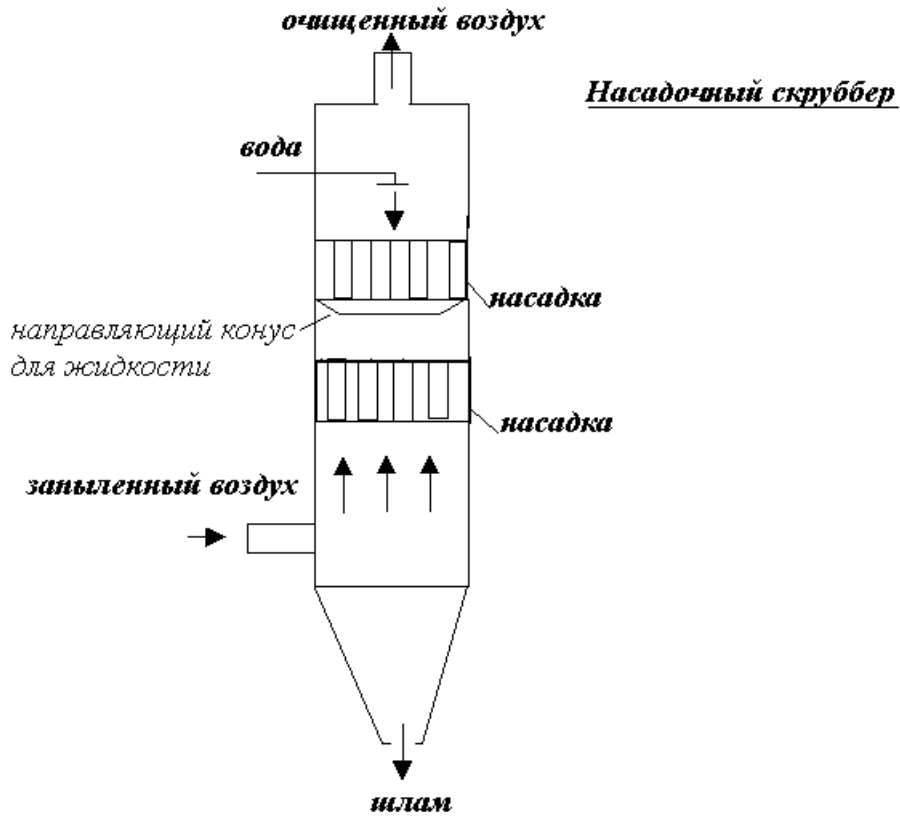
d<sub>o</sub> - эквивалентный диаметр насадки, м,

**Полый скруббер**

$\rho$  - плотность газа, кг/м<sup>3</sup>,

$\zeta$  - коэффициент сопротивления насадки.

На 1 м<sup>2</sup> насадки требуется 20 м<sup>3</sup>/ч воды, может применяться насадка из шаров.



Более надёжны центробежные скрубберы и циклоны с водяной плёнкой ЦВП

Существуют следующие виды мокрых пылеуловителей: циклон-промыватель СИОТ, скоростные пылеуловители с трубкой Вентури (СПУ Вентури), пенно-капельный пылеуловитель РИСИ, пенные пылеуловители.

Дополнительные затраты для мокрых пылеуловителей требуются на организацию водного хозяйства системы мокрой очистки, шламовое хозяйство, обратное водоснабжение, необходимы также очистные сооружения.

### **Электро пылеуловители**

**Биофильтры** работают за счёт жизнедеятельности микроорганизмов, которые живут в компосте, земле, торфе, кора деревьев и пр. Активность микроорганизмов зависит от температуры, влажности, кислотности среды,  $O_2$ , и пр. Микроорганизмы разлагают вредные вещества на безопасные. Биофильтры — это многэтажные сооружения, эффективность очистки 99 %, производительность - 1000 - 25000 м<sup>3</sup>/ч, обезвреживаются: органические растворители, газы в химической, нефтехимической, табачной, фармацевтической промышленности.

Вопросы для самоконтроля.

1. Классификация аппаратов для пылеочистки.
2. Эффективность аппаратов для пылеочистки.
3. Циклоны.
4. Скрубберы.
5. Пористые фильтры.
6. Инерционные пылеуловители.
7. Вихревые пылеуловители.
8. Электрические пылеулавители.

**Проект по разделу «охрана окружающей среды» состоит из следующих разделов (пособие к СНиП 11-01-95):**

### **1. Охрана атмосферного воздуха от загрязнения.**

- 1.1 Общие сведения о предприятии, очередность строительства и пусковые комплексы.
- 1.2 Краткая характеристика физико-географических и климатических условий района и площадки строительства.
- 1.3 Характеристика источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.
- 1.4 Характеристика источников выбросов загрязняющих веществ.
- 1.5 Обоснование данных о выбросах вредных веществ.
- 1.6 Комплекс мероприятий по уменьшению выбросов в атмосферу.
- 1.7 Характеристика мероприятий по регулированию выбросов в периоды особо неблагоприятных метеорологических условий (НМУ).
- 1.8 Расчет и анализ величин приземных концентраций, загрязняющих веществ.



- 1.9 Предложения по установлению предельно допустимых выбросов (ПДВ) и временно согласованных выбросов (ВСВ) для предприятия.
- 1.10 Методы и средства контроля за состоянием воздушного бассейна.
- 1.11 Обоснование принятого размера санитарно-защитной зоны (СЗЗ).
- 1.12 Сведения о сметной стоимости объектов и работ, связанных с осуществлением воздухоохраных мероприятий.
- 1.13 Оценка экономической эффективности воздухоохраных мероприятий и проектируемых сооружений и устройств.
- 1.14 Организация работ по составлению подраздела.
- 1.15 Состав пояснительной записки по отдельным производствам.
- 1.16 Мероприятия по защите от шума и других вредных физических воздействий.
- 1.17 Выводы
- 1.18 Приложения
- 2. Охрана поверхностных и подземных вод от загрязнения и истощения.**
- 2.1 Характеристика современного состояния водного объекта.
- 2.2 Краткая характеристика проектируемого предприятия.
- 2.3 Мероприятия по охране и рациональному использованию водных ресурсов.
- 2.4 Водопотребление и водоотведение предприятия.
- 2.5 Объемы и характеристика сточных вод.
- 2.6 Обоснование проектных решений по очистке сточных вод.
- 2.7 Очистные сооружения и установки.
- 2.8 Баланс водопотребления и водоотведения по предприятию в целом и по основным производственным процессам.
- 2.9 Показатели использования водных ресурсов в проектируемом предприятии.
- 2.10 Сброс сточных вод.
- 2.11 Обработка, складирование и использование осадков сточных вод.
- 2.12 Предложения по предупреждению аварийных сбросов сточных вод.
- 2.13 Контроль водопотребления и водоотведения.
- 2.14 Гидрогеологическая характеристика района, гидрогеологический разрез, характеристика водоносных и водоупорных горизонтов.
- 2.15 Современное состояние подземных вод территории, фоновые концентрации загрязняющих веществ в подземных водах.
- 2.16 Виды воздействия проектируемой деятельности на подземные воды.
- 2.17 Математическое моделирование гидродинамических процессов территории размещения объекта.
- 2.18 Мероприятия по охране подземных вод.
- 2.19 Обоснованность принятых в проекте технических решений по охране подземных вод от загрязнения и истощения.
- 2.20 Рыбоохраные мероприятия.
- 2.21 Водоохраные мероприятия при сооружении и эксплуатации водохранилищ охладителей, естественных водоемов.
- 2.22 Водоохраные мероприятия при сооружении и эксплуатации водохранилищ комплексного использования.
- 2.23 Водоохраные зоны и прибрежные полосы.
- 2.24 Мероприятия по охране руслового режима водного объекта в районе водозабора.
- 2.25 Данные о сметной стоимости объектов и мероприятий по охране и рациональному использованию водных ресурсов.
- 2.26 Оценка эколого-экономической эффективности.
- 2.27 Выводы
- 2.28 Приложения.
- 3. Восстановление (рекультивация) земельного участка, использование плодородного слоя почвы, охрана недр, растительного и животного мира.**
- 3.1 Рекультивация нарушенных земель, использование плодородного слоя почвы.
- 3.2 Мероприятия по охране почв от отходов производства.
- 3.3 Охрана недр.

- 3.4 Охрана животного мира.
- 3.5 Охрана растительного мира.
- 3.6 Данные о сметной стоимости объектов и мероприятий по восстановлению земельного участка, охране недр, животного и растительного мира.
- 4. Отходы хозяйственной деятельности, их переработка (складирование).**
- 4.1 Перечень отходов производства и потребления при строительстве и эксплуатации проектируемого объекта.
- 4.2 Технологическая схема производства (способы складирования, размещения, захоронения и утилизации отходов).
- 4.3 Видовой состав отходов, сведения о физико-химическом состоянии, токсичности, пожаровзрывоопасности, данные о ежегодном объеме образования отходов.
- 4.4 Предложения по снижению токсичности образующихся отходов.
- 4.5 Радиационно-дозиметрический контроль, мониторинговые наблюдения.
- 4.6 Документальное подтверждение (договор) вывоза образующегося на проектируемом предприятии отходов.
- 4.7 Предложения по лимиту образования отходов.
- 4.8 Выводы.
- 4.9 Приложения.
- 4.10
- 5. Экономическая эффективность природоохранных мероприятий.**
- 5.1 Определение экономической эффективности природоохранных мероприятий.
- 5.2 Оценка предотвращенного ущерба.

### **Инструкция пользователю**

#### **К программе по расчету рассеивания вредных примесей в приземном слое атмосферы “ЭКОЛОГ”**

1. Необходимо загрузить программу из Нортон командера или WINDOWS. Программа работает если на экране появится заставка “ЭКОЛОГ” после чего необходимо нажать ENTER.
2. Перед вами будет стандартная заставка с меню, по которому можно перемещать курсор с помощью стрелок вправо влево. Из раздела СЛОВАРЬ ПРИМЕСЕЙ необходимо выписать коды примесей, которые имеют место в источнике, для попадания в словарь примесей стрелкой на право перевести курсор и нажать ENTER. В СЛОВАРЕ ПРИМЕСЕЙ указаны коды разнообразных примесей , чтобы найти необходимую примесь или визуалью или с использованием клавиши F6 после нажатия которой нужно ввести название примеси, если такой примеси нет в СЛОВАРЕ, то необходимо ее заменить на другую или после консультации у преподавателя завести с требуемым набором данных в словарь. Выход из СЛОВАРЯ ПРИМЕСЕЙ - F3.
3. Затем необходимо остановиться на разделе меню ВЫБОР ОБЪЕКТА (КАТАЛОГ), после чего нажать ENTER.
4. Следующий шаг - необходимо завести номер и имя нового объекта или найти нужный из имеющихся. Чтобы завести новый объект необходимо произвести следующие операции: нажать клавишу F4 занести любой двухзначный номер (отличный от имеющихся в колонке) нажать ENTER после чего появиться сообщение НЕ НАЙДЕН СОЗДАТЬ? ДА НЕТ выбрать ДА и нажать ENTER два раза и цифру 2 и ENTER, после чего вы увидите новую пустую строку, в начале которой имеется номер вами заданный.
5. Необходимо ввести данные в колонки строки, перемещаясь из колонки в колонку стрелками вправо и влево, внизу таблицы имеются подсказки (что необходимо заносить в ту или иную колонку). В колонке название объекта ввести фамилию студента выполняющего расчет, значения следующих колонок будут участвовать в расчете и их необходимо вносить с учетом данных при выполнении курсового

- проекта. Заполнение данными всех колонок производится после нажатия клавиши ПРОБЕЛ, после каждой операции нажимать ENTER последняя колонка не заполняется и не изменяется.
6. После заполнения всех колонок таблицы нажать клавиши F5 и F3, появиться таблица с введенными данными и вопрос БУДЕТЕ РЕДАКТИРОВАТЬ - ДА НЕТ (стрелки вправо влево) выбрать НЕТ и нажать ENTER, если необходимо изменить данные, то выбрать ДА и нажать ENTER, клавишей ENTER перевести курсор в нужную строку и внести изменения, затем клавишей ENTER перейти в строку ДА НЕТ выбрать НЕТ и нажать ENTER, появиться табличка УКАЖИТЕ ВРЕМЯ ГОДА ЛЕТО ЗИМА стрелками влево вправо выбрать и нажать ENTER, после чего появиться первоначальная таблица с меню в виде горизонтальной строки, перевести курсор стрелкой вправо в раздел РАБОТА С ОБЪЕКТОМ и нажать ENTER, после чего появиться таблица с новым горизонтальным меню, выбрать раздел ИСТОЧНИКИ, ПЛОЩАДКИ, ПРЕДПРИЯТИЯ и нажать ENTER.
  7. Перед вами появиться новая таблица, посвященная параметрам источников на промпредприятии, которая имеет много колонок по горизонтали, перемещаться из колонки в колонку стрелками вправо влево. Первые три колонки для каждой строки заполняются с помощью клавиши F4 – необходимо ввести номер площадки, номер предприятия, номер источника на данном предприятии (например на предприятии с двумя источниками вредных примесей первая строка - площадка №0, предприятие №0, источник №1, вторая строка - площадка №0, предприятие №0, источник №2). Четвертая колонка посвящена выбору типа источника 1 – точечный, 2 – линейный, 3 – пылящий, 4 – площадной. В следующей колонке нужно указать название источника нажав ПРОБЕЛ, после ввода названия нажмите ENTER, таким образом вводятся значения в каждую колонку практически всех таблиц программы, если способ ввода другой, то появиться подсказка в нижнем левом углу экрана. Далее вводятся высота источника, диаметр устья трубы, объем газовой смеси поступающей из источника в м<sup>3</sup>/с, скорость выхода газовой смеси рассчитывается автоматически программой, температура газовой смеси, выходящей из источника (не может быть ниже температуры наружного воздуха), следующие четыре колонки посвящены координатам источника, которые нужно взять с плана площадки, на которой расположено промпредприятие (если источник точечный, то заполняются только две колонки X1 и Y1, при этом в двух других колонках будет X2=X1 и Y2=Y1, следующая колонка **“ширина” не заполняется!**; если источник площадной, то вводятся координаты середин противоположных сторон X1 и Y1, X2 и Y2 и заполняется следующая колонка **“ширина”** площадного источника), далее вводится коэффициент источника рельефа. Следующие колонки посвящены примесям, имеющимся в источнике: колонка **“количество примесей”** не заполняется, далее вводятся коды примесей и масса (40 колонок). Всего в одном источнике примесей может быть не более 20 примесей. Для каждой примеси в источнике предусмотрены две колонки: для кода примеси из СЛОВАРЯ ПРИМЕСЕЙ и массы вредной примеси в кг. Следующие затем колонки таблицы не заполняются. После заполнения таблицы нажать клавишу F3, после чего появиться сообщение КООРДИНАТЫ ПРОВЕРЯТЬ? ДА? НЕТ? выбрать и нажать ENTER, на следующем шаге появиться горизонтальное меню ИСТОЧНИКИ, ПЛОЩАДКИ, ПРЕДПРИЯТИЯ ФОН ГРАФИКА РАСЧЕТ ПЕЧАТЬ ВЫХОД перевести курсор клавишами со стрелками в раздел ФОН и нажать ENTER.
  8. Если при расчете учитывается фон местности то в разделе ФОН заполняются таблицы с номерами и координатами постов для контроля концентраций вредных примесей. Если фон при расчете не учитывается, то данный пункт меню можно пропустить. Выход из раздела ФОН нажатием клавиши F3.
  9. Следующий раздел горизонтального меню который необходим для продолжения расчета – РАСЧЕТ, необходимо подвести курсор и нажать ENTER, после этого появиться таблица-меню, где первый пункт ВЫБОР ВАРИАНТА. Необходимо нажать ENTER, появиться таблица вариантов с №1 здесь в колонке КОММЕНТАРИЙ

- можно написать сообщение о особенностях данного варианта расчета при многовариантных расчетах для чего курсор передвигают стрелкой вправо и нажав ПРОБЕЛ вводят текст, затем нужно нажать ENTER. При многовариантном расчете стрелкой вверх-вниз перевести курсор на нужный вариант. После выбора нужного варианта необходимо последовательно нажать клавиши F5 и F3.
10. Используя стрелки вверх-вниз перевести курсор в раздел ПРИМЕСИ/ ГРУППЫ/ ФОН и нажать ENTER (так для всех разделов меню). Необходимо ввести в первую колонку верхней таблицы коды всех примесей, которые участвуют в расчете, используя клавиши F4, ПРОБЕЛ и ENTER. Для использования словаря примесей в нижней таблице использовать клавишу F6, выход из словаря примесей клавиша ТАВ, выход из раздела клавиша F3.
  11. Следующий раздел РАСЧЕТНЫЕ ПЛОЩАДКИ посвящен расчетным площадкам в приземном слое атмосферы которых рассчитывается рассеивание вредной примеси. Нажмите клавишу F4 и в появившуюся таблицу внесите номер площадки (например №1) и нажмите 3 раза клавишу ENTER, после чего появится строка с нулями, готовая для внесения необходимых данных. Вводятся координаты середин противоположных сторон X1 и Y1, X2 и Y2, шаг по длине, “ширина”, шаг по ширине площадки. Шаг для расчета необходимо выбирать не мелкий и не крупный (например 50 или 100 м.) По окончании заполнения таблицы нажмите клавишу F3.
  12. РАСЧЕТНЫЕ ТОЧКИ – если есть координаты точек на площадке в которых необходимо знать значение концентрации вредных примесей, то необходимо заполнить данный раздел, если расчетных точек нет, то необходимо пропустить этот раздел. При заполнении данного раздела использовать клавишу F4, для выхода использовать клавишу F3.
  13. МЕТЕОПАРАМЕТРЫ. Для перемещения по таблицам использовать клавишу ТАВ, для заполнения таблиц стандартным набором данных использовать клавиши F4 и ENTER, при корректировке стандартных данных использовать клавиши ПРОБЕЛ и ENTER, для выхода использовать клавишу F3.
  14. ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ. В последнем столбце таблицы, которая появится при открытии данного раздела меню, для каждого источника вредных примесей, который участвует в данном варианте расчета, знак “=” надо заменить на знак “+”, после чего для выхода нажать клавишу F3.
  15. РАСЧЕТНЫЕ КОНСТАНТЫ. В данном разделе можно ввести площадь города, если рассматриваемая площадка с источниками вредных примесей находится в городе, если нет, то оставить 0, остальные константы предлагается не менять, замена возможна при согласовании с преподавателем.
  16. ВКЛАДЫ. Данный раздел используется если имеются несколько предприятий с источниками вредной примеси на данной площадке и необходимо знать вклад каждого предприятия на значение концентрации вредной примеси в приземном слое атмосферы. При наличии одного предприятия на площадке данный раздел можно пропустить.
  17. РАСЧЕТ. После нажатия ENTER необходимо нажимать ПРОБЕЛ и на экране будут мелькать различные исходные данные, программа будет проверять эти данные на наличие ошибок. Если все правильно, то появится сообщение, ОШИБОК НЕ ОБНАРУЖЕНО. НАЧИНАТЬ РАСЧЕТ. (Д-У/Н-N). Если включен русский язык нажать букву Д, если – английский нажать букву У, если по каким-либо причинам расчет проводить не надо, то нажать соответственно Н или N. Расчет будет продолжаться некоторое время, после чего появится меню, где необходимо перейти в раздел РЕЗУЛЬТАТ.
  18. РЕЗУЛЬТАТ. В данном разделе по каждой площадке и каждой примеси в узлах сетки, заданной для расчета, будут в табличной форме записаны расчетные значения концентрации вредной примеси в долях ПДК и мг/м<sup>3</sup>. После входа в раздел РЕЗУЛЬТАТ появится вертикальное меню, по которому курсор перемещается стрелками вверх-вниз, что позволяет выбрать нужный раздел нажав

клавишу ENTER, после чего в следующем горизонтальном меню выбрать нужный вариант и нажать ENTER, для выхода из таблицы с значениями концентраций вредной примеси нажать клавишу F3. Переведя курсор вверх по вертикальному меню остановить на пункте ВЫХОД и нажать ENTER. Перейти в раздел ВЫХОД и нажать ENTER.

19. В горизонтальном меню выбрать раздел ГРАФИКА и нажать ENTER, после чего появиться таблица с вертикальным меню, где нужно выбрать строку с той или иной примесью, по которой проводился расчет и нажать ENTER, появиться новое горизонтальное меню, из которого выбрать первый пункт и нажать ENTER, появиться еще одно вертикальное меню, в котором надо выбрать первый пункт и нажать ENTER. После чего появиться результат расчетов в виде плана площадки с нанесением изолиний равных концентраций примеси (если результатов расчетов мало, то использование данного раздела может быть недоступно). Перемещая курсор по полю площадки можно визуалью в любой точке проверить значение концентрации вредной примеси и зафиксировать эти значения в нужных точках нажатием клавиши ENTER. После этого необходимо просмотреть результаты расчетов по всем примесям, которые были заданы в данном расчете. Планы площадок, на которых имеются не нулевые значения концентрации вредной примеси при необходимости можно распечатать на принтере. Для печати графического результата расчета необходимо после просмотра картинки нажать два раза клавишу ESC и оказавшись во втором горизонтальном меню перейти в пункт НАПЕЧАТАТЬ ТОЛЬКО ЧТО НАРИСОВАННЫЙ ГРАФИК и при подсоединенном и включенном принтере, готовом к печати, нажать 2 раза ENTER. Для каждого графика необходимо повторить последовательно пройдя по разделам необходимых горизонтальных меню. Для выхода из раздела ГРАФИКА после окончания печати необходимо нажать три раза клавишу ESC.
20. ПЕЧАТЬ. Как правило достаточно напечатать графики с изолиниями равных концентраций вредных примесей. При необходимости можно в табличной форме распечатать результаты расчетов.
21. Для ВЫХОДА из программы необходимо перевести курсор на раздел ВЫХОД и нажать ENTER, после чего в следующем горизонтальном меню перевести курсор в раздел ВЫХОД и нажать ENTER 2 раза. На этом работа программы ЭКОЛОГ будет завершена.

Вопросы для самоконтроля.

1. Состав проекта «Охрана воздушного бассейна»
2. Назначение программы «Эколог»

Литература

1. Рекомендации по оформлению и содержанию проекта нормативов предельно-допустимых выбросов в атмосферу (ПДВ) для предприятия /Госкомитет СССР по охране природы.- М.,1989.-42с.
2. Штокман А.Е. Очистка воздуха. АСВ, 1999.
3. Уточнения к действующим нормативным документам по вопросам нормирования выбросов вредных веществ в атмосферу/Минэкологии России.-М.,1992.
4. Письмо Госкомитета РФ по охране окружающей среды. «О деноминации базовых нормативов платы» № 05-14/29-3621 от 20.11.97 г.
5. СанПиН 2.2.1/2.1.1.567—96 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов». Утверждены и введены в действие Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 41. М.: Информ.-изд. Центр Минздрава России, 1997.- 47с.
6. РД 52.04-52-85 Регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях. – Л.6 гидрометеоздат, 1987.-53с.

## Практические занятия

### Пример 1. Расчет электрофильтра

Определить эффективность электрофильтрации отбросных газов сордорегенерационного котлоагрегата (СРКА) целлюлозно-бумажного комбината и параметры работы электрофильтра.

#### Решение.

Выбираем из действующих каталогов электрофильтр ЭГ2-2-4-37 СРК, специально предназначенный для очистки выбросов СРКА. По маркировке определяем некоторые из необходимых конструктивных параметров:

- количество полей-2 (вторая цифра),
- активная длина каждого поля 4 м (третья цифра),
- площадь активного сечения  $37 \text{ м}^2$ .

По табличным данным принимаем общую площадь осаждения ( $2256 \text{ м}^2$ ) и габариты электрофильтра (12,6x9,55x14,84). По каталожному описанию скорость газов до 1 м/с, температура  $130...250^\circ\text{C}$ , запыленность на входе до  $7 \text{ г/м}^3$ , разрежение до 3 кПа, гидравлическое сопротивление аппарата 200 Па. Степень очистки при этих условиях предположительно может достигать 98%.

Осадительные электроды электрофильтра плоские, коронирующие выполнены в виде трубчатых рам с ленточно-игольчатыми или зубчатыми элементами. Высота электродов 7200 мм, расстояние между осадительными электродами 300 мм. Регенерация производится механическим встряхиванием. Принимаем интервал между встряхиваниями в 4 часа.

Предполагая, что по габаритам аппарат можно разместить на производственной площадке, сопоставим его характеристики с заданными параметрами обрабатываемых газов. Исходная запыленность составляет  $4,1 \text{ г/м}^3$ , а количество газов  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ , что находится в пределах допустимого для выбранного типа электрофильтра. Заданная температура газов ( $140^\circ\text{C}$ ) также соответствует показателям аппарата. Заметим, что в данном случае важен не только верхний, но и нижний температурный предел вследствие повышенной влажности обрабатываемых газов и возможной конденсации паров при температурах ниже  $130^\circ\text{C}$ . Можно

констатировать, что по техническим параметрам выбранный тип аппарата удовлетворяет заданным условиям, что позволяет перейти к *расчету полного коэффициента очистки*:

1) Подсчитываем скорость газов в активном сечении

$$w = \frac{W}{f},$$

Где  $W$  - количество газов  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $f$  - площадь активного сечения  $37 \text{ м}^2$ , получим

$$w = \frac{W}{f} = \frac{5}{37} = 0,135 \text{ м/с}$$

Относительная скорость газов:

$$w_{rl} = \frac{w}{1},$$

Где  $w$  - скорость газов в активном сечении,

$$w_{rl} = \frac{w}{1} = \frac{0,135}{1} = 0,135$$

Относительная длина электродов будет равна:

$$h_{rl} = \frac{h}{8}$$

где  $h$  – высота электродов  $7200 \text{ мм}$  ( $7,2 \text{ м}$ ),

$$h_{rl} = \frac{h}{8} = \frac{7,2}{8} = 0,9 \text{ м}$$

Определим ориентировочную величину пылеемкости электродов:

$$m = \frac{W \cdot z \cdot t \cdot \varphi}{F},$$

где  $W$  – количество газов  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $z$  – исходная запыленность  $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $t$  – время между регенерациями равное  $14400 \text{ сек}$  ( $4 \text{ часа}$ ),  $\varphi$  - степень улавливания (очистки) равное  $98\%$  ( $0,98$ ),  $F$  – общая площадь осаждения, принимаемая по таблицам, равная  $2256 \text{ м}^2$ .

$$m = \frac{W \cdot z \cdot t \cdot \varphi}{F} = \frac{5 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot 14400 \cdot 0,98}{2256} = 0,128$$

Тогда относительная пылеемкость составит:

$$m_{rl} = \frac{m}{1} = \frac{0,128}{1} = 0,128$$

Вычисляем величину вторичного уноса:

$$K_n = 1 - 0,275 \cdot w_{rl}^{0,35} \cdot h_{rl}^{0,51} \cdot \exp(-1,72 m_{rl}),$$

где  $w_{rl}, h_{rl}, m_{rl}$  - относительные скорость газа, высота и пылеемкость осадительных электродов, вычисляемые как отношения действительных значений указанных характеристик к базовым, применяемым соответственно 1 м/с, 8 м и 1 кг/м<sup>2</sup>.

$$K_n = 1 - 0,275 \cdot w_{rl}^{0,35} \cdot h_{rl}^{0,51} \cdot \exp(-1,72m_{rl}) = 1 - 0,275 \cdot 0,135^{0,35} \cdot 0,9^{0,51} \cdot \exp(-1,72 \cdot 0,128) = 0,897$$

- 2) Вычислим напряженность поля у осадительного электрода, внося необходимые поправки на геометрические характеристики электродов: принимая за  $D_1$  шаг между осадительными электродами  $a=0,3$  м, за  $D_2$  расстояние между концами игл или зубьев коронирующих электродов  $b=0,03$  м, за  $\delta$  расстояние от конца иглы ( $c=0,015$  м) до

осадительного электрода, равное  $[(D_1/2) - (D_2/2)]$ . Расчет ведем на максимальное напряжение  $U=50$  кВ:

$$E = U / [\delta \ln(D_1 / D_2)] = 50 \cdot 10^3 / \left[ \left( \frac{0,3}{2} - \frac{0,03}{2} \right) \cdot \ln \left( \frac{0,3}{0,03} \right) \right] =$$

$$= 50 \cdot 10^3 / [(0,15 - 0,015) \cdot \ln(0,3 / 0,03)] = 160,85 \cdot 10^3 \text{ В / м}$$

Подсчитаем коэффициент  $k$  при температуре газа  $T=140+273=413\text{K}$ , абсолютном давлении в электрофилт্রে  $p=101325-3000=98325$  Па и среднем размере дисперсных частиц  $D_{50} = 1,1 \cdot 10^{-6}$  м:

$$k = 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot [(1/p) + (10/E)] / D_{50} = 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot 413 \cdot \left[ \left( \frac{1}{98325} \right) + \left( \frac{10}{160850} \right) \right] / (1,1 \cdot 10^{-6}) = 1,49$$

Принимаем величину  $f_{rl} = 0,9$  и из таблиц при заданной  $\sigma = 1,7$  и максимальном значении  $k$ , которое имеется в таблице, находим параметр  $A=2,452$ .

- 3) Аппарат ЭГ2-2-4-37 СРК имеет порядка 20 газовых проходов (ширина активное зоны 6000 мм, расстояние между осадительными электродами 300 мм). Принимаем для него среднее значение  $k_{rg}=0,93$ .

Подсчитываем коэффициент динамической вязкости  $\eta$  газа – носителя заданного состава для нормальных условий и пересчитываем на рабочую температуру.

компоненты	CO2	N2	O2	H2S	CO и пр.
	0,17	0,8	0,024	0,002	0,004
	13,7	17	20,3	11,66	16,6
	254	114	131	396	100
	304,2	126	154,3	373,5	132,9

$$\eta_{273} = \frac{\sum \eta_{oi} \cdot 10^{-6} \cdot r_i \cdot \sqrt{\eta_{oi} \cdot 10^{-6} \cdot T_{cri}}}{\sum r_i \cdot \sqrt{\eta_{oi} \cdot 10^{-6} \cdot T_{cri}}}$$



$$\eta_{273} = \frac{\sum \eta_{oi} \cdot 10^{-6} \cdot r_i \cdot \sqrt{\eta_{oi} \cdot 10^{-6} \cdot T_{cri}}}{\sum r_i \cdot \sqrt{\eta_{oi} \cdot 10^{-6} \cdot T_{cri}}} = \frac{(13,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,17 \cdot \sqrt{13,7 \cdot 10^{-6} \cdot 304,2} + 17 \cdot 10^{-6} \cdot 0,8 \cdot \sqrt{17 \cdot 10^{-6} \cdot 126} +)}{0,17 \cdot \sqrt{13,7 \cdot 10^{-6} \cdot 304,2} + 0,8 \cdot \sqrt{17 \cdot 10^{-6} \cdot 126} + 0,024 \cdot \sqrt{20,3 \cdot 10^{-6} \cdot 154,3} +} \\ + \frac{20,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,024 \cdot \sqrt{20,3 \cdot 10^{-6} \cdot 154,3} + 11,66 \cdot 10^{-6} \cdot 0,002 \cdot \sqrt{11,66 \cdot 10^{-6} \cdot 373,5} + 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,004 \cdot \sqrt{16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 132,9} +}{+ 0,002 \cdot \sqrt{11,66 \cdot 10^{-6} \cdot 373,5} + 0,004 \cdot \sqrt{16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 132,9}} =$$

$$= 16,16 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Далее:

$$k = 0,17 \cdot 254 + 0,8 \cdot 114 + 0,024 \cdot 131 + 0,002 \cdot 396 + 0,004 \cdot 100 = 138,72$$

$$\eta_{413} = 16,16 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{273,15 + 138,72}{413,15 + 138,72} \cdot \left( \frac{273,15}{413,15} \right)^{1,5} = 6,48 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Определяем параметр  $\beta$ :

$$\beta = \varepsilon_0 E^2 D_{50} l / (w k_{rg} \eta \delta)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  - электрическая постоянная,  $l$  - активная длина электрофильтра,  $\delta$  - расстояние между коронирующими и осадительными электродами, м,  $k_{rg}$  - коэффициент равномерности газового потока.

$$\beta = \varepsilon_0 E^2 D_{50} l / (w k_{rg} \eta \delta) = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (72 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,1 \cdot 10^6 \cdot 8 / (0,135 \cdot 0,93 \cdot 6,48 \cdot 10^{-6} \cdot 0,15) = 3,308$$

4) Подсчитываем коэффициент очистки:

$$\eta_{tot} = 1 - \exp(-K_n A \beta^{0,42})$$

$$\eta_{tot} = 1 - \exp(-K_n A \beta^{0,42}) = 1 - \exp(-0,897 \cdot 2,452 \cdot 2,452 \cdot 3,308^{0,42}) = 0,9736$$

Величина полного коэффициента очистки, найденная расчетным путем, оказалась достаточно близкой к каталожной. Отличие расчетного проскока (2,64%) от каталожного (2%) составляет порядка 25 %.

Однако результаты расчета значительно зависят от подбора значений опытных параметров, таких как интервал между встряхиваниями, напряжение на электродах и др. Так, при напряжении 40 кВ расчетный проскок составляет уже около 6%. Поскольку для электрических полей, создаваемых электродами, расчетная напряженность практически не соответствует реальной, можно предполагать, что в неоднородном поле возрастает еще более резко.

Можно сделать вывод о целесообразности электрофильтрации выбросов СРКА, если при эксплуатации удастся поддерживать параметры процесса очистки (пылеемкость, температуру газов, напряжение на электродах и т.д.) на уровне расчетных.

## Пример 2. Расчет центробежного скруббера

Определить размеры, аэродинамическое сопротивление центробежного скруббера,

эффективность очистки, а также расход жидкости на нее.

Дано: количество вентиляционного воздуха  $L=28000\text{ м}^3/\text{ч}$ ; температура воздуха  $t=20^\circ\text{C}$ ; избыточное давление во входе в скруббер  $P=300\text{ Па}$ ; барометрическое давление  $P=101325\text{ Па}$ ; начальная концентрация воздуха  $q_{\text{нач}}=1,0\text{ г/м}^3$ ; плотность пыли  $\rho_{\text{п}}=2\text{ г/см}^3$ .

Дисперсный состав пыли характеризуется следующим образом:

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
%(по массе)	2,0	18,0	15,0	25,0	15,0	10,0	15,0

Расчет.

1. Определить диаметр скруббера. Скорость воздуха в цилиндрической части его принимаем равной  $V=4\text{ м/с}$  (в соответствии с рекомендациями: "Очистка газов мокрыми фильтрами" М. Госстрой СССР. "СантехПроект" 1978г.).

$$D = \sqrt{\frac{4 * L}{3600 * \pi * g}} = \sqrt{\frac{4 * 28000}{3600 * 3,14 * 4}} = 1,574(\text{м})$$

Так как при диаметре скруббера больше 1200мм снижается эффективность его очистки, принимаем к установке два скруббера и рассчитываем диаметр каждого, при условии, что воздух поступает в них параллельно:

$$D = \sqrt{\frac{4 * 28000}{2 * 3600 * 3,14 * 4}} = 1,113(\text{м})$$

2. Определить высоту цилиндрической части скруббера принимаем равной  $6,5D$ :

$$H = 6,5 * D = 6,5 * 1,113 =$$

7,23м

3. Определить высоту бункера скруббера принимаем равной

$0,5D$ :

$$H_6 = 0,5 * D = 0,5 * 1,113 = 0,557\text{ м}$$

4. Определить площадь входного и выходного патрубков. Скорость воздуха в них принимаем равной  $21\text{ м/с}$  в соответствии с рекомендациями.

$$S_n = \frac{L}{3600 * n * g_n} = \frac{28000}{3600 * 2 * 21} = 0,185(\text{м}^2)$$

n-число скрубберов

5. Определить высоту патрубков для входа и выхода по формуле:

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

6. Определить ширину патрубка по формуле:

$$b_n = \frac{S_n}{h_n} = \frac{0,185}{0,89} = 0,207(\text{м})$$

7. Определить аэродинамическое сопротивление скруббера по формуле:

$$\Delta P = \xi * \frac{g^2 * \rho}{2} = 2,84 * \frac{21^2 * 1,208}{2} = 756(\text{Па})$$

$\rho$  - плотность воздуха в рабочих условиях

$g$  - скорость воздуха во входном патрубке, м/с

$\xi$  - коэффициент местного сопротивления, определяемый по справочнику И.Е. Идельчика

D	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$\xi$	3,4	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6

При диаметре D=1,113м коэффициент местного сопротивления  $\xi=2,84$ .

Плотность воздуха в рабочих условиях:

$$\rho_s = \rho_o * \frac{273,15}{(273,15 + t)} * \frac{(P_{бар} \pm P)}{P_{бар}} = 1,293 * \frac{273,15}{(273,15 + 20)} * \frac{101325 + 300}{101325} = 1,208(\text{кг} / \text{м}^3)$$

Аэродинамическое сопротивление скруббера равняется = 765Па

8. Определить расход жидкости на орошение по формуле  $Q_{ж}=m*L=0,25*28000=7000(\text{л/час})$

Удельный расход жидкости  $m$  при входной концентрации равной  $1,0 \text{ г/м}^3$  составит  $m=0,25 \text{ л/м}^3$

Расход жидкости составит – 7000 л/час

9. Определить степень очистки воздуха в скруббере по формуле:

$$\eta_{окр} = 1 - (1 - \eta) * \sqrt{D}$$

$\eta_{окр}$  - степень очистки скрубберов центробежного типа составляет:  $94-96\% = 0,94-0,96$ .

Следовательно, для рассчитанного диаметра D=1,113м центробежного скруббера

$$\eta_{1скр} = 1 - (1 - 0,94) * \sqrt{1,113} = 0,937 \text{ или } 93,7\%$$

$$\eta_{2скр} = 1 - (1 - 0,96) * \sqrt{1,113} = 0,958 \text{ или } 95,8\%$$

10. Определить концентрацию пыли на выходе из скруббера по формуле:

$$q_{1кон} = q_n * (1 - \eta_1) = 1 * (1 - 0,937) = 0,063(\text{г} / \text{м}^3)$$

$$q_{2\text{кон}} = q_n \cdot (1 - \eta_2) = 1 \cdot (1 - 0,958) = 0,042 \text{ (г / м}^3\text{)}$$

Концентрация пыли в очищенном воздухе после рассчитанного скруббера составляет от 0,042 до 0,063 г/м<sup>3</sup>

### **Пример 3. Подбор фильтров для очистки наружного воздуха, подаваемого в производственное помещение предприятия**

**Дано:** расход воздуха  $L=6000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; располагаемое давление  $H=150 \text{ Па}$ . Здание расположено в индустриальном районе промышленного города. Режим работы двухсменный-16ч. Фильтры должны быть регенерируемыми.

**Решение:** Начальную запыленность наружного воздуха принимаем  $c=1\text{мг/м}^3$ . При данной запыленности очищаемого воздуха могут быть, как обычно, установлены фильтры III класса. Поскольку расход воздуха небольшой, можно применять ячейковые фильтры. По табл. 4.4. принимаем к установке фильтры ячейковые типа ФЯР. При данной производительности очистку воздуха могут обеспечить четыре ячейки, площадью каждой  $0,22 \text{ м}^2$ .

Определим удельную воздушную нагрузку  
 $6000/(4 \cdot 0,22)=6818 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ .

Начальное сопротивление фильтра определим по графику, рис. 4.2.

$H_n=40 \text{ Па}$ .

Эффективность фильтров определим по графику, рис. 4.3.

$\varepsilon=82\%$ .

Пылеемкость фильтров определяем по графику, рис 4.3. из условия повышения их гидравлического сопротивления с 40 до 150 Па, т.е. на 110 Па. Пылеемкость составляет  $2420 \text{ кг/м}^2$ .

На  $1 \text{ м}^2$  фильтра ФЯР за сутки оседает пыли:

$$0,001 \cdot 6818 \cdot 0,82 \cdot 16 = 89,5 \text{ г/сут.}$$

Продолжительность работы фильтра до достижения предельного сопротивления:

$$2420 : 89,5 = 27 \text{ сут.}$$

Следовательно, регенерация фильтра должна производиться через 27 сут.

### **Пример 4. Расчет скоростного пылеуловителя**

**При расчете скоростного пылеуловителя определяются размеры, гидравлическое сопротивление, эффективность.**

Режим работы трубы – коагулятора (скорость газа в сечении горловины и удельный расход воды) выбирают в зависимости от характеристики пыли и ее дисперсного состава, а также от требуемой эффективности очистки газа.

Расчет эффективности работы скруббера Вентури может быть осуществлен на основании данных фракционной степени очистки газов и при помощи энергетической теории мокрого пылеулавливания. Суть энергетической теории мокрого пылеулавливания, основанной на законе сохранения энергии, заключается в следующем.

Эффективность любого мокрого аппарата газоочистки при улавливании определенного вида пыли зависит только от потери давления и не зависит от размера и конструкции пылеуловителя. В общий расход энергии на очистку газа включается как энергия, затрачиваемая на преодоление сопротивления при проходе запыленного газа через аппарат, так и расходуемая на распыление воды.

Затрату энергии на мокрую очистку газа от пыли без учета энергии, расходуемой на создание движения газа, определяют выражением

$$K_T = \Delta p_{ап} + p_{ж} \frac{V_{ж}}{V_T}, \text{ кДж} \quad (1)$$

где  $K_T$  - удельная энергия соприкосновения, затрачиваемая на очистку в мокром пылеуловителе  $1000\text{м}^3$  газов, кДж;

$\Delta p_{ап}$  - гидравлическое сопротивление аппарата, Н/м<sup>2</sup>;

$p_{ж}$  - давление распыливаемой жидкости, Н/м<sup>2</sup>;

$V_{ж}, V_T$  - расход соответственно жидкости и газа, м<sup>3</sup>/с.

Первое слагаемое в выражении (1) характеризует степень турбулизации газожидкостного потока в аппарате, второе – качество диспергирования жидкости. Их влияние на величину зависит от типа аппаратов. Например, в скруббере Вентури основное влияние оказывает гидравлическое сопротивление аппарата. Зависимость между степенью очистки газа и затратами энергии выражают формулой

$$\eta = 1 - e^{-BK_T^\alpha} \quad (2)$$

где  $B, K$  - константы, определяемые видом и дисперсным составом пыли и не зависящие от типа и размеров мокрого пылеуловителя.

Таблица 1

Параметры В и  $\chi$  для некоторых пылей

Номер кривой на рис. 1	Вид пыли или тумана	В	$\chi$
1	Конверторная пыль (при продувке кислородом	$9,88 \cdot 10^{-2}$	0,4663
2	сверху)	0,206	0,3506
3	Тальк	$1,34 \cdot 10^{-2}$	0,6312
4	Туман фосфорной кислоты	$1,355 \cdot 10^{-2}$	0,6210
5	Ваграночная пыль	$1,915 \cdot 10^{-2}$	0,5688
6	Мартеновская пыль	$6,61 \cdot 10^{-3}$	0,891
7	Колошниковая (доменная)	$6,5 \cdot 10^{-4}$	1,0529
8	пыль	$2,34 \cdot 10^{-2}$	0,5317
	Пыль известковых печей		
9	Пыль, содержащая окись цинка, из печей,	$5,53 \cdot 10^{-5}$	1,2295
10	выплавляющих латунь	$2,14 \cdot 10^{-4}$	1,0679
11	Щелочной аэрозоль из известковых печей	$1,09 \cdot 10^{-5}$	1,4146
12	Аэрозоль сульфата меди	$1,565 \cdot 10^{-6}$	1,619
	Дурнопахнущие вещества мыльных фабрик		
13	Пыль мартеновских печей, работающих на дутье,	$1,74 \cdot 10^{-6}$	1,594
14	обогащенном кислородом	0,1925	0,3255
15	Пыль мартеновских печей, работающих на воздушном	0,268	0,2589
16	дутье	$2,42 \cdot 10^{-5}$	1,26
	Пыль из доменных печей		
17	Пыль из томасовского конвертора	$4 \cdot 10^{-4}$	1,05
	Пыль, образующаяся при выплавке 45%-ного		
18	ферросилиция в закрытых	$1,32 \cdot 10^{-3}$	0,861

	электropечах		
19	Пыль, образующаяся в содорегенерационных	$9,3 \cdot 10^{-4}$	0,861
20	котлоагрегатах сульфатно- целлюлозного	0,016	0,554
21	производства	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,67
22	Пыль от производства черного щелока при обработке предварительно	$2,34 \cdot 10^{-4}$	1,115
23	увлажненных газов	$10^{-5}$	1,36
-	То же, при обработке сухих газов	$6,06 \cdot 10^{-3}$	0,4775
-	Частицы поташа из МГД- установок открытого цикла	$0,823 \cdot 10^{-3}$	0,914
-	Пыль, образующаяся при выплавке силикомарганца в закрытых ферросплавных печах	$6,49 \cdot 10^{-5}$	1,1
-	Пыль каолинового производства	0,17	0,3
	Улавливание сажи, образующейся при электрокрекинге метана		
	Возгоны свинца и цинка из шахтных печей		
	Пыль дымовых газов карбидной печи		
	Пыль закрытой печи, выплавляющей углеродистый феррохром		
	Зола дымовых газов ТЭЦ		

Эти константы определяют только экспериментальным путем. Их значения для некоторых пылей и туманов приведены в табл. 1.

Величина  $\eta$  незначительно характеризует качество очистки в интервале высоких степеней очистки (0,98 – 0,99), поэтому в этом случае используют понятие числа единиц переноса:

$$N = \ln \frac{1}{1-\eta} \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) величину единиц переноса можно выразить формулой

В логарифмических координатах формула (4) представляет собой прямую линию, тангенсом угла наклона которой к оси абсцисс является  $\chi$ , а величину  $B$  находят при пересечении прямой с линией, соответствующей значению  $K_T=1,0$

Зная  $N_{\text{ч}}$ , удельную энергию  $K_T$  можно определить при помощи графиков, изображенных на рис. 1 (номера линий соответствуют определенной пыли по табл. 1).

Величина  $K_T$  учитывает способ ввода жидкости в аппарат, диаметр капель, вязкость, поверхностное натяжение и другие свойства жидкости.

### Технологический расчет мокрых центробежных циклонов и скрубберов

Расчет мокрых центробежных аппаратов заключается в определении их основных размеров, расхода воды, гидравлического сопротивления и эффективности по очистке газа. Диаметр цилиндрической части циклонов и скрубберов рассчитывают по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi \times v}}, \text{ м} \quad (1)$$

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.

Расход воды, необходимой для орошения стенок аппаратов, определяется в зависимости от их диаметра по формуле

$$G_{\text{в}}=0,14 \times D, \text{ л/с} \quad (2)$$

При таком расходе воды толщина пленки будет не менее 0,3 мм, что исключит разрывы на пути ее движения по стенкам.

Гидравлическое сопротивление циклонов и скрубберов находят по формуле

$$\Delta p = \xi \frac{v^2}{2} \rho, \text{ Н/м}^2 \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность газа в рабочих условиях, Нсм,

$v$  – скорость газа во входном патрубке, м/с;

$\xi$  – коэффициент местного сопротивления аппарата.

Значение коэффициента местного сопротивления циклонов зависит от диаметра:



Диаметр циклона , м .	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
$\xi$	3,4	3,0	2,9	2,8	2,7	2,6

Значение скрубберов типа МП – ВТИ КМС=9, а для типа ЧС – ВТИ КМС=2,6ч2,8.

Если в формуле (3) принять скорость газа в цилиндрической части корпуса аппарата, то значение коэффициента гидравлического сопротивления следует принимать для циклонов КМС=30-32, а для скрубберов КМС=33,5-35,2.

Чтобы определить степень очистки газа или воздуха в циклонах и скрубберах, необходимо знать их фракционную эффективность. Для мокрых центробежных циклонов и скрубберов диаметром 1 м, по данным ВТИ, фракционная эффективность в зависимости от скорости витания частиц пыли приведена в табл. 2.

Таблица 2

**Фракционная эффективность очистки газа от пыли в мокрых циклонах и скрубберах диаметром 1м, %**

Скорость газа во входном патрубке, м/с	Фракционная эффективность при скорости витания частиц, см/с						
	0 - 0,5	0,5 - 2	2 - 5	5 - 10	10-15	15-20	>20
15	65,5	80	88	91	92,7	94	98
17	75,7	85,2	90	92	93,7	95	98,5
19	81,5	88,2	91,5	93,2	94,5	95,8	99
21	85	90,3	92,8	94,3	95,5	96,7	99,5
23	87,4	91,6	93,7	95,3	96,4	97,6	100

Скорость витания частиц в зависимости от их размера и плотности находят по номограмме. По этим данным общую степень очистки газа определяют по формуле (4).

Для циклонов другого диаметра D м степень очистки газа может быть уточнена по формуле

$$\eta_{VT} = 1 - (1 - \eta)\sqrt{D} \quad (4)$$

В некоторых случаях требуется знать конечную температуру газа на выходе из циклона или скруббера. Ее можно определить по эмпирической формуле

$$t_{ВЫХ} = t_{ВХ} \frac{t_H + t_K}{2} \times \frac{5,8}{10,4c\rho + 2,9}; \quad ^\circ C \quad (5)$$

где  $t_{ВЫХ}$ - температура газа на выходе из аппарата, С;

- $t_{BX}$  - температура газа перед аппаратом, С;  
 $t_H$  - температура воды, поступающей на орошение, С;  
 $t_K$  - температура воды на выходе из аппарата, принимаемая на 5 – 10 С меньше температуры мокрого термометра газа, С;  
 $c$  - теплоемкость газа, Дж/(кг· С);  
 $\rho$  - плотность газа перед аппаратом, кг/м<sup>3</sup>.

### Расчет полоого скруббера

Количество тепла, которое необходимо отнять от газа в процессе его охлаждения и передать жидкости (воде), рассчитывают по формуле

$$Q = V_0(c + f_1 c_{\Pi})(t_1 - t_2); \text{ Дж/с} \quad (1)$$

- где  $V_0$  - количество сухого газа при нормальных условиях, м<sup>3</sup>(н)/с;  
 $c$  - объемная теплоемкость сухого газа при нормальных условиях, Дж/(м<sup>3</sup>(н)·°С);  
 $c_{\Pi}$  - теплоемкость водяного пара, Дж/(кг·°С);  
 $f_1$  - начальное влагосодержание газа, кг/м<sup>3</sup>(н);  
 $t_1, t_2$  - соответственно начальная и конечная температуры газа на выходе в скруббер и на выходе из него, °С.

Пренебрегая теплотерями в окружающую среду, полезный рабочий объем скруббера рассчитывают по формуле

$$V_{ск} = \frac{Q}{k \Delta t}, \text{ м}^3 \quad (2)$$

- где  $k$  - объемный коэффициент теплопередачи в скруббере, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $\Delta t$  - средняя разность температур газа и жидкости, °С.

Зависимость объемного коэффициента теплопередачи от плотности орошения и массовой скорости в скрубберах была получена Г.Ф. Алексеевым и В.А. Оленевым опытным путем при исследованиях охлаждения и очистки доменного газа водой:

$$K = (14.7 + 96.7U) \rho_r v_r \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}), \quad (3)$$

- где  $U$  - плотность орошения, кг/(м<sup>3</sup>·ч);

$\rho_{\Gamma}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$v_{\Gamma}$  – скорость газа, м/с.

### Коэффициент теплопередачи и испарения в полых скрубберах (практические данные)

Для некоторых газов объемный коэффициент теплопередачи в скрубберах приведен в табл. 3. Коэффициент теплопередачи зависит от режимных параметров жидкости и газа в скруббере.

Его значение увеличивается с ростом относительной скорости газа и капель, а также с уменьшением размера капель и снижается с ростом величины удельного орошения.

Среднюю разность температур газа и воды в скруббере (газ и вода движутся противотоком) определяют из выражения

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_K) - (t_2 - t_H)}{2,3 \lg \frac{t_1 - t_K}{t_2 - t_H}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

где  $t_1, t_2$  – начальная и конечная температура газа,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_H, t_K$  – начальная и конечная температура воды,  $^\circ\text{C}$ .

### Расчёт скруббера Вентури

В зависимости от гидравлического сопротивления скрубберы (трубы) Вентури подразделяют на низконапорные с  $\Delta p_n < 5$  кПа и высоконапорные с  $\Delta p_n \text{ до } 25$  кПа. Низконапорные трубы имеют сравнительно невысокую (до 90 м/с) скорость газов в горловине трубы и хорошо очищают относительно крупную пыль с  $d_m > 3$  мкм. Расчёт труб Вентури удобно вести по известному или рассчитанному коэффициенту очистки. Методика такого расчёта состоит в следующем:

1. принимают или, зная начальное и конечное пылесодержание воздуха, рассчитывают общий коэффициент очистки.

2. используя зависимость  $\eta = 1 - \exp(-B \cdot K_m^x)$  определяют затраты энергии на очистку воздуха:  $K_m = \sqrt[3]{-\ln(1-\eta)/B}$

3. находим гидравлическое аппарата  $\Delta p_n$ , которое для труб Вентури состоит из потерь напора как в самой трубе  $\Delta p_{mp}$ , так и в циклоне-каплеотделителе  $\Delta p_u$ , т.е.

$$\Delta p_n = \Delta p_{mp} + \Delta p_u \quad (1.1)$$

4. рассчитывают циклон-каплеотделитель:

а) диаметр циклона равен: 
$$D_{\text{ц}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{L}{3600 \cdot \mathcal{G}_{\text{ц}}}}$$

$L$  – расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{ч}$

$\mathcal{G}_{\text{ц}}$  – скорость (фиктивная) воздуха в расчёте на площадь сечения цилиндрической части циклона,  $\text{м}/\text{с}$

б) гидравлическое сопротивление циклона  $\Delta p_{\text{ц}}$ , Па, равно: 
$$\Delta p_{\text{ц}} = \xi_{\text{ц}} \cdot \rho \cdot \frac{\mathcal{G}_{\text{ц}}^2}{2}$$

$\xi_{\text{ц}}$  – коэффициент местного сопротивления циклона, отнесённый к скорости  $\mathcal{G}_{\text{ц}}$  (для пылеуловителей типа ЦВП  $\xi_{\text{ц}} = 30$ ).

5. по формуле (1.1) находят гидравлическое сопротивление трубы Вентури.

6. расчёт скорости воздуха  $\mathcal{G}_2$ ,  $\text{м}/\text{с}$ , в горловине трубы Вентури производят по

формуле: 
$$\mathcal{G}_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{\text{тр}}}{\rho \cdot \xi_{\text{с}} + \rho_{\text{жс}} \cdot \xi_{\text{жс}} \cdot m}} \quad (1.2)$$

$\rho, \rho_{\text{жс}}$  – плотность соответственно воздуха и воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$

$\xi, \xi_{\text{жс}}$  – коэффициенты гидравлического сопротивления соответственно «сухой» трубы и трубы с подачей жидкости

$m$  – удельный расход воды. Принимают: при улавливании мелкодисперсной пыли и центральной (через сопло) подаче орошаемой воды:  $m = 0,005 - 0,007 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , при улавливании грубодисперсной пыли в низконапорных трубах:  $m = 0,001 - 0,002 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Зависимость (1.2) для труб Вентури при  $l_2 = 0,15 \cdot d_2$  и при стандартных условиях ( $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{\text{жс}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), а также с учётом того, что  $\xi_{\text{с}} = 0,15$ , а  $\xi_{\text{жс}} = 0,63 \cdot \xi_{\text{с}} \cdot m^{-0,3}$ , имеет вид:

$$\mathcal{G}_2 = 3,33 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{тр}}}{1 + 0,525 \cdot m^{0,7} \cdot 10^3}}$$

7. определяют геометрические размеры трубы Вентури:

а) диаметр горловины  $d_2$ ,  $\text{м}$ , трубы Вентури равен 
$$d_2 = 1,88 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{L}{\mathcal{G}_2}}$$

б) длина горловины  $l_2$ ,  $\text{м}$ , равна 
$$l_2 = 0,15 \cdot d_2$$

в) диаметр входного отверстия конфузора  $d_k$ , м, равен  $d_k = 1,88 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{L}{g_{\text{вх}}}}$

$g_{\text{вх}}$  – скорость воздуха во входном патрубке, равная 15-20 м/с

г) длина конфузора  $l_k$ , м, соответствует  $l_k = \frac{d_k - d_z}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}$

$\alpha_1$  – угол раскрытия конфузора равный  $25 - 30^\circ$  (при необходимости уменьшения длины трубы Вентури угол  $\alpha_1$  может быть увеличен до  $60^\circ$ , но тогда длина горловины должна приниматься  $l_z = 0,3 \cdot d_z$ )

д) диаметр выходного отверстия  $d_o$ , м, диффузора равен  $d_o = 1,88 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{L}{g_{\text{вых}}}}$

$g_{\text{вых}}$  – скорость выхода воздуха из диффузора, равная 16-18 м/с

е) длину диффузора  $l_o$ , м, находим по формуле:  $l_o = \frac{d_k - d_z}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)}$

$\alpha_2$  – угол раскрытия диффузора равный  $6 - 7^\circ$

Диаметр сопла для подачи воды  $d_c$ , м, рассчитывают по формуле:

$$d_c = 1,06 \cdot \sqrt{\frac{G_6}{\sqrt{\rho_{\text{ж}}}}}$$

$G_6$  – расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$

### Пример расчёта скруббера Вентури

Исходные данные:

- расход очищаемого от ваграночной пыли воздуха  $L = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$
- начальная запылённость  $c_1 = 4000 \text{ мг}/\text{м}^3$
- конечная запылённость  $c_2 = 80 \text{ мг}/\text{м}^3$
- давление воды  $p_{\text{ж}} = 300 \text{ кПа}$

Требуется рассчитать скруббер Вентури.

Решение:

1. определяем общий коэффициент очистки:  $\eta = \frac{400 - 80}{400} = 0,98$

2. рассчитываем затраты энергии на очистку, принимая по табл.1 для ваграночной пыли

$$B = 1,355 \cdot 10^{-2}, \quad \chi = 0,621 :$$

$$K_m = 0,621 \sqrt{\frac{-\ln(1-0,98)}{1,35 \cdot 10^{-2}}} = 9106 \text{ кДж} / 1000 \text{ м}^3 \text{ газа}$$

3. определяем суммарное гидравлическое сопротивление трубы Вентури и циклона-каплеотделителя, принимая коэффициент орошения  $m = 0,001 \text{ м}^3 / \text{м}^3$  :

$$\Delta p_n = 9106 - 300000 \cdot 0,001 = 8806 \text{ Па}$$

4. рассчитываем циклон-каплеобразователь:

а) диаметр циклона-каплеотделителя:

$$d_u = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{10000}{3600 \cdot 5,5}} = 0,8 \text{ м}$$

б) гидравлическое сопротивление циклона-каплеуловителя типа ЦВП:

$$\Delta p_{\text{ц}} = 30 \cdot 5,5^2 \cdot \frac{1,2}{2} = 545 \text{ Па}$$

5. гидравлическое сопротивление трубы Вентури:

$$\Delta p_{mp} = 8806 - 545 = 8261 \text{ Па}$$

6. скорость в горловине трубы:

$$g_z = 3,33 \cdot \sqrt{\frac{8261}{1 + 0,525 \cdot 0,001^{0,7} \cdot 10^3}} = 133 \text{ м/с}$$

7. определяем геометрические характеристики трубы Вентури:

а) диаметр горловины трубы:

$$d_z = 1,88 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{10000}{133}} = 0,16 \text{ м}$$

б) длина горловины трубы:

$$l_z = 0,15 \cdot 0,16 = 0,024 \text{ м}$$

в) диаметр входного отверстия конфузора:

$$d_k = 1,88 \cdot 100^2 \cdot \sqrt{\frac{10000}{18}} = 0,445 \text{ м}$$

г) длина конфузора:

$$l_k = \frac{0,445 - 0,16}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{30}{2}} = 0,53 \text{ м}$$

д) диаметр выходного отверстия диффузора:

$$d_o = 1,88 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{10000}{17}} = 0,455 \text{ м}$$

е) длина диффузора:

$$l_0 = \frac{0,445 - 0,16}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{6}{2}} = 2,815 \text{ м}$$

8. диаметр сопла для подачи воды:

$$d_c = 1,06 \cdot \sqrt{\frac{10000 \cdot 0,001}{3600 \cdot \sqrt{300000}}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

### Пример 5. Расчет электрофилтра

Подобрать электрофилтр для очистки газа, если известно:

1. Количество отходящего газа:

$$V_{\text{вх}} = 27000 \text{ м}^3/\text{Г}$$

2. Температура отходящего газа:

$$t_r = 150^\circ \text{ С}$$

3. Разрежение перед фильтром:

$$P_z = 2000 \text{ Па}$$

4. Концентрация пыли в отходящих газах:

$$C_{\text{вх}} = 40 \text{ г/м}^3$$

5. Фракционный состав пыли:

Средний радиус частиц, мкм	0,5	2,5	5	10	15	20	25
Содержание ( по массе %)	5	10	10	15	20	20	20

6. Межэлектродное состояние (расстояние между коронирующими и осадительными электродами)  $H = 0,15 \text{ м}$ .

7. Расстояние между коронирующими электродами  $d = 0,24 \text{ м}$ .

8. Скорость газов в электрофилтре  $v = 0,8 \text{ м/с}$ .

9. Радиус коронирующего электрода  $R = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

10. Барометрическое давление  $P_{\text{бар}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

11. Состав газов в %:

CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
13	6,5	8,5	7,2

12. Напряжение ( среднее значение) :

$$U_{\text{ср}} = 46 \text{ кВт}$$

13. Площадь осадительных электродов:

$$F_{\text{о.э}} = 242 \text{ м}^2$$

14. Конечная концентрация отходящих газов:

$$C_{\text{вых}} = 0,05 \text{ г/м}^3$$

15. Объемный расход воздуха, выходящего из электрофильтра с учетом подсоса:

$$V_{\text{вых}} = 31500 \text{ м}^3/\text{г}$$

### Расчет

1. Рекомендуемая скорость газа в 0,8-1,0 м/с (Справочник по пылеулавливанию)

2. Площадь сечения, при скорости  $v=0,8 \text{ м/с}$ :

$$F = L/3600 \cdot v = 27000/3600 \cdot 0,8 = 9,4 \text{ м}^2$$

3. Выбор электрофильтра (по каталогу производителя) типа УГ-1-2-10 (Унифицированный горизонтальный односекционный с двумя полями и активной площадью сечения  $10 \text{ м}^2$ )

4. Уточнение скорости газа в электрофильтре

$$v = L/3600 \cdot 10 = 0,75 \text{ м/с}$$

5. Расчет электрических параметров электрофильтра

Относительная плотность газа:

$$\rho = (P_{\text{бар}} - P_z / P_{\text{бар}}) \cdot (273 + t_v / 273 + t_r) = (103013 - 2000 / 103013) \cdot (273 + 20 / 273 + 150) = 0,68 \text{ кг/м}^3.$$

Критическая напряженность электрического поля в/м:

$$E_0 = 3,04(0,68 + 0,0311 \cdot \sqrt{(0,68 / 1,25 \cdot 10^{-3})}) \cdot 10^6 = 4,26 \cdot 10^6 \text{ в/м}$$

Критическое напряжение короны, в

$$U_0 = E_0 \cdot R_1 (\pi H / d - \ln(2\pi R_1 / d)) = 4,26 \cdot 10^6 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} ((3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-1} / 2,4 \cdot 10^{-1}) - 2,31 \lg(2 \cdot 3,14 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} / 2,4 \cdot 10^{-1})) = 4,26 \cdot 10^6 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} (1,96 + 3,42) = 28,5 \cdot 10^3 \text{ в}$$

Линейная плотность тока короны (ма/м):

$$i_0 = (4\pi \cdot K \cdot \gamma / (9 \cdot 10^9 \cdot 10^2 \cdot (\pi H / d - \ln(2\pi R_1 / d))) \cdot u(u - u_0)$$

$$H/d = 0,15 / 0,24 = 0,625$$

$\gamma$ -коэффициент зависящий от взаиморасположения электродов,

$$\gamma = 7,7 \cdot 10^{-2}$$

K- коэффициент подвижности ионов в газах

$$K = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 (\text{В} \cdot \text{сек})$$

$$i_0 = (4 \cdot 3,14 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 7,7 \cdot 10^{-2} / 9 \cdot 10^9 \cdot 0,24^2 (1,96 - 3,42)) \cdot 46 \cdot 10^3 \cdot (46 \cdot 10^3 - 28,5 \cdot 10^3) = 0,185 \cdot 10^{-3} \quad \text{а/м} = 0,185$$

ма/м

Напряженность электрического поля, в:

$$E = \sqrt{(\Delta i_0 \cdot H / 4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot K \cdot d)} = \sqrt{(8 \cdot 0,185 \cdot 10^{-3} \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 0,15 / 4\pi \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,24)} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ в.}$$



$$\varepsilon = 1/4\pi \cdot 10^9 \text{ фг/м}$$

Скорость движения частиц диаметром от 2 до 50 мкм в электрическом поле.

$$W_{\text{п}} = (0,118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2) / \mu \cdot r$$

$$W_{\text{п}} = 0,118 \cdot 10^{-10} \cdot (1,99 \cdot 10^5)^2 / 0,225 \cdot 10^{-4} \cdot r = 2,08 \cdot 10^{-4} \cdot r$$

$\mu$  – динамическая вязкость газов (Па/сек)

$\mu = 0,225 \cdot 10^{-4}$ , состоит из отношения  $M/\mu_{\text{суммарная}}$ ;  $M = 29,35$  кг/кмоль – относительная молекулярная масса газов к сумме вязкостей:  $\mu_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{O}_2} + \mu_{\text{N}_2} + \mu_{\text{H}_2\text{O}} = 130,9 \cdot 10^4$

Расчет  $\mu_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{O}_2} + \mu_{\text{N}_2} + \mu_{\text{H}_2\text{O}}$  ведется по формуле  $\mu_{\text{суммарная}} = \mu_0 (273 + c/T + c)(T/273)^{3/2}$

$\mu_0$  – для каждого вещества (Па·сек).

$c$  – постоянная Сезерменда (для каждого вещества).

$r$  – радиус частиц, мкм.

Подставив значения радиуса частиц,  $r$  (мкм), получим следующие значения скорости дрейда:

Радиус частиц, мкм	2,5	5	10	15	20	25
Скорость дрейда, м/сек	5,2	10,4	20,8	31,2	41,5	52

## 6. Расчет эффективности очистки газов электрофильтром

### 6.1 Определение коэффициента очистки газов электрофильтром:

$$\eta = C_{\text{вх}} \cdot v_{\text{вх}} - C_{\text{вых}} \cdot v_{\text{вых}} / C_{\text{вх}} \cdot v_{\text{вх}} = 1 - C_{\text{вых}} \cdot v_{\text{вых}} / C_{\text{вх}} \cdot v_{\text{вх}}$$

где  $C_{\text{вх}}$ ,  $C_{\text{вых}}$  – концентрация пыли в воздухе, поступающем на очистку и после нее, соответственно.

$v_{\text{вх}}$ ,  $v_{\text{вых}}$  – Объемные расходы газовой смеси на входе в электрофильтр, и на выходе из него соответственно, м<sup>3</sup>/ч.

$$\eta = 40 \cdot 27000 - 0,05 \cdot 31500 / 40 \cdot 27000 = 1 - 0,05 \cdot 31500 / 40 \cdot 27000 = 0,9985 \cdot 100\% = 99,85\%$$

### 6.2 Концентрация пыли на выходе из фильтра можно определить по формуле:

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}} \cdot (150 - 4/150) = 40(150 - 99,85/150) = 0,06 \text{ г/м}^3 \text{ или } 60 \text{ мг/м}^3$$

## Литература

- Рекомендации по оформлению и содержанию проекта нормативов предельно-допустимых выбросов в атмосферу (ПДВ) для предприятия /Госкомитет СССР по охране природы.- М., 1989.-42с.
- Штокман А.Е. Очистка воздуха. АСВ, 1999.
- Уточнения к действующим нормативным документам по вопросам нормирования выбросов вредных веществ в атмосферу/Минэкологии России.-М., 1992.
- Письмо Госкомитета РФ по охране окружающей среды. «О деноминации базовых нормативов платы» № 05-14/29-3621 от 20.11.97 г.

11. СанПиН 2.2.1/2.1.1.567—96 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов». Утверждены и введены в действие Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 41. М.: Информ.-изд. Центр Минздрава России, 1997.- 47с.
12. РД 52.04-52-85 Регулирование выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях. – Л.6 гидрометеоиздат, 1987.-53с.

## **МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

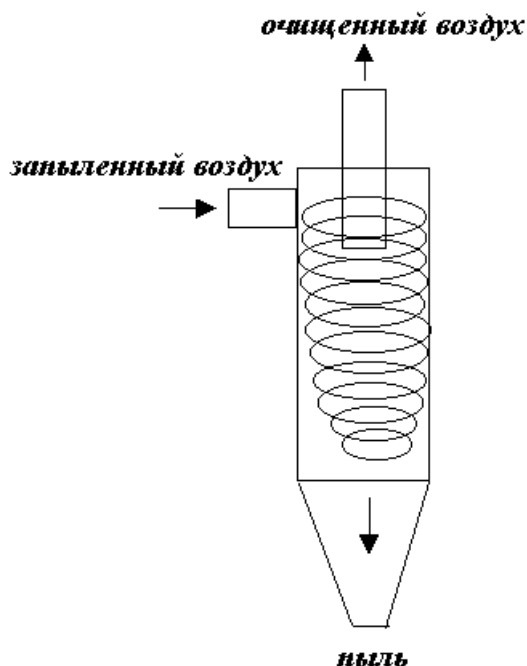
Кафедра отопления и вентиляции

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЦИКЛОНА**

Лабораторный практикум

к курсовому проектированию

**Исследование работы и подбор циклона**



**Цель работы** - изучить принципиальную схему циклона, схему движения воздушного потока в циклоне, а также последовательность действия сил, осаждающих частицы пыли в циклоне; научиться определять расход воздуха, поступающего в циклон на очистку, потери полного давления в циклоне и коэффициент местного сопротивления (КМС) циклона.

#### **Используемые приборы:**

- микроанометр в комплекте с пневмометрической трубкой;
- метр стальной или мерная рулетка;
- анемометр чашечный;
- секундомер;
- спиртовой термометр;
- барометр – anerоид.

#### **Определение гидравлического сопротивления и КМС циклона.**

Циклоны являются простейшими центробежными пылеуловителями. Они применяются в вентиляционной технике для очистки воздуха, загрязненного пылью. Достоинство циклонов как пылеочистных устройств заключается в простоте конструкции, компактности, легкости обслуживания и достаточно высоком коэффициенте очистки для крупных фракций (более 10 мк) сухой пыли (60-30%). Отделение частиц пыли от воздуха в циклоне осуществляется под действием сил инерции, центробежных и гравитационных сил.

На рис. 16.1. изображен циклон, который состоит из следующих элементов:

- 1 – входной патрубок круглого или прямоугольного сечения;
- 2 – цилиндра;
- 3 – выхлопной трубы, установленной вертикально по оси цилиндра;
- 4 – конуса;
- 5 – пылеотводящего патрубка;
- 6 – винтовой направляющей плоскости.

Пылеотделение происходит следующим образом. Запыленный воздушный поток через входной патрубок 1 поступает в цилиндр 2.

Входя тангенциально в цилиндрическую часть циклона, поток приобретает вращательное, спиралеобразное движение вокруг выхлопной трубы 3 и опускается вниз. При входе в циклон частицы пыли под действием сил инерции стремятся сохранить свое первоначальное направление. Под действием центробежных сил, возникающих при круговом, вращательном

движении потока воздуха, частицы пыли перемещаются к стенке цилиндра. Соприкасаясь со стенкой цилиндрической части циклона, частицы теряют свою первоначальную скорость и, увлекаемые спиралеобразным движением воздушного потока, под действием уже гравитационной силы выпадают в низ конуса. Из конуса через пылеотводящий патрубок частицы пыли поступают в бункер. Спиралеобразное движение воздуха в нижней части циклона переходит с нисходящего потока в восходящий поток, что также способствует выпадению пыли (рис. 16.2.). Очищенный от пыли воздушный поток выходит из циклона через выхлопную трубу.

Эффективность пылеотделения в циклоне зависит в основном от центробежной силы

$$P = \frac{m \cdot V^2}{r}$$

Из этого выражения видно, что эффективность очистки возрастает с увеличением массы пылинок  $m$ , скорости вращения воздушного потока  $V$  и с уменьшением радиуса вращения пылинок  $r$ , то есть, чем меньше будет диаметр (радиус) циклона, тем выше эффективность очистки в воздухе в нем.

Каждый циклон характеризуется величиной гидравлического сопротивления  $\Delta P_v$ , Па, оказываемого им при прохождении через него воздушного потока. Гидравлическое сопротивление, Па, циклона вычисляют по формуле:

$$P_v = \xi_{ц} \frac{\rho_t \cdot V_{вх.п.}^2}{r} \cdot g$$

где  $\xi_{ц}$  – коэффициент местного сопротивления циклона;

$V_{вх.п.}$  – скорость во входном патрубке циклона, м/с;

$\rho_t$  – плотность перемещаемого воздуха;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

В опытной установке (рис 16.3) гидравлическое сопротивление испытываемого циклона измеряют по перепаду полных давлений в сечениях : до сечения 2-2 и после него, перед сечением 3-3.

Рис. 16.3. Рабочая схема лабораторной установки

1 – всасывающий воздухопровод диаметром 192 мм;

2 – центробежный вентилятор высокого давления типа ВД №3;

3 – нагнетательный воздухопровод диаметром 192 мм;

4 – циклон ЦН – 15 с  $D_{ц}=400$  мм;

5 – выхлопной участок нагнетательного воздухопровода диаметром 400 мм;

6 – микроманометр.

## Порядок выполнения работы

1. В начале определяют динамическое давление, Па, во всасывающем или нагнетательном воздухопроводе сети  $P_{dv}^{1-1}$  по формуле:

$$P_{dv}^{1-1} = (l - l_0) \cdot \sin \alpha \cdot \rho_{жс} \cdot \kappa_m \cdot \kappa_T \cdot \Delta$$

2. Затем вычисляют скорость движения потока воздуха, м/с, в поперечном сечении воздухопровода:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{dv}^{cp.}}{\rho_t}}$$

где  $P_{dv}^{cp.}$  - среднее динамическое давление в рассматриваемом сечении, Па;

$\rho_t$  - плотность перемещаемого воздуха, кг/м<sup>3</sup>, определяют с учетом температуры воздуха в помещении.

$$\rho = \frac{353}{t + 273}$$

Примечание: При наличии нескольких рабочих бригад студентов скорость движения воздушного потока в воздуховоде следует замерять на линии всасывания: с помощью микроанометра или чашечного анемометра, а на линии нагнетания с помощью микроанометра (сеч. 1-1).

3. Подсчитывают расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч, в сети:

$$L = f_c \cdot v \cdot 3600$$

где  $f_c$  - площадь воздухопровода в рассматриваемом сечении, м<sup>2</sup>

4. Находят полные давления до и после циклона в сечениях 2-2 и 3-3:  $P_v^{2-2}$  и  $P_v^{3-3}$ , Па.

5. Замеряют динамическое давление перед циклоном в сечении 2-2:  $P_v^{2-2}$ , Па.

6. Гидравлическое сопротивление, Па, циклона определяют по разности полных давлений до и после циклона:

$$\Delta P_v = P_v^{2-2} - P_v^{3-3},$$

7. По известным значениям  $\Delta P_v$  и  $P_{dv}^{2-2}$  вычисляют КМС циклона:

$$\xi_{\zeta} = \frac{\Delta P_v}{P_{dv}^{2-2}},$$

Примечание: 1. КМС циклона принимают как среднее из трех значений, полученных при разных расходах.

2. Для принятой испытательной схемы (см. рис. 16.3.) КМС перехода перед циклоном, т.е.

$$\xi_{исп.} = \xi_{\zeta} - 0,1,$$

Данные измерения и расчетов заносят в таблицу 16.1.

Номер замера	$P_{dv}^{1-1}$ или $P_{dv}^{1'-1'}$ , Па	$V$ , м/с <sup>2</sup>	$L$ , м <sup>3</sup> /ч	$P_v^{2-2}$ , Па	$P_v$			$\xi_{\zeta}$	$\xi_{исп}$
					$P_v^{2-2}$	$P_v^{3-3}$	$\Delta P_v$		
1.									
2.									
3.									

1. Объяснить назначение циклона и его конструктивное исполнение(поэлементно)
2. Перечислить силы, действующие на пылевой поток в циклоне, и последовательность их приложения.
3. Как определяется расход воздуха в сети и на входе в циклон?
4. Как определяются потери полного давления в циклоне?
5. Объяснить принцип осаждения пыли в циклоне.
6. Сопоставить  $\xi_{ц}$  и  $\xi_{таб}$  . циклона ЦН-15

### Выбор и расчёт циклонов

Выбирают циклоны по расчётной производительности аппарата и расчётной скорости газа (воздуха) при входе в циклон. Потери давления в циклоне определяются по формуле:

$$\Delta P = \zeta_{вх} \frac{v_{вх}^2 \rho}{2}$$

$v_{вх}$  - скорость воздуха во входном патрубке, м/с,

$\zeta_{вх}$  - коэффициент гидравлического сопротивления циклона.

Общее гидравлическое сопротивление циклона находят по условной скорости газа в циклоне -  $v_0$ , отнесённой к площади свободного сечения циклона (цилиндрической части).

$$\Delta P_{ц} = \zeta_0 \frac{v_0^2 \rho}{2}$$

$v_0 = 3-3,5$  м/с,

$\zeta_0$  - коэффициент гидравлического сопротивления циклона.

Для большинства циклонов  $\xi_0$  постоянно и не зависит от Re, для ряда циклонов коэффициент гидравлического трения равен:

ЦН-11 -  $\zeta_0 = 250$

ЦН-15 -  $\zeta_0 = 160$

ЛИОТ -  $\zeta_0 = 460$

Для расчёта циклонов необходимы следующие исходные данные:

1. Расход газа (воздуха) подлежащего очистке  $L_p$ , м<sup>3</sup>/с,
2. плотность газа при рабочих условиях  $\rho_r$ , кг/м<sup>3</sup>,
- 3, Динамическая вязкость газа при рабочей температуре  $\mu_r$ , Па·с,
4. Дисперсный состав пыли:  $d_m$  и  $lg\sigma_{ч}$ :  $d_m$  - такой размер пыли, при котором количество частиц крупнее  $d_m$  равно количеству частиц мельче  $d_m$ ,  $lg\sigma_{ч}$  - среднее квадратичное отклонение в функции распределение частиц по размерам,
5. Запылённость газа  $c_{вх}$ , г/м<sup>3</sup>,
6. Плотность частиц  $\rho_{ч}$ , кг/м<sup>3</sup>
7. Требуемая эффективность очистки газа  $\varepsilon$ , %

### Последовательность расчёта циклонов:

1. Задаются типом циклона. Определяют оптимальную скорость  $v_{опт}$ .
2. Определяют необходимо площадь сечения циклона, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{L_p}{v_{опт}}$$

3. Определяют диаметр циклона, м, задаваясь количеством циклонов N:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,786 \times N}}$$

D - округляют до целой величины.

4. Рассчитывают действительную скорость газа в циклоне:

$$v = \frac{L_p}{0,786 \times N \times D^2}$$

Скорость газа не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15 %.

5. Принимают коэффициент гидравлического трения. Вносят нужные поправки

6. Определяют потери давления в циклоне, Па

$$\Delta P = \zeta_{\text{ex}} \frac{v^2 \rho_{\Gamma}}{2}$$

Если потери давления приемлемы, то продолжают расчёт.

7. Принимая по таблицам значения  $d_{50}^T$  и  $\lg \sigma_{\varepsilon}^T$  для табличных условий, определяют значения при рабочих условиях (диаметр циклона, скорость потока, плотность пыли, динамическая вязкость газа) по уравнению:

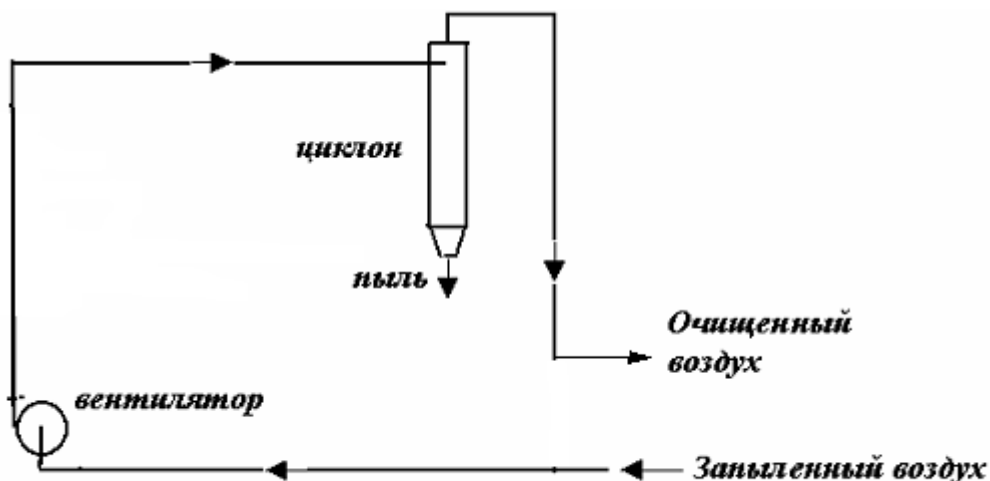
$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{(D/D_T)(\rho_{\text{чТ}}/\rho_{\text{ч}})(\mu/\mu_{\text{ч}})(v_T/v)}$$

8. Определяют параметр X по формуле:

$$X = \frac{\lg(d_m/d_{50})}{\lg^2 \sigma_{\varepsilon} + \lg^2 \sigma_{\text{ч}}}$$

9. По таблицам по параметру X находят значение  $\Phi(X)$ , которое представляет собой эффективность очистки газа в долях единицы, сравнивают полученное значение с требуемым и если не годится, берут другой циклон и повторяют расчет.

Схема лабораторной установки.



Пример расчета

**Дано:** Расход очищаемого воздуха  $L=10000\text{м}^3/\text{ч}$ , температура воздуха  $t=40^\circ\text{C}$ , пыль горелой земли литейного цеха, с начальной концентрацией  $C_1=10000\text{мг}/\text{м}^3$ , плотность пыли  $\rho_p=2900\text{кг}/\text{м}^3$ , медианный размер (диаметр) частиц  $d_m=15\text{мкм}$ .

Необходимо: подобрать циклон, определить его основные размеры.

**Решение:** при  $t=40^\circ\text{C}$ , плотность воздуха  $\rho=1,128\text{кг}/\text{м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu=19,3\cdot 10^{-6}\text{Па}\cdot\text{с}$ .

1. Выбираем тип циклона по таблице с техническими характеристиками (каталог) и определим оптимальные скорость в сечении циклона.

Согласно таблицы: примем циклон ЦН-24 при скорости в циклоне  $V_0=4,5\text{м}/\text{с}$ .

2. Определяем необходимую площадь сечения циклона  $F$ ,  $\text{м}^2$

$F=L/3600\cdot V_0$ , где  $L$  – расход воздуха,

$$F=10000/3600\cdot 4,5=0,617\text{м}^2.$$

3. Определяем диаметр циклона  $D$ , м, задаваясь числом циклонов  $n$ :

$$D=1,13\cdot\sqrt{\frac{F}{n}}.$$

Для циклонов НИИОГаз диаметры: 150,200,300,450,500,600,700,800,900,1000,1200,1400,1600.

$$D'=1,13\cdot\sqrt{0,617}=0,888\text{м}$$

Принимаем  $n=1$ . Принимаем ближайший диаметр циклона  $D=0,9\text{м}$ .

4. Определяем действительную скорость в циклоне, она не должна отклоняться от оптимальной не более чем на 15%.

$$V'_0=1,27\cdot L/3600\cdot n\cdot (D')^2=1,27\cdot 10000/3600\cdot 1\cdot 0,9^2=4,36\text{м}/\text{с}$$

$$\text{Отклонение от оптимальной } \frac{4,5-4,36}{4,5}\cdot 100=3\% < 15\%$$

5. Если циклонов  $n>1$ , то выбираем их компоновку.

Принимаем установку одиночного циклона с выбросами воздуха в атмосферу  $\zeta_0=80$ .

6. Определим гидравлическое сопротивление циклона  $\Delta p_{\text{ц}}$ :

$$\Delta p_{\text{ц}}=\zeta_{\text{вх}}\cdot(\rho\cdot V_{\text{вх}}^2/2)=\zeta_{\text{ц}}\cdot(\rho\cdot (V'_0)^2/2),$$

где  $\zeta_{\text{вх}}$  – коэффициент местного сопротивления отнесенный к скорости во входном сечении циклона  $V_{\text{вх}}$ ,

$\zeta_{\text{ц}}$  – коэффициент местного сопротивления отнесенный к действительной скорости  $V'_0$ .

Действительный КМС:

$$\zeta_{\text{ц}}=K_1\cdot K_2\cdot \zeta_0+\Delta\zeta_0,$$

где  $K_1$  – коэффициент зависящий от диаметра циклона (т.8.4),

$K_2$  – поправочный коэффициент на запыленность воздуха,

$\zeta_0$  – КМС циклона  $D=500$  (т.8.3),



$\Delta\zeta_0$  – коэффициент, зависящий от компоновки группы циклонов, для одиночного с выбросом в атмосферу  $\Delta\zeta_0=0$ .

$$\zeta_u = 1 \cdot 0,95 \cdot 80 + 0 = 76$$

$$K_1=1$$

$$K_2=0,95 \text{ при } c=10\text{г/м}^3$$

$$\Delta p_u = \zeta_u \cdot (\rho \cdot (V_0')^2 / 2) = 76 \cdot (1,128 \cdot (4,36)^2 / 2) = 814\text{Па}$$

7. По графику (фракционная эффективность очистки циклонами НИИОГаза) определяем размер пыли  $d$  с эффективностью улавливания 50% для выбранного типа циклона при  $D=500$  условия эксперимента: скорость движения воздуха  $V_0$ , плотность  $\rho_{ц}=2670\text{кг/м}^3$ , динамическая вязкость  $\mu=17,75 \cdot 10^{-6}\text{Па}\cdot\text{с}$ .

Для определения  $E$  циклона других диаметров определяем новое значение  $d'$  по формуле:

$$d' = 548,5 \cdot d \sqrt{D' \cdot \mu' \cdot V_0' / \rho_n' \cdot V_0'}$$

После на графике находят точку с координатами  $E=50\%$  и  $d'$ , из этой точки проводят линию, параллельно линии  $d$  для выбранного типа циклона, по которой определяют фракционную эффективность.

Размер пыли  $d=5\text{мкм}$  для графика

Новый размер:

$$d' = 548,5 \cdot 5 \sqrt{900 \cdot 19,3 \cdot 10^{-6} \cdot 4,5 / 2900 \cdot 4,36} = 6,82\text{мм}$$

На график наносим точку  $\eta=50\%$ ,  $d=6,82\text{мкм}$  и через нее проводим линию 7, параллельно линии 4, которая определяет фракционную эффективность очистки запроектированного циклона. Для медианного размера  $d=15\text{мкм}$ , следовательно по линии 7 будет  $\eta=83\%$ .

Основные размеры циклона:

$$D=900\text{мм}$$

$$\text{Выхлопная труба: } D_{\text{выхл}}=900 \cdot 0,59=530\text{мм}$$

$$\text{Входной патрубков воздуха} = 900 \cdot 0,26 \times 900 \cdot 1,11=235 \times 1100\text{мм}$$

$$\text{Общая высота } 900 \cdot 4,26=3835\text{мм}$$

Литература.

1. Лабораторный практикум по курсу "Теплогоснабжение, отопление и вентиляция" под общей ред. С.В. Бакановой, 3-е изд. - Пенза, 2003, 153 с.
2. Штокман А.Е. Очистка воздуха. АСВ, 1999.