

Министерство образования и науки Республики Казахстан
Некоммерческое акционерное общество
«Алматинский университет энергетики и связи»

А.А. Абикенова

**ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ВЫБРОСОВ**

Учебное пособие

Алматы 2018

УДК 502.3:628.39 (075.8)

ББК 68.9

A15

Рецензенты

Доктор PhD, академик МАНЭБ, заместитель директора по науке
института архитектуры, строительства и энергетики им. Т.К. Басенова
НАО КазННТУ имени К.И. Сатпаева

Жумадилова Ж.О.

кандидат технических наук, начальник отдела экологии
ТОО «Смарт Инжиниринг»

А.А. Демеуова

профессор кафедры «Безопасность труда и инженерная экология»

АУЭС

Ф.Р. Жандаулетова

Рекомендовано к изданию Ученым советом Алматинского университета
энергетики и связи (Протокол №__ от . .2018)
Печатается по тематическому плану выпуска ведомственной литературы
АУЭС на 2018 год, позиция 15.

А.А.Абикенова А15 Защита окружающей среды от промышленных выбросов. Учебное пособие для студентов специальности 5В073100 – Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды. - Алматы: АУЭС, 2018 - 106 с.: табл.25, ил.39, библиогр. 23.

ISBN 978-601-7939-05-2

Пособие предназначено для студентов специальности 5В073100 – «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды». В пособии приведена классификация и характеристика загрязняющих атмосферный воздух веществ. Представлены обобщенные и систематизированные сведения о современных методах и способах защиты атмосферного воздуха от промышленных выбросов.

УДК 502.3:628.39 (075.8)

ББК 68.9

ISBN 978-601-7939-05-2

© АУЭС, 2018

Абикенова А.А.

Содержание

Введение.....	4
1 Источники загрязнения атмосферного воздуха.....	7
1.1 Характеристика источников загрязнения атмосферы.....	7
1.2 Методы определения количественных и качественных характеристик выбросов загрязняющих газов в атмосферу.....	13
1.3 Методы определения количественных и качественных характеристик выбросов пыли в атмосферу.....	18
1.4 Нормирование примесей в атмосферном воздухе.....	20
2 Основные физико-химические свойства загрязняющих веществ, параметры очищаемых газов и оценка эффективности систем очистки.....	26
3 Физический механизм очистки воздуха от твердых примесей.....	32
4 Техника и технология удаления загрязняющих веществ из атмосферных выбросов.....	35
5 Аппараты сухой очистки газовоздушных выбросов.....	36
5.1 Гравитационные пылеуловители.....	36
5.2 Инерционные пылеуловители.....	40
5.3 Центробежные пылеуловители.....	41
6 Очистка газов от твердых примесей методом фильтрации.....	55
6.1 Волокнистые фильтры.....	58
6.2 Зернистые фильтры.....	59
6.3 Тканевые фильтры. Рукавные тканевые фильтры.....	60
7 Электрофильтры.....	7
8 Аппараты мокрой очистки газовоздушных выбросов.....	76
8.1 Полые газопромыватели.....	77
8.2 Насадочные газопромыватели.....	81
8.3 Барботажные и пенные аппараты.....	81
8.4 Газопромыватели ударно-инерционного действия.....	83
8.5 Ротоклон.....	84
8.6 Газопромыватели центробежного действия.....	85
8.7 Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури).....	86
8.8 Туманоуловители.....	89
9 Очистка газов от парообразных и газообразных примесей.....	91
9.1 Абсорбционные методы.....	92
9.2 Адсорбционные методы.....	96
9.3 Термическая нейтрализация.....	99
Приложения.....	101
Список литературы.....	103

Введение

Атмосфера – это оболочка Земли, которая подвержена антропогенному загрязнению вредными веществами. Воздух атмосферы дает возможность дышать живым организмам, так как содержит кислород. Атмосфера препятствует проникновению на поверхность Земли вредных космических лучей, защищает от падения мелких метеоритов, которые сгорают в ней и др. Атмосфера обладает свойством самоочищения, поэтому антропогенное загрязнение окружающей среды до определенного периода времени достаточно хорошо компенсировалось процессами, происходящими в биосфере. Однако в результате интенсивной деятельности человека биосфера стала постоянно деградировать: ухудшается качество атмосферы, водоемов и почв, уничтожается фауна и флора. В результате интенсивного индустриального развития общества происходит значительное загрязнение окружающей среды, с которым она зачастую уже не в состоянии сама справиться. Выбросы и сбросы промышленных предприятий, энергетических систем и транспорта в атмосферу, водоемы и почву достигли таких масштабов, что в некоторых регионах земного шара, особенно в крупных промышленных центрах, уровни загрязнений окружающей среды значительно превышают допустимые санитарные нормы. Поэтому *проблема защиты окружающей среды* является одной из важных задач человечества.

На рисунке 1 показана общая схема загрязнения окружающей среды при функционировании любого промышленного предприятия.

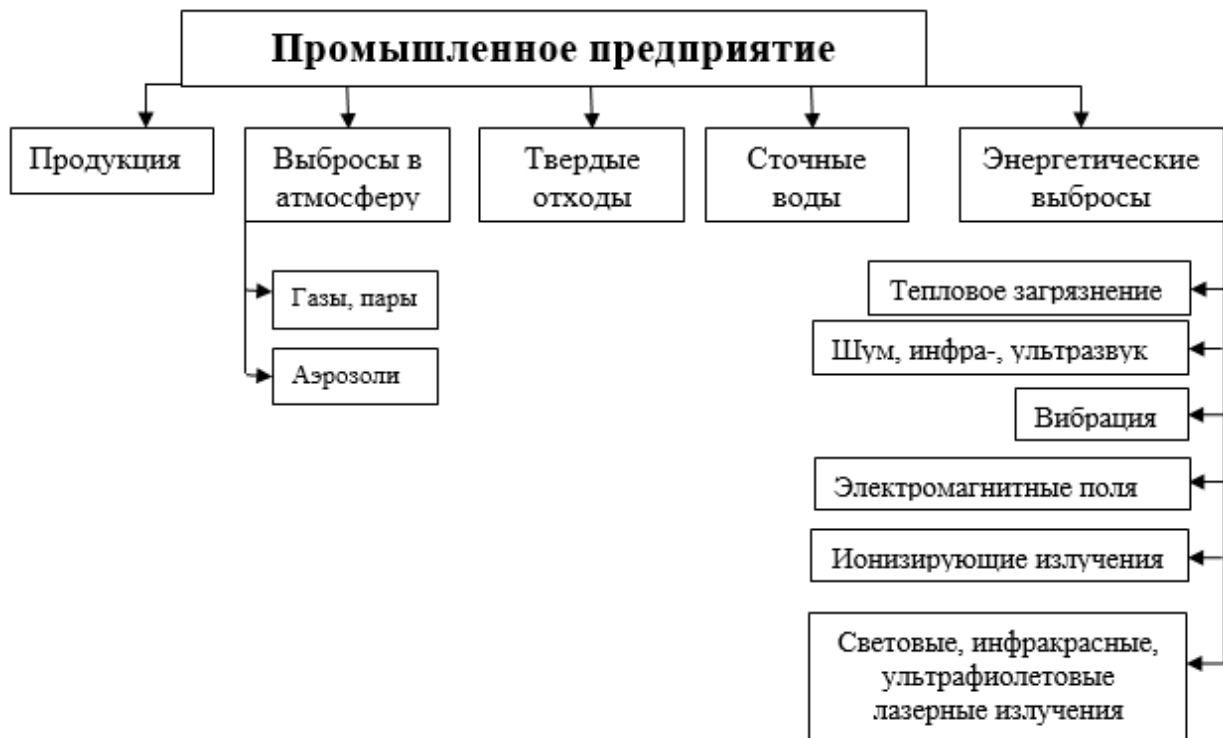


Рисунок 1 - Общая схема загрязнения окружающей среды

Для защиты окружающей среды (ЗОС) работа промышленности должна быть организована с внедрением безотходных технологий. «Безотходная технология представляет собой такой метод производства продукции (процесс, предприятие, территориально-производственный комплекс — ТПК), при котором все сырье и энергия используются наиболее рационально и комплексно в цикле: сырьевые ресурсы — производство — потребление — вторичные ресурсы, и любые воздействия на окружающую среду не нарушают ее нормального функционирования». (Формулировка принята на семинаре ЕЭК ООН по малоотходной технологии, Ташкент, 1984г.).

Невозможно представить себе абсолютно безотходное производство, однако отходы не должны нарушать нормальное функционирование природных систем, то есть, мы должны выработать критерии такого ненарушенного состояния природы, чтобы образующиеся отходы превращались в новые продукты.

Охрана природы требует, чтобы производство совершенствовалось, а отходы утилизировались; все процессы создавались на основе малоотходной и безотходной технологии. Применение малоотходной и безотходной технологии позволит не только решить проблему ЗОС, но одновременно обеспечит высокую экономическую эффективность производства.

Важная роль в ЗОС отводится мероприятиям по *рациональному размещению* источников загрязнения, а именно:

- вынесение предприятий из крупных городов и сооружение новых в малонаселенных районах;
- расположение их с учетом топографии местности и розы ветров;
- установление санитарно-защитных зон (СЗЗ);
- рациональная застройка городов, обеспечивающая оптимальные экологические условия для человека и зеленых насаждений.

1 Источники загрязнения атмосферного воздуха

1.1 Характеристика источников загрязнения атмосферы

Загрязнение атмосферы происходит от двух видов источников: естественных и антропогенных. Классификация источников загрязнения атмосферного воздуха показана на рисунке 1.1 [1].

К *естественным* загрязнениям относятся: пыль растительного, вулканического и космического происхождения; пыль от эрозии почвы; туман, дымы и газы от лесных и степных пожаров; испарения различных биологических сред и т. п. Уровень загрязнения атмосферы от естественных источников является *природным фоном* загрязнения и незначительно изменяется со временем.

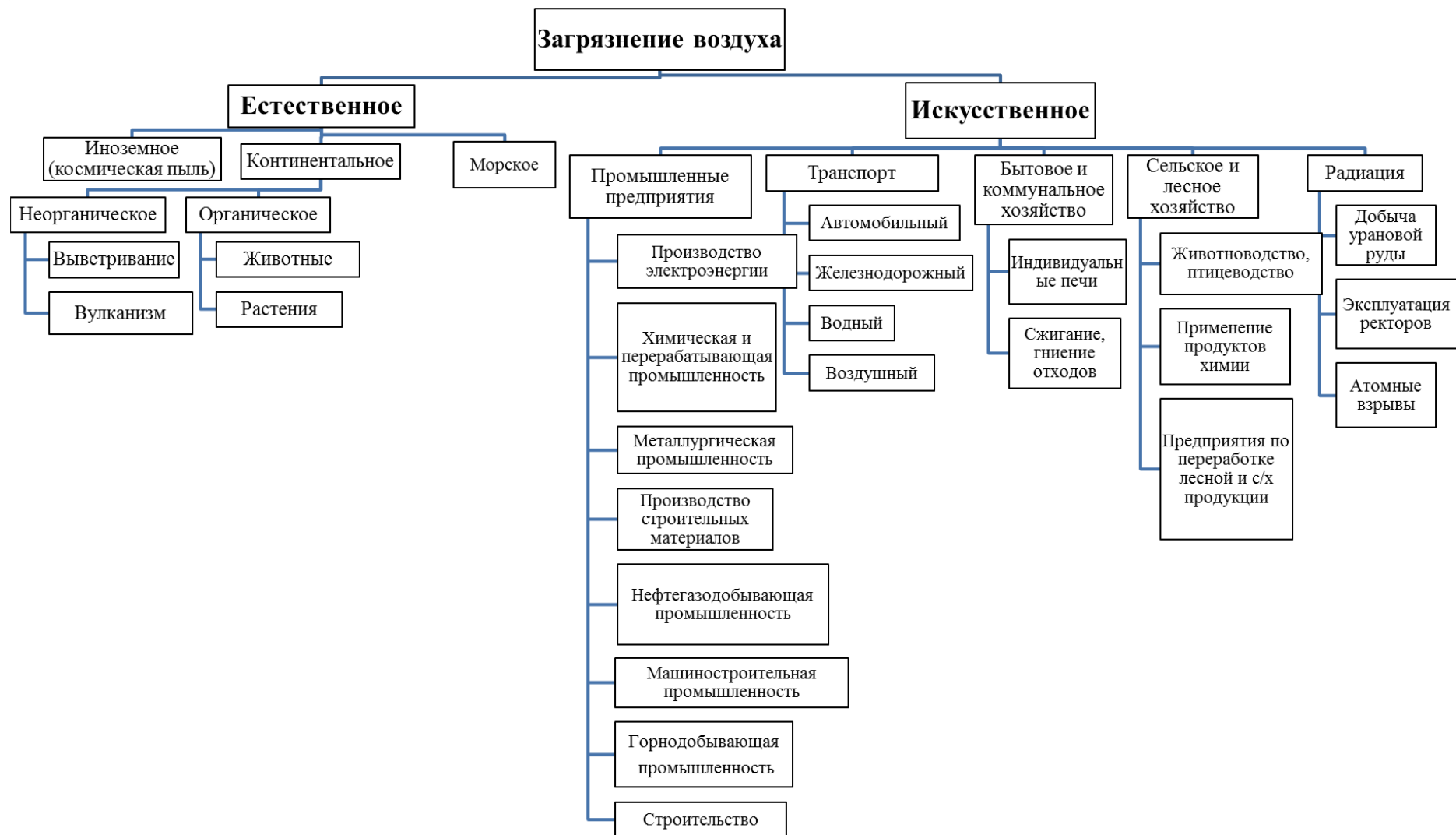


Рисунок 1.1 - Классификация источников загрязнения атмосферного воздуха

Антропогенные загрязнения отличаются большим многообразием видов и количеством источников. Самыми распространенными источниками загрязнения атмосферы являются машиностроительные предприятия (литейные, термические, прокатные, кузнечно-прессовые, сварочные, гальванические и лакокрасочные цехи), энергетические установки, автотранспорт, ракетные двигатели, топки, котельные, сельское хозяйство, добывающие отрасли и др. Самыми распространенными веществами, загрязняющими атмосферу, являются: оксид углерода CO, двуокись углерода CO₂ и серы SO₂, оксиды азота NO_x, летучие углеводороды, пыль; различные заводы выбрасывают пары кислот, щелочей, органических растворителей, ртути и т. п.

По агрегатному состоянию все загрязняющие атмосферу вещества (Г.В.Стадницкий. А.И.Родионов, 1982) делят на 4 группы:

- а) твердые;
- б) жидкие;
- в) газообразные;
- г) смешанные.

Промышленные выбросы в атмосферу классифицируются:

- по организации отвода и контроля (организованные и неорганизованные);
- по режиму отвода (непрерывные и периодические);
- по температуре (нагретые и холодные);
- по локализации (в основном, вспомогательном, подсобном производствах).
- по признакам очистки (выбрасываемые без очистки, выбрасываемые после очистки).

Организованный промышленный выброс - это выброс, поступающий в атмосферу через специально сооруженные газоотходы, воздухопроводы, трубы.

Неорганизованный промышленный выброс - это выброс, поступающий в атмосферу, выброс в виде ненаправленных потоков газа в результате нарушения герметичности оборудования, отсутствия или неудовлетворительной работы оборудования. Промышленные выбросы подразделяю на:

Первичные - непосредственно поступающие в атмосферу от тех или иных источников.

Вторичные - образованные от первичных. Они более токсичны.

Аэрозоли - это твердые или жидкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе. Твердые компоненты аэрозолей в ряде случаев особенно опасны для организмов, а у людей вызывают специфические заболевания. В атмосфере аэрозольные загрязнения воспринимаются в виде дыма, тумана, мглы или дымки. Значительная часть аэрозолей образуется в атмосфере при взаимодействии твердых и жидких

частиц между собой или с водяным паром. Большое количество пылевых частиц образуется также в ходе производственной деятельности людей.

Литейные цехи содержат в основном электродуговые и индукционные печи и другое оборудование. Это наиболее крупные источники пылегазовыделения. Например, при производстве одной тонны чугуновых отливок образуются: до 300 кг CO, 1–2 кг SO₂, до 50 кг пыли, оксиды азота, аммиак, фенолы и другие вредные химические вещества (ВХВ).

Термические цехи оборудованы нагревательными печами на жидком и газообразном топливе. Вентиляционный воздух из этих цехов содержит: пары масла, аммиака, цианистого водорода и других вредных веществ. Из дробеструйных камер после очистки металла от окалины с отходящим газом выбрасывается до 10 г/м³ твердых частиц.

Сварочные, прокатные и кузнечно-прессовые цехи при обработке металла выделяют много пыли, тумана кислот и масел, токсичные газы. При сварке образуется мелкодисперсная пыль, до 99 % состоящая из субмикронных частиц. Для удаления окалины с поверхности горячекатанной полосы применяют травление в серной и соляной кислотах. При этом среднее содержание кислоты в удаляемом воздухе достигает 3 г/м³. Газовая и плазменная резка металлов сопровождается выделением мелкодисперсной пыли, CO, NO_x.

Гальванические цехи и цехи механической обработки металлов используют при травлении растворы серной, соляной, азотной и плавиковой (HF) кислот. При воронении в воздух выделяются особо токсичные пары цианистых солей, хромовой и азотной кислот и др.

Лакокрасочные цехи и цехи по производству неметаллических изделий из стеклопластика, пластмасс, полимеров и при нанесении краски на поверхности изделий значительно загрязняют окружающую среду. В этом случае в атмосферу с выбрасываемым воздухом поступают пары растворителей, красок, SO₂, CO, H₂S, пары бензина, толуола, ксилола, пыль и др. Особенно много вредных веществ выделяется при производстве пластмасс, синтетических волокон и т.п.

Выбросы энергетических установок ТЭЦ, котельных, автотранспорта и других транспортных средств определяются видом используемого топлива и режимами работы агрегатов. При сжигании органического топлива образуется CO₂ и водяной пар. Но в атмосферу с ними поступают и примеси топлива, продукты неполного сгорания топлива: оксид углерода, сажа, углеводороды, бенз(а)пирен C₂₀H₁₂, зола, оксиды серы, азота, свинца, а также урана и тория. Например, ТЭЦ мощностью 2,5 млн кВт за сутки расходует около 20 тыс. т угля и выбрасывает в атмосферу до 700 т SO₂ и SO₃, 200 т оксидов азота, около 200 т твердых частиц (зола, сажа, пыль).

Автотранспорт выбрасывает нетоксичные (N₂, O₂, H₂O (пары), CO₂, H₂) и токсичные вредные вещества (NO_x, C_nH_m, альдегиды, сажа, бенз(а)пирен, свинец при использовании этилированного бензина).

Основными источниками искусственных аэрозольных загрязнений воздуха являются ТЭС, которые потребляют уголь высокой зольности, обогатительные фабрики, металлургические, цементные, магнезитовые и сажевые заводы. Аэрозольные частицы от этих источников отличаются большим разнообразием химического состава. Чаще всего в их составе обнаруживаются соединения кремния, кальция и углерода, реже - оксиды металлов: железа, магния, марганца, цинка, меди, никеля, висмута, селена, мышьяка, бериллия, кадмия, хрома, кобальта, молибдена, а также асбест. Еще большее разнообразие свойственно органической пыли, включающей алифатические и ароматические углеводороды, соли кислот. Она образуется при сжигании остаточных нефтепродуктов, в процессе пиролиза на нефтеперерабатывающих, нефтехимических и других подобных предприятиях.

Постоянными источниками аэрозольного загрязнения являются промышленные отвалы - искусственные насыпи из переотложенного материала, преимущественно вскрышных пород, образуемых при добыче полезных ископаемых или же из отходов предприятий перерабатывающей промышленности, ТЭС. Источником пыли и ядовитых газов служат массовые взрывные работы. Так, в результате одного среднего по массе взрыва (1250 - 1300 тонн взрывчатых веществ) в атмосферу выбрасывается около 12 тыс. куб. м условного оксида углерода и более 1150 тонн пыли (11, с. 74). Производство цемента и других строительных материалов также является источником загрязнения атмосферы пылью.

В соответствии с ГОСТ 12.0.0030 - 74 «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с изменениями по И-Л-Х1-91)» повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны относятся к физически опасным и вредным производственным факторам. Действие вредных веществ на организм человека обусловлено их физико-химическими свойствами. Согласно ГОСТ 12.0.003-74, группа химически опасных и вредных производственных факторов по характеру воздействия на организм человека подразделяются на следующие подгруппы:

- а) общетоксические;
- б) раздражающие;
- в) сенсibiliзирующие (лат. *sensibilis* чувствительный);
- г) канцерогенные (лат. *cancer* рак, злокачественная опухоль);
- д) мутагенные (лат. *mutatio* изменение, перемена);
- е) влияющие на репродуктивную функцию.

Большинство промышленных вредных веществ обладают *общетоксическим действием*: ароматические углеводороды и их амидо- и нитропроизводные (бензол, толуол, ксилол, нитробензол, анилин и др.). Большой токсичностью обладают ртутьорганические вещества, тетраэтилсвинец, фосфорорганические вещества, хлорированные углеводороды (тетрахлорид углерода, дихлорэтан и др.).

Раздражающим действием обладают кислоты, щелочи, а также хлор-, фтор-, серо-, и азотсодержащие соединения (фосген, аммиак, оксиды серы и азота, сероводород и др.). Эти вещества при контакте с биологическими тканями они вызывают воспалительную реакцию, причем в первую очередь страдают органы дыхания, кожа и слизистые оболочки глаз.

К *сенсibiliзирующим* относятся вещества, которые после относительно непродолжительного действия на организм вызывают в нем повышенную чувствительность к этому веществу. При последующем даже кратковременном контакте с этим веществом у человека возникают бурные реакции, чаще всего приводящие к кожным изменениям, астматическим явлениям, заболеваниям крови. Такими веществами являются некоторые соединения ртути, платины, альдегиды (формальдегид) и др.

Канцерогенные (бластомогенные, гр. blastos росток) вещества, попадая в организм человека, вызывают развитие злокачественных опухолей. Имеются данные о канцероопасности для человека относительно небольшой группы химических соединений, встречающихся в производственных условиях: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), которые могут входить в состав сырой нефти, но в основном образуются при термической (выше 350 °С) переработке горючих ископаемых (каменного угля, древесины, нефти, сланцев) или при неполном их сгорании. Выраженной канцерогенной активностью обладают: 7,12-диметилбенз(а)антрацен, 3,4-бенз(а)пирен, 1,2-бензантрацен. Среди продуктов термической переработки горючих ископаемых наиболее канцерогенными являются вещества сухой перегонки каменного угля. Канцерогенные свойства присущи и продуктам нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: мазутам, гудрону, крекинг-остатку, нефтяному коксу, битумам, маслам, саже и др. Канцерогенными свойствами обладают ароматические амины (продукты лакокрасочной промышленности), а также пыль асбеста.

Яды, обладающие *мутагенной активностью*, влияют на генетический аппарат зародышевых и соматических (телесных) клеток организма. Мутации в клетках приводят к их гибели или к функциональным изменениям. Это может вызвать снижение общей сопротивляемости организма, раннее старение, а иногда и тяжелые заболевания. Воздействие мутагенных веществ может сказаться и на потомстве (не всегда первого, а, возможно, второго и третьего поколений). Мутационной активностью обладают: этиленамин, уретан, органические перекиси, иприт, оксид этилена, формальдегид, гидроксилламин.

К веществам, влияющим на репродуктивную функцию (функцию воспроизведения потомства), относят бензол и его производные, сероуглерод, хлоропрен, свинец, сурьма, марганец, ядохимикаты, никотин, этиленамин, соединения ртути и др.

Существуют и другие классификации вредных веществ, например, по преимущественному действию на определенные органы или системы человека, по основному вредному воздействию (удушающие, раздражающие,

нервные (нейротропные), кровяные яды, печеночные и т.д.) по воздействию с ферментными системами, по величине среднесмертельной дозы и др.

По степени воздействия на организм человека все вредные вещества подразделяются на четыре класса (ГОСТ 12.1.007-76):

1 класс – вещества *чрезвычайно опасные* (3,4-бен(а)пирен, ртуть, озон, фоген и др); ПДК менее 0,1 мг/м³.

2 класс – вещества *высокоопасные* (оксиды азота, бензол, йод, марганец, медь, сероводород, едкие щелочи, хлор и др); ПДК 0,1 - 1,0 мг/м³.

3 класс – вещества *умеренно опасные* (ацетон, ксилол, сернистый ангидрид, метиловый спирт и др.); ПДК 1,1 -10,0 мг/м³.

4 класс – вещества *малоопасные* (аммиак, бензин, скипидар, этиловый спирт, оксид углерода и др.). ПДК более 10 мг/м³.

Следует иметь в виду, что и вещества, малоопасные при длительном воздействии, могут при больших концентрациях вызывать тяжелые отравления.

Многие вещества (например, пары бензина, ацетона, аммиака), попадая в организм, приводят к острым и хроническим отравлениям. При воздействии на человека больших доз на протяжении одной рабочей смены возникает *острое отравление*. Эти отравления зависят в основном от вполне устранимых причин — плохой организации производства, нарушений трудовой дисциплины и т.д. Однако небольшая часть связана с несовершенством технологии и вентиляции. Постепенное поступление в организм небольших количеств токсичных веществ может привести к *хроническим отравлениям*.

При любой форме отравления характер действия промышленных ядов определяется степенью его физической активности - токсичности. Промышленными ядами называют те ядовитые вещества, с которыми рабочий встречается на производстве и которые при неправильной организации труда и отсутствии соответствующих санитарно-технических мер могут оказать вредные воздействия на организм человека и его работоспособность.

Степень воздействия загрязняющих веществ на организм человека зависит от:

- концентрации;
- химического состава;
- токсичности;
- радиоактивности;
- дисперсности и формы;
- электрической заряженности.

Образование производственной пыли сопровождает технологические процессы многих отраслей промышленности, связанных с получением или переработкой пылевидных материалов. Это является одним из широко распространенных вредных факторов, оказывающих негативное воздействие на здоровье работающих. Повышенное содержание пыли может наблюдаться

и в крупных учреждениях массового обслуживания населения (супер- и гипермаркетах, комбинатах сервисного обслуживания, выставочных комплексах и т.п.), в которых существует движение больших людских и товарных потоков. Кроме этого, пыль в воздухе может образовывать взрывопожароопасные смеси.

Производственной пылью называют взвешенные в воздухе твердые частицы размерами от нескольких десятков до долей микрометра. Обычно твердые частицы в смеси с воздухом (газом) называют дисперсными системами. При этом твердые частицы называют дисперсной фазой, а газовую составляющую – дисперсионной средой. Если твердые частицы имеют размеры менее 0,1 мкм, такие системы называются коллоидными аэрозолями, или, в последнее время, наносистемами. Сами частицы называют коллоидными, или наночастицами. Если твердые частицы, взвешенные в воздухе, имеют размер более 0,1 мкм, такие системы называют *аэровзвесьями*.

Все виды производственной пыли подразделяются: на органические, неорганические и смешанные. Органические, в свою очередь, делятся на пыль естественного (древесная, хлопковая, льняная, шерстяная и др.) и искусственного (пыль пластмасс, резины, смол и др.) происхождения. Неорганические пыли бывают металлическими или минеральными. К смешанным видам пыли относят каменноугольную пыль, содержащую частицы угля, кварца и силикатов, а также пыли, образующиеся в химических и других производствах.

Основными параметрами, характеризующими физические свойства пыли, являются:

- дисперсный состав (крупность частиц);
- объемная (насыпная);
- удельная поверхность, форма частиц;
- порозность (объемная доля пустот);
- истинная плотность;
- теплоемкость;
- теплопроводность;
- влажность;
- гигроскопичность;
- электризуемость;
- подвижность.

Дисперсный (гранулометрический) состав показывает количественное распределение частиц по их крупности, которую характеризуют величиной эквивалентного диаметра.

Дисперсный состав пыли определяется методами микроскопии, седиментометрии, механического разделения. Микроскопический метод основан на измерении числа и размеров частиц, позволяет определить их среднюю величину. Обычно, в этом случае применяются оптический (размеры определяемых частиц от 100 до 0,1 мкм) и электронный (размер

определяемых частиц менее 0,1 мкм) микроскопы.

Кседиментационному методу относятся способы разделения порошков на фракции (размер определяемых частиц от 100 до 1 мкм), основанные на различной скорости оседания частиц. Способ воздушной сепарации позволяет разделить пыль на фракции выдуванием частиц воздухом в вертикальных цилиндрах с разными скоростями его движения. Определение числа и размера частиц по скорости оседания их в жидкости (воде, спирте, глицерине и др.) называется седиментационным анализом.

Методы механического разделения частиц основаны на процессах просеивания и фильтрации (ситовой и фильтрационный анализы). Для разделения проб исследуемого материала на фракции используют набор сит со стандартными размерами отверстий, образующих некоторый закономерный ряд. Ситовой анализ позволяет определять состав пыли с частицами размером до 40 мкм.

Удельная поверхность частиц тесно связана с дисперсным составом и увеличивается с уменьшением размера частиц.

Порозность слоя сыпучего материала P характеризует объем воздуха, содержащегося в этом слое, и определяется по разности насыпной и истинной плотности материала.

Производственной пылью называются находящиеся во взвешенном состоянии в воздухе твердые частицы размером от нескольких десятков до долей микрона. Пыль принято также называть аэрозолем, имея в виду, что воздух является дисперсной средой, а твердые частицы - дисперсной фазой. Производственную пыль классифицируют по способу образования, происхождения и размерам частиц.

В соответствии со способом образования различают пыли (аэрозоли) дезинтеграции и конденсации. Первые являются следствием производственных операций, связанных с разрушением или измельчением твердых материалов и транспортировкой сыпучих веществ. Второй путь образования пыли – возникновение твердых частиц в воздухе вследствие охлаждения или конденсации паров металлов или неметаллов, выделяющихся при высокотемпературных процессах.

Степень воздействия пыли зависит от:

- поверхности и формы частиц;
- способности адсорбировать газы, пары, радиоактивные вещества;
- электрической заряженности (удельного электрического сопротивления);
- дисперсности частиц;
- твердости частиц.

1.2 Методы определения количественных и качественных характеристик выбросов загрязняющих газов в атмосферу

Для определения количественных и качественных характеристик выделений и выбросов ЗВ в атмосферу используются инструментальные и расчетные (расчетно-аналитические) методы.

Инструментальные методы являются преобладающими для источников с организованным выбросом загрязняющих веществ в атмосферу.

К основным источникам с организованным выбросом относятся:

- дымовые и вентиляционные трубы;
- вентиляционные шахты;
- аэрационные фонари;
- дефлекторы.

При инструментальных измерениях должны применяться только газоаналитические средства, предназначенные для контроля промышленных выбросов и внесенные в Государственный реестр средств измерений.

Объемы отходящих газов, полученные по результатам инструментальных измерений, должны быть приведены к нормальным условиям (н.у.): 0°C, 101,3 кПа.

Расчетные методы применяются, в основном, для определения характеристик неорганизованных выделений (выбросов). К неорганизованным источникам относятся:

- неплотности технологического оборудования (пропуски технологических газов через уплотнения перекачивающего оборудования и запорно-регулирующую арматуру, расположенную вне вентилируемых помещений), в том числе работающего при избыточном давлении;
- факельные установки и амбары для сжигания некондиционного углеводородного сырья;
- открытое хранение топлива, сырья, материалов и отходов, в том числе пруды-отстойники и накопители, нефтеловушки, шламо- и хвостохранилища, золоотвалы, отвалы горных пород, открытые поверхности испарения и т. п.;
- взрывные работы;
- погрузочно-разгрузочные работы, в том числе маршруты перемещения сыпучих материалов;
- карьеры добычи полезных ископаемых, открытые участки их дробления и отсева на фракции;
- оборудование и технологические процессы, расположенные в производственных помещениях, не оснащенных вентиляционными установками, а также расположенные на открытом воздухе (например, передвижные сварочные посты, пилорамы и т.д.).

В рамках работ по учету, нормированию и контролю выбросов стационарных источников к неорганизованным источникам также относятся:

- транспортные средства, хранящиеся или эксплуатируемые на

производственной территории (автотранспорт, тепловозы, дорожная и строительная техника, речные и морские суда в акватории порта и т.п.);

- резервуарные парки, сливно-наливные железно- и автодорожные эстакады и терминалы речных и морских портов.

Оценка выбросов от неорганизованных источников выполняется с помощью расчетных (расчетно-аналитических) методов, базирующихся на удельных технологических показателях, балансовых схемах, закономерностях протекания физико-химических процессов, а также на сочетании инструментальных измерений и расчетных формул, учитывающих параметры конкретных неорганизованных источников.

Для инструментального определения содержания вредных веществ используют следующие методы анализа: микрообъемный, фотометрический, люминесцентный, спектроскопический, хроматографический, полярографический, колориметрический.

Микрообъемный метод основан на свойствах отдельных компонентов газовой смеси вступать в химические реакции только с определёнными реагентами – поглотителями. При пропускании газовой смеси через раствор – поглотитель за счёт поглощения отдельных компонентов, сокращается общий объём газовой пробы. По этой разности объёма газовой пробы до поглощения и после устанавливается содержание компонента в смеси (в % объёмных).

Фотометрический метод основан на способности некоторых веществ растворяться в специальных растворах или в воде, придавая им определённую окраску. Степень окраски зависит от концентрации вредного вещества. В свою очередь, окраска раствора влияет на его светопропускание. На этой способности растворов основан фотометрический метод анализа, т.е. измерения интенсивности светопоглощения окрашенными растворами по сравнению со стандартными шкалами.

К фотометрическим методам относятся колориметрические и нефелометрические методы, основанные на визуальных наблюдениях или осуществляемые с помощью специальных приборов – фотоэлектроколориметров, спектрофотометров и нефелометров.

Спектроскопический метод основан на способности элементов, помещённых в пламя вольтовой дуги (3500-4000°С), давать определенный спектр излучения, который пропускается через систему линз и фиксируется на фотопластинке. Каждый элемент обладает своим спектром излучения, своей характерной линией спектра, с помощью микрофотометра измеряют интенсивность потемнения спектральных линий, присущих данному веществу, интенсивность потемнения фона пластинки и ряда специально подобранных «эталонов» – стандартов. Определение ведут по градуировочным графикам.

Люминесцентный метод основан на способности некоторых веществ отдавать поглощенную ими энергию в виде светового излучения. Явление, когда по окончании процесса возбуждения люминесценция практически

прекращается, называется флуоресценцией, когда не она продолжается в течение некоторого времени – фосфоресценцией.

При хроматографическом методе осуществляется разделение многокомпонентной газовой смеси, движущейся вдоль специального вещества-сорбента, на бинарные смеси отдельных компонентов.

Полярнографический метод основан на измерении предельного тока диффузии, возникающего при электролизе испытуемого раствора, с помощью ртутных (или других) электродов, при этом катодом служат – капли ртути, вытекающего из капилляра, а анодом – слой ртути в электролизе, имеющий значительную большую поверхность, чем катод. На эту ртуть в электролизе наливают испытуемый раствор. В момент разряжения на электроде ионов, способных восстанавливаться или окисляться, при определённом потенциале возникает ток, который после достижения некоторой величины остаётся постоянным, так называемый предельный ток диффузии.

Колориметрический метод основан на протягивании воздуха, содержащего загрязняющее вещество, через раствор, фильтровальную бумагу или зернистый твёрдый сорбент и измерении интенсивности полученной на них окраски путём сравнения с окраской стандартных шкал.

Газоанализаторы: применение и виды.

Газоанализаторы и газосигнализаторы в зависимости от условий применения и типа анализируемого вещества построены на различных принципах и имеют различную чувствительность. Приборы, имеющие высокую чувствительность, определяют воздушные загрязнения на уровне предельно допустимых концентраций, на уровне взрывных и огнеопасных концентраций, дают световой или звуковой сигнал при достижении соответствующего уровня концентрации.

Стационарные или переносные газоанализаторы для выборочного или непрерывного анализа состава газа доступны в исполнениях для множества видов газа и областей применения.

Газоанализаторы - приборы, дающие возможность контролировать состав газовой смеси. Для анализа воздушной среды производственных помещений наибольший интерес представляют автоматические приборы, непрерывно регистрирующие концентрации анализируемого компонента в течение определенного времени. Приборы должны быть снабжены сигнальным устройством.

Принципы действия газоанализаторов различны. В настоящее время широкое распространение для определения различных примесей в воздухе нашли оптические газоанализаторы, действие которых основано на избирательном поглощении газами лучистой энергии в инфракрасной, ультрафиолетовой или видимой областях спектра.

Большое распространение для определения вредных веществ в воздухе промышленных предприятий нашли фотометрические газоанализаторы,

основанные на поглощении лучистой энергии в видимой области спектра растворами или индикаторными лентами, изменяющими свою окраску при взаимодействии с анализируемым компонентом воздуха. Эти приборы отличаются высокой чувствительностью и избирательностью. Кроме того, они универсальны по конструкции, так как один и тот же прибор может быть применен для определения нескольких токсичных веществ.

Существует два вида фотометрических газоанализаторов - жидкостные и ленточные. В первых измеряют концентрации анализируемого компонента воздуха по светопоглощению раствора; принцип действия вторых основан на фотометрировании окраски индикаторной ленты, предварительно обработанной или смоченной раствором, вступающим в реакцию с анализируемым компонентом воздуха. Ленточные газоанализаторы чувствительнее жидкостных.

Представляют интерес ленточные газоанализаторы, работа которых основана на линейно-колористическом методе. На участок бумажной ленты наносят раствор реактива. При взаимодействии исследуемого воздуха с реактивом на поверхности индикаторной ленты появляется окрашенная линия, длина которой пропорциональна концентрации анализируемого компонента.

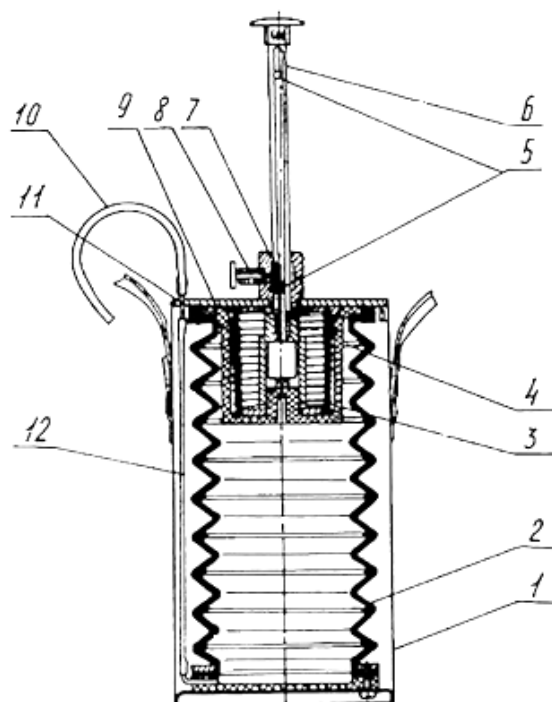
Для определения вредных веществ в воздухе широкое применение нашли также приборы упрощенного типа, с помощью которых можно быстро непосредственно в производственном помещении определять концентрации токсичных веществ. К этой группе приборов относятся универсальные газоанализаторы УГ-2, газоопределители ГХ-2, прибор для быстрого определения окиси углерода и др. Эти приборы состоят из воздухозаборного устройства и набора индикаторных трубок для определения различных веществ.

Газоанализатор УГ-2 с комплектом принадлежностей изображен на рисунке 1.2.

Универсальный газоанализатор УГ -2. Состоит из воздухозаборного устройства, общего для всех определяемых газов (паров), и индикаторных трубок с фильтрующими патронами, предназначенных для определения тех газов и паров, на которые калиброван прибор.

Исследуемый воздух протягивают через индикаторные трубки с помощью воздухозаборного устройства. Основным узлом воздухозаборного устройства является резиновый сильфон с расположенным внутри него металлическим стаканом, в котором помещена пружина в сжатом состоянии.

Пробу воздуха отбирают меховым аспиратором АМ-3. Основной частью аспиратора являются резиновые мехи, внутри которых расположены пружины, удерживающие его в растянутом положении. При сжатии мехов воздух выходит через выпускной клапан. Дистанционные ремешки ограничивают ход мехов.



1-корпус; 2-сильфон; 3-пружина 4-кольцо распорное; 5-канавка с двумя углублениями; 6 - шток; 7- втулка; 8 - фиксатор; 9-плата; 10-трубка резиновая; 11-штуцер ; 12-трубка резиновая.

Рисунок 1.2 - Газоанализатор УГ-2 в рабочем состоянии с комплектом принадлежностей и футляром

Время полного раскрытия мехов при индикаторной трубке, имеющих сопротивление 16,625 кПа (125 мм рт. ст.), составляет 8-9 с, объем просасываемого воздуха за полный ход аспиратора - 100 мл. Аспиратор приводят в действие одной рукой. Масса прибора 300 г.

Экспресс-анализ воздуха с помощью универсальных газоанализаторов может проводиться работниками предприятий, не имеющими специальной подготовки. На газоанализаторах УГ-2 и УГ-3 с помощью предварительно сжатого сильфона производится просасывание фиксированного объема загрязненного воздуха через индикаторные стеклянные трубки, заранее заполненные специальным индикаторным порошком.

По градуировочной шкале, по длине окрашенного столбика порошка в индикаторной трубке определяют концентрацию примеси в воздухе.

Исследуемый воздух через индикаторную трубку просасывается после предварительного сжатия сильфона штоком. На гранях (под головкой) штока обозначены объемы просасываемого при анализе воздуха. На цилиндрической поверхности штока предусмотрены четыре продольные канавки с двумя углублениями 8, служащими для фиксации двух положений штока фиксатором 5.

Расстояние между углублениями на канавках подобрано таким образом, чтобы при ходе штока от одного углубления к другому сильфон забирал заданный объем исследуемого воздуха.

Длина окрашенного столбика индикаторного порошка в трубке пропорциональна содержанию измеряемого вещества в исследуемом воздухе и измеряется по специально градуированной шкале.

1.3 Методы определения количественных и качественных характеристик выбросов пыли в атмосферу

Основным способом борьбы с пылью является предупреждение ее образования и выделения в воздух, где наиболее эффективными являются мероприятия технологического и организационного характера:

- внедрение непрерывной технологии, механизации работ;
- герметизация оборудования, пневмотранспортирование, дистанционное управление;
- замена пылящих материалов влажными, пастообразными, гранулирование;
- аспирация и др.

Большое значение имеет применение систем искусственной вентиляции, дополняющее основные технологические мероприятия по борьбе с пылью. Для борьбы с вторичным пылеобразованием, т.е. поступлением в воздух уже осевшей пыли, используют влажные методы уборки, ионизации воздуха и др.

В случаях, когда не удастся снизить запыленность воздуха в рабочей зоне более радикальными мероприятиями технологического и другого характера, применяются индивидуальные защитные средства различного типа: респираторы, специальные шлемы и скафандры с подачей в них чистого воздуха.

Необходимость строгого соблюдения ПДК требует систематического контроля за фактическим содержанием пыли в воздухе рабочей зоны производственного помещения.

Всемирная организация здравоохранения считает частицы пыли в воздухе одной из серьезнейших опасностей и причин множества заболеваний дыхательных путей и сердечно-сосудистой системы. Предельные концентрации частиц PM10 и PM2.5 в воздухе установлены в документе под названием «Руководство по качеству воздуха» («Air quality guidelines») в виде среднесуточных и среднегодовых величин приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Рекомендации ВОЗ по целевым уровням концентраций твердых частиц PM10 и PM2.5

Показатель	Среднесуточная	Среднегодовая
Твердые частицы PM2.5	0,025 мг/м ³	0,01 мг/м ³
Твердые частицы PM10	0,05 мг/м ³	0,02 мг/м ³

По мнению экспертов ВОЗ, только достижение таких уровней концентраций пыли в воздухе может позволить снизить смертность от легочных и сердечных заболеваний, ассоциированных с качеством воздуха.

Существует несколько основных методов измерения массовой концентрации аэрозолей в воздухе.

Наиболее распространенный метод – гравиметрия, при которой пробы воздуха прокачиваются через фильтр, и по разности массы фильтра до и после отбора пробы измеряется концентрация пыли в воздухе. Метод имеет как преимущества, так и недостатки. Он требует очень длительного отбора проб для анализа атмосферного воздуха, в котором частицы пыли, как правило, содержатся в низких концентрациях, но при этом обладает высокой точностью при определении больших концентраций пыли в воздухе рабочей зоны. Для определения содержания в воздухе пыли различных фракций используются специальные вспомогательные устройства – импакторы, позволяющие разделять частицы разных аэродинамических размеров.

Другой метод анализа воздуха на аэрозоли – оптический. Для анализа используется анализатор пыли («пылемер»), позволяющий в режиме реального времени измерять концентрации общей пыли, PM10, PM4, PM2.5, PM1. Технически прибор измеряет счетную концентрацию частиц аэрозоля в воздухе, а расчет массовой концентрации проводится на основе заложенных в программу моделей распределения массы частиц в зависимости от их размера и калибровочных зависимостей. Для калибровки прибора может использоваться импактор и гравиметрический метод, что позволяет достигать высокой точности измерений.

Главным достоинством данного метода является возможность быстро и с приемлемой точностью измерять низкие концентрации частиц в воздухе, поэтому при анализе атмосферного воздуха и воздуха в квартирах и офисных помещениях используется именно оптический метод.

Еще одна распространённая гравиметрическая методика применяется для определения сажи в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны. Принципиально анализ массовой концентрации ничем не отличается от измерения концентраций пыли в воздухе гравиметрическим методом. Разница заключается в том, что доля сажи в измеренной массе частиц, осевших на фильтр, определяется фотометрически.

1.4 Нормирование примесей в атмосферном воздухе

Основным критерием качества воздуха являются концентрации вредных веществ. Существуют различные единицы выражения концентрации: массовые, объемные, в долях, в процентах и другие. При санитарной оценке качества воздуха принято выражать содержание загрязняющих веществ (концентрацию) в миллиграммах на кубический метр воздуха (мг/м³). Это

применимо для любого агрегатного состояния примесей: газов, паров, аэрозолей, твердых веществ.

Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны - концентрации, которые при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 ч. или при другой продолжительности, но не более 40 ч. в неделю, в течение всего рабочего стажа не могут вызвать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

Первые предельно-допустимые концентрации были установлены для питьевой воды в 1939 г., для воздуха в 1951 году, а для почвы в 1980 г.

В воздухе, поступающем внутрь зданий и сооружений через приемные отверстия систем вентиляции и кондиционирования воздуха и через проемы для естественной проточной вентиляции, содержится 30% предельно допустимых концентраций вредных веществ в рабочей зоне производственных помещений.

Санитарно-гигиенические нормативы устанавливаются в интересах охраны здоровья человека и сохранения генетического фонда некоторых популяций растительного и животного мира. Гигиеническое нормирование охватывает также производственную и жилищно-бытовую сферу жизни человека.

Для каждого вредного вещества в воздухе устанавливают два нормативных значения: предельно допустимую концентрацию в воздухе рабочей зоны (ПДК_{р.з.}) и предельно допустимую концентрацию в атмосферном воздухе ближайшего населенного пункта (ПДК_{а.в.}).

ПДК_{р.з.} – это концентрация вредных химических веществ (в воздухе на уровне двух метров от пола), которая при работе не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа не может вызвать заболеваний у работающих и их детей.

ПДК_{а.в.} – это предельная концентрация вредных химических веществ, которая на протяжении всей жизни человека не должна оказывать на него вредного воздействия, включая отдаленные последствия на окружающую среду в целом.

Обычно ПДК_{р.з.} > ПДК_{а.в.}. На территории предприятия содержание примесей принимают равным 0,3ПДК_{р.з.}. Трехкратное снижение нормы содержания примесей в воздухе на территории предприятия по сравнению с ПДК_{р.з.} вызвано тем, что этот воздух используется для вентиляции производственных помещений (приточная вентиляция). Поэтому он должен быть более чистым.

Для воздуха населенных пунктов установлены два вида ПДК:

– максимальноразовая ПДК (ПДК_{м.р.}) - с целью предупреждения негативных рефлекторных реакций (ощущение запаха, световой

чувствительности глаз и т.п.) при кратковременном воздействии примесей;

– среднесуточная ПДК (ПДК_{с.с.}) - для предупреждения общетоксического, канцерогенного, мутагенного и других видов воздействия примеси на организм человека.

В воздухе населенных пунктов с населением более 200 тыс. человек и в курортных зонах концентрация вредных веществ с учетом рассеивания не должна превышать 80 % от ПДК_{м.р.}.

На практике имеет место следующее неравенство:

$$\text{ПДК}_{\text{р.з.}} > \text{ПДК}_{\text{м.р.}} > \text{ПДК}_{\text{с.с.}} \quad (1.1)$$

Наибольшая концентрация C любого вредного вещества в приземном слое воздуха за пределами санитарно-защитной зоны СЗЗ предприятия не должна превышать максимальной разовой предельно допустимой концентрации:

$$C \leq \text{ПДК}_{\text{м.р.}} \quad (1.2)$$

При одновременном присутствии в атмосфере нескольких вредных веществ, обладающих однонаправленным действием, их безразмерная суммарная концентрация должна удовлетворять условию:

$$C_1 / \text{ПДК}_1 + C_2 / \text{ПДК}_2 + \dots + C_n / \text{ПДК}_n \leq 1, \quad (1.3)$$

где C_1, C_2, \dots, C_n – концентрация вредных веществ в атмосфере в одной и той же точке местности, мг/м³;

$\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_n$ – максимальные разовые предельно допустимые концентрации вредных веществ в атмосфере, мг/м³.

Эффектом однонаправленного действия (суммации) обладает ряд вредных веществ: SO_2 и NO_2 , SO_2 и H_2S , сильные минеральные кислоты (серная, соляная, азотная), озон, формальдегид и другие (более 30 наименований веществ в различной их комбинации друг с другом).

Для вредных веществ, ПДК которых не утверждены определены (обычно на 3 года) *ориентировочные безопасные уровни воздействия* (ОБУВ). Таких веществ в настоящее время более 1500 наименований.

При проектировании предприятий в районах, где атмосферный воздух уже загрязнен выбросами от других, ранее построенных и действующих предприятий, необходимо нормировать их выбросы с учетом уже присутствующих в воздухе примесей. Их содержание рассматривается в качестве *фоновой концентрации* $C_{\text{ф}}$.

В Республике Казахстан предельно-допустимые концентрации регламентируется Приказом Министра национальной экономики Республики

Казахстан от 28 февраля 2015 года № 168. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 13 мая 2015 года № 11036 Об утверждении Гигиенических нормативов к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, в которых в табличном виде даются сведения по различным вредным веществам (таблицы 1.2-1.4) [16].

Таблица 1.2 - Предельно-допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест

№	Наименование вещества	Регистрационный номер CAS	Формула	Величина ПДК (мг/м ³)		Лимитирующий показатель вредности	Класс опасности	КОД загрязняющих веществ
				Максимальная разовая	Среднесуточная			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Азот (II) оксид (Азота оксид)	10102-43-9	NO	0,4	0,06	рефл.	3	0304
2.	Бенз/а/пирен (3,4-Бензпирен)	50-32-8	C ₂₀ H ₁₂	-	0,1 мкг/100м ³	рез.	1	0703
3.	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния в %: 70-20			0,3	0,1	рез.	3	2908
4.	Сера диоксид (Ангидрид сернистый, Сернистый газ, Сера (IV) оксид)	7446-09-5	S O ₂	0,5	0,05	рефл.-рез.	3	0330
5.	Формальдегид (Метаналь)	50-00-0	CH ₂ O	0,05	0,01	рефл.-рез.	2	1325

Лимитирующий (определяющий) показатель вредности характеризует направленность биологического действия вещества:

- рефлексорное (рефл);
- резорбтивное (рез).

Рефлексорное действие – реакция со стороны рецепторов верхних дыхательных путей: ощущение запаха; раздражение слизистых оболочек; задержка дыхания.

Возникает при кратковременном воздействии веществ, поэтому рефлексорное действие лежит в основе установления максимально разовых ПДК.

Резорбтивное действие – возможность развития общетоксических, гонадотоксических, эмбрионотоксических, мутагенных, канцерогенных и др. эффектов, возникновение которых зависит не только от концентрации вещества в воздухе, но и от длительности ее вдыхания. С целью предупреждения развития резорбтивного действия устанавливается среднесуточная ПДК.

Таблица 1.3 - Ориентировочные безопасные уровни воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест

№ п/п	Наименование вещества	№ по CAS	Формула	Величина ОБУВ (мг/м ³)	Код ЗВ
1	2	3	4	5	6
1	1-Адамантилэтилкетон		C ₁₃ H ₂₁ O	0,01	1415
2	Аденозин-5'-(тетрагидротрифосфат динатрия) (Аденозин-5 трифосфорной кислоты динатриевая соль, АТФ)	987-65-5	C ₁₀ H ₁₄ N ₅ NaO ₁₃ P ₃	0,05	0147
3	Азофоска (смесь солей фосфата и нитрата аммония, фосфатов кальция) (Нитроаммофоска)			0,02	2832
4	Акриламид (Акриловой кислоты амид)	79-06-1	C ₅ H ₅ NO	0,005	2041
5	L-Аланин (L-2-Аминопропановая кислота)	56-41-7	C ₃ H ₇ NO ₂	0,7	1501
6	Алкилбензолсульфоокислота из олефинов			0,04	1503
7	Алкилбензолы на основе олефинов C11-14			0,01	0635
8	Алкилдифенилы			0,1	0642

Таблица 1.4 - ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны

№ п/п	Наименование вещества	Регистрационный номер CAS (Chemical Abstracts Service)-уникальный численный идентификатор химических соединений	Формула	Величина на ПДК, мг/м ³	Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства	Класс опасности	Особенности действия на организм
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Азота диоксид	10102-44-0	NO ₂	2	п	3	О

Окончание таблицы 1.4

2	Азота оксиды /в пересчете на NO ₂ /			5	п	3	О
3	Азотная кислота ⁺	7697-37-2	HNO ₃	2	а	3	
4	Сера диоксид ⁺	7446-09-5	O ₂ S	10	п	3	
5	Пыль растительного и животного происхождения						
	а) с примесью диоксида кремния от 2 до 10%			-/4	а	4	А,Ф
	б) зерновая			-/4	а	5	А
	в) лубяная, хлопчатобумаж ная хлопковая, льняная, шерстя ная, пуховая и др. (с примесью диоксида кремния более 10%)			-/2	а	4	А,Ф
	г) мучная, древесная и др. (с примесью диоксида кремния менее 2%)			-/6	а	4	А
	д) хлопковая мука /по белку/			0, 5	а	3	А

Преимущественное агрегатное состояние в воздухе в условиях производства представлено в двух вариациях : «п» – пары; «а» - аэрозоли.

Используются аббревиатуры «CAS» – Chemical Abstracts Service (международная информационная система, осуществляющая регистрацию всех известных химических веществ) и «IUPAC» – International Union of Pure and Applied Chemistry (Международный союз теоретической и прикладной химии).

Особенности действия на организм:

«А» – вещества, способные вызывать аллергические заболевания в производственных условиях (моющие средства, зерновая пыль);

«Ф» – аэрозоли, преимущественно фиброгенного действия, могут вызывать фиброз легких, что связано с разрастанием соединительной ткани легких и тяжелыми последствиями;

«О» – вещества, с остронаправленным механизмом действия, например, оксид углерода нарушает процесс переноса кислорода гемоглобином крови, что может приводить к химическому удушью вплоть до смертельного исхода, сероводород также нарушает процесс усвоения кислорода и вызывает химическое удушье;

«К» – канцерогены, которые вызывают или достоверно увеличивают вероятность возникновения доброкачественных или злокачественных опухолей у людей (бенз(а)пирен, бензол, асбестовая пыль);

«+» – вредные вещества, способные проникать в организм не только при вдыхании, но и через кожу и слизистые оболочки, работа с которыми требует специальной защиты кожи и глаз.

2 Основные физико-химические свойства загрязняющих веществ, параметры очищаемых газов и оценка эффективности систем очистки

Плотность и дисперсный состав пылей и аэрозолей.

Надежность и эффективность систем газоочистки во многом зависит от физико-химических свойств пыли и от основных параметров газовых потоков, которые должны быть хорошо изучены и учтены при проектировании и эксплуатации систем газоочистки.

Важнейшей характеристикой золы и пылей является их *плотность*, кг/м³ или г/см³. Принято рассматривать *истинную*, *насыпную* и *кажущуюся плотности*.

Истинная плотность частицы представляет собой отношение массы гладкой монолитной частицы к занимаемому ею объему.

Кажущаяся плотность частиц представляет собой отношение массы частиц к занимаемому ими объему, включая поры, пустоты, неровности и т.п.

Насыпная плотность пыли, в отличие от истинной, учитывает наличие воздушных зазоров между частицами свеженасыпанной пыли. Насыпной плотностью пользуются для определения объема, который занимает пыль в бункерах в первое время до начала ее слеживания. Насыпная плотность слежавшейся пыли обычно в 1,2–1,5 раза больше, чем у свеженасыпанной.

На величину насыпной и кажущейся плотности пыли существенное влияние оказывают различные физико-химические процессы (вибрация, коагуляция, спекание, смачивание, окисление и т.д.).

Для правильного выбора пылеулавливающего аппарата необходимы, прежде всего, сведения о *дисперсном составе* пылей.

Дисперсный состав пылей определяют экспериментально. Для этого чаще всего используют приборы, называемые *импакторами*. Работа

импактора основана на избирательной сепарации частиц по размерам при пропускании газа через ряд последовательно установленных сопел уменьшающегося сечения, под которыми находятся плоские осадительные пластины (подложки). Проба газа изокинетично прокачивается через прибор с постоянным расходом. На подложках импактора происходит инерционное осаждение частиц, причем средний размер их на каждой последующей подложке (ступени импактора) получается меньше, чем на предыдущей. Самые мелкие частицы (не осевшие на подложках предыдущих ступеней импактора) задерживаются абсолютным фильтром. Таким образом, анализируемые частицы оказываются рассортированными на фракции, число которых равно числу ступеней (каскадов) импактора, включая ступень абсолютного фильтра. Используют пяти-, шести- и семикаскадные импакторы.

Результаты определения дисперсного состава пыли обычно представляют в виде зависимости массовых (иногда счетных) фракций частиц от их размера. Под фракцией понимают массовые (счетные) доли частиц, содержащихся в определенном интервале размеров частиц.

По дисперсности пыли классифицированы на 5 групп: I – очень крупнодисперсная пыль, $d_m > 140$ мкм;

II – крупнодисперсная пыль, $d_m = 40 \div 140$ мкм;

III – среднедисперсная пыль,

$d_m = 10 \div 40$ мкм; IV – мелкодисперсная пыль,

$d_m = 1 \div 10$ мкм;

V – очень мелкодисперсная пыль, $d_m < 1$ мкм.

Адгезионные свойства частиц.

Эти свойства частиц определяют их склонность к *слипаемости*. Повышенная слипаемость частиц может привести к частичному или полному забиванию аппаратов.

Чем меньше размер частиц пыли, тем легче они прилипают к поверхности аппарата. Пыли, у которых 60–70 % частиц имеют диаметр меньше 10 мкм, ведут себя как слипающиеся, хотя те же пыли с размером частиц более 10 мкм обладают хорошей сыпучестью.

По слипаемости пыли делятся на 4 группы:

1) Неслипающаяся (сухая шлаковая, кварцевая; сухая глина).

2) Слабослипающаяся (коксовая; магнезитовая сухая; апатитовая сухая; доменная; колошниковая летучая зола, содержащая много несгоревших продуктов; сланцевая зола);

3) Среднеслипающаяся (торфяная, влажная магнезитовая; металлическая, содержащая колчедан, оксиды свинца, цинка и олова, сухой цемент; летучая зола без недожиг; торфяная зола; сажа, сухое молоко; мука, опилки).

4) Сильнослипающаяся (цементная; выделенная из влажного воздуха;

гипсовая и алебастровая; содержащая нитрофоску, двойной суперфосфат, клинкер, соли натрия; волокнистая (асбест, хлопок, шерсть)).

Абразивность частиц.

Абразивность пыли характеризует интенсивность износа металла газохода и очистных устройств. Она зависит от твердости, формы, размера и плотности частиц. Абразивность учитывают при расчетах аппаратуры (выбор скорости газа, толщины стенок аппаратуры и облицовочных материалов).

Смачиваемость частиц.

Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на эффективность мокрых пылеуловителей, особенно при работе с рециркуляцией. Гладкие частицы смачиваются лучше, чем частицы с неровной поверхностью, так как последние в большей степени оказываются покрытыми абсорбированной газовой оболочкой, затрудняющей смачивание.

По характеру смачивания все частицы из твердых материалов можно разделить на три основные группы:

а) гидрофильные материалы – хорошо смачиваемые (кальций, кварц, большинство силикатов и окисленных минералов, галогениды щелочных металлов);

б) гидрофобные материалы – плохо смачиваемые (графит, уголь, сера);

в) абсолютно гидрофобные – парафин, тефлон, битумы.

Гигроскопичность частиц.

Способность пыли впитывать влагу зависит от химического состава, размера, формы и степени шероховатости поверхности частиц. *Гигроскопичность* способствует их улавливанию в аппаратах мокрого типа.

Электрическая проводимость слоя пыли.

Этот показатель оценивается по удельному электрическому сопротивлению слоя пыли $\rho_{сл}$, которое зависит от свойств отдельных частиц (от поверхностной и внутренней электропроводности, формы и размеров частиц), а также от структуры слоя и параметров газового потока. Оно оказывает существенное влияние на работу электрофильтров.

В зависимости от удельного электрического сопротивления пыли делятся на три группы:

- *низкоомные пыли* $\rho_{сл} < 10^4$ Ом·см (при осаждении на электроде частицы пыли мгновенно разряжаются, что может привести к вторичному уносу);

- *пыли с* $\rho_{сл} = 10^4 - 10^{10}$ Ом·см (эти пыли хорошо улавливаются в электрофильтре, так как разряд частиц происходит не сразу, а в течение времени, необходимого для накапливания слоя);

- пыли с $\rho_{сл} = 10^{10} - 10^{13}$ Ом·см (улавливание пылей этой группы в электрофильтрах вызывает большие трудности; частицы пыли этой группы образуют на электроде пористый изолирующий слой).

Электрическая заряженность частиц.

Знак заряда частиц зависит от способа их образования, химического состава, а также от свойств веществ, с которыми они соприкасаются. Этот показатель оказывает влияние на эффективность улавливания в газоочистных аппаратах (мокрых пылеуловителях, фильтрах и др.), на взрывоопасность и адгезионные свойства частиц.

Способность пыли к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом.

Горючая пыль вследствие сильно развитой поверхности контакта частиц (порядка $1\text{ м}^2/\text{г}$) с кислородом воздуха способна к самовозгоранию и образованию взрывоопасных смесей с воздухом. Интенсивность взрыва пыли зависит от ее химических и термических свойств, от размеров и формы частиц, их концентрации в воздухе, от влагосодержания и состава газов, размеров и температуры источника воспламенения и относительного содержания инертной пыли. Способностью к воспламенению обладают некоторые пыли органических веществ, образующиеся при переработке красителей, пластмасс, волокон, а также пыли металлов: магния, алюминия и цинка.

Минимальные взрывоопасные концентрации взвешенной в воздухе пыли составляет примерно $20 - 500 \text{ г}/\text{м}^3$, максимальные – $700 - 800 \text{ г}/\text{м}^3$. Чем больше содержание кислорода в газовой смеси, тем вероятнее взрыв и больше его сила. При содержании кислорода менее 16 % пылевое облако не взрывается.

Эффективность пылеулавливания.

К основным характеристикам оборудования для очистки аэрозолей от взвешенных частиц относятся эффективность (степень) очистки воздуха от пыли, которую также иногда называют коэффициентом полезного действия аппарата, хотя это не отражает ее физический смысл; гидравлическое сопротивление; стоимость очистки. К общим параметрам пылеуловителей относят их производительность по очищаемому газу и энергоемкость, определяемую величиной затрат энергии на очистку 1000 м^3 газа.

При оценке эффективности работы пылеуловителей принимают во внимание:

- общую эффективность обеспыливания, или количество пыли, задержанной в пылеуловителе, по отношению к количеству пыли, содержащейся в обеспыливаемом газе;

- фракционную эффективность, определяющую полноту улавливания частиц определенных размеров; ее выражают процентом отделенных в пылеуловителе частиц пыли определенных размеров;
- остаточное содержание пыли в газе при выходе его из пылеуловителя;
- распределение остатка пыли в газе по размеру частиц или скорости витания.

Степень очистки воздуха от пыли (эффективность) характеризует отношение массы пыли G_y , уловленной в аппарате, к массе поступившей в него пыли $G_{вх}$. Выражается в процентах, иногда в долях единицы:

$$\varepsilon = 100 \frac{G_y}{G_{вх}}. \quad (2.1)$$

Степень очистки можно определить также, зная концентрацию пыли в воздухе до и после очистки (соответственно $C_{вх}$, $C_{вых}$, мг/м³). Если не происходит подсоса воздуха в аппарате, эффективность очистки определяют по формуле:

$$\varepsilon = 100 \frac{1 - C_{вых}}{C_{вх}}. \quad (2.2)$$

При наличии подсоса воздуха (например, в рукавных фильтрах) эффективность определяют по формуле:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{C_{вых} L_{вых}}{C_{вх} L_{вх}} \right) \cdot 100, \quad (2.3)$$

где $L_{вх}$, $L_{вых}$ — соответственно расход воздуха при входе и выходе из аппарата, м³/ч.

При последовательной установке нескольких аппаратов (каскадной очистке), применяемой для более полного обеспыливания воздуха, суммарная эффективность очистки определяется по формуле:

$$\varepsilon = [1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) \dots (1 - \varepsilon_n)] 100, \quad (2.4)$$

где ε_1 , ε_2 , ..., ε_n — эффективность очистки каждого из аппаратов, входящих в каскад (в долях единицы).

Эффективность очистки — важнейшая характеристика пылеотделителя. На нее ориентируются при выборе пылеулавливающего оборудования в соответствии с допустимым остаточным содержанием пыли в очищенном воздухе. Сравнивая два аппарата, сопоставляют проценты пропущенной пыли. Если эффективность одного аппарата 99%, а другого 98%, то они пропускают соответственно 1 % и 2% пыли. Следовательно, эффективность первого аппарата в два раза выше, чем второго.

Для полной характеристики аппарата нужно знать его фракционную эффективность. Она показывает долю уловленной пыли по каждой фракции. Этот показатель позволяет выбрать оборудование в соответствии с фракционным составом пыли. Фракционная эффективность очистки $\varepsilon_{\phi n}$ выражается отношением:

$$\varepsilon_{\phi n} = \frac{g_n}{G_n} , \quad (2.5)$$

где g_n — количество уловленной пыли n -й фракции;

G_n — количество поступившей в аппарат пыли n -й фракции.

Общую эффективность аппарата \mathcal{L} определяют по фракционной эффективности следующим образом:

$$\mathcal{L} = \frac{G_1 \varepsilon_{\phi 1} + G_2 \varepsilon_{\phi 2} + \dots + G_n \varepsilon_{\phi n}}{G_1 + G_2 + \dots + G_n} , \quad (2.6)$$

где G_1, G_2, \dots, G_n — количество пыли соответствующих фракций, поступившей в аппарат;

$\varepsilon_{\phi 1}, \varepsilon_{\phi 2}, \dots, \varepsilon_{\phi n}$ — фракционная эффективность улавливания по данной фракции. Отношение количества пыли данной фракции ко всей пыли, поступившей в аппарат, выражается:

$$\frac{G_1}{G} = \delta_1; \frac{G_2}{G} = \delta_2; \dots; \frac{G_n}{G} = \delta_n . \quad (2.7)$$

После преобразования получим значение общей эффективности очистки:

$$\varepsilon = \delta_1 \cdot \varepsilon_{\phi 1} + \delta_2 \cdot \varepsilon_{\phi 2} + \dots + \delta_n \cdot \varepsilon_{\phi n} \quad (2.8)$$

или в процентах

$$\varepsilon = 100 \sum_1^n \delta \varepsilon_{\phi} . \quad (2.9)$$

Производительность характеризуется количеством воздуха, которое очищается за 1 час. Аппараты, в которых воздух очищается при прохождении через фильтрующий слой, характеризуются удельной воздушной нагрузкой, т. е. количеством воздуха, которое проходит через 1 м² фильтрующей поверхности за 1 час.

Гидравлическое сопротивление имеет важное значение, так как от его величины зависит требуемое давление вентилятора, а следовательно, и расход

электроэнергии. Гидравлическое сопротивление аппарата определяют по формуле:

$$H = A v^n, \quad (2.10)$$

где v - скорость движения воздуха через аппарат, м/с;

A, n - коэффициенты, определяемые экспериментальным путем и зависящие от конструкции аппарата.

Расход энергии зависит в значительной мере от гидравлического сопротивления аппарата. В электрофильтрах электроэнергия расходуется, в основном, на создание электростатического поля. Расход электроэнергии при одноступенчатой очистке находится в пределах от 0,035 до 1,0 кВт-ч на 1000 м³ воздуха. Удельные затраты энергии на удаление дисперсных примесей возрастают пропорционально снижению концентрации взвешенных в потоке частиц, поскольку степень очистки в пылеулавливающих аппаратах практически не зависит от начальной концентрации загрязнителя. В дополнение к этому затраты растут и с уменьшением размеров частиц.

Стоимость очистки является важнейшим показателем, так как характеризует экономичность очистки. Она зависит от многих факторов: капитальных затрат на оборудование, эксплуатационных расходов и др.

Стоимость очистки воздуха в различных аппаратах значительно отличается. Как правило, более эффективная очистка обходится значительно дороже. Если стоимость очистки определенного количества воздуха в таком сравнительно простом аппарате, как циклон большой производительности, принять за 100 %, то стоимость очистки такого же количества воздуха в батарейном циклоне составит 120 %, в циклоне с водяной пленкой - 130 %, в скруббере ВТИ - 140 %, в электрофильтре - 220 %, в тканевых фильтрах (в зависимости от типа) от 260 до 280 %. Двухступенчатая очистка по схеме батарейный циклон - электрофильтр стоит 330 % [7].

При выборе пылеулавливающего оборудования, кроме фракционной эффективности, учитывают также особенности пыли, физические и химические свойства, в том числе взрывопожароопасность, склонность к коагуляции, гидрофобность и др., а также ценность пыли, необходимость ее сохранения и использования. Важное значение придают экономичности очистки, принимают во внимание такие факторы, как наличие водных ресурсов и т. д.

3 Физический механизм очистки воздуха от твердых примесей

В основу действия пылеулавливающих и сепарационных устройств положен определенный физический механизм. В пылеуловителях и сепарационных устройствах находят применение следующие способы отделения взвешенных частиц от взвешивающей среды, т. е. воздуха (газа):

осаждение в гравитационном поле, осаждение под действием сил инерции, осаждение в центробежном поле, фильтрование, осаждение в электрическом поле, мокрая газоочистка и др.

Гравитационное осаждение.

Частицы аэрозоля осаждаются из потока загрязненного газа (воздуха) под действием силы тяжести. Для этого необходимо создать соответствующий режим движения загрязненного газа в аппарате с учетом размера частиц, их плотности и т. д.

Инерционное осаждение.

Инерционное осаждение основано на том, что частицы аэрозоля и взвешивающая среда ввиду значительной разности плотностей обладают различной инерцией. Частицы аэрозоля, двигаясь по инерции, отделяются от газовой среды. При инерционном осаждении поток аэрозоля, перемещающийся со значительной скоростью, изменяет направление движения. Движущиеся в потоке аэрозольные частицы вследствие большой инерции не следуют за потоком, а стремятся сохранить первоначальное направление движения, двигаясь в котором, оседают на стенках, перегородках, сетках и др. элементах аппарата. При обтекании твердого тела (или капли) запыленным потоком частицы вследствие большей инерции продолжают двигаться поперек изогнутых линий тока газов и осаждаются на поверхности тела.

Коэффициент эффективности инерционного осаждения определяется долей частиц, покинувших поток при изменении им направления вследствие обтекания им различного рода препятствий.

Осаждение под действием центробежной силы.

Происходит при криволинейном движении пылегазового потока. Под действием возникающих центробежных сил частицы аэрозоля отбрасываются на периферию аппарата и осаждаются. Этот метод отделения частиц аэрозолей от воздуха (газа) значительно эффективнее гравитационного осаждения, так как возникающая центробежная сила во много раз больше, чем сила тяжести. Центробежная сепарация может применяться по отношению к более мелким частицам.

В аппаратах, основанных на использовании центробежной сепарации, могут применяться два принципиальных конструктивных решения:

- поток аэрозоля вращается в неподвижном корпусе аппарата;
- поток движется во вращающемся роторе.

Первое решение применено в циклонах, второе - в ротационных пылеуловителях.

Эффект зацепления при фильтровании.

Частицы аэрозоля, взвешенные в воздушной (газовой) среде, задерживаются в узких извилистых каналах и порах при прохождении аэрозольного потока через фильтровальные материалы. Для тонкой очистки газов от частиц и капельной жидкости применяют процесс фильтрования.

Фильтрация заключается в пропускании аэрозоля через фильтровальные перегородки, которые допускают прохождение воздуха, но задерживают аэрозольные частицы.

Осаждение частиц на поверхности пор фильтрующего элемента происходит в результате совокупного действия эффекта зацепления, а также диффузионного, инерционного и гравитационного механизмов. Пыль при фильтрации в основном задерживается в результате столкновения частиц с волокнами и нитями фильтровального материала и прилипания частиц к волокнам.

Осаждение в электрическом поле.

Проходя электрическое поле, частицы аэрозоля получают заряд. Двигаясь к электродам противоположного знака, они осаждаются на них.

Осаждение взвешенных в газе твердых и жидких частиц под действием электрического поля имеет преимущества по сравнению с другими способами осаждения. Действие электрического поля на заряженную частицу определяется величиной ее электрического заряда. При электроосаждении частицам небольших размеров удается сообщить значительный электрический заряд и благодаря этому осуществить процесс осаждения очень малых частиц, который невозможно провести под действием силы тяжести или центробежной силы.

Принцип электрической очистки воздуха (газов) от взвешенных частиц заключается в зарядке частиц в поле коронного разряда с последующим их выделением из взвешивающей среды под воздействием электрического поля.

Физическая сущность электроосаждения состоит в том, что газовый поток, содержащий взвешенные частицы, предварительно ионизируют, при этом содержащиеся в газе частицы приобретают электрический заряд. Зарядка частиц в поле коронного разряда происходит под воздействием электрического поля и вследствие диффузии ионов. Максимальная величина заряда частиц размером более 0,5 мкм пропорциональна квадрату диаметра частиц, а частиц размером меньше 0,2 мкм - диаметру частиц.

Коронный разряд возникает в неоднородном электрическом поле у поверхности электродов с малым радиусом кривизны. Различают зону ионизации газа небольшой протяженности (собственно корону) и внешнюю зону коронного разряда. В зоне короны, где напряженность поля очень велика, ионы, содержащиеся в газе, перемещаются по направлению силовых линий поля и разгоняются настолько, что, столкнувшись с нейтральными газовыми молекулами, выбивают из них несколько внешних электронов. При этом возникают новые положительные и отрицательные ионы.

Если в электрическом поле между коронирующим (отрицательным) и осадительным (положительным) электродами создать определенное напряжение, то носители зарядов, т.е. ионы и электроны, получают значительное ускорение, и при их столкновении с молекулами происходит ионизация последних. Ионизация заключается в том, что с орбиты

нейтральной молекулы выбивается один или несколько внешних электронов. В результате происходит превращение нейтральной молекулы в положительный ион и свободные электроны. Этот процесс называется ударной ионизацией.

При прохождении ионизированного потока газа в электрическом поле между двумя электродами заряженные частицы под действием электрического поля перемещаются к противоположно заряженным электродам и оседают на них.

Образующиеся в процессе лавинообразной ударной ионизации ионы, имеющие заряд того же знака, что и потенциал коронирующего электрода, притягиваются к противоположно заряженному осадительному электроду, устремляясь во внешнюю зону ионизации. Сталкиваясь здесь с пылевыми частицами, ионы сообщают им свой заряд, вследствие чего эти частицы также начинают притягиваться к осадительному электроду. Скорость движения пылевой частицы к электроду зависит в значительной мере от величины полученного ею заряда, которая, в свою очередь, определяется действующими на газовые ионы вблизи частицы силами, связанными с внешним полем, поляризацией частиц, электростатическим притяжением и отталкиванием одноименных зарядов.

4 Техника и технология удаления загрязняющих веществ из атмосферных выбросов

Универсальных методов защиты биосферы, радикально решающих проблему борьбы с загрязнениями, пока не существует, и только сочетание нескольких научно обоснованных мероприятий в каждом конкретном случае может привести к желаемому эффективному результату.

Рассмотрим известные методы защиты окружающей среды от промышленных загрязнений.

Технологический метод – непосредственное воздействие на технологические процессы, являющиеся источниками загрязнения. При этом проблема устранения загрязнений решается радикально, но их разработка и внедрение связаны с трудоемкими дорогостоящими мероприятиями: реконструкцией предприятий и изменением существующей технологии; значительными капитальными затратами; проведением специальных научно-исследовательских проектно-конструкторских работ; решением сложных технологических и организационных задач не только научно-технического, но и социально-экономического плана.

Организационно-технический метод – уменьшение концентраций и уровней загрязнения на пути их распространения в биосфере. Этот метод предполагает борьбу при помощи технических средств с уже образовавшимся, результате существующего технологического процесса, загрязнением.

Планировочные мероприятия. Этот метод позволяет за счет рационального размещения источников загрязнения снизить их влияние на человека. Промышленное предприятие должно располагаться на возвышенном месте, хорошо продуваемом ветрами. Площадка жилой застройки не должна быть выше предприятия. Взаимное расположение предприятий и населенных пунктов определяется по средней розе ветров (преимущественному направлению ветров) теплого периода года.

Производственные здания и сооружения промышленных предприятий обычно размещают по ходу производственного процесса. Вместе с тем, цехи, выделяющие наибольшее количество вредных веществ, следует располагать на краю производственной территории со стороны, противоположной жилому массиву.

Средства защиты атмосферы. На практике реализуются следующие варианты использования средств защиты атмосферы:

– локализация токсичных веществ в зоне их образования, очистка загрязненного воздуха в специальных аппаратах и его возврат в производственное или бытовое помещение;

– локализация токсичных веществ в зоне их образования, очистка загрязненного воздуха, технологических и газовых выбросов или отработанных газов в специальных аппаратах, выброс и рассеивание в атмосфере.

Классификация аппаратов очистки вентиляционных и технологических выбросов в атмосферу приведена на рисунке 4.1 [1].

При подборе аппарата очистки очень большое значение имеет фракционный состав воздуха. Примерная характеристика пылеуловителей дана в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Основные характеристики пылеуловителей

Размер частиц, мкм	Аппарат	Эффективность очистки
40–1000	Пылеосадительные камеры	до 0,75
5–1000	Циклоны	0,85–0,95
0,05–100	Фильтры тканевые, волокнистые, мокрые	0,7–0,999
0,01–10	Электрические пылеуловители	до 0,999

5 Аппараты сухой очистки газоздушных выбросов

К сухим механическим пылеуловителям относятся аппараты, в которых использованы различные механизмы осаждения: гравитационный (пылеосадительные камеры), инерционный (камеры, осаждение пыли в которых происходит в результате изменения направления движения газового



Рисунок 4.1 - Классификация методов и аппаратов для обезвреживания газовых выбросов

потока или установления на его пути препятствия) и центробежный (одиночные, групповые и батарейные циклоны, вихревые и динамические пылеуловители). Эти аппараты отличаются простотой изготовления и эксплуатации, их достаточно широко используют в промышленности. Однако эффективность улавливания в них пыли не всегда оказывается достаточной, в связи с чем, они часто выполняют роль аппаратов предварительной очистки газов.

5.1 Гравитационные пылеуловители

В *пылеосадительных камерах* (рисунки 5.1 - 5.3) используется механизм гравитационного осаждения частиц из горизонтально направленного потока газов. Пылеосадительные камеры предназначены для улавливания крупнодисперсных частиц размером 50 мкм и больше.



Рисунок 5.1 – Пылеосадительная камера

Для получения высокой эффективности очистки необходимо, чтобы частицы находились в пылеосадительной камере как можно больше времени. Хорошую эффективность очистки имеют камеры Говарда (рисунок 5.1), в которых поток газа разбивается на несколько параллельных секций очистки воздуха. Однако они не получили широкого распространения из-за громоздкости и трудности их очистки. Пылеосадительные камеры обычно сооружают из кирпича, сборного железобетона и др.

В горизонтальных пылеосадительных камерах для повышения их эффективности устраивают цепные или проволочные завесы и отклоняющие перегородки. Это позволяет дополнительно к гравитационному использовать эффект инерционного осаждения частиц при обтекании потоком газов различных препятствий. Эффективность работы в значительной мере зависит от того, насколько равномерно распределен поток. Для этой цели камеры оборудуют газораспределительными решетками.

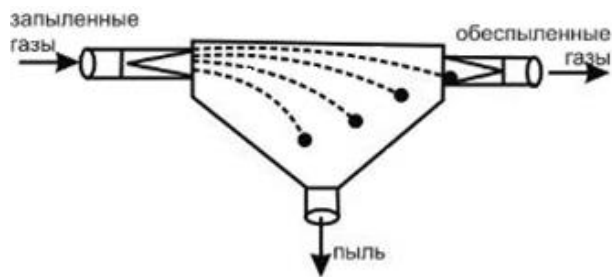


Рисунок 5.1 - Пылеосадительная камера Говарда

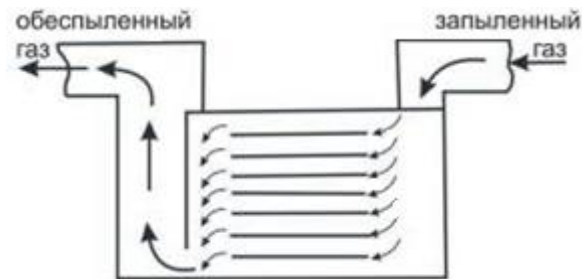
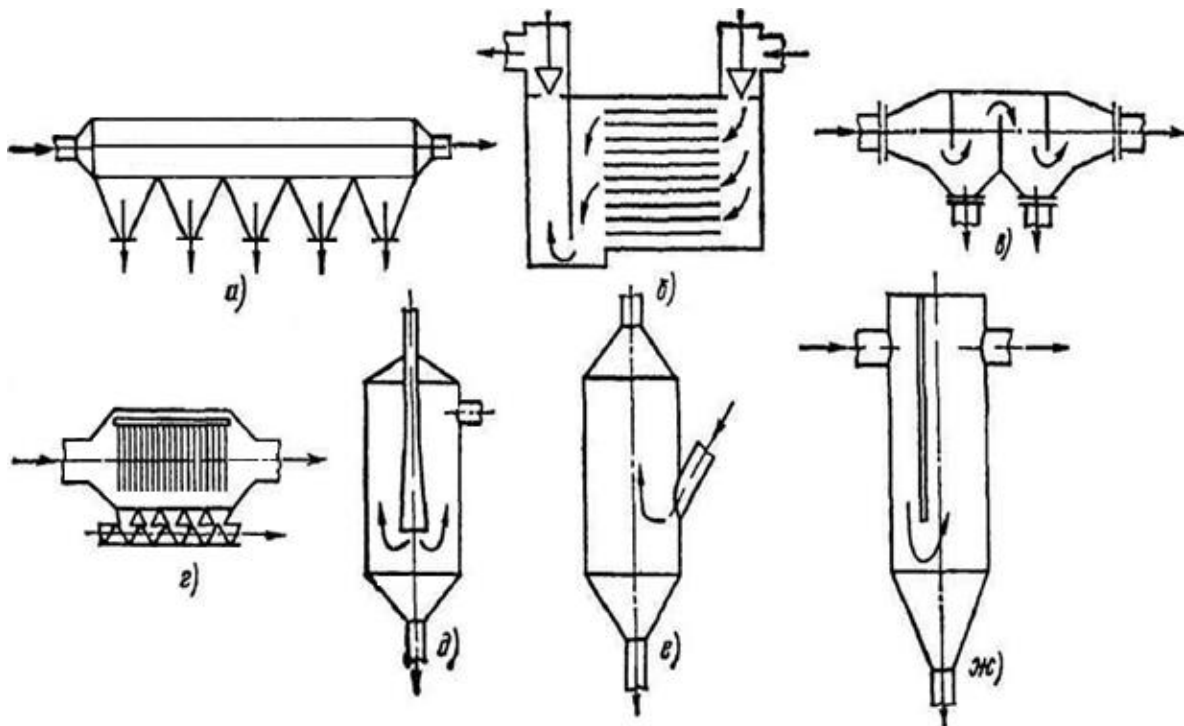


Рисунок 5.2 - Осадительная камера



а - простейшая пылеосадительная камера; б - многополочная камера; в - камера с перегородками; г - камера с цепными или проволочными завесами; д - пылевой «мешок» с центральным подводом газа; е - пылевой «мешок» с боковым подводом газа; ж - пылеосадитель с отражательной перегородкой.

Рисунок 5.3 - Конструкции пылеосадительных камер

Диаметр осадительной камеры обычно в 2,5 раза больше диаметра дымовой трубы, и соответственно скорости газов в камере в 6,25 раз меньше, чем в трубе. Такое соотношение размеров трубы и осадительного устройства позволяет при скорости газов в дымовой трубе 1,5-2,0 м/с осаждать частицы размером 200-400 мкм.

Жалюзийные аппараты обычно применяют для улавливания пыли с размером частиц более 20 мкм. Они имеют жалюзийную решетку, состоящую из рядов пластин или колец. Очищаемый газ, проходя через решетку, делает резкие повороты. Пылевые частицы вследствие инерции стремятся сохранить первоначальное направление, что приводит к отделению крупных частиц из газового потока, которые, сталкиваясь с наклонными решетками, отражаются и отскакивают в сторону от щелей между лопастями жалюзи (рисунок 5.4). В результате газ делится на два потока. Пыль в основном содержится в потоке, который отсасывают и направляют в циклон, где его очищают от пыли и вновь сливают с основной частью потока, прошедшего через решетку. Скорость газа перед жалюзийной решеткой должна быть достаточно высокой (до 15 м/с), чтобы достигнуть эффекта инерционного отделения пыли. На степень очистки влияет также скорость движения газов, отсасываемых в циклон. Гидравлическое сопротивление решетки составляет 100–500 Па.

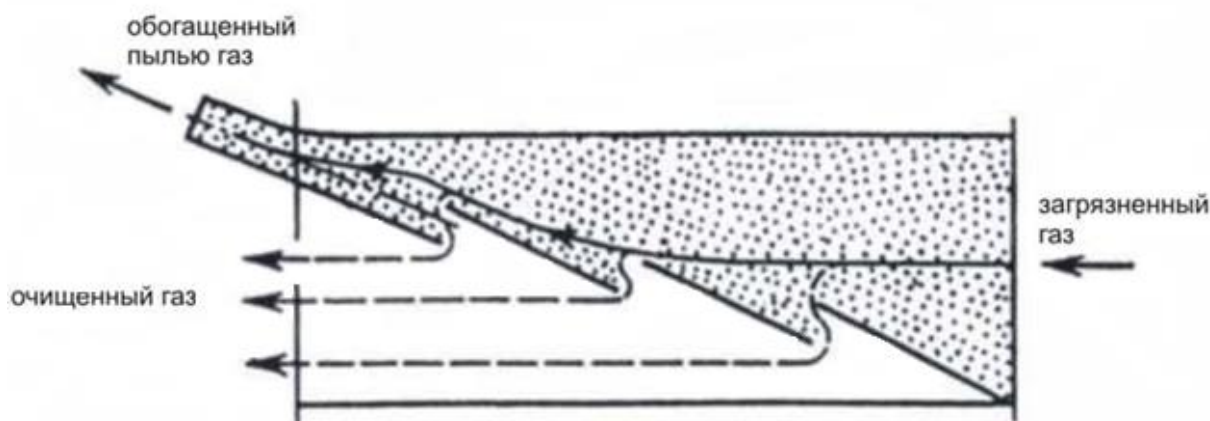


Рисунок 5.4 - Жалюзийный пылеотделитель

Основным недостатком этих аппаратов является износ пластин при высокой концентрации пыли.

5.2 Инерционные пылеуловители

В этих аппаратах при резком изменении направления движения газового потока частицы пыли под воздействием инерционной силы продолжают двигаться в прежнем направлении и после поворота потока газов выпадают в бункер. Наиболее простые из этого типа аппаратов являются так называемые

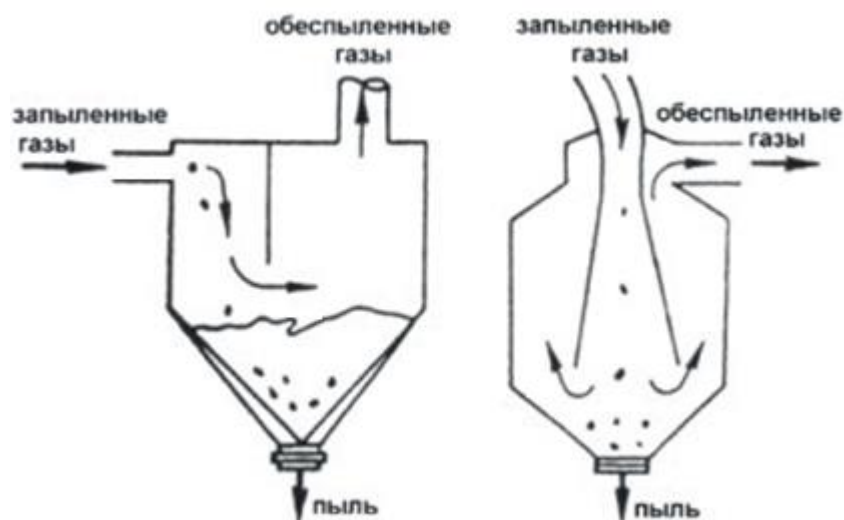


Рисунок 5.5 - Инерционные пылеуловители

пылевые мешки (рисунок 5.5).

Эффективность этих аппаратов низкая, а задерживают они только крупные фракции пыли.

Пылеуловители с плавным поворотом газового потока имеют меньшее гидравлическое сопротивление, чем другие аппараты. Скорость газа в сечении таких аппаратов принимают 1,0 м/с. Для частиц пыли размером 25–30 мкм достигается степень улавливания 65–80 %. Такие пылеуловители применяют на заводах черной и цветной металлургии. Гидравлическое сопротивление их равно 150–390 Па. Пылеуловители этого типа обычно встраивают в газоходы.

5.3 Центробежные пылеуловители

В качестве инерционных пыле- и золоуловителей наибольшее распространение получили циклоны, в которых осаждение твердых частиц происходит за счет центробежных сил при вращательном движении потока. Запыленный воздух поступает в циклон по касательной к внутренней поверхности корпуса, где совершается нисходящее спиралеобразное движение вдоль корпуса к бункеру. Под действием центробежной силы частицы пыли прижимаются к внутренним стенкам наружного цилиндра и скатываются в пылесборник (рисунок 5.6). Величину центробежной силы F , действующей на частицу диаметром d , м, движущуюся по радиусу циклона R , м, при скорости потока газов u , м/с, можно определить по выражению [19]:

$$F = \rho_{\text{ч}} \frac{\pi d^2 u^2}{6R}. \quad (5.1)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, кг/м³.

Циклоны широко применяются для улавливания частиц размерами от 5 до 1000 мкм при скоростях газового потока от 5 до 20 м/с, при этом эффективность улавливания составляет от 0,85 до 0,95.



Рисунок 5.6 - Циклон

В промышленности принято разделять циклоны на *высокоэффективные* и *высокопроизводительные*. Первые эффективны, но требуют больших затрат на осуществление процесса очистки; циклоны второго типа имеют небольшое гидравлическое сопротивление, но хуже улавливают мелкие частицы.

На практике широко используют циклоны НИИОГАЗа цилиндрические (с удлиненной цилиндрической частью) и конические (с удлиненной конической частью). Цилиндрические циклоны относятся к высокопроизводительным аппаратам, а конические - к высокоэффективным. Диаметр цилиндрических циклонов не более 2000 мм, а конических - не более 3000 мм. В таблице 5.1 приведена характеристика видов пыли, для которых используются циклоны.

Таблица 5.1 - Зависимость типа циклона от вида пыли

Тип циклона	Вид пыли
Цилиндрические серии ЦН	Зола из дымовых газов котельных, сухая пыль помольных и сушильных установок, горела земля литейных цехов
Конические серии С	Пыль каталитического крекинга нефтепродуктов, угольная пыль, сажа
СИОТ, ЛИОТ	Сухая несминающаяся, неволокнистая пыль
ВЦНИИОТ с обратным конусом	Абразивная пыль, слипающаяся пыль типа сажи и талька
Гипродрева	Древесная щепка и стружка, влажные опилки
Гипродревпрома серии Ц	Сухие опилки, шлифовальная древесная пыль

На рисунке 5.7 показан принцип работы циклонов.

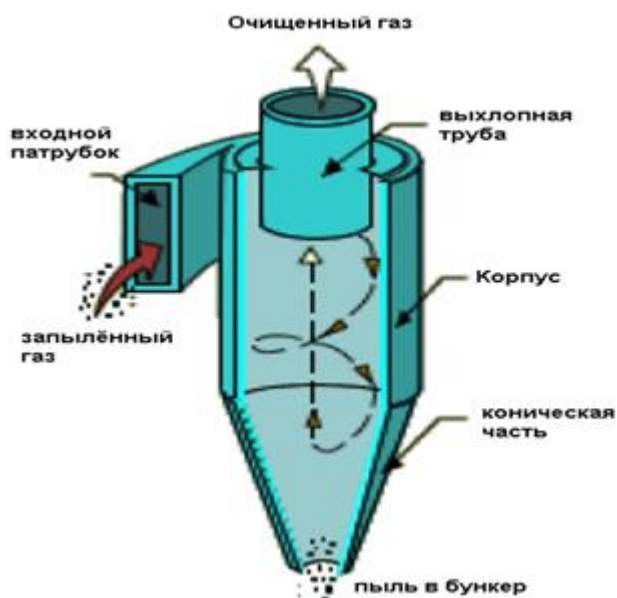


Рисунок 5.7 - Принцип работы циклонов

Согласно ГОСТ 9617-67, для циклонов принят следующий ряд внутренних диаметров: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000.

Расчет циклонов ведут методом последовательных приближений в следующем порядке:

1) Задав тип циклона, определяют оптимальную скорость газов $\omega_{оп}$ в сечении циклона диаметром D по данным таблицы 5.2.

Таблица 5.2 - Оптимальная скорость газов

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СДК-ЦН-34	СДК-ЦН-34м
$\omega_{оп}$, м/с	4,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

2) Вычисляют диаметр циклона D , м по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4Q_p}{\pi\omega_{оп}}} \quad (5.2)$$

Полученное значение D округляют до ближайшего типового значения внутреннего диаметра циклона. Если расчетный диаметр циклона превышает его максимальное допустимое значение, то необходимо применять два и более установленных параллельно циклона.

3) По выбранному диаметру циклона находят действительную скорость движения газа в циклоне:

$$\omega_D = \frac{4Q_P}{\pi n D^2}, \text{ м/с,} \quad (5.3)$$

где n – число циклонов.

Действительная скорость в циклоне не должна отклоняться от оптимальной более чем на 15%.

4) Определяют коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона:

$$\xi = k_1 k_2 \xi_{500}, \quad (5.4)$$

где k_1 - поправочный коэффициент на диаметр циклона (таблица 5.5);

k_2 - поправочный коэффициент на запыленность газа (таблица 5.6);

ξ_{500} - коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона диаметром 500 мм (таблица 5.7).

5) Гидравлическое сопротивление определяют:

$$\Delta p = \frac{\xi \rho_{\Gamma} \omega_D^2}{2}, \text{ Па.} \quad (5.5)$$

6) Эффективность очистки газа в циклоне:

$$\eta = 0,5[1 + \Phi(x)], \quad (5.6)$$

где $\Phi(x)$ – табличная функция от параметра x , равного

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_4}}, \quad (5.7)$$

где d_m – медианный размер частиц (Приложение А). Здесь d_{50} - диаметр частиц, осаждаемых с эффективностью 50%.

Для учета влияния отклонения условий работы от типовых на величину d_{50} используют соотношение:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \cdot \frac{\rho_{\text{чТ}}}{\rho_{\text{ч}}} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{\omega_T}{\omega}}. \quad (5.8)$$

Значения d_{50}^T определяются по условиям работы типового циклона: $D_T = 0,6$; $\rho_{\text{чТ}} = 1930 \text{ кг/м}^3$; $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\omega_T = 3,5 \text{ м/с}$.

$\lg \sigma_{\eta}$ - стандартное отклонение в функции распределения парциальных коэффициентов очистки;

$\lg \sigma_4$ - среднее квадратичное отклонение в функции данного

распределения частиц по размерам (Приложение А).

Значения d_{50}^T и $\lg \sigma_\eta$ для каждого типа циклона приведены в таблице 5.8.

Определив по формуле (5.7) значение x , находят параметр $\Phi(x)$ по таблице 5.9.

Затем по формуле (5.6) определяют расчетные значения эффективности очистки газа циклоном. Если расчетное значение η окажется меньше необходимого по условиям допустимого выброса пыли в атмосферу, то нужно выбрать другой тип циклона с большим значением коэффициента гидравлического сопротивления. Для ориентировочных расчетов необходимого значения $\xi_{ц}$ рекомендуется следующая зависимость:

$$\xi_{ц2} = \xi_{ц1} \left(\frac{100 - \eta_3}{100 - \eta} \right)^2 \frac{\omega_1 D_2}{\omega_2 D_1}, \quad (5.9)$$

где индекс 1 относится к расчетным, а индекс 2 - к требуемым значениям циклона.

Коэффициент гидравлического сопротивления группы циклонов:

$$\xi = k_1 k_2 \xi_{500} + k_3, \quad (5.10)$$

где k_3 - коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу, определяемый по таблице 5.10.

Для всех циклонов бункеры имеют цилиндрическую форму диаметром D_6 :

- для цилиндрических циклонов: $D_6 = 1,5 D$;
- для конических циклонов: $D_6 = (1,1-1,2) D$.

Высота цилиндрической части бункера составляет: $H_6 = 0,8D$, днище бункера выполняется с углом 60° между стенками. Выходное отверстие бункера имеет диаметр 250 или 500 мм.

Таблица 5.3 - Соотношение размеров в долях внутреннего диаметра D для циклонов ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24

Наименование	Обозначение	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-24
Внутренний диаметр выхлопной трубы	d	0,59		
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия	d_1	0,3 - 0,4		
Ширина входного патрубка в циклоне (внутренний размер)	b	0,2		

Окончание таблицы 5.3

Ширина входного патрубка на входе (внутренний размер)	b_1	0,26		
Длина входного патрубка	l	0,6		
Высота установки фланца	$h_{фл}$	0,1		
Диаметр средней линии циклона	$D_{ср}$	0,8		
Угол наклона крышки и входного патрубка циклона	α	11°	15°	24°
Высота входного патрубка	a	0,48	0,66	1,11
Высота выхлопной трубы	h_m	1,56	1,74	2,11
Высота цилиндрической части циклона	$H_{ц}$	2,06	2,26	2,11
Высота кожуха циклона	$H_{к}$	2,0	2,0	1,75
Высота внешней части выхлопной трубы	h_b	0,3	0,3	0,4
Общая высота циклона	H	4,38	4,56	4,26

Таблица 5.4

Наименование	Обозначение	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
Высота цилиндрической части	$H_{ц}$	0,535	0,515	0,4
Высота конической части	$H_{к}$	3,0	2,11	2,6
Внутренний диаметр выхлопной трубы	d	0,334	0,340	0,22
Внутренний диаметр пылевыпускного отверстия	d_1	0,334	0,229	0,18
Ширина входного патрубка	b	0,264	0,214	0,18
Высота внешней части выхлопной трубы	h_b	0,2-0,3	0,515	0,3
Высота установки фланца	$h_{фл}$	0,1	0,1	0,1
Высота входного патрубка	a	0,535	0,2-0,3	0,4
Длина входного патрубка	l	0,6	0,6	0,6
Высота заглубления выхлопной трубы	h_T	0,535	0,515	0,4
Текущий радиус улитки	ρ	$D/2 + b/2\pi$	$D/2 + b/4\pi$	

Таблица 5.5

Тип циклона	Значение k_1 для D , мм				
	150	200	300	450	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-24 СДК-ЦН-33	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0
СК-ЦН-34, СК-ЦН-34м	1,0	1,9	1,0	1,0	1,0

Таблица 5.6

Тип циклона	Значение k_2 при $C_{ВХ}$, г/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	-
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34м	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Таблица 5.7

Тип циклона	Значение ξ_{500}	
	при выхлопе в атмосферу	при выхлопе в гидравлическую сеть
ЦН-11	245	250
ЦН-15	155	163
ЦН-24	75	80
СДК-ЦН-33	520	600
СК-ЦН-34	1050	1150
СК-ЦН-34м		2000

Таблица 5.8

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34м
d_{50}^T	8,5	4,5	3,65	2,31	1,95	1,3
$\lg \sigma_{\eta}$	0,30 8	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

Таблица 5.9

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-2,70	0,0035	-0,7	0,2420	0,9	0,8159
-2,0	0,0228	-0,6	0,2743	1,00	0,8413
-1,9	0,0288	-0,5	0,3085	1,1	0,8643
-1,8	0,0359	-0,4	0,3446	1,2	0,8849
-1,7	0,0446	-0,3	0,3821	1,3	0,9032
-1,6	0,0548	-0,2	0,4207	1,4	0,9192
-1,5	0,0668	-0,1	0,4602	1,5	0,9332
-1,4	0,0808	0	0,5000	1,6	0,9452
-1,3	0,0968	0,1	0,5398	1,7	0,9554
-1,2	0,1151	0,2	0,5793	1,8	0,9641
-1,1	0,1357	0,3	0,6179	1,9	0,9713
-1,0	0,1587	0,4	0,6554	2,0	0,9772
-0,9	0,1841	0,5	0,6915	2,2	0,9861

Окончание таблицы 5.9

-0,8	0,2119		0,6	0,7257		2,4	0,9918
			0,7	0,7580		2,6	0,9953
			0,8	0,7881		2,7	0,9965

Таблица 5.10

Характеристика группового циклона	k_3
Круговая компоновка, нижний организованный подвод	60
Прямоугольная компоновка, организованный подвод, элементы расположены в одной плоскости Отвод из общей камеры чистого газа.	35
То же, но улиточный отвод из циклонных элементов	28
Прямоугольная компоновка. Свободный подвод потока в общую камеру	60

Циклоны имеют следующие *достоинства*:

- отсутствие движущихся частей в аппарате;
- надежность работы при температурах газов вплоть до 500 °С (для работы при более высоких температурах циклоны изготавливают из специальных материалов);
- возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями;
- улавливание пыли в сухом виде;
- почти постоянное гидравлическое сопротивление аппарата;
- успешная работа при высоких давлениях газов;
- простота изготовления;
- сохранение высокой фракционной эффективности очистки при увеличении запыленности газов.

Недостатки:

- высокое гидравлическое сопротивление – 1250–1500 Па;
- плохое улавливание частиц размером менее 5 мкм;
- невозможность использования для очистки газов от липких загрязнений.

Пример выполнения расчета циклона.

Количество очищаемого газа при рабочих условиях $Q_R = 5,5 \text{ м}^3/\text{с}$; плотность газа при рабочих условиях $\rho_r = 1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$; вязкость газа при рабочих условиях $\mu = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; дисперсный состав пыли $d_m = 20 \text{ мкм}$ ($\lg \sigma_r = 0,652$; входная концентрация $C_{ВХ} = 20 \text{ г}/\text{м}^3$; плотность частиц пыли $\rho_{\text{ч}} = 2200 \text{ кг}/\text{м}^3$; требуемая эффективность очистки газа $\eta = 88\%$).

Решение:

1) Выбираем тип циклона - ЦН-24:

$$\omega_{on} = 4,5 \text{ м}/\text{с}.$$

2) Диаметр циклона

$$D = \sqrt{\frac{4Q_P}{\pi\omega_{on}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,5}{3,14 \cdot 4,5}} = 1,25 \text{ м.}$$

3) Ближайшее стандартное значение в ряду $D=1,2$ м.

4) Находим действительную скорость в циклоне:

$$\omega_D = \frac{4Q_P}{\pi n D^2} = \frac{4 \cdot 5,5}{3,14 \cdot 1 \cdot 1,2^2} \approx 4,9 \text{ м/с.}$$

5) Она отклоняется от оптимальной на 8,2%, что не превышает допустимого значения.

6) Определим коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi = k_1 k_2 \xi_{500} = 1 \cdot 0,93 \cdot 75 = 69,75 \approx 70.$$

7)
$$\Delta p = \frac{\xi \rho_{\Gamma} \omega_D^2}{2} = \frac{70 \cdot 1,3 \cdot 4,9^2}{2} = 1092,5 \text{ Па.}$$

8)
$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_4}} = \frac{\lg\left(\frac{20}{9,03}\right)}{\sqrt{\lg^2 0,308 + \lg^2 0,652}} = 0,634 \cdot$$

9) Определим по формуле (5.8):

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \cdot \frac{\rho_{\text{чт}}}{\rho_{\text{ч}}}} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{\omega_T}{\omega} = 8,5 \sqrt{\frac{1,2}{0,6} \cdot \frac{1930}{2200} \cdot \frac{3,5}{4,9} \cdot \frac{20}{22,2}} = 9,03 \text{ мкм.}$$

10) Определим по таблице параметр $\Phi(x)$ по $x=0,634$ $\Phi(x)=0,7359$.

11)
$$\eta = 0,5[1 + \Phi(x)] = 0,5[1 + 0,7359] = 0,86795 \approx 0,87.$$

Полученное значение эффективности практически совпадает с требуемым: $\eta_{mp}=86\%$. Теперь по таблице 5.3 определяем размеры для выбранного циклона ЦН-24:

$d = 0,59 D = 0,59 \cdot 1,2 = 0,7 \text{ м;}$	$\alpha = 24^0$
$d_1 = 0,3 D = 0,3 \cdot 1,2 = 0,36 \text{ м;}$	$a = 1,11 \cdot 1,2 = 1,3332 \text{ м;}$
$b = 0,2 \cdot 1,2 = 0,24 \text{ м;}$	$h_m = 2,11 \cdot 1,2 = 2,53 \text{ м;}$
$b_1 = 0,26 \cdot 1,2 = 0,312 \text{ м;}$	$H_{\text{ц}} = 2,11 \cdot 1,2 = 2,53 \text{ м;}$
$l = 0,6 \cdot 1,2 = 0,72 \text{ м;}$	$H_K = 1,75 \cdot 1,2 = 2,1 \text{ м;}$
$h_{\text{фл}} = 0,1 \cdot 1,2 = 0,12 \text{ м;}$	$h_b = 0,4 \cdot 1,2 = 0,48 \text{ м;}$
$D_{\text{ср}} = 0,8 \cdot 1,2 = 0,96 \text{ м;}$	$H = 4,26 \cdot 1,2 = 5,11 \text{ м.}$

Вычертить конструктивную схему циклона ЦН-24 и нанести соответствующие размеры. Бункер: $D=1,5D = 1,5 \cdot 1,2 = 1,8$ м; $H = 0,8 D = 0,8 \cdot 1,2 = 0,96$ м.

При больших объемах очищаемого газа определенное число малых циклонов (мультициклонов) объединяют в группу (*батареи циклоны*).

Батарейный циклон представляет собой пылеулавливающий аппарат, составленный из большого количества параллельно установленных циклонных элементов, объединенных в одном корпусе и имеющих общие подвод и отвод газов, а также сборный бункер (рисунок 5.8). В качестве

элемента батарейных циклонов используется большое число модификаций: аксиальным подводом газа и лопаточными завихрителями с тангенциальным подводом газа, прямоточные и др.

Широко применяются для энергетических установок элементы с тангенциальным улиточным подводом газа типа «Энергоуголь» с внутренним диаметром 231 мм (рисунок 5.8,а) [19]. Нормальный ряд таких циклонов для котлов паропроизводительностью от 20 до 500 т/ч представлен в таблице 5.1.

Гидравлическое сопротивление батарейных циклонов составляет около 500-700 Па. Наиболее целесообразно для батарейных циклонов применять элементы диаметром 250 мм. Оптимальная скорость потока газа в элементе обычно может быть в пределах: $\omega_{opt} = 3,5 \div 4,75 \text{ м/с}$.

Расчет батарейного циклона рекомендуется производить в следующей последовательности:

1) Определяется расход газов, $\text{м}^3/\text{с}$, при котором обеспечиваются оптимальные условия работы циклонного элемента, по формуле:

$$q_{opt} = 0,785D^2\omega_{opt}, \quad (5.11)$$

где ω_{opt} - оптимальная скорость потока в элементе, м/с (таблица 5.11);

D -внутренний диаметр элемента, м.

2) Число циклонных элементов, необходимое для оптимальных условий работы батарейного циклона, определяется как

$$n_{opt} = Q/q_{opt}, \quad (5.12)$$

где Q - общий расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$.

3) По таблице 5.11 подбирают батарейный циклон с ближайшим к n_{opt} количеством циклонных элементов n . Число элементов выбранного батарейного циклона n желательно выбрать таким, чтобы оно не более чем на 10% отличалось от n_{opt} .

Далее определяют действительную скорость потока в элементе ω , м/с:

$$\omega = Q / (0,785D^2n). \quad (5.13)$$

4) Потери давления (аэродинамическое сопротивление) в батарейном циклоне, Па:

$$\Delta p = \xi \rho \omega^2 / 2, \quad (5.14)$$

где ξ - коэффициент гидравлического сопротивления принимается по таблице 5.11.

5) Необходимая площадь сечения батарейного циклона определяется по выражению:

$$F_u = \frac{Q}{\omega Z}, \quad (5.15)$$

где Z - число батарейных циклонов на котел;

Q - количество очищаемого газа при номинальной нагрузке котла, м³/с.

6) Параметр улавливания определяется по приближенному выражению:

$$P_i = \sqrt{\frac{u_d}{4,5}} \sqrt[3]{d_i^2}, \quad (5.16)$$

где d_i - средний диаметр фракции, мкм;

u_d - скорость газов, м/с.

7) По параметру P_i по таблице 5.12. определяется степень уноса для каждой фракции ε_i , а затем общая степень уноса золоуловителя:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{i=k} \varepsilon_i \frac{\Phi_i}{100}, \quad (5.17)$$

где k - число фракций.

Положительный опыт длительной эксплуатации батарейных циклонов на многих электростанциях позволяет рекомендовать их для ряда случаев, в частности, для очистки:

- дымовых газов от золы при сжигании малозольных топлив, главным образом, бурых углей;

- рециркуляционных газов котлов от золы с целью защиты дымососов системы рециркуляции от износа;

- сушильного агента от невзрывоопасной угольной пыли, например, пыли углей марки АШ, в системах подготовки топлива.

Таблица 5.11 - Технические характеристики батарейных циклонов серийного изготовления

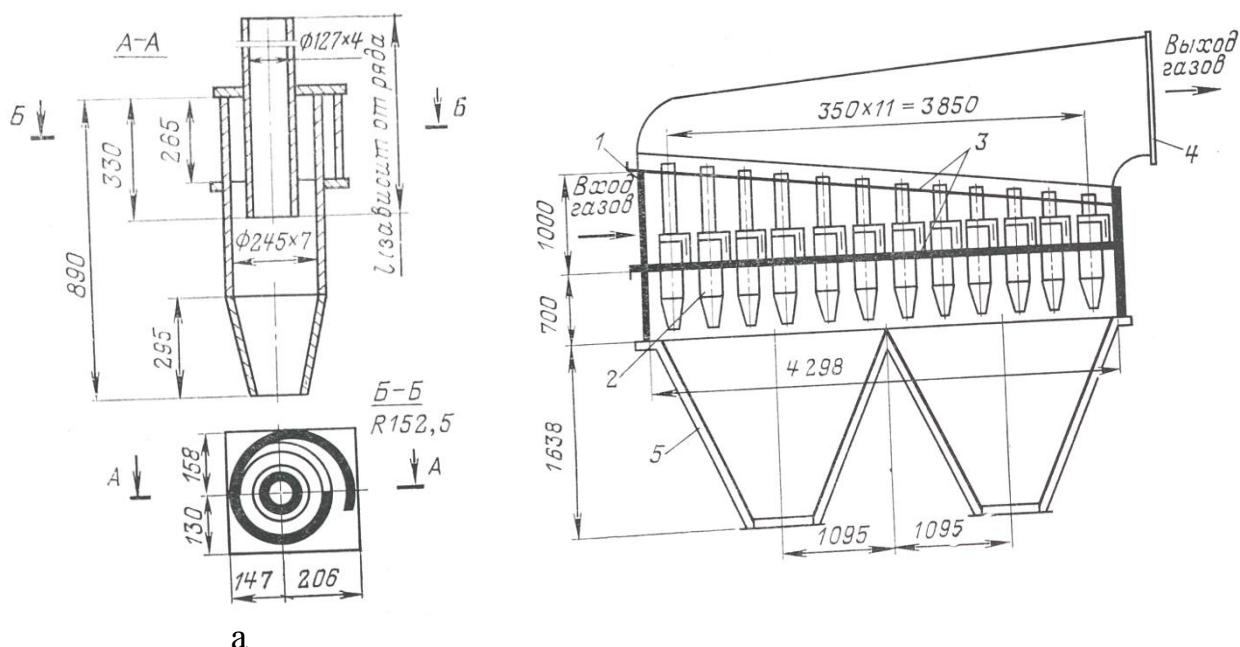
Тип циклона, завод-изготовитель, ОСТ или ТУ	Число элементов в секции п, шт.	Оптимальная скорость газа в элементе ω , м/с	Производитель по газу одной секции Q, м ³ /с	Коэффициент сопротивления ξ	Область промышленного применения
ЦБ-254Р, Семибратовский завод газоочистительной аппаратуры, ОСТ 26-14-2002-77. ОСТ 26-14-2003-77	25, 30, 40, 50, 60, 80	4,5	5,6 - 16,2	90	Очистка газа при температуре до 400 ⁰ С
ЦБ-231У, Семибратовский завод газоочистительной аппаратуры, ОСТ 26-14-2002-77	12, 16, 20, 25, 30, 42, 56, 63	4,5	2,2-11,7	110	То же
ЦБ-2, Кусинский Машиностроительный завод, ОСТ 108-033 взамен ОСТ 24-03- 001	20, 25, 30	4,5	4,84- 13,6	70	Очистка газа при температуре до 150 ⁰ С
ПБЦ, Карагандинский машиностроительный завод №2, ТУ 12-44- 21-038-75	24, 36, 48, 96	3,5	4,2 - 15.7	150	Очистка газа при температуре до 20 ⁰ С. Аппараты выпускаются во взрывобезопасном исполнении

Таблица 5.12 - Зависимость проскока (степени уноса) золы через золоуловитель от параметра золоулавливания

Параметр П	Параметр П									
	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
0,	1,0000	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,4966	0,4493	0,4066
1,	0,3679	3329	3012	2725	2466	2231	2019	1827	1653	1496
2,	15553	1225	1100	1003	0907	0821	0743	0672	0608	0550
3,	0498	0450	0407	0369	0334	0302	0273	0247	0224	0202
4,	0183	0166	01550	0136	0123	0111	0100	00910	00823	00745
5,	00674	00610	00552	00500	00452	00409	00370	00335	00303	00274
6,	00248	00224	00203	00184	00166	00150	00136	00123	00111	00100
7,	00091	00082	00075	00068	00061	00055	00050	00045	00041	00037
8,	00033	00030	00027	00025	00022	00020	00018	00017	00015	00014
9,	00012	00011	00010	00009	00008	00007	00006	00006	00005	00004

Т а б л и ц а 5.13 - Фракционный состав золы уноса некоторых топлив, %

Месторождение, бассейн	Марка топлива	Тип мельницы	Размер частиц, мкм								
			0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 60	60 – 80	80 – 100	> 100
			2,5	7,5	15	25	35	50	70	90	
Донецкий	АШ	ШБМ	8	9	14	11	11	20	17	5	5
Донецкий	Т	ШБМ	12	20	31	11	7	8	6	2	3
Кузнецкий	Т	ШБМ	12	19	31	9	6	10	5	3	5
Кемеровское	Т	ШБМ	8	13	22	17	10	14	8	3	5
Экибастузский	СС	ШБМ	6	9	46	21	8,3	6,7	-	-	-
Экибастузский	СС	ШБМ	9,5	15,5	20	11	7,55	9,55	-	-	-
Челябинский	Б	ШБМ	6,5	11,5	20	16	9	8	16	4	9
Подмосковный	Б	Быстроходная	24	21	16,5	10,2	8,5	9	6,5	1,8	2,5
Подмосковный	Б	ШБМ	11	18	22	14	18	12	8,1	2,1	2,0
Подмосковный	Б	ММТ	5	155	23	16,5	10	12,5	4	4	10
Канско-Ачинский	Б	ММТ	4	8	22	19	10	19	8	3	7
Фрезерный торф		ММТ	12	11	11	10	9	13	9	3	22



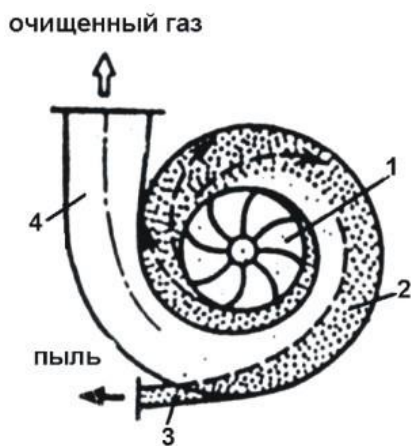
а - элемент батарейного циклона БЦУ типа «Энергоуголь»; б - батарейный циклон; 1- входной патрубок запыленного газа; 2- циклонный элемент; 3-трубные доски; 4-выходной патрубок очищенного газа; 5-бункер для золы.

Рисунок 5.8 - Циклонные золоуловители

Ротационные пылеуловители относят к аппаратам центробежного действия, которые одновременно с перемещением воздуха очищают его от фракции пыли крупнее 5 мкм. Они обладают большой компактностью, так как вентилятор тор и пылеуловитель обычно совмещены в одном агрегате.

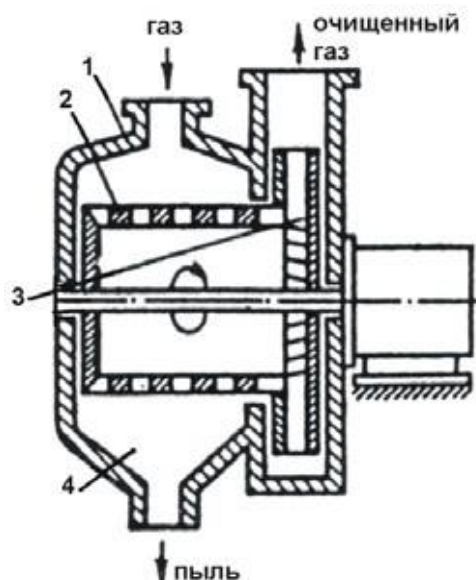
Схемы пылеуловителей ротационного типа представлены на рисунке 5.9 и 5.10. При работе вентиляторного колеса частицы пыли за счет центробежных сил отбрасываются к стенке спиралеобразного кожуха и движутся по ней в направлении выхлопного отверстия (рисунок 5.9). Газ, обогащенный пылью, через специальное пылеприемное отверстие отводится в пылевой бункер, а очищенный газ поступает в выхлопную трубу.

В противопоточном центробежном ротационном пылеуловителе (рисунок 5.10) ротор и колесо вентилятора насажены на общий вал. При работе пылеотделителя запыленный воздух поступает внутрь кожуха, где закручивается вокруг ротора. В результате вращения пылевого потока возникают центробежные силы, под действием которых взвешенные в воздухе частицы пыли стремятся выделяться из него в радиальном направлении. Одновременно на эти частицы в противоположном направлении действуют силы аэродинамического сопротивления.



1 – вентиляторное колесо; 2 – кожух;
3 – пылеприемное отверстие; 4 –
выхлопная труба.

Рисунок 5.9 - Пылеуловитель
ротационного типа



1 – кожух; 2 – ротор; 3 – колесо
вентилятора; 4 – бункер.

Рисунок 5.10 - Противоточный
ротационный пылеуловитель

Частицы, центробежная сила которых больше силы аэродинамического сопротивления, отбрасываются к стенкам кожуха и поступают в бункер. Очищенный воздух через перфорацию ротора всасывается в вентилятор и затем выводится наружу.

Эффективность очистки этих аппаратов зависит от выбранного соотношения центробежной и аэродинамической сил и теоретически может достигать 100 %. Величина центробежной силы является функцией числа оборотов и диаметра ротора. Величина аэродинамической силы является функцией скорости просасывания воздуха через перфорацию ротора, т.е. производительности вентилятора.

6 Очистка газов от твердых примесей методом фильтрации

Процесс очистки газов от твердых или жидких частиц с помощью пористых сред (перегородок) называется *фильтрацией*. При фильтрации (рисунок 6.1) взвешенные в газовом потоке частицы осаждаются на поверхности или в объеме пористых сред (перегородок).

Процесс фильтрации основан на многих физических явлениях (эффект зацепления, в том числе ситовый эффект, - аэрозольные частицы задерживаются в порах и каналах, имеющих сечение меньше, чем размеры частиц; действие сил инерции - при изменении направления движения запыленного потока частицы отклоняются от этого направления и осаждаются; броуновское движение - в значительной мере определяет

перемещение высокодисперсных субмикронных частиц; действие гравитационных сил, электростатических сил - аэрозольные частицы и материал фильтра могут иметь электрические заряды или быть нейтральными).

Существенными для фильтрования считаются следующие механизмы осаждения частиц на препятствиях: касание (зацепление), отсеивание (отсев, ситовой эффект), инерционный захват, гравитационное и диффузионное осаждение, электростатическое взаимодействие. Доля вклада каждого из них может изменяться от 0 до 1 в зависимости от условий, в которых происходит осаждение.

Перечисленные факторы указывают причину приближения частиц к препятствию на расстояние, при котором становится возможным их осаждение, то есть отделение от газовой фазы. Само же отделение происходит в случае удержания частиц на структурном элементе пористой среды силами межмолекулярных (вандерваальсовых, квантовых электрических) или химических связей.

Общим способом взаимодействия частиц с препятствием для всех разновидностей пористых сред является касание, т.е. когда препятствием будут уловлены (захвачены) и удержаны все частицы, которые могут его задеть (коснуться, зацепить). Поэтому частицы, проходящие от препятствия на расстоянии меньше своего радиуса, считаются осажденными за счет касания.

В процессе фильтрования практически всегда происходят отсеивание инерционный захват частиц. Ситовой эффект определяет степень осаждения частиц, которые по размерам не проходят сквозь поры. Он приобретает одно из определяющих значений после осаждения на структурных элементах фильтра первичного слоя улавливаемых частиц (автослоя), который уменьшает размеры пор и выполняет в дальнейшем функции фильтрующей среды.

Массивные частицы вследствие инерции не могут огибать препятствие вместе с газовым потоком. Сойдя с линии тока, частицы могут столкнуться с препятствием или зацепить его. При фильтровании за счет инерционного захвата осаждаются частицы размером более 1 мкм.

Гравитация, диффузия и электростатические силы оказывают влияние на осаждение частиц только в определенных условиях. Гравитационное осаждение может быть заметно, если в фильтрующей среде возможно образование застойных зон, например, в круглых порах и полостях. Частицы размером менее 0,1 мкм могут приблизиться к препятствию, совершая хаотичные перемещения (диффундируя) под воздействием броуновского движения молекул. Доля диффузионного осаждения в улавливании более крупных частиц незначительна.

Электростатические силы проявляются при взаимодействии носителей

зарядов. Частицы загрязнителей и элементы пористой среды обычно имеют небольшое число зарядов, приобретенных естественным путем (при диспергации компактных объектов, трении движущихся частиц, адсорбции газовых ионов), но сила их взаимодействия невелика. Необходимость учета электростатического взаимодействия возникает только при искусственной зарядке фильтрующего материала и частиц.

Большинство фильтров обладает высокой эффективностью очистки. Фильтры применяют как при высокой, так и при низкой температуре очищаемой среды, при различной концентрации в воздухе взвешенных частиц.



Рисунок 6.1 - Схема процесса фильтрации

Соответствующим подбором фильтровальных материалов и режима очистки можно достичь требуемой эффективности очистки в фильтре практически во всех необходимых случаях.

Фильтрующие перегородки весьма разнообразны по своей структуре, но в основном они состоят из волокнистых или зернистых элементов и условно подразделяются на следующие типы:

– *гибкие пористые перегородки* – тканевые материалы из природных, синтетических или минеральных волокон; нетканевые волокнистые материалы (войлоки, клееные и иглопробивные материалы, бумага, картон, волокнистые маты); ячеистые листы (губчатая резина, пенополиуретан, мембранные фильтры);

– *полужесткие пористые перегородки* – слои волокон, стружка, вязанные сетки, расположенные на опорных устройствах или зажатые между ними;

– *жесткие пористые перегородки* – зернистые материалы (пористая керамика и пластмасса, спеченные или спрессованные порошки металлов, пористые стекла, углеграфитовые материалы и др.); волокнистые материалы (сформированные слои из стеклянных и металлических волокон); металлические сетки и перфорированные листы.

В процессе очистки запыленного газа частицы приближаются к волокнам или к поверхности зерен материала, сталкиваются с ними и осаждаются, главным образом, в результате действия сил диффузии, инерции и электростатического притяжения.

В фильтрах уловленные частицы накапливаются в порах или образуют пылевой слой на поверхности перегородки, и, таким образом, сами становятся

для вновь поступающих частиц частью фильтрующей среды. По мере накопления пыли пористость перегородки уменьшается, а сопротивление возрастает. Поэтому возникает необходимость удаления пыли и регенерации фильтра.

В зависимости от назначения и величины входной и выходной концентрации фильтры условно разделяются на три класса:

– *фильтры тонкой очистки* (высокоэффективные или абсолютные фильтры) предназначены для улавливания с очень высокой эффективностью (более 99 %) в основном субмикронных частиц из промышленных газов с низкой входной концентрацией (менее 1 мг/м³) и скоростью фильтрования менее 10 см/с. Фильтры применяют для улавливания особо токсичных частиц, а также для ультратонкой очистки воздуха при проведении некоторых технологических процессов. Они не подвергаются регенерации;

– *воздушные фильтры* используют в системах приточной вентиляции и кондиционирования воздуха; работают при концентрации пыли менее 50 мг/м³, при высокой скорости фильтрации – до (2,5–3) м/с. Фильтры могут быть нере- генерируемые и регенерируемые;

– *промышленные фильтры* (тканевые, зернистые, грубоволокнистые) применяются для очистки промышленных газов с концентрацией пыли до 60 г/м³. Фильтры регенерируются.

В фильтрах уловленные частицы накапливаются в порах или образуют пылевой слой на поверхности перегородки, и таким образом сами становятся для вновь поступающих частиц частью фильтрующей среды. По мере накопления пыли пористость перегородки уменьшается, а сопротивление возрастает. Поэтому возникает необходимость удаления пыли и регенерации фильтра.

Обладая многими положительными качествами, фильтрующие устройства в то же время не лишены недостатков: стоимость очистки в фильтрах выше, чем в большинстве других пылеуловителей, в частности, в циклонах. Это объясняется большей конструктивной сложностью фильтров по сравнению с другими аппаратами - большим расходом электроэнергии. Многие конструкции фильтрационных пылеуловителей более сложны в эксплуатации и требуют квалифицированного обслуживания.

По типу структурных элементов пористого слоя различают волокнистые, зернистые и тканевые фильтры. В волокнистых фильтрах осаждение взвешенных частиц происходит на слоях волокон, удерживаемых конструкциями в виде прямоугольных рам, колец и др.

6.1 Волокнистые фильтры

и волокнистых фильтрах фильтрующий слой образован относительно равномерно распределенными тонкими волокнами фильтрующих материалов. Эти фильтры предназначены для улавливания

частиц мелкодисперсной и особо мелкодисперсной пыли при ее концентрации в очищаемом воздухе (газе) в пределах $0,5 \dots 5 \text{ мг/м}^3$.

Волокнистые фильтры могут быть подразделены на тонковолокнистые, глубокие и грубоволокнистые фильтры.

Тонковолокнистые фильтры имеют диаметры волокон менее 5 мкм и используются для улавливания высокодисперсной пыли и других аэрозольных частиц размером $0,05 \dots 0,1$ мкм с эффективностью по субмикронным частицам не менее 99 %. В качестве фильтровального материала используется ФП (фильтр Петрянова).

Фильтры с материалом ФП часто используются для улавливания опасных (высокотоксичных, радиоактивных, бактериологически зараженных и др.) аэрозолей с последующим уничтожением или захоронением.

Основного недостатка тонковолокнистых фильтров (короткий срок службы фильтрующего слоя из-за неприменимости регенерации) лишены *глубокие фильтры* (фильтры долговременного пользования). Первый слой фильтра на пути движения очищаемой среды состоит из грубых волокон, последний слой - из тонких. Диаметр грубых волокон $8 \dots 19$ мкм. Фильтры имеют высоту фильтрующего слоя от 0,3 до 2 м и рассчитаны на работу при давлении до 0,3 МПа. Фильтр применяется в системах стерилизации воздуха.

В производстве антибиотиков, витаминов и других био- и медицинских препаратов. Они могут применяться и для тонкой очистки некоторых видов технологических газовых выбросов. Фильтр периодически стерилизуют острым паром, затем просушивают сухим воздухом. Они рассчитаны на срок службы 10...20 лет.

Грубоволокнистые фильтры. Эти фильтры называют также предфильтрами, так как их устанавливают перед тонковолокнистыми фильтрами для предварительной очистки воздуха (газов). Благодаря этому снижается стоимость очистки, поскольку стоимость грубоволокнистых фильтров почти 10 раз ниже тонковолокнистых, их легче заменять или регенерировать. Фильтровальный материал предфильтра состоит из смеси волокон диаметром от 1 до 20 мкм.

Грубоволокнистые фильтры отличаются низким начальным сопротивлением (порядка 100 Па) и высокой пылеемкостью. При удельной нагрузке $0,05 \dots 1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ с})$ фильтры должны полностью улавливать частицы крупнее 1 мкм.

6.2 Зернистые фильтры

Зернистые фильтры используют в газоочистке при невозможности применения тканевых из-за высокой температуры среды. Зернистые фильтры находят все более широкое применение в мире при обработке запыленных выбросов производства строительных материалов, предприятий химической промышленности, при получении редких металлов и в других

технологических процессах. Однако по сравнению с тканевыми фильтрами они имеют меньшее распространение. Перспективным направлением можно считать использование зернистых фильтров для одновременного улавливания дисперсных и газообразных примесей газовых выбросов.

Фильтрующий слой в зернистых фильтрах образован зернами сферической или другой формы. Могут использоваться при высоких температурах - до 500...800 °С, в условиях воздействия агрессивной среды. Зернистые фильтры распространены значительно меньше, чем тканевые фильтры. Различают насыпные зернистые фильтры, в которых элементы фильтрующего слоя не связаны жестко друг с другом, и жесткие зернистые фильтры, в которых эти элементы прочно связаны между собой путем спекания, прессования, склеивания, и образуют прочную неподвижную систему.

Зернистые жесткие фильтры керамические, металлокерамические и другие обладают значительной устойчивостью к высокой температуре, коррозии, механическим нагрузкам. Их недостаток - высокая стоимость, большое гидравлическое сопротивление, трудность регенерации.

В насадке насыпных фильтров используют песок, гравий, шлак, дробленые горные породы, кокс, крошку резины, пластмасс, графита и другие материалы в зависимости от требуемой устойчивости к воздействию температуры, химических веществ.

Зернистый фильтр может быть единственной ступенью в установке или первой ступенью перед более эффективным фильтром, например с материалами ФП.

В зернистом гравийном фильтре для улавливания пылей с наличием абразивных частиц и агрессивных газов от дробилок, грохотов, сушилок, мельниц, транспортирующих устройств предприятий по производству цемента, извести, гипса, фосфорных удобрений и др. удельная нагрузка на фильтр составляет 17...50 м³/(м²ч), сопротивление фильтра - в пределах 0,5...1,5 кПа. Эффективность очистки - до 99,8 %.

6.3 Тканевые фильтры. Рукавные тканевые фильтры

В настоящее время выпускается и эксплуатируется множество разнообразных конструкций тканевых фильтров. По форме фильтровальных элементов и тканей они могут быть рукавные и плоские (полотняные), по виду опорных устройств - каркасные, рамные и т.д., по наличию корпуса и его форме - цилиндрические, прямоугольные, открытые (бескамерные), по числу секций - одно- и многосекционные. Фильтры могут также различаться по способу регенерации и ряду других признаков.

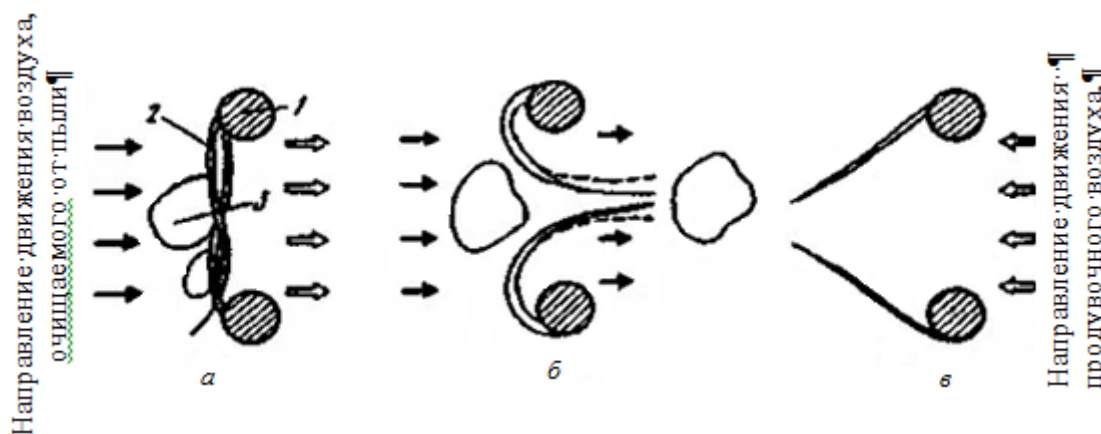
В тканевых фильтрах применяются *тканые* или *валяные* материалы, выполняющие роль подложки для фильтрующей среды, которой является

первичный слой уловленной пыли. Ткани для фильтров изготавливают из натуральных, или синтетических волокон диаметром 10...30 мкм, скручиваемых в нити диаметром около 0,5 мм. Размеры пор между нитями обычно составляют 100...200 мкм

Эффективность очистки воздуха (газов) в рукавных пылеуловителях в основном зависит от свойств фильтровальной ткани, из которой изготовлены рукава аппарата, а также от того, в какой мере эти свойства соответствуют свойствам очищаемой среды и взвешенных в ней частиц.

При прохождении запыленного воздуха (газа) через ткань пылевые частицы задерживаются между нитями и ворсом. Сетка образуется нитями основы и утка и дополнительно переплетается ворсинками. Наличие ворса повышает эффективность фильтрации.

Ворс должен быть обращен навстречу запыленному потоку. При движении запыленного потока воздух прижимает ворсинки к ткани. При обратной продувке происходит выпучивание ворсинок, и накопившиеся пылевые частицы удаляются (рисунок 6.2). Если же ворс будет направлен в противоположную сторону, то количество задержанной пыли уменьшается, поскольку происходит выпучивание ворсинок. Затрудняется и регенерация, так как ворсинки прижимаются к нитям и препятствуют отделению пыли от ткани.



а - рабочее положение ворса: 1 - нить ткани; 2 - нить ворса;
3 - частицы пыли; б - пылевой пробой ткани; в - обратная продувка.

Рисунок 6.2 - Положение ворса фильтрованной ткани при различных режимах работы

Чистая ткань не обеспечивает необходимую эффективность очистки. После регенерации на ткани остается некоторый слой пыли. После нескольких циклов (запыление - регенерация и т. д.) ткань приобретает рабочее состояние. В ней создается остаточный слой пыли, который вместе с тканью образует фильтрующий слой. В процессе фильтрования этот слой увеличивается. После очередной регенерации он уменьшается до остаточной величины. Обычно

после нескольких циклов запыления и регенерации сопротивление ткани стабилизируется. Однако в некоторых случаях сопротивление ткани непрерывно растет. Это происходит при застревании в волокнах ткани пылевых частиц, а также при конденсации влаги на поверхности, замасливания ткани и т. д., в результате чего уменьшается сечение пор.

Фильтровальные ткани должны обладать рядом положительных свойств: обеспечивать эффективную очистку, допускать достаточную воздушную нагрузку, обладать необходимой пылеемкостью, способностью к регенерации, высокой долговечностью, стойкостью к истиранию и другим механическим воздействиям, низкой гигроскопичностью, невысокой стоимостью. К ткани могут быть предъявлены дополнительные требования, обусловленные свойствами очищаемой среды: стойкость к определенным химическим веществам и высокой температуре.

Наибольшее распространение получили фильтры с гибкими фильтрующими перегородками.

В фильтровальных тканях применяются следующие виды волокон: естественные волокна животного и растительного происхождения (шерстяные, льняные, хлопчатобумажные, шелковые); искусственные органические (лавсан, нитрон, капрон, хлорин и др.); естественные минеральные (асбест); искусственные неорганические (стеклоткань, металлоткань).

В основе выбора материала фильтрующей перегородки лежат следующие показатели: термостойкость, химическая стойкость, воздухопроницаемость, разрывная нагрузка, изгибоустойчивость, а также возможная степень очистки.

Хлопковое волокно на 94...95 % состоит из целлюлозы, оно гигроскопично. При относительной влажности воздуха 65 % это волокно поглощает до 8 % влаги, при влажности 93...94 % - 25 % влаги. При нагревании до 120...130 °С заметных последствий не наблюдается, при более высокой температуре происходит разрушение волокна. Слабые растворы едкой щелочи (0,5...5%-ные) не оказывают существенного влияния на хлопковое волокно, при более сильных растворах происходит его разрушение. Многие кислоты действуют на хлопковое волокно разрушающе. Так, 1,5%-ная соляная кислота при температуре 90...100 °С разрушает волокно в течение 1 ч. Так же действуют азотная и серная кислоты.

В *шерстяных волокнах* содержится 90 % каротина. При нагревании свыше 170 °С они разрушаются. В отличие от хлопкового волокна шерстяные волокна менее стойки к кислотам и более стойки к щелочам. Шерстяное волокно при влажности воздуха 65 % интенсивно поглощает до 15,5 % влаги, при влажности: 100 % - 34 % влаги. На шерстяную ткань разрушающе действует вода температурой свыше 70 °С и серная, соляная, азотная кислоты концентрацией раствора более 5...7 %. При воздействии воздуха

температурой 80 °С шерсть становится жесткой и ломкой. Механическая прочность шерстяного волокна ниже, чем хлопкового, однако шерстяные волокна более пригодны для изготовления фильтровальных тканей благодаря большей упругости.

Значительными преимуществами обладают фильтровальные ткани из *нитрона* и *лавсана*. Нитроновое волокно характеризуется прочностью, эластичностью, малой гигроскопичностью. При влажности воздуха 65 % оно поглощает из воздуха лишь 1 % влаги. Нитрон неограниченно долго без заметных последствий выдерживает температуру 120...130 °С и ограниченное время 180 °С. По сравнению с хлопком нитрон в несколько раз устойчивее к кислотам, органическим растворителям. Он устойчив также к действию микроорганизмов, моли. Ткань из нитрона не подвергается усадке.

Лавсановое волокно обладает прочностью, устойчивостью к истиранию и температуре примерно такими же, как нитроновое волокно, однако более устойчиво к химическим реагентам. Лавсановое волокно обладает малой гигроскопичностью, устойчиво к действию микроорганизмов.

Основное достоинство *волокон асбеста*: обладают высокой термостойкостью, не загнивают, стойки по отношению к растворам щелочей и кислот. Прочность невелика.

Стекловолоконное волокно обладает высокой термостойкостью, химической стойкостью, выдерживает значительные разрывные нагрузки. Стеклоткани стойки при температуре до 150...300 °С. Фильтровальные стеклоткани обычно изготавливают из волокон диаметром 6...8 мкм. Стеклоткани аппретируют - покрывают кремнийорганическим соединением - силиконом и графитируют. Благодаря этому срок службы стеклоткани увеличивается.

Фильтровальные материалы могут быть ткаными и неткаными, а в зависимости от состояния поверхности - ворсованными и гладкими.

При изготовлении нетканых материалов из синтетических волокон сцепление этих волокон усиливают, пробивая слой волокон специальными иглами и получая, таким образом, иглопробивные материалы. Для этих же целей используют склеивающие добавки и др.

Сопротивление незапыленных фильтровальных тканей при нагрузках по газу (воздуху) $0,3...2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ обычно находится в пределах 5...40 Па. Срок службы фильтровальных тканей в зависимости от условий эксплуатации (вид пыли, ее концентрация, температура, уровень эксплуатации и др.) может составлять от нескольких месяцев до нескольких лет.

Удельную воздушную нагрузку ткани (скорость фильтрации), $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ принимают в зависимости от концентрации пыли в очищаемом воздухе (газе), вида ткани (таблица Б.1 приложения Б).

Многие ткани изготавливают в виде полотен (кусков), из которых шьют рукава. Диаметр рукавов обычно в пределах 90...450 мм. Длина 2,5...10м. Отношение длины рукава к его диаметру 15...20.

Величины воздухопроницаемости характеризуют аэродинамические свойства тканей в незапыленном состоянии. По мере запыления сопротивление ткани начинает расти. Если не принимать никаких мер, оно может увеличиваться до величины напора, развиваемого вентилятором. Дальнейшее накопление пыли приведет к уменьшению подачи вентилятора. Часть пыли при повышенных перепадах давления может проникнуть в поры между нитями и «забить» ткань, сделав ее непригодной для фильтрования. Во избежание этого явления фильтры через определенное время эксплуатации подвергают регенерации. Процесс регенерации является неотъемлемой частью технологии фильтрации и разрабатывается в проекте наряду с другими параметрами фильтрации.

Аппарат очистки воздуха от пыли методом фильтрования является рукавный фильтр.

Рукавные тканевые фильтры применяются для очистки больших объемов воздуха (газов) со значительной концентрацией пыли. Фильтрующими элементами в этих аппаратах являются рукава из специальной фильтровальной ткани.

Рукавный фильтр представляет собой металлический корпус, разделенный перегородками на секции, в каждой из которых размещена группа фильтрующих рукавов подвешенных на монтажных (опорных) решетках. Внизу рукавного фильтра находится бункер для сбора пыли, выгрузку пыли и герметичность обеспечивают шнек и шлюзовой питатель. Регенерация (очистка) рукавов фильтра происходит поочередно кратковременными импульсами сжатого воздуха. Управление регенерацией осуществляет контроллер, который задает частоту и продолжительность импульсов по перепаду давления при помощи дифманометра.

Рукавные фильтры обеспечивают очистку воздуха от пылевых частиц, имеющих размер от 0,05 до 100 мкм с эффективностью от 0,7 до 0,999.

Наряду с циклонами, рукавные фильтры являются одним из основных видов пылеулавливающего оборудования и широко применяются на предприятиях черной и цветной металлургии, химической промышленности, промышленности строительных материалов, пищевой промышленности, в энергетических установках и др.

Рукавные фильтры предназначены для очистки пылегазовоздушных потоков с температурой до +260 С° и исходной запыленностью до 100 г/м³.

Рукавные фильтры относятся к пылеулавливающему оборудованию «сухого» типа. Остаточная запыленность пылевых выбросов на выходе после рукавных фильтров обычно составляет не более 10 мг/м³ (существуют модификации фильтров с более низкой остаточной запыленностью, до 1 мг/м³). Рукавные фильтры могут быть укомплектованы фильтрующими рукавами, сшитыми из высокотемпературных фильтрующих материалов (политетрафторэтилен, полиимид) с температурой эксплуатации до +260 С°.

Рукавные фильтры предназначены как для очистки дымовых газов, так и аспирационных выбросов предприятий различных отраслей промышленности:

- чёрная металлургия;
- цветная металлургия;
- промышленность по производству строительных материалов;
- машиностроение;
- литейное производство;
- металлообработка;
- стекольная промышленность;
- химическая промышленность;
- горнодобывающая промышленность;
- пищевая промышленность;
- деревообработка и мебельная промышленность;
- энергетика.

Общий вид рукавного фильтра показан на рисунке 6.3.

В эксплуатации находятся многие конструкции рукавных фильтров, отличающиеся формой корпуса, диаметром и длиной рукавов, видом применяемой фильтровальной ткани, способом регенерации и др.

Методика расчета рукавных фильтров.

Расчеты фильтров сводятся к определению площади фильтровальной перегородки, гидравлического сопротивления фильтровальной перегородки и аппарата в целом, частоты и продолжительности циклов регенерации фильтрующих элементов.

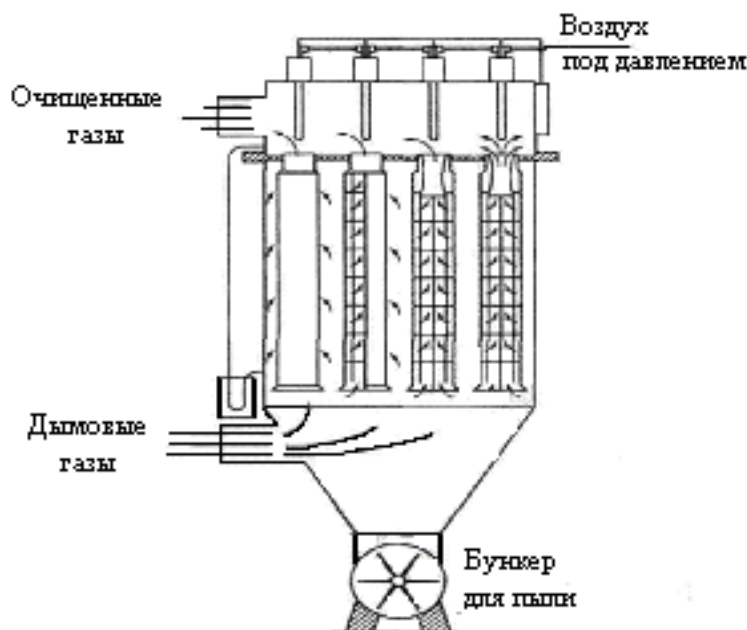


Рисунок 6.3 - Рукавный фильтр

С учетом физико-химических характеристик выбросов, характера производства, технико-экономических и других факторов обосновывают эффективность очистки газов посредством фильтрации, принимают тип фильтрующей среды и фильтра (волоконный, тканевый, зернистый и др.), подбирают приемлемый материал волокон, ткани или гранул; для тканых и зернистых фильтров определяют также способ регенерации фильтрующего слоя.

Фильтрующая поверхность аппарата определяется из выражения:

$$F_{\phi} = [(V_{\text{п}} + V_{\text{р}})/60q] + F_{\text{р}}, \quad (6.1)$$

где $V_{\text{п}}$ – объем газа, поступающего на очистку, м³/ч;
 $V_{\text{р}}$ – объем газа или воздуха, расходуемого на регенерацию ткани, м³/ч;
 q – удельная газовая нагрузка фильтровальной перегородки при фильтровании, м³/(м²·мин);

$F_{\text{р}}$ – фильтрующая поверхность, отключаемая на регенерацию в течение 1 час, м².

Величину $F_{\text{р}}$ следует рассчитывать по зависимости:

$$F_{\text{р}} = N_{\text{с}} \cdot F_{\text{с}} \cdot \tau_{\text{р}} \cdot m_{\text{р}}, \quad (6.2)$$

где $N_{\text{с}}$ – число секций в фильтре;

$F_{\text{с}}$ – фильтрующая поверхность секции, м²;

$\tau_{\text{р}}$ – время регенерации секции, с;

$m_{\text{р}}$ – число регенерации в течении 1 часа.

Для фильтров с импульсной продувкой в связи с кратковременностью процесса регенерации поверхности фильтра, выключаемой на время регенерации, и объемом газа, расходуемого на обратную продувку, можно пренебречь.

Удельная газовая нагрузка на фильтровальную перегородку для рукавных фильтров колеблется от 0,3 до 6 м³/(м²·мин). Внутри этого диапазона выбор оптимального значения зависит от многих факторов, к которым, в первую очередь, относятся свойства улавливаемой пыли, способ регенерации фильтровальных элементов, концентрация пыли в газе, структура фильтровального материала, температура очищаемого газа, требуемая степень очистки.

С достаточной для практических расчетов точностью удельную газовую нагрузку в рукавных фильтрах можно определить из следующего выражения [м³/(м²·мин)]:

$$q = q_{\text{н}} \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot c_5, \quad (6.3)$$

где q_n – нормативная удельная нагрузка, зависящая от вида пыли и ее склонности к агломерации (таблица 6.1);

c_1 – коэффициент, характеризующий способность регенерации фильтрующих элементов (определяется по данным приведенным ниже);

c_2 – коэффициент, учитывающий влияние концентрации пыли на удельную газовую нагрузку, определяется по рисунку 6.3;

c_3 – коэффициент, учитывающий влияние дисперсного состава пыли в газе (таблица 6.2);

c_4 – коэффициент, учитывающий влияние температуры газа (таблица 6.3);

c_5 – коэффициент, учитывающий требования к качеству очистки.

Таблица 6.1 - Нормативная удельная газовая нагрузка

№ п/п	Вид пыли	q_n
1	Комбикорм	3,5
2	Мука	
3	Зерно	
4	Жмыховая смесь	
5	Пыль кожи	
6	Опилки	
7	Табак	
8	Картонная пыль	
9	Асбест	2,6
10	Волокнистые целлюлозные материалы	
11	Пыль при выбивке отливок из форм	
12	Гипс	
13	Известь гашеная	
14	Пыль от полировки	
15	Соль	
16	Песок	
17	Глинозем	2,0
18	Цемент	
19	Керамические красители	
20	Уголь	
21	Резина	
22	Каолин	
23	Известняк	
24	Сахар	
25	Кокс	1,7
26	Летучая зола	
27	Окислы металлов	
28	Крахмал	
29	Пластмассы	
30	Активированный уголь	1,5

31	Моющие средства
32	Порошковое молоко
33	Возгоны цветных и черных металлов

Для коэффициента, учитывающего влияние особенностей регенерации фильтровальных элементов, в качестве базового варианта принимается фильтр с импульсной продувкой сжатым воздухом с рукавами из ткани. Для этого аппарата коэффициент $c_1 = 1$. При использовании рукавов из нетканых материалов значение коэффициента может увеличиваться на 5...10%. Для фильтров с регенерацией путем обратной продувки и одновременного встряхивания или покачивания рукавов принимается коэффициент $c_1 = 0,70...0,85$.

Меньшее значение принимается для более плотной ткани. При регенерации путем только обратной продувки $c_1 = 0,55...0,70$.

Концентрация пыли (коэффициент c_2) сказывается на продолжительности цикла фильтрования (рисунок 6.4).

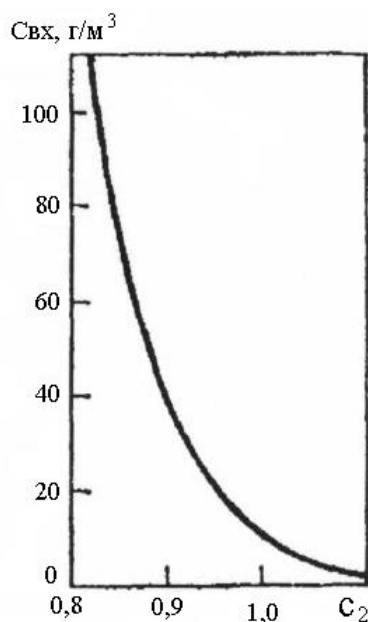


Рисунок 6.4 - Зависимость коэффициента c_2 от концентрации пыли на входе в фильтр $C_{вх}$

При увеличении концентрации увеличивается частота регенерации и удельная нагрузка должна снижаться. Однако зависимость удельной нагрузки от концентрации пыли не является линейной функцией. Наиболее заметно изменение концентрации проявляет себя в интервале концентраций 1...30 г/м³.

При более высоких значениях усиливается влияние коагуляции частиц пыли, и часть ее в виде агломератов падает в бункер до ее осаждения на

фильтровальных элементах.

Коэффициент c_5 , учитывающий требования к качеству очистки, оценивается по концентрации пыли в очищенном газе. При концентрации пыли в отходящих газах 30 мг/м^3 $c_5 = 1$, а при 10 мг/м^3 $c_5 = 0,95$.

Таблица 6.2 – Зависимость коэффициента c_3 от диаметра частиц

$d_m, \text{ мкм}$	< 3	3 – 10	10 – 50	50 – 100	>100
c_3	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3
N	1 – 5	6 – 10	11 – 15	16 – 20	>20

Таблица 6.3- Зависимость коэффициента c_4 от температуры газа

$t, ^\circ\text{C}$	20	40	60	80	100	120	140	160
c_4	1	0,9	0,84	0,78	0,75	0,73	0,72	0,7
N	1 – 3	4 – 7	8 – 10	11 – 14	15 – 18	19 – 22	23 – 27	>28

Гидравлическое сопротивление фильтра в Па складывается из сопротивления корпуса P_k и сопротивления фильтровальной перегородки P_n :

$$P_\phi = P_k + P_n. \quad (6.4)$$

Гидравлическое сопротивление корпуса аппарата определяется величиной местных сопротивлений, возникающих на входе в аппарат и выходе из него и при раздаче потока по фильтровальным элементам. В общем виде гидравлическое сопротивление может быть оценено коэффициентом сопротивления корпуса аппарата, отнесенным к скорости газа во входном патрубке:

$$\xi_k = \frac{\Delta P_k^2}{v_{BX}^2 \cdot \rho_\Gamma}, \quad (6.5)$$

где v_{BX} - скорость газа во входном патрубке, м/с.

Величина ξ_k при конструировании фильтров обычно принимается равной 1,5 ... 2,0.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки включает потери напора за счет самой перегородки ($\Delta P'_\Pi$) и потери за счет осевшей на перегородку пыли ($\Delta P''_\Pi$):

$$\Delta P_\Pi = \Delta P'_\Pi + \Delta P''_\Pi. \quad (6.6)$$

Величину $\Delta P'_\Pi$ (в Па) удобно вычислять по выражению:

$$\Delta P'_\Pi = K_\Pi \cdot \mu \cdot v^n, \quad (6.7)$$

где K_{Π} - коэффициент, характеризующий сопротивление фильтровальной перегородки, м^{-1} ;

μ - динамическая вязкость газа, Па с;

v - скорость фильтрации, м/с;

n - показатель степени, зависящий от режима течения газа сквозь перегородку (для ламинарного режима $n = 1$, для турбулентного $n > 1$).

Коэффициент K_{Π} зависит от толщины и проницаемости фильтровальной перегородки, количества пыли, оставшейся на перегородке после регенерации, свойств пыли. Поэтому этот коэффициент определяют экспериментально. Например, для фильтровальных тканей из лавсана, улавливающих цементную или кварцевую пыль с медианным диаметром в пределах 10...20 мкм, $K_{\Pi} = (1100...1500) \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$, для тех же материалов при улавливании возгонов от сталеплавильных дуговых печей с медианным диаметром частиц 2,5...3,0 мкм $K_{\Pi} = (2300...2400) \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$. Для более плотных тканей (лавсан, стеклоткань) на тех же пылях коэффициент K_{Π} увеличивается в 1,2...1,3 раза.

При улавливании пылей с медианным размером частиц меньше 1 мкм коэффициент K_{Π} увеличивается в несколько раз и для лавсана. При улавливании возгонов кремния с медианным диаметром 0,6 мкм он составляет $(13000...15000) \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$.

Приведенные значения коэффициентов не учитывают возможное увеличение его в присутствии влаги.

Сопротивление в Па, вызванное осевшей на перегородку пылью, рассчитывается по уравнению:

$$\Delta P''_{\Pi} = \mu \cdot \tau \cdot C_{\text{вх}} \cdot v^2 \cdot K_1, \quad (6.8)$$

где τ - продолжительность фильтровального цикла, с;

$C_{\text{вх}}$ - концентрация пыли на входе в фильтр, $\text{кг}/\text{м}^3$;

K_1 - параметр сопротивления слоя пыли, м/кг.

Величина K_1 зависит от свойств пыли и порозности слоя пыли на перегородке. Например, для цемента с медианным диаметром частиц $d_m = 12...20$ мкм $K_1 = (6,5 - 16) \cdot 10^9 \text{ м}/\text{кг}$, для частиц кремния $d_m = 0,7$ мкм $K_1 = 330 \cdot 10^9 \text{ м}/\text{кг}$, для возгонов сталеплавильной дуговой печи $d_m = 3$ мкм $K_1 = 80 \cdot 10^9 \text{ м}/\text{кг}$.

Пользуясь формулой (6.8), при известном или заданном гидравлическом сопротивлении слоя пыли можно найти продолжительность фильтровального цикла:

$$T = \frac{\Delta P_{II}''}{\mu \cdot C_{BX} \cdot v^2 \cdot K_1} \quad (6.9)$$

Следует иметь в виду, что общее сопротивление рукавных фильтров не должно превышать 2800 Па, а сопротивление слоя пыли на перегородке - 600...800 Па.

Достоинства:

- широкий температурный диапазон эксплуатации, который определяется видом фильтрующего материала и может достигать 280 °С;
- высокой эффективностью улавливания (около 99%) пыли с размером фракции свыше 1 мкм;
- возможностью эксплуатации в щелочных и кислых атмосферах.

Недостаток: сложность работ по регенерации фильтровальных рукавов.

7 Электрофильтры

Электрическая очистка – один из наиболее совершенных видов очистки газов от взвешенных в них частиц пыли и тумана. Этот процесс (рисунки 7.1-7.3) основан на ударной ионизации газа в зоне коронирующего разряда, передаче заряда ионов частицам примесей и осаждении последних на осадительных и коронирующих электродах.

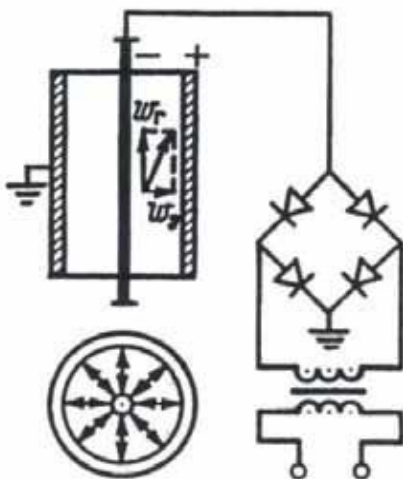


Рисунок 7.1 - Схема расположения электродов в электрофильтре

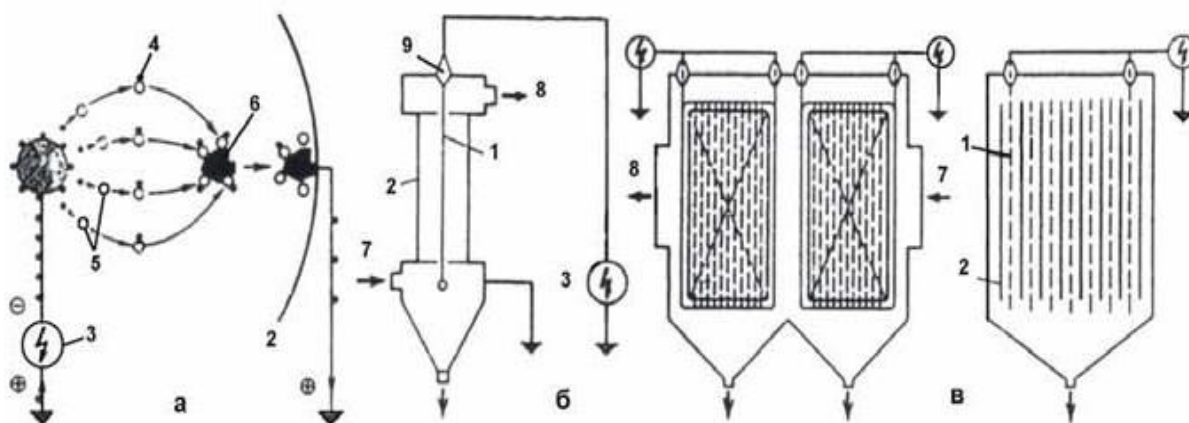


Рисунок 7.2 - Зависимость силы тока от напряжения между электродами

Загрязненные газы, поступающие в электрофильтр, всегда частично ионизированны за счет различных внешних воздействий (рентгеновских лучей, радиоактивных излучений, космических лучей, нагрева газа и др.), поэтому, попадая в пространство между электродами, они способны проводить ток. При

увеличении напряжения между электродами вовлекается все большее число ионов и величина тока растет до тех пор, пока в движении не окажутся все ионы, имеющиеся в газе. При этом величина силы тока становится постоянной (*ток насыщения*), несмотря на дальнейший рост напряжения. При некотором достаточно большом напряжении движущиеся ионы и электроны настолько ускоряются, что, сталкиваясь с молекулами газа, ионизируют их, превращая нейтральные молекулы в положительные ионы и электроны. Образовавшиеся новые ионы и электроны ускоряются электрическим полем и ионизируют новые молекулы газа. Этот процесс называется *ударной ионизацией газа*.

Ударная ионизация газа протекает устойчиво лишь в неоднородном электрическом поле, характерном для цилиндрического конденсатора. В зазоре между коронирующим и осадительным электродами создается электрическое поле убывающей напряженности с силовыми линиями, направленными от осадительного к коронирующему электроду или наоборот.



а - процесс электрического осаждения частиц; б - электрофильтр с трубчатым электродом; в - электрофильтр с пластинчатым электродом; 1- коронирующий электрод; 2-осадительный электрод; 3 - агрегат электропитания; 4 - электрон; 5 - молекула газа; 6 - осаждаемая частица; 7- очищаемый газ; 8 - очищенный газ; 9 –изолятор.

Рисунок 7.3 - Принципиальная схема работы электрофильтра

Аэрозольные частицы, поступающие в зону между коронирующим и осадительным электродами, адсорбируют на своей поверхности ионы, приобретая электрический заряд, и получают тем самым ускорение, направленное в сторону электрода с зарядом противоположного знака.

Движение заряженных частиц к осадительному электроду происходит под действием аэродинамических сил, силы взаимодействия электрического поля и заряда частицы, силы тяжести и силы давления электрического ветра.

Основной силой, вызывающей движение частицы к осадительному электроду, является сила взаимодействия между электрическим полем и зарядом частицы.

Таким образом, отрицательно заряженные аэрозольные частицы движутся к осадительному электроду под действием аэродинамических сил и электрических сил, а положительно заряженные частицы оседают на отрицательном коронирующем электроде. Ввиду того, что объем внешней зоны коронного разряда во много раз больше объема внутренней, большинство частиц пыли получает заряд отрицательного знака. Поэтому основная масса пыли осаждается на положительном осадительном электроде и лишь относительно небольшая – на отрицательном коронирующем электроде.

Важное значение на процесс осаждения пыли на электродах имеет электрическое сопротивление слоев пыли. По величине электрического сопротивления пыль делят на:

- пыли с малым удельным электрическим сопротивлением (менее 10^4 Ом·см), которые при соприкосновении с электродом мгновенно теряют свой заряд и приобретают заряд, соответствующий знаку электрода, после чего между электродом и частицей возникает сила отталкивания, стремящаяся вернуть частицу в газовый поток. Противодействует этой силе только сила адгезии и, если она оказывается недостаточной, то резко снижается эффективность процесса очистки;

- пыли с удельным электрическим сопротивлением от 10^4 до 10^{10} Ом·см хорошо осаждаются на электродах и легко удаляются с него при встряхивании;

- пыли с удельным электрическим сопротивлением более 10^{10} Ом·см труднее всего улавливаются в электрофильтрах, так как на электродах частицы разряжаются медленно, что в значительной степени препятствует осаждению новых частиц.

В реальных условиях снижение удельного электрического сопротивления пыли можно осуществить увлажнением запыленного газа.

Теоретическое определение эффективности очистки запыленного газа в электрофильтрах обычно производится по формуле Дейча:

$$\eta = 1 - e^{-w_3 F_{уд}}, \quad (7.1)$$

где $F_{уд}$ – удельная поверхность осадительных электродов, равная отношению поверхности осадительных элементов к расходу очищаемых газов в $\text{м}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^3$.

Эффективность очистки газа в электрофильтрах возрастает с ростом значения показателя степени ($w_3 F_{уд}$):

$w_3 F_{уд}$	3,0	3,7	3,9	4,6
η	0,95	0,975	0,98	0,99

Электрофильтры используют также для глубокой очистки газа от масляных туманов, смолы и пыли в различных отраслях промышленности.

При использовании электрофильтров для очистки воздуха от аэрозолей горючих веществ необходимо, чтобы максимальная температура аэрозольной среды была на 20–25 °С ниже температуры вспышки улавливаемой жидкости, а максимальная концентрация горючей компоненты – не менее чем на порядок меньше нижнего концентрационного предела воспламенения данной смеси.

В электрофильтрах очистка газов от пыли происходит под действием электрических сил. В процессе ионизации молекул газов электрическим разрядом происходит заряд содержащихся в них частиц (коронирующий электрод). Ионы адсорбируются на поверхности пылинок, а затем под действием электрического поля пылинки перемещаются к осадительным электродам.

Установки состоят из двух частей: агрегатов питания и собственно электрофильтра (рисунок 7.4).

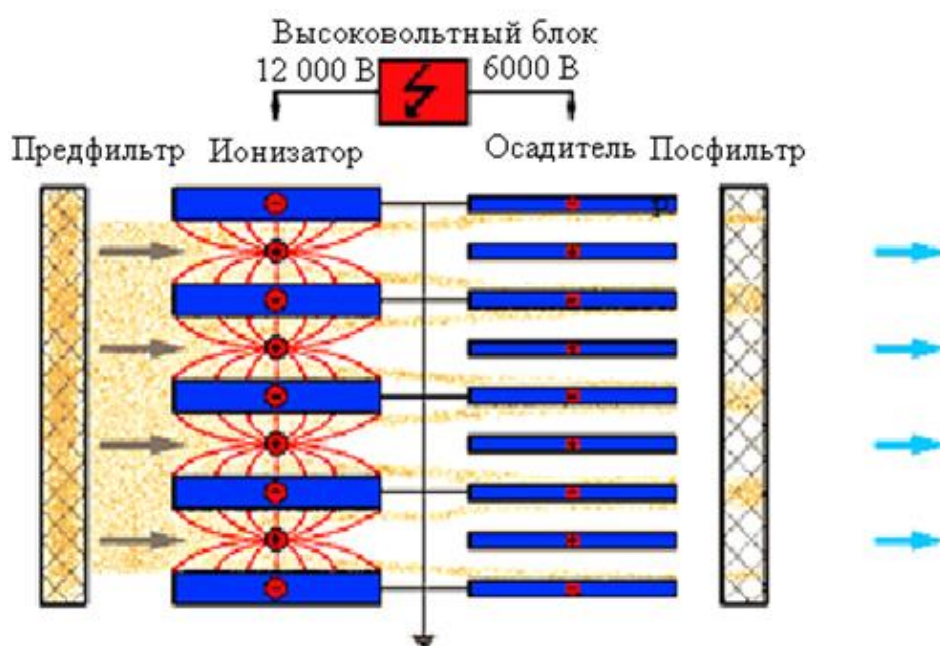


Рисунок 7.4 - Принципиальная схема электрофильтра

Осадительные электроды в виде труб или пластин подключаются к заземлению и положительному полюсу выпрямителя. Коронирующие электроды, выполняемые чаще всего в виде проволоки, изолированы от земли с помощью изоляторов, и к ним подводится по кабелю выпрямленный электрический ток высокого напряжения (до 50—80 кВ) отрицательной полярности.

По способу удаления осажденных на электродах частиц электрофильтры разделяются на сухие и мокрые. В зависимости от направления прохождения очищаемого газа через активную зону [23] электрофильтры могут быть вертикальными и горизонтальными. Наиболее распространенным типом

сухих электрофильтров является многопольный горизонтальный электрофильтр. Вертикальные электрофильтры являются однопольными, применяются редко.

Существует два типа осадительные электродов - пластинчатые и трубчатые [23]. Пластинчатые электроды используются как в горизонтальных, так и в вертикальных электрофильтрах, а трубчатые - только в вертикальных.

В таблицах 7.1, 7.2, 7.3 показаны технические характеристики применяемых электрофильтров [23]. Электрофильтры серии УГ унифицированные горизонтальные сухие для очистки газов с температурой до 250⁰ С (таблица 7.1) предназначены для очистки от пыли дымовых газов, аспирационного воздуха и других промышленных газов.

Электрофильтры серии УГТ (таблица 7.2), унифицированные горизонтальные высокотемпературные сухие, предназначенные для очистки от пыли газов с температурой до 425⁰ С, применяются в химической промышленности, в черной и цветной металлургии, в цементной промышленности.

Электрофильтры серии ОГП (таблица 7.2), горизонтальные сухие, предназначены, главным образом, для улавливания огарковой пыли из газов, отходящих от печей обжига флотационного колчедана в сернокислотном производстве при температуре до 425⁰ С, но также могут применяться и в других процессах при аналогичных условиях.

Электрофильтры УВВ и УВ, унифицированные вертикальные, предназначены для взрывоопасных сред (таблица 7.3).

Электрофильтры очищают газы от пыли с частицами размером 0,01—100 мкм при температуре менее 400—450⁰С. Сопротивление их достигает 150 Па. Затраты электроэнергии составляют 0,36—1,8 МДж на 1000 м³ газа. Эффективность работы электрофильтра зависит от свойств частиц и газа, скорости и равномерности распределения очищаемого потока в сечении фильтров и т.д. Чем выше напряженность поля и меньше скорость газа, тем лучше улавливаются частицы.

Электрофильтры предназначены для высокоэффективной очистки технологических газов и аспирационного воздуха от твердых или жидких частиц, выделяющихся при технологических процессах в различных отраслях промышленности.

Электрические фильтры применяют в энергетике, черной и цветной металлургии, промышленности строительных материалов, химической и нефтехимической промышленности и многих других отраслях.

Методика расчета электрофильтра.

1. Рассчитывают требуемую площадь активного сечения электрофильтра:

$$S = \frac{Q}{w_r}, \text{ м}^2, \quad (7.2)$$

где Q - объемный расход очищаемых газов, $\text{м}^3/\text{с}$;
 w_r - скорость газа, $\text{м}/\text{с}$.

2. Определяют напряженность электрического поля:

$$E = \frac{U}{H}, \text{ В/м}, \quad (7.3)$$

где U - рабочее напряжение электрофильтра, В;
 H - расстояние между электродами, м.

Для трубчатых электрофильтров $H=R$, где R - радиус трубы.

3. Определяют скорость осаждения (дрейфа) частиц:

$$\omega_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot d \cdot E^2}{(\varepsilon + 2)\mu}, \text{ м/с}, \quad (7.4)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ε - относительная диэлектрическая проницаемость вещества частиц;

μ - динамическая вязкость газа, Па·с.

4. Рассчитывают требуемую активную длину электрофильтра:

- для трубчатого электрофильтра:

$$L = \frac{R \cdot \omega_r}{2\omega_0} \ln \frac{1}{1-\eta}; \quad (7.5)$$

- для пластинчатого электрофильтра:

$$L = \frac{H \cdot \omega_r}{2\omega_0} \ln \frac{1}{1-\eta}, \quad (7.6)$$

где η - требуемая эффективность очистки электрофильтра.

5. Ожидаемая эффективность электрофильтра:

- для трубчатого электрофильтра:

$$\eta = 1 - \exp \left[-\frac{2\omega_0 \cdot L}{R \cdot \omega_r} \right]; \quad (7.7)$$

- для пластинчатого электрофильтра

$$\eta = 1 - \exp \left[-\frac{2\omega_0 \cdot L}{H \cdot \omega_r} \right]. \quad (7.8)$$

8 Методы и средства мокрой очистки газоздушных выбросов

Аппараты мокрой очистки газов используются для одновременного решения целого комплекса задач:

- пылеулавливание;
- абсорбция;
- охлаждение газов.

Конденсация паров жидкости, содержащихся в газах, при их охлаждении способствует росту эффективности мокрых пылеуловителей. В качестве орошающей жидкости в них чаще всего используется обычная вода или вода с примесями для абсорбции. Обычно для экономии жидкости применяют замкнутую систему орошения.

Мокрые пылеуловители имеют ряд достоинств и недостатков в сравнении с аппаратами других типов.

Достоинства:

- небольшая стоимость и более высокая эффективность улавливания взвешенных частиц;
- возможность использования для очистки газов от частиц размером до 0,1 мкм;
- возможность очистки газа при высокой температуре и повышенной влажности, а также при опасности возгорания и взрывов очищаемых газов и уловленной пыли;
- возможность наряду с пылями одновременно улавливать парообразные и газообразные компоненты.

Недостатки:

- выделение уловленной пыли в виде шлама, что связано с необходимостью обработки сточных вод, т.е. с удорожанием процесса;
- возможность уноса капель жидкости и осаждения их с пылью в газоходах и дымососах;
- в случае очистки агрессивных газов необходимость защищать аппарата турбу и коммуникации антикоррозийными материалами.

По способу действия мокрые аппараты разделяют на:

- полые газопромыватели;
- насадочные газопромыватели;
- барботажные и пенные аппараты;
- мокрые аппараты ударно-инерционного типа;
- мокрые аппараты центробежного действия;
- механические скрубберы (динамические газопромыватели);
- скоростные газопромыватели.

8.1 Полые газопромыватели

У этого типа аппаратов загрязненные газы пропускают через завесу распыленной жидкости. При этом частицы пыли захватываются каплями

жидкости и осаждаются, а очищенные газы удаляются из аппарата.

Самым простым полым газопромывателем является орошаемый газопровод, в котором ряд форсунок создают на пути газа водяную завесу (рисунки 8.1-8.2). Для снижения уноса воды (брызг) скорость в газопроводе не должна превышать 3 м/с. Расход воды принимают обычно 0,1-0,3 г/м³.

Таблица 7.1-Технические характеристики УГ

Показатели	УГ 1-2-10	УГ 1-2-15	УГ 2-3-26	УГ 2-3-37	УГ 2-3-53	УГ 2-3-74	УГ 3-3-88	УГ 3-3-115	УГ 3-3-117	УГ 3-3-230	УГ 3-3-265
Площадь активного сечения, м ²	10	15	26	37	53	74	88	115	117	230	265
Количество полей, шт	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Шаг между одноименными электродами, мм.	275	275	275	275	275	275	275	275	275	275	275
Активная высота электродов, м.	4,2	4,2	7,46	7,46	7,46	7,46	12,16	12,16	12,16	12,16	12,16
Активная длина поля, м.	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	3,95	3,95	3,95	3,95	3,95
Общая площадь осаждения осадительных электродов, м .	420	630	1690	2360	3370	4700	9200	1210	1840	2420	2760
Габариты электрофильтра, м:											
длина	9,6	9,6	14,1	14,1	14,1	14,1	18,8	18,8	18,8	18,8	18,8
высота	12,3	12,3	15,4	15,4	15,4	15,4	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8
ширина (по осям крайних опор)	3,0	4,5	4,5	6,0	9,0	12,0	9,0	12,0	18,0	24,0	27,0

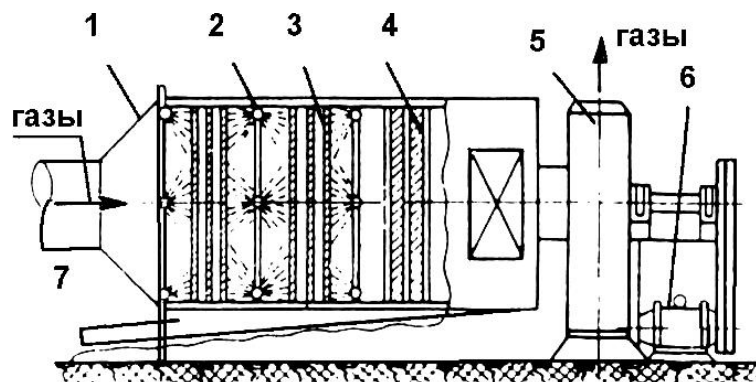
Таблица 7.2 - Технические характеристики ОГВ

Показатели	ОГВ 4-8	ОГВ 4-16	УГТ 1-3-30	УГТ 1-3-40	УГТ 1-3-60	УГТ 1-3-80	УГТ 2-3-50	УГТ 2-3-80
Площадь активного сечения, м ²	8	16	30	40	60	80	50	80
Количество полей, шт	4	4	3	3	3	3	3	3
Шаг между одноименными электродами, мм.	260	260	260	260	260	260	260	260
Активная высота электродов, м.	4,5	4,5	7,5	7,5	7,5	7,5	10,0	10,0
Активная длина поля, м.	1,5	1,5	2,58	2,58	2,58	2,58	2,58	2,58
Общая площадь осаждения осадительных электродов, м .	380	760	1860	2560	3720	5120	3400	4950
Габариты электрофильтра, м:								
длина	14,4	14,4	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0
высота	10,8	12,6	17,0	18,7	17,0	18,7	19,0	19,0
ширина (по осям крайних опор)	2,0	4,0	4,5	6,0	9,0	12,0	6,0	9,0

Таблица 7.3 - Технические характеристики УВВ и УВ

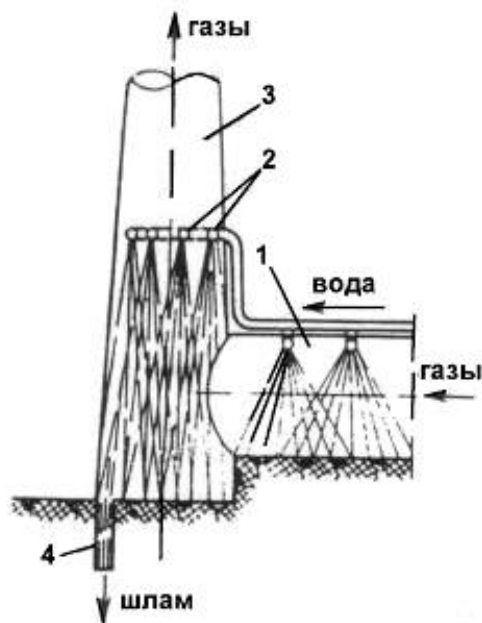
Показатели	УВ 2x10	УВ 2x16	УВ 2x24	УВ 3x24	УВВ-8	УВВ-12	УВВ-16	УВВ-2x12
Площадь активного сечения, м ²	21	32	48	72	8	12	16	24
Количество полей, шт	2	2	2	3	1	1	1	2
Шаг между одноименными электродами, мм.	1	1	1	1	1	1	1	1
Активная высота электродов, м.	275	275	275	275	275	275	275	275
Активная длина поля, м.	7,4	7,4	7,4	7,4	6,2	6,2	6,2	6,2
Общая площадь осаждения осадительных электродов, м .	1170	1760	2600	3900	285	430	570	870
Габариты электрофильтра, м:								
длина	4,5	4,5	6,0	6,0	3,15	3,15	3,15	3,15
высота	6,0	6,0	9,0	13,0	3,0	4,5	6,0	9,0
ширина (по осям крайних опор)	19,9	19,9	21,4	21,4	20,0	20,0	20,0	20,0

При несколько больших скоростях газа применяют *промывные камеры* (металлические, бетонные или из кирпича). Внутри камеры в несколько рядов размещаются распылительные форсунки для создания водяных завес на пути газа. Для повышения эффективности промывки газа в камере устанавливаются отбойные пластины, перфорированные листы, сетки. Камеры применяют для очистки от пыли и увлажнения воздуха в вентустановках и установках кондиционирования воздуха.



1 – камера; 2 – форсунки; 3 – перфорированные перегородки; 4 – брызгоуловитель; 5 – вентилятор; 6 – электродвигатель; 7 – шламовая труба.

Рисунок 8.1 - Промывная камера

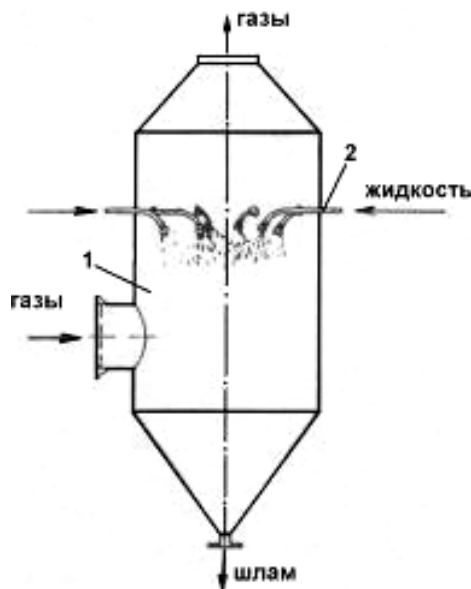


1 – газоход; 2 – форсунки; 3 – дымовая труба; 4 – шламовая труба.

Рисунок 8.2 - Оросительное устройство

Полые форсуночные скрубберы (рисунок 8.3) представляют собой колонну круглого или прямоугольного сечения с форсунками. Они обычно работают в противопоточном режиме. Скорость потока газа обычно 0,6–1,2

м/с. Иногда форсунки устанавливают в несколько рядов. Высокая степень очистки в полых скрубберах достигается при улавливании частиц с $d_p > 10$ мкм.



1- корпус; 2 – форсунки.

Рисунок 8.3 - Полый скруббер

8.2 Насадочные газопромыватели

Насадочные скрубберы – это колонны, заполненные различной формы насадками (в виде колец Рашига и других форм), которые насыпают на опорную решетку. На практике применяют два типа аппаратов: газопромыватели в виде противопоточных колонн и насадочные скрубберы с поперечным орошением (рисунок 8.4). Их целесообразно применять, когда пыль (аэрозоли) является хорошо смачиваемой, растворимой в воде или процесс улавливания пыли сопровождается охлаждением или абсорбцией. Расход жидкости, например, в скруббере с поперечным орошением составляет $0,15-0,5$ л/м³, а эффективность улавливания частиц размером более 2 мкм превышает 90 %.

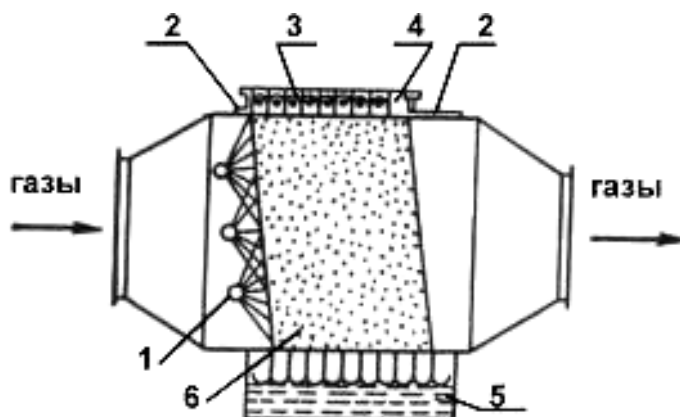
8.3 Барботажные и пенные аппараты

В *барботажных аппаратах (барботерах)* газ проходит через слой жидкости в виде пузырьков, на поверхности которых происходит осаждение частиц. При этом скорость подъема пузырьков газа должна быть не намного большей, чем скорость свободного всплытия ($\sim 0,35$ м/с). Эффективность высока при очистке от частиц $d_p > 5$ мкм. Их недостаток – невысокая производительность.

Пенный способ очистки реализуется с помощью *пенных аппаратов* со

свободным сливом воды (переливная тарелка) или с подпором (провальная тарелка). Эти типы аппаратов показаны на рисунке 8.5

Размер отверстий в тарелках этих аппаратов составляет 3–8 мм. В настоящее время аппараты с провальными тарелками вытеснили переливные аппараты.



1 – форсунки; 2 – опорные решетки; 3 – оросительное устройство; 4 – неорошаемый слой насадки (брызгоуловитель); 5 – шламосборник; 6 – насадка.

Рисунок 8.4 - Насадочные скрубберы с поперечным орошением

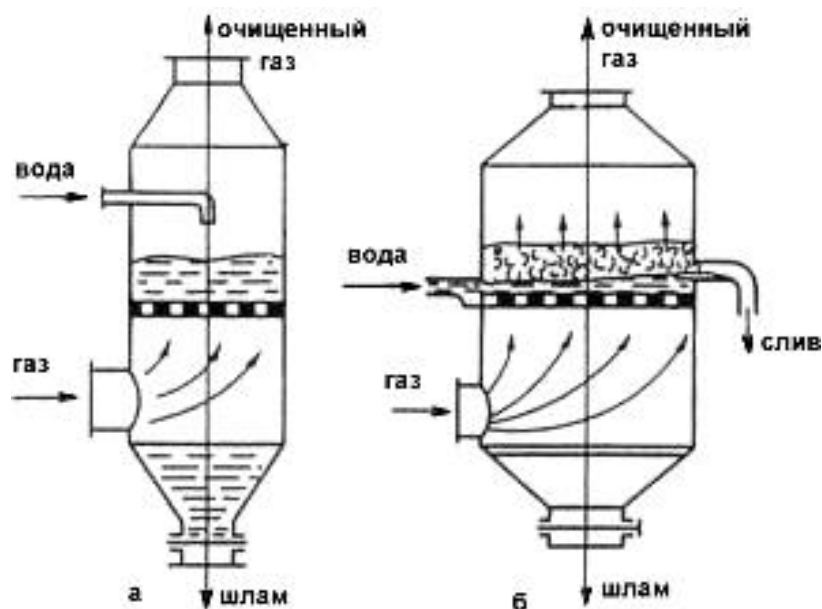


Рисунок 8.5 - Барботажно-пенный пылеуловитель с провальной (а) и переливной (б) решетками

Аппараты с провальными тарелками, в зависимости от скорости газа, могут работать в трех режимах: барботажном, в котором газовые пузырьки с невысокой скоростью барботируют через слой жидкости на тарелке; пенном, при котором за счет роста скорости газов жидкость на тарелке переходит в состояние турбулизованной пены; волновом, характеризующимся

образованием газовых струй, колебанием слоя жидкости на тарелке, значительном ростом гидравлического сопротивления и интенсивным брызгоуносом.

Наибольший интерес для процесса пылеулавливания представляет пенный режим, обеспечивающий наилучшие условия для подвода частиц пыли к постоянно обновляющимся, сильно турбулизированным поверхностям (пленкам) жидкости.

Работа в волновом режиме возможна при больших плотностях орошения (исключается возможность оголения отдельных частей тарелки и прорыва газовых струй) и при наличии эффективного каплеуловителя, встроенного непосредственно в аппарат или установленного на выходе газов из аппарата. Подобное решение особенно целесообразно, когда в тарельчатом аппарате осуществляется подготовка газов (предварительная очистка и охлаждение) и вслед за ним устанавливается мокрый аппарат тонкой очистки газов (например, скруббер Вентури, мокрый электрофильтр или самоочищающийся волокнистый фильтр).

Выделяют следующие стадии процесса улавливания пыли в пенных аппаратах:

- инерционное осаждение частиц пыли в подрешеточном пространстве;
- первую стадию улавливания частиц пыли в пенном слое (механизм удара);
- вторую стадию улавливания частиц пыли в пенном слое (инерционно турбулентное осаждение частиц на поверхности пены).

Эффективность улавливания пыли в подрешеточном пространстве значительна (более 50 %) при улавливании пыли размером частиц более 10 мкм. Преобладающим в работе пенных аппаратов для пылеулавливания является «механизм удара». Эффективность этого механизма намного больше эффективности других механизмов.

8.4 Газопромыватели ударно-инерционного действия

В этих аппаратах контакт газов с жидкостью осуществляется за счет удара газового потока о поверхность жидкости с последующим пропусканием газо-жидкостной смеси через отверстия различной конфигурации или непосредственным отводом газожидкостной смеси в сепаратор жидкой фазы. В результате такого взаимодействия образуются капли диаметром 300–400 мкм.

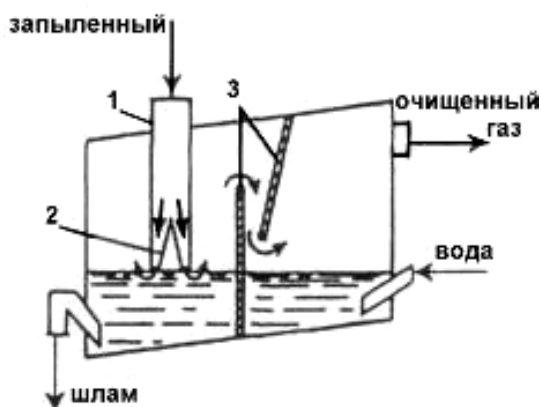
Наиболее простым по конструкции является аппарат, показанный на рисунок 8.6. Газ с большой скоростью входит в колону. При повороте на 180° происходит инерционное осаждение частиц пыли на каплях жидкости. В основе процесса осаждения лежит «механизм удара». Имеются и другие конструкции аппаратов этого типа (например, скруббер Дойля).

Схема скруббера Дойля приведена на рисунке 8.7. В нижней части трубы установлены конусы для увеличения скорости выхода газа. В щели она равна 35– 55 м/с. Газ ударяется о поверхность жидкости, создавая завесу из капель. Гидравлическое сопротивление газопромывателя от 500 до 4000 Па, удельный расход жидкости составляет 0,13 л/м³.



1 – входной патрубок; 2 – резервуар с жидкостью; 3 – сопло.

Рисунок 8.6 - Пылеуловитель ударно-инерционного действия



1 – труба; 2 – конус; 3 – перегородки.

Рисунок 8.7 - Скруббер Дойля

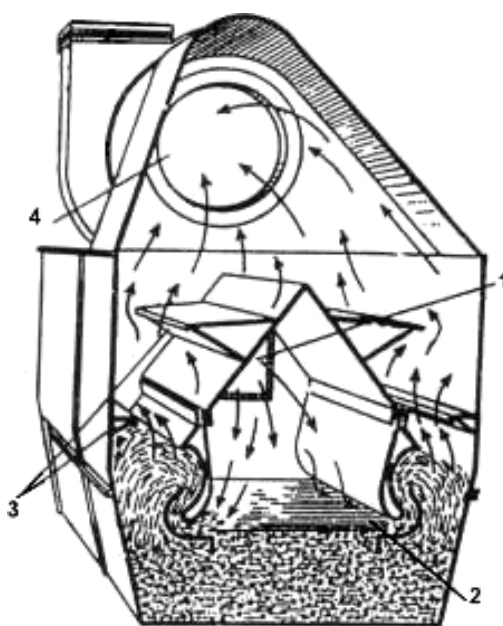
8.5 Ротоклон

Типичная конструкция *ротоклона* показана на рисунке 8.8. В аппарате установлены один или несколько изогнутых щелевых каналов (импеллеров), нижняя часть которых затоплена жидкостью. Ударяясь о поверхность жидкости, газовый поток захватывает часть жидкости и заставляет ее двигаться вдоль нижней направляющей канала. Затем жидкость отбрасывается к верхней направляющей и при выходе из щели падает в виде сплошной водяной завесы. Для предотвращения уноса капель газы после канала проходят через систему

каплеотбойных устройств.

Скорость газов в канале обычно не превышает 15 м/с. Важное значение для нормальной эксплуатации ротоклона играет поддержание постоянного уровня жидкости в аппарате. Даже незначительное изменение уровня жидкости может привести к резкому снижению эффективности или значительному увеличению гидравлического сопротивления. Удаление шлама из отстойника осуществляется периодически (вручную) или непрерывно с помощью скребкового конвейера. Расход воды в ротоклонах значительно ниже, чем в других мокрых пылеуловителях. Вода в количестве, не превышающем $0,03 \text{ л/м}^3$, подается в основном для компенсации ее потерь за счет испарения и уноса со шламом.

Производительность промышленных ротоклонов, применяемых на зарубежных заводах, колеблется от 2500 до 90000 $\text{м}^3/\text{ч}$.



1 – устройство для подвода газов; 2 – направляющие лопатки; 3 – каплеотбойник; 4 – устройство для вывода газов.

Рисунок 8.8 - Ротоклон

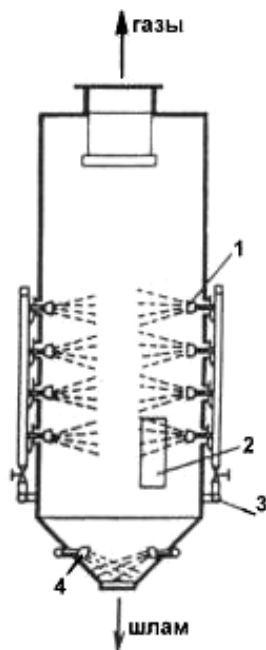
8.6 Газопромыватели центробежного действия

Наиболее распространены *центробежные скрубберы*, которые по конструктивному признаку можно разделить на два вида:

- аппараты, в которых закрутка газового потока осуществляется при помощи центрального лопастного закручивающего устройства;

- аппараты с боковым тангенциальным или улиточным подводом газа. Последние орошают через форсунки, установленные в центральной части аппарата, кроме того, жидкость, стекающая по внутренней поверхности стенки

аппарата, образует пленку.



1 – форсунка; 2 – устройство для ввода газов; 3 – водяной коллектор; 4 – форсунка для орошения стенок бункера.

Рисунок 8.9 - Центробежный скруббер с боковым расположением форсунок

Большинство отечественных центробежных скрубберов имеют тангенциальный подвод газов и пленочное орошение. Схема аппарата с боковым расположением форсунок представлена на рисунке 8.9. Такие аппараты используют для очистки любых видов нецементирующейся пыли. При содержании пыли, превышающем 2 г/м^3 , до очистки в циклоне с водяной пленкой рекомендуется предварительная очистка газов в аппарате другого типа. Для улавливания смачиваемой пыли (за исключением волокнистой и цементирующейся) при начальной концентрации до 5 г/м^3 используют скоростные промыватели.

8.7 Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури)

В скруббере Вентури движущийся поток газов перед трубой Вентури вводится через разбрызгивающий насадок вода. Труба Вентури состоит из конфузора, в котором происходит разгон пылегазового потока до скорости 50-70 м/с, горловины, в которой происходит дробление капель при взаимодействии с быстро движущимся потоком, и диффузора, в котором происходят столкновение частиц золы с каплями воды и снижение скорости пылегазового потока. Далее поток тангенциально вводится в скруббер, стенки которого орошаются водой, и коагулированные частицы эффективно удаляются в золовой бункер. Эффективность мокрых золоуловителей с трубой Вентури определяется произведением следующих величин – степени

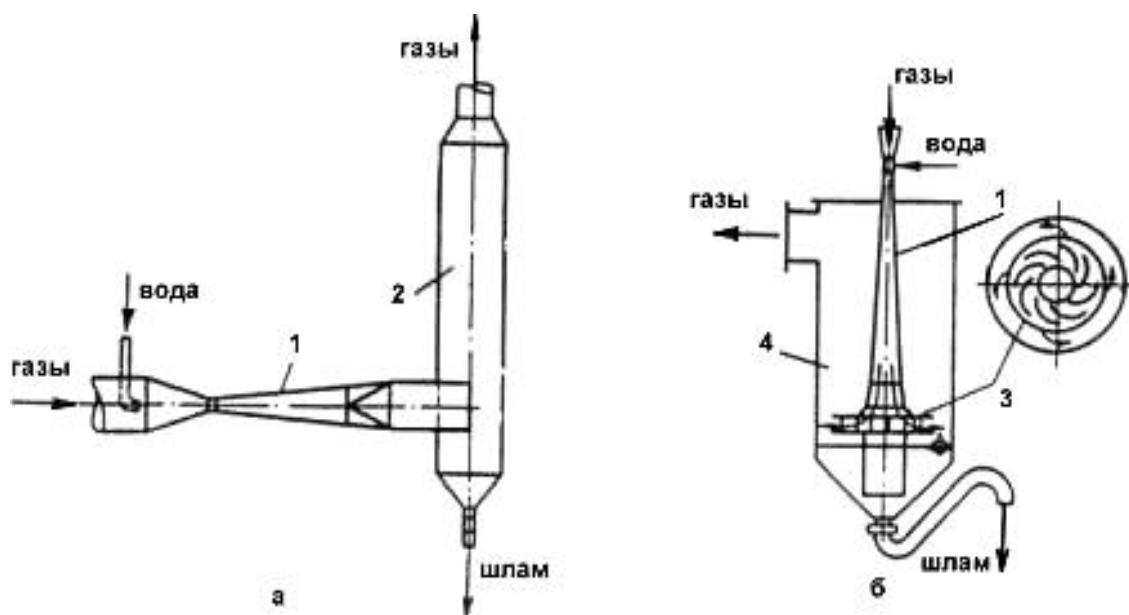
турбулентных пульсаций, расхода орошаемой жидкости, скорости газов в горловине трубы Вентури и расстояния между горловиной трубы Вентури и скруббером.

Основные элементы скруббера могут монтироваться как отдельно (рисунок 8.10, а), так и в одном корпусе (рисунок 8.10, б).

По конфигурации поперечного сечения трубы Вентури рассматриваемые скрубберы подразделяются на круглые и щелевые. Для малых расходов газов применяются, главным образом, круглые, для больших – щелевые, так как при диаметре горловины больше 0,25–0,35 м, первые не позволяют обеспечить равномерное распределение плотности орошения в ее поперечном сечении.

При больших расходах газов на очистку применяют групповые компоненты нескольких труб Вентури с небольшим круглым сечением или так называемые *батареиные скрубберы Вентури* (рисунок 8.11), иногда скрубберы Вентури с предварительным дроблением орошающей жидкости и *эжекторные скрубберы Вентури* (рисунок 8.12) со скоростью истечения жидкости в форсунке 15–30 м/с.

Не рекомендуется применять мокрые золоуловители для топлив, содержащих в составе золы более 15-20 % СаО. Жесткость орошаемой воды не должна превышать 15 мг·эquiv/л.



а – с выносным каплеуловителем; б – с встроенным каплеуловителем; 1 – труба Вентури; 2 – циклон каплеуловитель; 3 – розеточное устройство; 4 – каплеосадительная камера.

Рисунок 8.10 - Скрубберы Вентури

Пример выполнения расчета скруббера Вентури.

Расход очищаемого воздуха $L = 11000$, м³/ч; начальная концентрация пыли 30, г/м³; конечная концентрация пыли 0,5, г/м³; давление воды $P_{ж} = 350$ кПа.

1. Находим требуемый коэффициент очистки:

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} = \frac{30 - 0,5}{30} = 0,98.$$

2. Определяем затраты энергии на очистку, принимая согласно заданному виду производства (таблица 3.8) $B = 6,5 \cdot 10^{-4}$; $A = 1,0529$:

$$K_T = 1,0529 \sqrt{\frac{\ln(1 - 0,98)}{6,5 \cdot 10^{-4}}} = 8499 \text{ кДж на } 1000 \text{ м}^3 \text{ газа.}$$

3. Находим гидравлическое сопротивление аппарата, которое состоит из потерь давления в трубе Вентури и циклоне-каплеуловителе. Удельный расход воды $m = 0,006$ м³/м³;

$$P_{II} = 8499 - 350000 \cdot 0,006 = 6399 \text{ Па.}$$

4. Рассчитываем параметры циклона - каплеуловителя, предварительно определив секундный расход воздуха ($L_c = 11000/3600 = 3,06$ м³/с); оптимальную скорость воздуха в циклоне принимаем равной $v_{ц} = 5,5$ м/с.

$$\text{Диаметр циклона } D_{ц} = 1,13 \sqrt{\frac{L_c}{v_{ц}}} = 1,13 \sqrt{\frac{3,06}{5,5}} = 0,76 = 0,8 \text{ м.}$$

Высота циклона равна $H = 2,5 \cdot 0,8 = 2,0$ м.

Гидравлическое сопротивление $P_{ц}$ циклона, Па:

$$\Delta P_{ц} = 30 \cdot 1,25 \cdot 5,5^2 / 2 = 545 \text{ Па.}$$

5. Находим гидравлическое сопротивление трубы Вентури:

$$\Delta P_{тр} = 6399 - 545 = 5854 \text{ Па.}$$

6. Рассчитываем скорость воздуха в трубе Вентури:

$$v_T = 3,33 \sqrt{5854 / (1 + 0,5250,006^{0,7} \cdot 10^3)} = 64,5 \text{ м/с.}$$

7. Определяем геометрические размеры трубы Вентури:

а) диаметр горловины: $d_{\Gamma} = 1,88 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{L}{v_{\Gamma}}} = 1,88 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{11000}{64,5}} = 0,25 \text{ м};$

б) длина горловины: $l_{\Gamma} = 0,15d_{\Gamma} = 0,15 \cdot 0,25 = 0,04 \text{ м};$

в) диаметр входного отверстия конфузора d_K , м, равен:

$$d_K = 1,88 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{L}{v_{BK}}} = 1,88 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{11000}{15}} = 0,53 \text{ м};$$

г) длина конфузора: $l_K = \frac{d_K - d_{\Gamma}}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)} = \frac{0,53 - 0,25}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{30}{2}\right)} = 0,52 \text{ м};$

д) диаметр входного отверстия: $d_K = 1,88 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{11000}{16}} = 0,51 \text{ м};$

е) длина диффузора l_D , м, устанавливается по формуле:

$$l_D = \frac{d_K - d_{\Gamma}}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)} = \frac{0,51 - 0,25}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{6}{2}\right)} = 2,48 \text{ м};$$

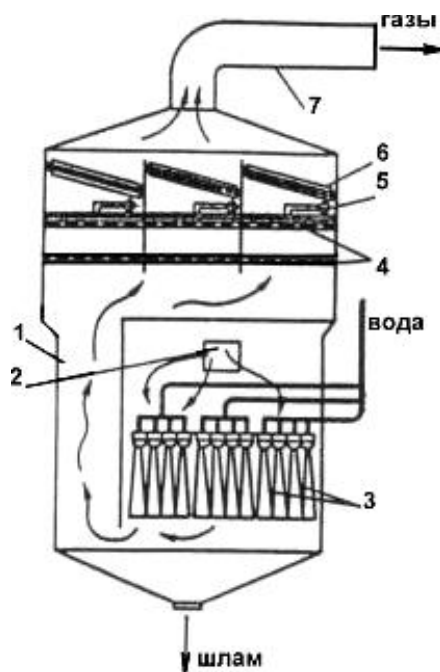
ж) диаметр сопла подачи воды d_C , м равен:

$$d_C = 1,06 \sqrt{\frac{G_B}{\sqrt{P_{\text{эс}}}}} = 1,06 \sqrt{\frac{11000 \cdot 0,006 / 3600}{350000}} = 0,006 \text{ м}.$$

Далее по рассчитанным параметрам определяются параметры скруббера.

8.8 Туманоуловители

Для очистки воздуха от туманов кислот, щелочей, масел и других жидкостей используют волокнистые фильтры, принцип действия которых основан на осаждении капель на поверхности волокон и пор с последующим стеканием жидкости под действием сил тяжести. Осаждение капель жидкости на поверхности волокон и пор происходит под действием всех ранее рассмотренных механизмов отделения частиц загрязнителя от газовой фазы на фильтроэлементах.

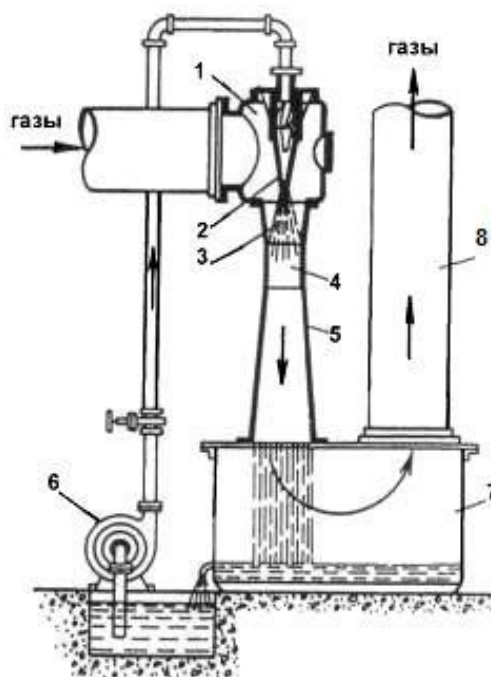


1 – корпус; 2 – ввод газов; 3 – трубы Вентури; 4 – провальные тарелки; 5 – оросительное устройство; 6 – каплеотбойник; 7 – отвод газов.

Рисунок 8.11 - Батарейный скруббер Вентури

Туманоуловители делят на *низкоскоростные* ($v_t \leq 0,15$ м/с), в которых преобладает механизм диффузионного осаждения капель, и *высокоскоростные* ($v_t = 2-2,5$ м/с), где осаждение происходит, главным образом, под воздействием инерционных сил.

Фильтрующий элемент низкоскоростного туманоуловителя показан на рисунок 8.13. В пространство между двумя цилиндрами 3, изготовленными из сеток, помещается волокнистый фильтроэлемент 4, который крепится через фланец 2 к корпусу туманоуловителя 1. Жидкость, осевшая на фильтроэлементе, стекает на нижний фланец 5 и затем через трубку гидрозатвора 6 и стакана 7 сливается из фильтра. Волокнистые низкоскоростные туманоуловители обеспечивают очень высокую эффективность очистки (до 0,999) газа от частиц размером менее 3 мкм и полностью улавливают частицы большего размера. Волокнистые слои формируются набивкой стекловолна диаметром от 7 до 30 мкм или полимерных волокон (лавсана, ПВХ, полипропилен) диаметром от 12 до 40 мкм. Толщина слоя составляет 5–15 см. Гидравлическое сопротивление сухих фильтроэлементов равно 200–1000 Па, а в режиме очистки без образования твердого осадка – 1200–2500 Па.



1 – приемная камера; 2 – форсунка; 3 – конфузор; 4 – камера смешения; 5 – диффузор; 6 – насос; 7 – резервуар-отстойник; 8 – выхлопной патрбок.

Рисунок 8.12 - Принципиальная схема эжекторного скруббера

Высокоскоростные туманоуловители имеют меньшие габаритные размеры и обеспечивают эффективность очистки газа от тумана с частицами менее 3 мкм, равную 0,90–0,98 при $\Delta p=1500\text{--}2000$ Па. В качестве фильтрующей набивки в таких туманоуловителях используются войлоки из полипропиленовых волокон, которые успешно работают в среде разбавленных и концентрированных кислот (H_2SO_4 , HCl , HF , H_3PO_4 , HNO_3) и сильных щелочей.

В тех случаях, когда диаметр капель тумана составляет 0,6–0,7 мкм и менее, для достижения приемлемой эффективности очистки приходится увеличивать скорость фильтрации до 4,5–5 м/с. Рост скорости фильтрации приводит к заметному брызгоуносу с выходной стороны фильтроэлемента (брызгоунос обычно возникает уже при скоростях 1,7–2,5 м/с). Значительно уменьшить брызгоунос можно применением брызгоуловителей в конструкции туманоуловителя.

Для улавливания жидких частиц размером более 5 мкм применяют брызгоуловители из пакетов сеток. Захват частиц жидкости в таких брызгоуловителях (рисунок 8.14) происходит за счет эффекта касания и инерционных сил. Скорость фильтрации в брызгоуловителях не должна превышать 6 м/с.

9 Очистка газов от парообразных и газообразных примесей

Промышленные способы очистки газовых выбросов от газо- и парообразных токсичных примесей можно разделить на три основные группы:

- абсорбция жидкостями;
- адсорбция твердыми поглотителями;
- каталитическая очистка.

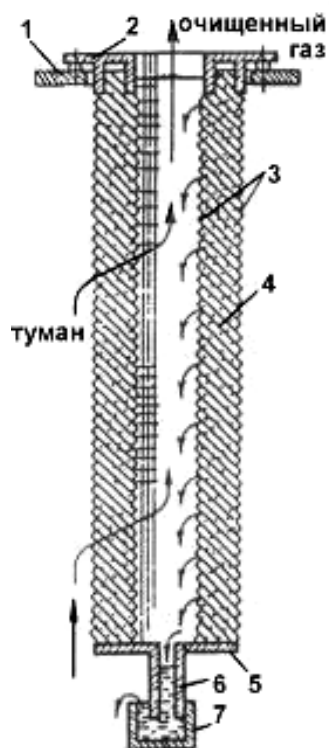


Рисунок 8.13 - Фильтрующий элемент низкоскоростного туманоуловителя

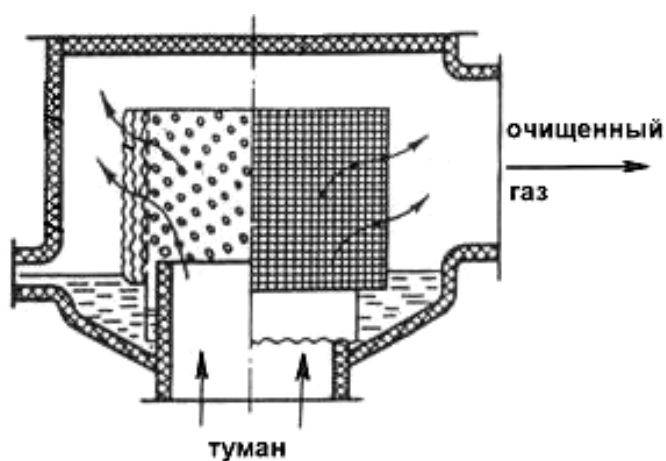


Рисунок 8.14 - Высокоскоростной фильтр

В меньших масштабах применяются термические методы очистки

(сжигания или дожигания) горючих загрязнений, способ химического взаимодействия примесей с сухими поглотителями и окисление примесей озоном.

9.1 Абсорбционные методы

Абсорбция жидкостями применяется в промышленности для извлечения из газов диоксида серы, сероводорода, сероуглерода, меркаптанов и других сернистых соединений, оксидов азота, галогенов и их соединений, паров кислот (HCl , HF , H_2SO_4), диоксида и оксида углерода, разнообразных органических соединений (фенол, формальдегид, летучие растворители и прочее).

Абсорбционные методы основаны на избирательной растворимости газо- и парообразных примесей в жидкости (физическая абсорбция) или на избирательном извлечении примесей химическими реакциями с активным компонентом поглотителя (хемосорбция). Абсорбционная очистка – непрерывный и, как правило, циклический процесс, так как поглощение примесей обычно сопровождается регенерацией поглотительного раствора и его возвращением в начало цикла очистки. При физической абсорбции (и в некоторых хемосорбционных процессах) регенерацию абсорбента проводят нагреванием и снижением давления, в результате чего происходит десорбция поглощенной газовой примеси и ее концентрирование. Схема установки для абсорбционно-десорбционного метода разделения газов показана на рисунке 19.

Показатели абсорбционной очистки: степень очистки и коэффициент массопередачи зависят от растворимости газа в абсорбенте, технологического режима в реакторе (скорости, температуры, давления) и от других факторов, например от равновесия и скорости химических реакций при хемосорбции. В хемосорбционных процессах, где в жидкой фазе происходят химические реакции, коэффициент массопередачи увеличивается по сравнению с физической абсорбцией. Большинство хемосорбционных процессов газоочистки обратимы, то есть при повышении температуры поглотительного раствора химические соединения, образовавшиеся при хемосорбции, разлагаются с регенерацией активных компонентов поглотительного раствора и с десорбцией поглощенной из газа примеси. Этот прием положен в основу регенерации хемосорбентов в циклических системах газоочистки. Хемосорбция, в особенности, применима для тонкой очистки газов при сравнительно небольшой начальной концентрации примесей.

Абсорбенты, применяемые в промышленности, оцениваются по следующим показателям:

- абсорбционная емкость, то есть растворимость извлекаемого компонента в поглотителе в зависимости от температуры и давления;

- селективность, характеризуемая соотношением растворимостей разделяемых газов и скоростей их абсорбции;
- минимальное давление паров во избежание загрязнения очищаемого газа парами абсорбента;
- дешевизна;
- отсутствие коррозирующего действия на аппаратуру.

В качестве абсорбентов применяют воду, растворы аммиака, едких и карбонатных щелочей, солей марганца, этаноламины, масла, суспензии гидроксида кальция, оксидов и др. (таблица 8.1).

Таблица 8.1 - Абсорбенты, применяемые для очистки отходящих газов

Поглощаемые компоненты	Абсорбенты
N_2O_3, NO_5	Вода, водные растворы и суспензии: $NaOH, Na_2CO_3, NaHCO_3, KOH, K_2CO_3, KHCO_3, Ca(OH)_2, CaCO_3, Mg(OH)_2, MgCO_3, Ba(OH)_2, NH_4HCO_3$
NO	Растворы $FeCl_2, FeSO_4, Na_2S_2O_3, NaHCO_3, Na_2SO_3, NaHSO_3$
SO_2	Вода, водные растворы: $Na_2SO_3, NH_4OH, Ca(OH)_2, NaOH, KOH, (NH_4)_2SO_3, ZnSO_3, K_2CO_3$, суспензии $CaO, MgO, CaCO_3, ZnO$, золы, ксилитин – вода (1:1)
H_2S	Водные растворы: $Na_2SO_3, Na_3AsO_4, As_2O_3, NH_3, (NH_4)_3 As_2O_3$; моноэтаноламан
CO	Жидкий азот, медно-аммиачные растворы
CO_2	Водные растворы: $Na_2CO_3, K_2CO_3, NaOH, KOH, Ca(OH)_2, NH_4OH$, этаноламины RNH_2, R_2NH_4
Cl_2	Растворы: $NaOH, KOH, Ca(OH)_2, Na_2CO_3, K_2CO_3, MgCO_3, CaCO_3, Na_2S_2O_3$, тетрахлоридметан CCl_4
HF, SiF_4	$Na_2CO_3, NaOH, Ca(OH)_2$

Очистная аппаратура аналогична уже рассмотренной аппаратуре мокрого улавливания аэрозолей. Наиболее распространен насадочный скруббер, применяемый для очистки газов от диоксида серы, сероводорода, хлороводорода, хлора, оксида и диоксида углерода, фенолов и прочее. В насадочных скрубберах скорость массообменных процессов мала из-за малоинтенсивного гидродинамического режима этих реакторов, работающих при скорости газа от 0,02 до 0,7 м/с. Объемы аппаратов поэтому велики и установки громоздки.

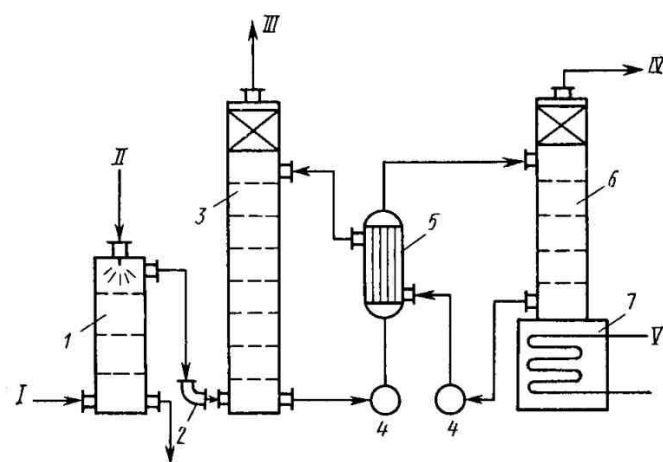
Для очистки выбросов от газообразных и парообразных примесей применяют и интенсивную массообменную аппаратуру — пенные аппараты, безнасадочный форсуночный абсорбер, скруббер Вентури, работающие при более высоких скоростях газа. Пенные абсорберы работают при скоростях от

1 до 4 м/с и обеспечивают сравнительно высокую скорость абсорбционно-десорбционных процессов; их габариты в несколько раз меньше, чем насадочных скрубберов. При достаточном числе ступеней очистки (многополочный пенный аппарат) достигаются высокие показатели глубины очистки. Особенно перспективны для очистки газов от аэрозолей и вредных газообразных примесей пенные аппараты со стабилизатором пенного слоя. Они сравнительно просты по конструкции и работают в режиме высокой турбулентности при линейной скорости газа до 4-5 м/с.

Примером безотходной абсорбционно-десорбционной циклической схемы может служить поглощение диоксида углерода из отходящих газов растворами моноэтаноламина с последующей регенерацией поглотителя при десорбции CO_2 . На рисунке 9.1 приведена схема абсорбции CO_2 в пенных абсорберах; десорбция CO_2 проводится также при пенном режиме. Установка безотходна, так как чистый диоксид углерода после сжижения передается потребителю в виде товарного продукта.

Абсорбционные методы характеризуются непрерывностью и универсальностью процесса, экономичностью и возможностью извлечения больших количеств примесей из газов. Недостаток этого метода в том, что насадочные скрубберы, барботажные и даже пенные аппараты обеспечивают достаточно высокую степень извлечения вредных примесей (до ПДК) и полную регенерацию поглотителей только при большом числе ступеней очистки. Поэтому технологические схемы мокрой очистки, как правило, сложны, многоступенчаты и очистные реакторы (особенно скрубберы) имеют большие объемы.

Организация контакта газового потока с жидким растворителем осуществляется либо пропусканием газа через насадочную колонну, либо распылением жидкости, либо барботажом газа через слой абсорбирующей жидкости.



1 — холодильник; 2 — воздуходувка; 3 — пенный абсорбер; 4 — насос; 5 — теплообменник; 6 — пенный десорбер; 7 — кипятильник десорбера; I — газ на очистку; II — вода; III — очищенный газ; IV — диоксид углерода потребителю; V — пар.

Рисунок 9.1 - Схема абсорбционной очистки газов от CO_2 с получением

товарного диоксида углерода:

В зависимости от реализуемого способа контакта газ - жидкость различают полые, насадочные, форсуночные, распыливающие, барботажные, тарельчатые и другие абсорберы.

В распыливающих абсорберах межфазная поверхность образуется мелкими каплями путем дробления, распыления жидкости. В объеме аппарата с помощью форсунок создаются капли, контактирующие с газовым потоком.

В полых и распыливающих абсорберах сплошной фазой является газ, а распределенной - жидкость. В барботажных абсорберах в сплошном потоке жидкости распределяется газ, что достигается на так называемых тарелках.

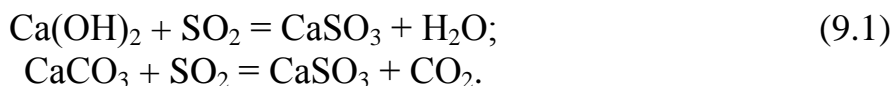
Большое распространение получили абсорберы с колпачковыми тарелками [14], [18]. При прохождении между зубцами колпачков газ разбивается на множество струек и пузырьков, в результате чего образуется большая поверхность соприкосновения взаимодействующих веществ.

Расчет процессов абсорбции основывается на материальном балансе [14], [18], из которого определяют расходные параметры по абсорбенту и размеры аппаратов.

Широкое распространение получили три основных способа: известковый, магнезитовый и амиачно-циклический.

Известковый способ.

Известковый способ очистки основан на нейтрализации сернистой кислоты, получающейся в результате растворения SO_2 , содержащегося в дымовых газах, щелочными реагентами: гидроксидом кальция (известью) или карбонатом кальция (известняком). При этом протекают следующие реакции:



В результате этих реакций получается сульфит кальция, частично окисляющийся в сульфат, возможна его переработка на строительные материалы, а также использование в сульфитцеллюлозном бумажном производстве.

На практике применяются известняки, мел, доломиты, мергели (осадочные породы глинисто-карбонатного состава). Известь получают обжигом карбонатных пород при температуре 1100 – 1300 °С.

Достоинством метода является простая технологическая схема, низкие эксплуатационные затраты, доступность и дешевизна сорбента, возможность очистки газа без предварительного охлаждения и обеспыливания. Известковый способ обеспечивает улавливание SO_2 не менее чем на 85%.

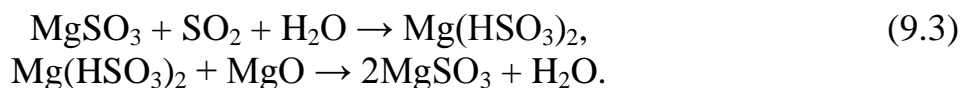
Магнезитовый способ.

При очистке по магнезитовому способу газы поступают в абсорбер типа трубы Вентури, где орошаются суспензией, содержащей оксид магния. При

этом происходит химическая реакция:



Полученный сульфит магния снова взаимодействует с диоксидом серы и водой, образуя бисульфит магния, который затем нейтрализуется добавлением магнезита:



Образовавшийся сульфит магния в процессе обжига при температуре 800 – 900 °С подвергается термическому разложению с образованием исходных продуктов по реакции:



Оксид магния возвращают в процесс, а концентрированный SO_2 может быть переработан в серную кислоту или элементарную серу.

Степень очистки газов от SO_2 составляет 90 – 92%, причём предварительное охлаждение газов не требуется, в этом заключается основное достоинство магнезитового метода. К недостаткам относится наличие многочисленных операций с твёрдыми веществами, которые приводят к абразивному износу аппаратуры, и большой расход тепловой энергии на разложение сульфита магния.

9.2 Адсорбционные методы

Адсорбционные методы применяют для различных технологических целей - разделение парогазовых смесей на компоненты с выделением фракций, осушка газов и для санитарной очистки газовых выхлопов. В последнее время адсорбционные методы выходят на первый план как надежное средство защиты атмосферы от токсичных газообразных веществ, обеспечивающее возможность концентрирования и утилизации этих веществ.

Адсорбционные методы основаны на избирательном извлечении из парогазовой смеси определенных компонентов при помощи адсорбентов — твердых высокопористых материалов, обладающих развитой удельной поверхностью (отношение поверхности к массе, $\text{м}^2/\text{г}$). Внутренняя структура наиболее распространенных на практике промышленных адсорбентов характеризуется наличием различных размеров и форм пустот или пор, среди которых различают макро-, мезо- и микропоры. Суммарный объем последних в единице массы или объема адсорбента определяет в решении задач

газоочистки как скорость (интенсивность) поглощения целевого компонента, так и адсорбционную способность твердым поглотителем этого компонента.

Промышленные адсорбенты, чаще всего применяемые в газоочистке, — это активированные угли, силикагели, алюмогели, природные и синтетические цеолиты (молекулярные сита). Основные требования к промышленным сорбентам — высокая поглотительная способность, избирательность действия (селективность), термическая устойчивость, длительная служба без изменения структуры и свойств поверхности, возможность легкой регенерации. Чаще всего для санитарной очистки газов применяют активный уголь благодаря его высокой поглотительной способности и легкости регенерации.

Различают физическую и химическую адсорбцию (хемосорбцию). При физической адсорбции поглощаемые молекулы газов и паров удерживаются силами Ван-дер-Ваальса, при хемосорбции — химическими силами [1].

Адсорбцию газовых примесей обычно ведут в полочных реакторах периодического действия без теплообменных устройств; адсорбент расположен на полках реактора. Когда необходим теплообмен (например, требуется получить при регенерации десорбат в концентрированном виде), используют адсорберы с встроенными теплообменными элементами или выполняют реактор в виде трубчатых теплообменников; адсорбент засыпан в трубки, а в межтрубном пространстве циркулирует теплоноситель.

Очищаемый газ проходит адсорбер со скоростью от 0,05 до 0,3 м/с. После очистки адсорбер переключается на регенерацию. Адсорбционная установка, состоящая из нескольких реакторов, работает в целом непрерывно, так как одновременно одни реакторы находятся на стадии очистки, а другие — на стадиях регенерации, охлаждения и прочее. Схема адсорбционной газоочистной установки представлена на рисунке 9.2.

Регенерацию проводят нагреванием, например, выжиганием органических веществ, пропусканием острого или перегретого пара, воздуха, инертного газа (азота). Иногда адсорбент, потерявший активность (экранированный пылью, смолой), полностью заменяют.

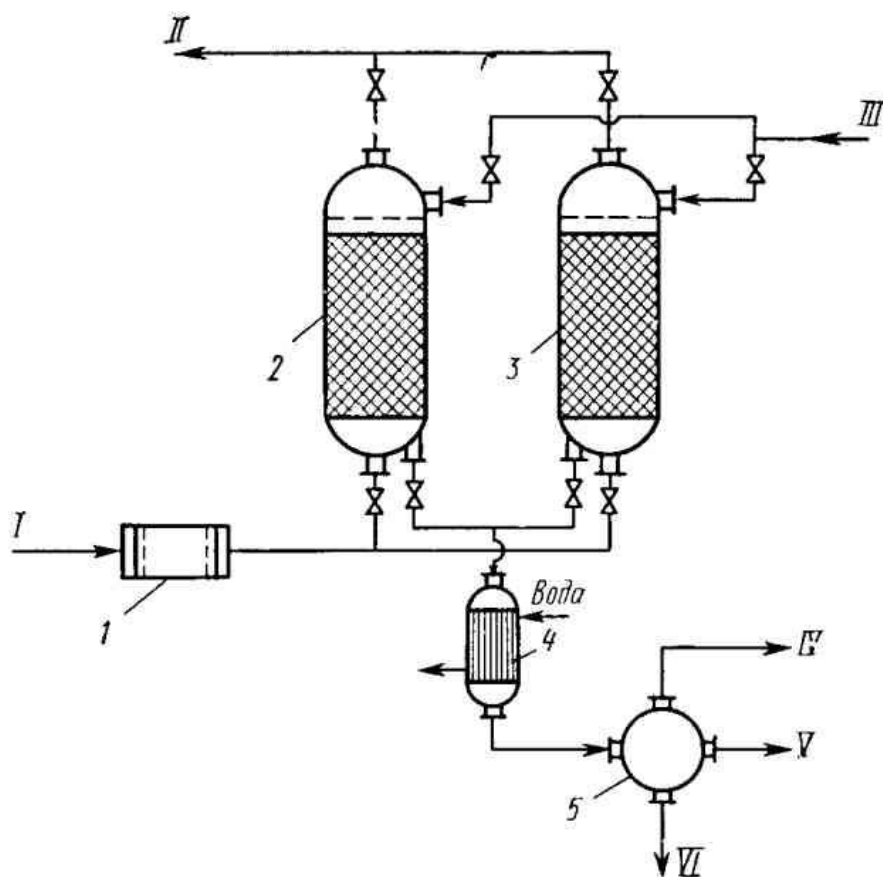
Наиболее перспективны непрерывные циклические процессы адсорбционной очистки газов в реакторах с движущимся или взвешенным слоем адсорбента, которые характеризуются высокими скоростями газового потока (на порядок выше, чем в периодических реакторах), высокой производительностью по газу и интенсивностью работы.

Общие достоинства адсорбционных методов очистки газов:

- глубокая очистка газов от токсичных примесей;
- сравнительная легкость регенерации этих примесей с превращением их в товарный продукт или возвратом в производство; таким образом, осуществляется принцип безотходной технологии.

Адсорбционный метод особенно рационален для удаления токсических

примесей (органических соединений, паров ртути и прочих), содержащихся в малых концентрациях, то есть как завершающий этап санитарной очистки отходящих газов.



1 — фильтр; 2, 3 — адсорберы; 4 — конденсатор; 5 — сепаратор; I — очищаемый газ; II — очищенный газ; III — водяной пар; IV — неконденсируемые пары; V — сконденсированный адсорбтив в хранилище; VI — водный конденсат.

Рисунок 9.2 - Схема адсорбционной газоочистной установки

Недостатки большинства адсорбционных установок — периодичность процесса и связанная с этим малая интенсивность реакторов, высокая стоимость периодической регенерации адсорбентов. Применение непрерывных способов очистки в движущемся и кипящем слое адсорбента частично устраняет эти недостатки, но требует высокопрочных промышленных сорбентов, разработка которых для большинства процессов еще не завершена [14], [18].

9.3 Термическая нейтрализация

Термическая нейтрализация основана на способности горючих газов и паров, входящих в состав вентиляционных или технологических выбросов, сгорать с образованием менее токсичных веществ.

Различают три схемы нейтрализации:

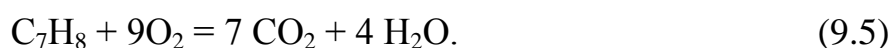
- прямое сжигание;
- термическое окисление;
- каталитическое дожигание.

Прямое сжигание используют в тех случаях, когда очищаемые газы обладают значительной энергией, достаточной для поддержания горения.

Примером такого процесса является факельное сжигание горючих отходов. Так нейтрализуют цианистый водород в вертикально направленных факелах на нефтехимических заводах.

Термическое окисление находит применение в тех случаях, когда очищаемые газы имеют высокую температуру, но не содержат достаточно кислорода, или когда концентрация горючих веществ незначительна и недостаточна для поддержания пламени. В первом случае процесс термического окисления проводят в камере с подачей свежего воздуха (дожигания CO , C_nH_m), а во втором – при подаче дополнительно природного газа.

Каталитическое дожигание используют для превращения токсичных компонентов, содержащихся в отходящих газах, в нетоксичные или менее токсичные путем их контакта с катализаторами. На практике в качестве катализаторов используют платину, палладий, оксиды меди, марганца, другие благородные металлы и их соединения. Данным методом обезвреживают оксиды углерода, летучие углеводороды, растворители, отработанные газы. В качестве примера рассмотрим реакцию окисления толуола, содержащегося в газовоздушных выбросах цехов окраски. Реакция протекает в присутствии марганцевой руды при температуре $t = 250\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$:



Каталитические методы очистки применяют и для нейтрализации выхлопных газов автомобилей.

Особенностью процесса каталитического сжигания является природа окисляющего вещества.

Наиболее сложной проблемой, возникающей в процессе каталитического сжигания, является постепенная дезактивация или отравление катализатора при длительном сроке службы или при неожиданном появлении ядов в газовом потоке. Дезактивация обусловлена либо химическим взаимодействием газов с катализатором, либо покрытием катализатора слоем дезактивирующего вещества.

Недостаток многих процессов каталитической очистки — образование новых веществ, которые подлежат удалению из газа другими методами (абсорбция, адсорбция), что усложняет установку и снижает общий экономический эффект.

Трудно провести границу между адсорбционными и каталитическими методами газоочистки, так как такие традиционные адсорбенты, как активированный уголь, цеолиты служат активными катализаторами для многих химических реакций. Очистку газов на адсорбентах–катализаторах называют адсорбционно-каталитической.

Представляет большой интерес очистка дымовых газов ТЭЦ или других отходящих газов, содержащих SO₂ (концентрацией 1-2% SO₂), во взвешенном слое высокопрочного активного угля с получением в качестве товарного продукта серной кислоты и серы.

Для полноценной очистки газовых выбросов целесообразны комбинированные методы, в которых применяется оптимальное для каждого конкретного случая сочетание грубой, средней и тонкой очистки газов и паров. На первых стадиях, когда содержание токсичной примеси велико, более подходят абсорбционные методы, а для доочистки — адсорбционные или каталитические.

Приложение А

Таблица А.1 - Дисперсный состав пыли, образующихся при технологических процессах

Наименование оборудования	Вид пыли	Запыленность газов, г/м ³	dm	$lg \sigma_4$
Вращающаяся клинкерно-обжигающая печь (мокрый способ производства):				
Липецкий завод	} Клинкер	25-30	23	0,501
Волжский завод		9-9,6	9,5	0,602
Ульяновский завод		28,5	14	0,535
Себряковский завод		18,5	8	0,494
Шахтная мельница	Гипсовая	1049	56	0,970
Крекинг-установка АМ-1/М (после циклонов регенератора)	Алюмосиликатам и катализатор	15	17	0,301
Крекинг-установка ГК-3 (после циклонов регенератора)	То же	10-20	16	0,250
Углесушильный барабан	Каменноугольная	-	15	0,334
Шаровая мельница	цементная	-	20	0,468
Вращающаяся цементная печь	Клинкер	40	11	0,345
(сухой способ производства)	Смесь шлака и трепела	20	20	0,652
Электролизер алюминия (боковой токопровод)	Окислы алюминия	1	20	0,652
Вращающаяся печь обжига	Магнезит	100-120	43	0,615
То же	Доломит	35-45	28	0,506
Распылительная сушилка	Двойной суперфосфат	3-5	80	0,210
Барабанная	То же	12-16	35	0,360

Приложение Б

Таблица Б.1 - Технические характеристики рукавных фильтров

Марка фильтра	Площадь фильтр. пов- ти, м ²	Кол-во секций, шт.	Кол-во ру- кавов в секции, шт	Диаметр рукава, мм	Высота ру- кава, м
1	2	3	4	5	6
ФР-6П	18	1	6	390	2,5
ФТ-2М	20	1	12	300	1,8
ФТНС-4М	12,4	1	4	386	2,6
ФТНС-8М	24,8	2	4	386	2,0
ФТНС-12М	37,2	3	4	386	2,6
ЦА-3804	4140	3	-	-	-
ФРУ	2,5 - 50	1 - 4	14; 28; 42; 56	125	0,9; 1; 2; 2,5
ФРН-20	20	2	32	130	1,63
ФРН-30	30	2	48	130	1,63
ФР-250	281	4	288	135	2,3
СМЦ-101А	50; 55; 110; 115; 205	2	36	200	2,2; 2,45; 4,9; 5,1; 9,1
РФГ	112; 168; 224; 280	4; 6; 8; 10	56; 84; 112; 140	220	3,1
УРФМ	1610; 2300	14; 20	588; 840	220	4,0
Г4-1БФМ	30; 45; 60; 90	2; 3; 4; 6	36; 54; 72; 108	135	2,09
Г4-2БМФ	60; 90	4; 6	72; 108	135	2,09
ФР-518 (650)	518 (650)	6	72 (90)	127	3,0
ФР-5000	5000	8	504	127	3,09
ФРДО-6500	6500	10	212	130	7,85
ФРО-2400-1	2400	8	42	200	8
ФРО-6000-2	6000	10	54	300	10
ФРО-20300-3	20300	10	216	300	10
РФОСП	1,9 - 136	-	2 - 24	-	1 - 6
РФСП-П	370	4	22	300	4,8
РФСП-1580	1580	20	24	-	-
ФРКИ-30	30	1	36	135	2
ФРКИ-В-30	30	1	36	135	2
ФРКИ-60	60	2	36	135	2
ФРКИ-В-60	60	2	36	135	2
ФРКИ-90	90	3	36	135	2
ФРКИ-В-90	90	3	36	135	2
ФРКИ-180	180	4	36	135	3
ФРКИ-360	360	8	36	135	3
ФРКИ-550	550	6	36	135	6
ФРКДИ	720	8	36	135	6
ФРКДИ-1100	1100	12	36	135	6

Список литературы

Основная

- 1 Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002.
- 2 Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 210 с.: ил.
- 3 Справочник инженера по охране окружающей среды (эколога) / под ред. В.П. Перхуткина. - М.: «Инфра-инженерия», 2005. – 864 с.
- 4 Процессы и аппараты защиты атмосферы /Практикум. В.В. Коростовенко, В.А. Стрекалова. КГАЦМиЗ. - Красноярск, 2003. – 141 с.
- 5 Швыдкий В.С. Очистка газов: Справочное издание / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
- 6 Родионов А.И., Клушин В.Н., Систер В.Г. Технологические процессы экологической безопасности. Калуга, 2000.
- 7 /<http://konspekta.net/allrefs/baza5/2107569095415.files/image015.jpg>
- 8 Шиляев М. И. Методы расчета пылеулавливающих систем / М. И. Шиляев. - М. : Форум ; ИНФРА-М, 2014.- 320 с.
- 9 Трифонов К.И., Девисилов В.А. Физико-химические процессы в техносфере.- М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007.- 240 с.
- 10 Инженерная экология и экологический менеджмент / под ред. Н.И. Иванова, И.М. Федина. -М.: Логос, 2003. - 528 с.
- 11 Квашнин И. М. Промышленные выбросы в атмосферу : Инженерные расчёты и инвентаризация.- М. : АВОК-Пресс, 2005. - 395 с.
- 12 Квашнин И. М. Промышленные выбросы предприятия в атмосферу: Рассеивание и установление нормативов.- М.: АВОК-Пресс, 2008. - 200 с.
- 13 Инженерная экология / под ред. В. Т. Медведева. - М.: Гардарики, 2002. – 687 с.
- 16 Приказ Министра национальной экономики Республики Казахстан от 28 февраля 2015 года № 168. Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 13 мая 2015 года № 11036 Об утверждении Гигиенических нормативов к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах.
- 14 Аверкин А.Г. Аппараты для физико-химической очистки воздуха. Учеб. пособие. В 2-х частях. Ч.1. Абсорберы.-Пенза: ПГАСА, 2000.

Дополнительная

- 15 Защита атмосферы от промышленных загрязнений. В 2-х ч. Ч.1: /Под ред. Калверта С., Инглунда Г.М. - М.: Металлургия, 1988.
- 16 Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. Изд. 7-е: в 3 т. Т. I. Органические вещества / под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. - Л.: Химия, 1976. - 525 с.
- 17 Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер [и др.]; под

общ. ред. А. А. Русанова. 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.

18 Аверкин А.Г. Аппараты для физико-химической очистки воздуха. Учеб. пособие. В 2-х частях. Ч.2 Адсорберы. - Пенза: ПГАСА, 1999.

19 Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций: Учебник для вузов/Л.А. Рихтер, Э.П. Волков, В.Н. Покровский; Под ред. П.С. Непорожного.-М.:Энергоиздат, 1981.

20 Воронцов А.А. Охрана природы / А.А. Воронцов, Е.А. Щетинский, И.Д. Никодимов. – М.: ВО «Агропромиздат», 1989.

21 Мазур И.И. Инженерная экология: Общий курс в 2-х томах. Справочное пособие /И.И. Мазур, О.И. Молдованов, В.Н. Шишов. Под ред. И.И. Мазура. – Москва: Высшая школа, 1986.

22 Охрана окружающей среды / Под ред. проф. С.В. Белова. – М.: «Высшая школа», 1991.

23 Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. и др. Очистка промышленных газов электрофильтрами. -М., 1967.

Абикенова Асель Амангельдиевна

**ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ВЫБРОСОВ**
Учебное пособие

Редактор

Л.Т. Сластихина

Подписано в печать _____.____.2018
Тираж 20 экз. Формат 60x84 1/16

Бумага типографская №2
Уч.-изд.л 6,7. Заказ № _____
Цена 3000 тг.

Некоммерческого АО «АУЭС»
г.Алматы, ул.Байтурсынулы, 126/1

Копировально-множительное бюро
Некоммерческого акционерного общества

«Алматинский университет энергетики и связи»
050013, Алматы, ул. Байтурсынулы, 126/1

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ
Кафедра «Безопасность труда и инженерная экология»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по УМР
_____ С. В. Коньшин
" ___ " _____ 2018 г.

ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

Учебное пособие

для студентов специальности 5В073100 – Безопасность жизнедеятельности
и защита окружающей среды

Согласовано:
Начальник УМО
_____ Р.Р.Мухамеджанова
" ___ " _____ 2018г.

Рассмотрено и одобрено на
на заседании кафедры «БТИЭ»
Протокол № от " ___ " _____ 2018г.
Зав. кафедрой
_____ А.А. Абикенова
" ___ " _____ 2018г.

Председатель ОУМК по МОиЭ
_____ Б.К. Курпенов
" ___ " _____ 2018г.

Редактор:
_____ Л.Т.Сластихина
" ___ " _____ 2018г.

Составители:
_____ А.А. Абикенова

Специалист по стандартизации:
_____ Н.К.Молдабекова
" ___ " _____ 2018г.

Алматы 2018 г.

