



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Н.И. Николайкин,
Н.Е. Николайкина,
С.Ю. Старков

ЭКОБИОЗАЩИТНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

Учебно-методическое пособие
по выполнению курсовой работы
«Защита атмосферы от выбросов аэрозолей
на авиапредприятиях»

для студентов
направления
всех форм обучения

Москва
2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

Кафедра безопасности полётов и жизнедеятельности
Н.И. Николайкин, Н.Е. Николайкина, Е.Ю. Старков

ЭКОБИОЗАЩИТНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

**Учебно-методическое пособие
по выполнению курсовой работы**

**«Защита атмосферы от выбросов аэрозолей
на авиапредприятиях»**

*для студентов
направления 20.03.01
очной формы обучения*

Москва
2019

ББК 331.8
Н-63

Рецензент:

Рыбалкина А.Л. – канд. техн. наук;

Мерзликін И.Н. – канд. техн. наук, доцент

Николайкин Н.И.

Н-63 Экобиозащитная техника и технологии на транспорте: учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы./ Н.И. Николайкин, Н.Е. Николайкина, Е.Ю. Старков. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 52 с.

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения студентами курсовой работы по дисциплине «Экобиозащитная техника и технологии на транспорте», и может быть использована для проведения семинарских (практических, расчетных) занятий со студентами в рамках дисциплин «Экология», «Охрана окружающей среды и основы природопользования», «Безопасность жизнедеятельности», а также на курсах повышения квалификации Института повышения квалификации и аттестации кадров (ИПКиАК) МГТУ ГА.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Экобиозащитная техника и технологии на транспорте» по учебному плану для студентов направления 20.03.01 очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 20.06.2019 г. и методического совета 20.06.2019 г.

В авторской редакции.

Подписано в печать 08.07.2019 г.

Формат 60x84/16 Печ.л. 3 Усл. печ. л. 3,49

Заказ 514/ Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Отпечатано ООО «МИР»

394033, г. Воронеж, Ленинский пр-т 119А, лит. Я, оф. 215

Тел.: 8 (958) 649-53-31 Email: 89586495331@mail.ru

© Московский государственный
технический университет ГА, 2019

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. Краткая теоретическая часть	6
1.1. Технология очистки газов, ее цель и основные стадии	6
1.2. Отбор газов от источников выделения	7
1.3. Аэрозоли и их основные свойства	8
1.4. Элементы теории подобия	11
1.5. Механика выделения частиц из аэрозоля	13
1.6. Классификация пылеуловителей	18
1.7. Сухие механические пылеуловители	20
1.7.1. Пылеосадительные камеры	20
1.7.2. Инерционные пылеуловители	21
1.7.3. Циклоны	21
1.7.4. Вихревые пылеуловители	25
1.8. Мокрые пылеуловители (скрубберы)	25
1.8.1. Теоретические основы мокрого пылеулавливания	26
1.8.2. Полые газопромыватели	27
1.8.3. Насадочные газопромыватели	27
1.8.4. Тарельчатые газопромыватели	27
1.9. Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури)	28
1.10. Тканевые фильтры	29
1.11. Электрическая очистка газов	31
1.11.1. Основные положения	31
1.11.2. Конструктивные особенности электрофильтров	34
1.11.3. Системы сухой очистки (встряхивания) электродов	34
1.11.4. Системы мокрой очистки (промывки) электрофильтров ...	34
1.11.5. Вспомогательное оборудование электрофильтров	35
2. Цель и задачи курсовой работы.....	35
3. Задание по курсовой работе	36
4. Содержание и оформление пояснительной записки	36
5. Порядок выполнения курсовой работы	38
6. Срок и порядок сдачи курсовой работы, её оценка	39
7. Требования к оформлению расчетной части работы	40
8. Порядок проведения расчетов	42
9. Контрольные вопросы	46
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	47
Приложение 1. Форма «задания на курсовую работу»	48
Приложение 2. Форма титульного листа пояснительной записка	49
Приложение 3. Исходные данные по фракционному составу пыли ...	50
Приложение 4. Исходные данные для расчёта электрофильтра	51

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Экобиозащитная техника и технологии на транспорте» (ЭБТТТ) относится к обязательным учебным дисциплинам вариативной части учебного плана образовательной программы направления подготовки (специальности) **20.03.01 «Техносферная безопасность»**, квалификация (степень) – бакалавр. Курсовая работа призвана выработать и закрепить на практике компетенции, предусмотренных Федеральным образовательным стандартом по соответствующему направлению подготовки.

Целью освоения дисциплины ЭБТТТ является получение знаний умений и владений, которые формируют компетенции, предусмотренные ФГОС ВО по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность», а именно:

- по общекультурной ОК 7 – *знать* основные методы и системы инженерного обеспечения безопасности окружающей среды;

- по общепрофессиональной ОПК 1 (способность учитывать современные тенденции развития техники и технологий в области обеспечения техносферной безопасности) – *уметь* ориентироваться в перспективах развития техники и технологии инженерной защиты среды обитания человека и природной среды от опасности их загрязнения в результате хозяйственной деятельности человека;

- по профессиональным: ПК 18 – *уметь* ориентироваться в основных ограничениях по использованию инженерных методов обеспечения экологической безопасности; - **ПК 20** – *знать* систему организации инженерной охраны окружающей среды на объектах экономики в целом, и на предприятиях транспорта (в частности гражданской авиации); *уметь применять методы инженерной экологии по уменьшению негативного воздействия деятельности транспорта на окружающую среду; владеть навыками обоснованного выбора известных устройств, систем и методов* защиты среды обитания человека и природной среды от загрязнений; - **ПК 21** – *владеть* способностью использовать знания в области инженерной охраны окружающей среды при решении профессиональных задач.

В дисциплине ЭБТТТ изучаются инженерные методы защиты окружающей среды от загрязнения, происходящего в процессе технической эксплуатации авиатехники. Таким образом в ЭБТТТ продолжается изучение теоретического материала цикла дисциплин, направленных на обеспечение «Экологической безопасности», являющейся одной из компонент «Комплексной безопасности на транспорте» - частью «Техносферной безопасности».

В пособии в соответствии с утвержденной рабочей программой дисциплины, рассматривается комплекс вопросов, связанных с аспектами учебного расчета аппаратурного оформления систем очистки отходящих газовых потоков от загрязняющих веществ (аэрозолей), в целом, и, в частности, и на эксплуатационных авиапредприятиях гражданской авиации.

Авторы выражают глубокую благодарность Зеверовой Светлане Евгеньевне за всестороннюю помощь в разработке и подготовке к изданию данного пособия.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении миллиардов лет эволюции живого на нашей планете разнообразные природные явления, связанные с выбросами в атмосферу газообразных и взвешенных (аэрозольных) частиц, оказывали воздействие на состояние и функционирование биосферы (прежде всего аэробииосферы), в итоге влияя на среду обитания человека. При этом они не вызывали глубоких экологических изменений, ибо уравнивались в природном круговороте.

Деятельность человека, связанная с улучшением условий проживания и, особенно, с развитием производства стала приносить значительно больший вред окружающей среде. Использование огня в очаге, сжигание лесов для расширения пахотных территорий, выплавка металлов и стекла - таков краткий перечень технологических процессов на заре цивилизации, которые сопровождались вредными выбросами в атмосферу.

Загрязнение атмосферы особенно усилилось с применением каменного угля в качестве горючего материала. Так, уже на рубеже XIII – XIII веков английский король Эдуард I издал эдикт (эдикт - постановления и предписания тех сановников, которые имели право их издавать), запрещающий использование каменного угля для отопления жилищ в Лондоне. Однако уменьшить загрязнение воздуха, как, впрочем, и остановить прогресс техники ни король, ни другие законодатели не смогли. К концу XVI века налаживается производство кокса, растет выплавка железа. Дым становится признаком процветания.

В XVII столетии появилась первая публикация, поднимавшая вопрос о защите окружающей среды от вредных выбросов. В 1661 году Джон Эвелин представил Карлу II доклад под названием “Заражение дымом, или распространение дыма в воздухе над Лондоном”, в котором помимо прочих зол, указывалось, что загрязнение воздуха дымом может привести к сокращению продолжительности жизни, и рекомендовалось вынести за черту города все промышленные предприятия, работающие на угле.

В XX в. угрожающие размеры вредных выбросов в атмосферу привлекли к себе пристальное внимание науки, общественности, правительств всех стран.

Ежедневно человек использует для дыхания 12 м^3 (около 15 кг) воздуха, любое загрязнение которого неблагоприятно влияет на самочувствие и здоровье.

Загрязнение воздуха наносит ущерб сельскохозяйственным культурам, лесам, зданиям, предприятиям, памятникам культуры. Такой ущерб, например, в США, оценивается в несколько миллиардов долларов в год. Значительный ущерб нанесен знаменитому Тадж Махалу в Индии, афинскому Акрополю и многим другим жемчужинам нашей цивилизации.

Защита атмосферного воздуха от загрязнения – важная проблема для всех отраслей экономики Российской Федерации. В воздушный бассейн от объектов всех отраслей экономики (промышленности, энергетики, транспорта, сельского и жилищно-коммунального хозяйства и других) нашей страны ежегодно поступают десятки миллионов тонн загрязняющих веществ как газообразных,

так и взвешенных (твердых и жидких). Они оказывают различное негативное влияние на окружающую среду, растительный и животный мир, а также на человека непосредственно. Загрязненный воздух в больших объемах поступает в бытовые и производственные помещения через системы приточной вентиляции и кондиционирования. Это актуально для аэровокзалов и многих иных зданий и наземных сооружений авиапредприятий.

В настоящее время имеется обширный парк оборудования, показатели работы которого могут обеспечить очистку отходящих технологических газов, выбрасываемых в атмосферу (выбросов), от загрязняющих веществ до допустимых нормативов. Поэтому, чаще всего, для решения задачи защиты от загрязнения достаточно квалифицированного выбора нужного метода очистки и соответствующего (по производительности, допустимым габаритам, стоимости и т. п. характеристикам) варианта оборудования из числа разработанных ранее инженерных решений и уже включенных в соответствующие специализированные каталоги выпускаемых устройств.

1. КРАТКАЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1. Технология очистки газов, её цель и основные стадии

Целью технологии газоочистки является снижение концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) в газовой (воздушной) среде до требуемых значений путём достижения соответствующей степени очистки (степени улавливания загрязнений), исключение вторичного загрязнения воздуха, воды и почвы уловленными веществами с учетом технико-экономических ограничений и реальных возможностей действующего или проектируемого объекта.

Стадии технологии газоочистки. Технология газоочистки с учетом ее задач и целей в общем случае включает в себя следующие стадии:

- 1) отбор (отсос) газов или воздуха от источника выделения ЗВ;
- 2) подготовку потока газов или вентиляционного воздуха к очистке;
- 3) улавливание ЗВ из газообразной среды (собственно очистка газов);
- 4) удаление и транспортирование уловленных ЗВ (газов и шламов);
- 5) утилизацию или захоронение уловленных ЗВ.

Первая стадия – отбор (отсос) в большинстве случаев определяет количество (объем) выбросов и затраты на их очистку. Если на этой стадии удастся отобрать, образующиеся ЗВ в источнике выделения, эффективно, т.е. с минимальным разбавлением их чистым воздухом (локализовать выбросы), при одновременном обеспечении установленных значений предельно допустимых концентраций в рабочей зоне ($ПДК_{p.з.}$), то дальнейшие затраты на очистку будут меньшими.

Вторая стадия – подготовка выбросов к очистке. Она может включать:

- предварительное охлаждение (нагрев) для приведения их к условиям, допустимым для выбранного типа газоочистного оборудования;

- объединение потоков выбросов от нескольких единиц оборудования с подключением отдельных ответвлений к сборнику-коллектору;
- подвод направляемых на очистку потоков газов или воздуха к аппарату очистки и обеспечение их равномерного распределения по его сечению;
- предварительную очистку выбросов в простейших газоочистных аппаратах для наилучших условий применения аппаратов тонкой очистки.

Третья стадия – собственно очистка газов. Для неё определяется оптимальный механизм осаждения взвешенных частиц или улавливания газообразных ЗВ, виды, типы, конкретные размеры газоочистных аппаратов и параметры их работы, при которых может быть достигнута требуемая степень очистки. При выбросе газов или воздуха в атмосферу требуемая степень очистки должна соответствовать нормам предельно допустимых выбросов (ПДВ).

Требуемая степень очистки вентиляционного воздуха в схемах газоочистки с рециркуляцией очищенного воздуха в помещении должна рассчитываться из условия, что концентрация ЗВ в очищенном воздухе будет не более 0,4 ПДК_{р.з.} для соответствующего вещества.

При выборе числа ступеней очистки и типов газоочистных аппаратов - следует ориентироваться главным образом использование унифицированных газоочистных аппаратов.

Способ очистки, тип аппарата и всех остальных элементов технологической схемы газоочистки, направления утилизации уловленных веществ зависит от их физические и химические свойства. Так, например, для улавливания пылей из взрывоопасной газообразной смеси, предпочтительны мокрые способы очистки.

Технологическую схему газоочистки целесообразно представить в виде следующих элементов:

- устройства отбора (отсоса) газов или воздуха;
- устройство подготовки выбросов к очистке;
- один или группа газоочистных аппаратов;
- соединительные газоходы или воздухопроводы;
- дымосос или вентилятор;
- устройства для выгрузки (отвода) уловленных веществ.

Источники образования выбросов. В соответствии с терминологией, используемой в сфере отечественной инженерной деятельности по защите окружающей среды от загрязнения, *источник загрязнения* атмосферного воздуха — это производство, технологический процесс, операция, в процессе которых происходит образование веществ, поступающих в атмосферу и загрязняющих воздух. *Источник выделения* ЗВ — это оборудование (агрегат, аппарат, двигатель, станок, устройство), при работе которого образуются твердые (пыль) или жидкие частицы, а также газо- парообразные вещества. Часто один источник загрязнения атмосферного воздуха обычно содержит несколько источников выделения ЗВ. Выбросы, содержащие ЗВ, специальными устройствами направляются от источников выделения в атмосферу. Их называют *организованными*, и это может быть труба (шахта) определенной высоты.

Выбросы от источников выделения, поступающие непосредственно в воздушное пространство помещения (цеха или участка, а потом через окна и двери, удающиеся из помещения, называют *неорганизованными* выбросами.

Количественный и качественный состав выбросов зависит от технологического процесса, изменением параметров технологического процесса можно воздействовать на состав выбросов,

Вредные вещества могут присутствовать в выбросах в различном фазовом состоянии, что влияет на выбор методов по очистке газов от них.

1.2. Отбор газов от источника выделения

Узел отвода газового потока от источника выделения ЗВ необходим для:

- максимального удаления ЗВ в систему газоочистки;
- сокращения до минимума подсоса воздуха.

Наилучшей конструкцией газоотводящего устройства является полностью герметичная система, обеспечивающая отвод всех образующихся ЗВ (запылённых газов) в систему очистки. Однако это не всегда возможно из-за работ по обслуживанию технологического агрегата, периодичности его работы, условий загрузки и выгрузки, высокой температурой образующихся газов, поэтому приходится применять менее совершенные местные укрытия, например, различные модификации вытяжных зонтов (рис. 1).

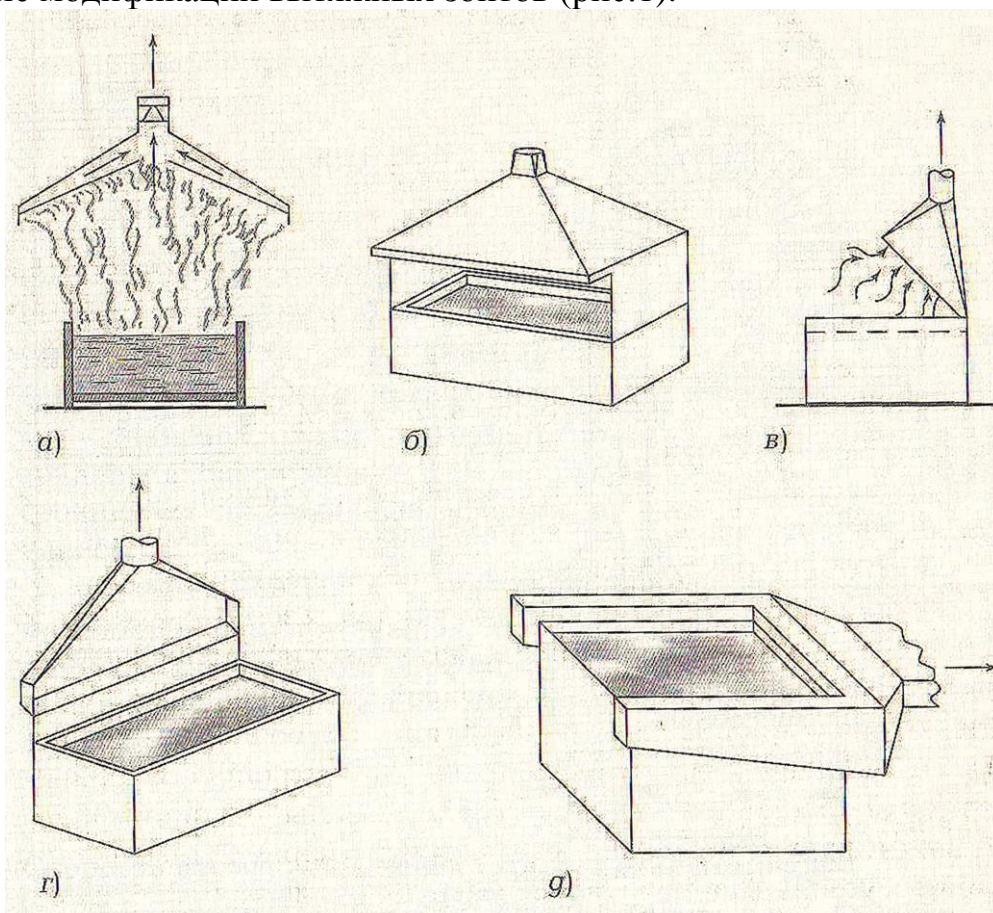


Рисунок 1 – Укрытия открытого типа: а – двойной зонт, б – навес, открытый с одной стороны; в – полу навес; г – щелевой зонт; д – бортовой отсос

Для предотвращения отложений на внутренней поверхности необходимо, чтобы скорость газов во входном сечении зонта была достаточно высокой. Скорость подсоса воздуха через все щели и неплотности должна предотвращать возможность выбивания пыли из-под укрытия в рабочие помещения. Разрежение внутри укрытия принимается равным 3-25 Па.

1.3. Аэрозоли и их основные свойства

Аэрозоли – двухфазные системы с газообразной дисперсионной средой и с дисперсной фазой, состоящей из весьма мелких твердых или жидких частиц. Они подразделяют на естественные и искусственные. Естественные аэрозоли образуются под воздействием природных сил, например, при вулканических явлениях, сочетании ветра с эрозией почвы, атмосферных явлениях. Искусственные аэрозоли образуются в результате хозяйственной деятельности общества, среди которых выделяют так называемые «промышленные аэрозоли», образующиеся в производственных процессах, являющиеся нежелательными отходами антропогенной деятельности общества и оказывающими неблагоприятное влияние на окружающую среду и здоровье населения.

Размеры твердых или жидких частиц, взвешенных в газообразной среде, могут находиться в диапазоне от 0,1 мкм до 1 мм. Для сравнения, средняя толщина человеческого волоса 100 мкм, а частицы меньше 50 мкм невидимы невооруженным глазом. Наиболее опасны для легких человека частицы от 0,5 до 5 мкм; более крупные задерживаются в полости носа, более мелкие в дыхательных путях не оседают, они выдыхаются легкими.

Аэрозоли подразделяют на: дымы, пыли, туманы, смешанные аэрозоли.

Пыли состоят из твердых частиц, диспергированных в газообразной среде в результате механического измельчения твердых тел в порошкообразное состояние, а также из твердых частиц, образовавших дисперсную фазу в результате процессов смешения, встряхивания, просеивания, сушки и транспортировки порошкообразных материалов. Пыли – полидисперсные системы с размером частиц от 5 до 100 мкм и более. К этому классу аэрозолей относится, например, аспирационный воздух, отсасываемый от дробеструйных камер, деревообрабатывающих и заточных станков.

Дымы – это конденсационные аэрозоли, образующиеся при возгонке веществ и конденсации их паров, а также в результате химических и фотохимических реакций. Размер частиц в дымах от 5 до 0,4 мкм и менее. Примером аэрозолей, в состав которых входят конденсационные аэрозоли, являются выбросы от электросварочного оборудования.

Туманы состоят из капелек жидкости, диспергированных в газообразной среде, в которых могут содержаться растворенные вещества или суспендированные твердые частицы. Туманы обычно образуются в результате конденсации паров или при распылении жидкости в газовой среде. Размер капель при конденсации может быть близок к размеру частиц в дымах, при

распылении – близок размеру частиц в пылях. Туманами являются выбросы при закалке изделий в масле, при хромировании изделий, при окраске.

Выбор и надежность работы пылеулавливающих аппаратов в значительной степени зависят от физико-химических свойств частиц, осаждаемых в них. Эти свойства в основном определяются химическим составом частиц и источником (способом) их образования.

Плотность частиц. Различают истинную, насыпную и кажущуюся плотности. Насыпная плотность (в отличие от истинной) учитывает воздушные прослойки между частицами пыли и поэтому она обычно в 2 ... 2,5 и более раз меньше истинной. При слеживании насыпная плотность увеличивается в 1,2 ... 1,6 раза.

Дисперсность частиц. Размер частиц является основным параметром аэрозоля, так как выбор типа уловителя определяется прежде всего дисперсным составом улавливаемого аэрозоля. В процессе коагуляции первичные частицы объединяются в агломераты, т.е. укрупняются (агрегируются).

Дисперсный состав пыли (аэрозоля) можно охарактеризовать числом частиц или массой частиц различных фракций. *Фракция* – относительная доля (часть) частиц, размеры которых находятся в определенном интервале значений, принятых в качестве нижнего и верхнего пределов. Та как, предельно-допустимые концентрации ЗВ в воздухе выражаются массой вещества, приходящейся на единицу объема воздуха, для оценки эффективности пылеулавливающих установок важно знать массовое содержание частиц различных фракций.

Адгезионные и аутогезионные свойства. Адгезионные свойства частиц определяют прочность их сцепления с различными макроскопическими поверхностями, а аутогезионные – друг с другом. Прилипание частиц к поверхности или друг к другу происходит за счет действия различных сил (сил Ван-дер-Ваальса; когезионного взаимодействия между молекулами; электростатического взаимодействия; капиллярных явлений; механического зацепления).

Абразивность частиц пыли характеризует интенсивность изнашивания металла при одинаковых скоростях газов и концентрациях частиц пыли. Она зависит от твердости, формы, размера и плотности частиц. Абразивность пыли учитывается при выборе скорости запыленных газов, толщины стенок аппаратов и газопроводов, а также при выборе облицовочных материалов для них.

Смачиваемость частиц водой оказывает влияние на эффективность мокрых пылеуловителей, особенно при работе с рециркуляцией жидкости.

Гигроскопичность и растворимость частиц определяются прежде всего их химическим составом, а также размером, формой и шероховатостью поверхности частиц. Гигроскопичность и растворимость частиц способствуют их улавливанию в аппаратах мокрого типа.

Электрические свойства частиц. Взвешенные частицы могут иметь положительный или отрицательный заряд, или быть нейтральными. В момент

образования частицы обычно заряжаются в результате передачи электронов трущимися поверхностями, а также вследствие передачи электронов при отрыве частиц друг от друга в процессе диспергирования. В большинстве случаев неметаллические взвешенные частицы в естественных условиях заряжаются положительно, а металлические - отрицательно. При распылении воды крупные капли заряжаются положительно, а мелкие – отрицательно. Частицы конденсационных аэрозолей, полученных при умеренных температурах, как правило, не заряжены. На взвешенных частицах, образующихся при горении или в дуговом разряде, наблюдаются большие заряды.

В промышленных газах число положительно заряженных частиц может быть равно числу отрицательно заряженных, что, как правило, наблюдается у аэрозолей, содержащих весьма мелкие частицы с однородным химическим составом. Электрические заряды можно сообщать взвешенным частицам и искусственно путем, например, воздействием на газы различных ионизаторов, использованием коронного разряда (электрофильтры), созданием контакта с заряженными телами. Заряд частиц с течением времени может меняться как в связи с их агрегированием, так и благодаря захвату газовых ионов.

Эффективность работы установок электрической очистки газов зависит от *электрической проводимости пыли*, связанной с удельным электрическим сопротивлением слоя пыли ρ (Ом \cdot м), равным сопротивлению прохождению электрического тока через куб пыли со стороной, равной 1 м.

Способность частиц пыли к самовозгоранию и образованию взрывчатых смесей с воздухом. Горючая пыль с кислородом воздуха вследствие сильно развитой поверхности контакта частиц (порядка 1 м²/г) способна к самовозгоранию и образованию взрывчатых 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, от относительного содержания инертной пыли. При повышении температуры воспламенение иногда происходит самопроизвольно. Плотные массы пылей горят медленно, а рыхлые, особенно мелкая пыль, обычно быстро возгораются во всем объеме.

Способностью к воспламенению обладают некоторые пыли органических веществ, образующиеся в процессах обработки древесных материалов, пластмасс, волокон, а также пыли металлов (например, Mg, Al и Zn). Чем больше кислорода в газовой смеси, тем вероятнее взрыв и больше его сила, но при содержании кислорода менее 16% облако пыли практически невзрываемо.

1.4. Элементы теории подобия

Участие того или иного механизма осаждения в процессе улавливания частиц из газового потока определяется целым рядом факторов, и в первую очередь размером частиц. При решении практических задач гидродинамики,

многие важные результаты получены с использованием теории подобия [6]. Методы этой теории применяются при расчётах пылеулавливающих аппаратов.

Согласно теории подобия [4, 5] эффективность осаждения частиц за счет определенного механизма их осаждения может быть качественно охарактеризована соответствующим безразмерным параметром, а общая эффективность улавливания частиц в аппарате η является функцией этих параметров и критерия Re , определяющего характер движения газовой среды.

$$\eta = f(Re; G; Stk; \omega; R; D; K_E), \quad (1.1)$$

где $G, Stk, \omega, R, D, K_E$ – безразмерные параметры осаждения частиц за счет механизмов седиментации, инерции при прямолинейном и криволинейном движениях, касания, диффузии и электростатических сил.

Дифференциальные уравнения движения газового потока после преобразования могут быть заменены следующим критериальным уравнением:

$$f(Fr, Eu, Re_2) = 0, \quad (1.2)$$

где $Fr = \frac{v_r^2}{g \cdot l}$ – критерий (число) Фруда, характеризующий отношение силы

инерции к силе тяжести; (v_r – скорость газов, м/с; l – определяющий линейный размер, м);

$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_r \cdot v_r^2}$ – критерий (число) Эйлера, характеризующий отношение силы давления к силе инерции; (Δp – перепад давления, Па; ρ_r – плотность газов, кг/м³);

$Re_r = \frac{v_r \cdot \rho_r \cdot l}{\mu_r}$ – критерий (число) Рейнольдса, характеризующий отношение

силы инерции к силе трения (μ_r – динамическая вязкость газов, Па·с).

Вид функциональной связи между критериями (числами) в уравнении (1.2) определяется опытным путём, причем критерий Eu , включающий в себя переменную Δp , не является определяющим и находится в результате решения уравнения (1.2). Критерий Fr играет важную роль, когда на движение потока существенно влияют гравитационные силы. Решение многих практических задач показывает, что действие силы тяжести весьма незначительно, и им можно пренебречь. Практически сила тяжести не учитывается и в общем случае вынужденного движения газового потока, то есть как бы происходит вырождение критерия Fr , и он выпадает из числа аргументов уравнения (1.2).

Важной характеристикой движения газового потока является критерий (число) Рейнольдса Re_2 . При малых значениях критерия (числа) $Re_2 < 2100$ преобладают силы трения и наблюдается устойчивое ламинарное течение газа – газовый поток движется вдоль стенок, определяющих его направление. С ростом критерия (числа) Re_2 ламинарное течение (режим) постепенно теряет устойчивость и при некотором критическом значении $Re_2 > 4000$ переходит в

турбулентный. В турбулентном режиме отдельные массы газов могут перемещаться в любом направлении, в том числе по направлению к стенке и или к телу, обтекаемому потоком.

1.5. Механика выделения частиц из аэрозоля

На практике процесс выделения взвешенных частиц из аэрозольной смеси обычно называется осаждением. Работа любого пылеулавливающего аппарата основана на использовании одного или нескольких механизмов осаждения.

Основные механизмы осаждения.

Гравитационное осаждение (седиментация) осуществляется в результате вертикального оседания частиц под действием силы тяжести.

Инерционное осаждение происходит в том случае, когда масса частицы или скорость ее движения настолько значительны, что она не может следовать вместе с газом по линии тока, огибая препятствие, а, стремясь по инерции продолжить свое движение, сталкивается с препятствием и осаждается на нем.

Разновидностью инерционного осаждения является осаждение под действием центробежной силы, благодаря которой при криволинейном движении аэродисперсного потока частицы отбрасываются на поверхности осаждения.

Зацепление (эффект касания) наблюдается, когда расстояние частицы, движущейся с газовым потоком, от обтекаемого тела равно или меньше ее радиуса.

Диффузионное осаждение. Мелкие частицы испытывают непрерывное воздействие молекул газа, находящихся в броуновском движении, в результате которого возможно осаждение этих частиц на поверхности обтекаемых тел или стенок аппарата.

Электрическое осаждение. В процессе ионизации молекул газа электрическим разрядом частицы, содержащиеся в газе, заряжаются, а затем под действием сил электрического поля они осаждаются на электродах.

Гравитационное осаждение частиц. В аппаратах, использующих этот принцип улавливания пыли, осаждение взвешенных частиц происходит под действием силы тяжести. При падении взвешенная частица испытывает сопротивление среды. В общем виде конечная скорость частицы $v_{\text{ч}}$ (м/с), достигаемая при установлении равенства между силой сопротивления среды и силой тяжести $F_G(H)$, определяется по формуле:

$$v_{\text{ч}} = [F_G / (S_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} \zeta_{\text{ч}})]^{0,5} \quad (1.3)$$

При гравитационном осаждении шаровой частицы

$$F_G = (\pi d_{\text{ч}}^3 / 6) \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) g \quad (1.4)$$

Инерционное осаждение частиц при криволинейном движении.

Инерционное осаждение взвешенных частиц широко используется в технике пылеулавливания посредством искривления движения газового потока (рис. 2).

Расчет сепарационного движения частицы достаточно сложен и проводится с помощью ЭВМ, результаты подобных расчетов приводятся в литературе.

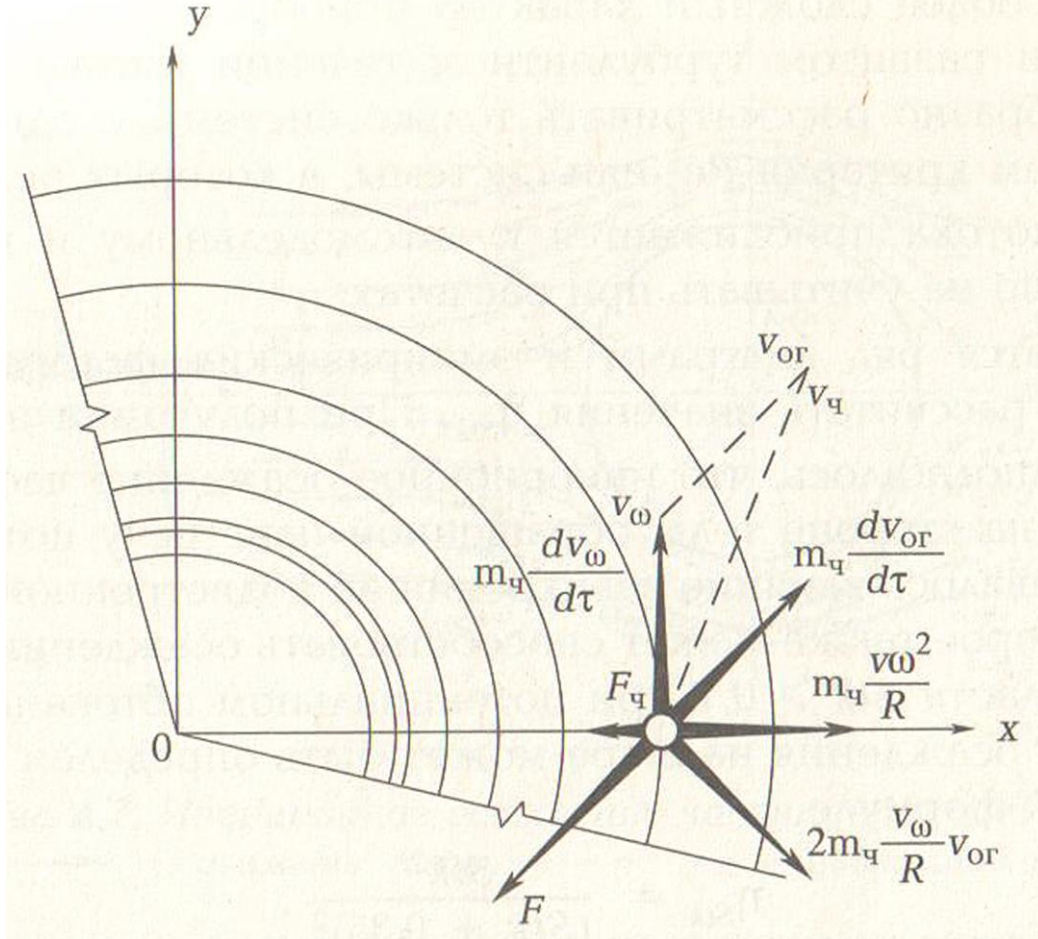


Рисунок 2 – Схема процесса инерционного осаждения частиц при криволинейном движении газового потока

Метод расчета инерционного осаждения частиц при криволинейном движении газового потока связан с использованием уравнения, учитывающего центробежную силу, направленную по радиусу вращения потока:

$$F_{ц} = m_{ч} \cdot \frac{v_{\omega}^2}{R}, \quad (1.5)$$

где $F_{ц}$ - центробежная сила, развивающаяся при вращении газового потока, Н; $m_{ч}$ - масса частиц, кг ($m_{ч} = \rho_{ч} V_{ч}$); v_{ω} - скорость вращения газового потока вокруг неподвижной оси, м/с; R - радиус вращения газового потока, м.

Тогда скорость осаждения частицы при криволинейном движении:

$$v_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{ч}}^2 \cdot \rho_{\text{ч}}}{18 \cdot \mu_r} \cdot \frac{v_{\omega}^2}{R} = \tau_p \cdot \frac{v_{\omega}^2}{R}, \quad (1.6)$$

откуда также следует, что скорость осаждения взвешенных частиц в центробежных пылеуловителях прямо пропорциональна квадрату диаметра частицы.

Коэффициент осаждения (улавливания) частиц под действием центробежной силы можно представить в виде

$$\eta_w = f(Re, Stk_w) \quad (1.7)$$

Зацепление (касание). Размер частиц имеет важное значение при захвате частиц за счет касания частицей поверхности обтекаемого тела.

Если пренебречь инерционными эффектами и считать, что частица точно следует в соответствии с линиями тока, то частица осаждается не только в том случае, когда ее траектория пересечется с поверхностью тела, но и в случае пересечения линии тока на расстоянии от поверхности тела, равном ее радиусу (рис. 3).

Таким образом, эффективность зацепления выше нуля и тогда, когда инерционное осаждение отсутствует.

Эффект зацепления характеризуется параметром R , который представляет собой отношение диаметров частицы $d_{\text{ч}}$ и обтекаемого тела $d_{\text{т}}$.

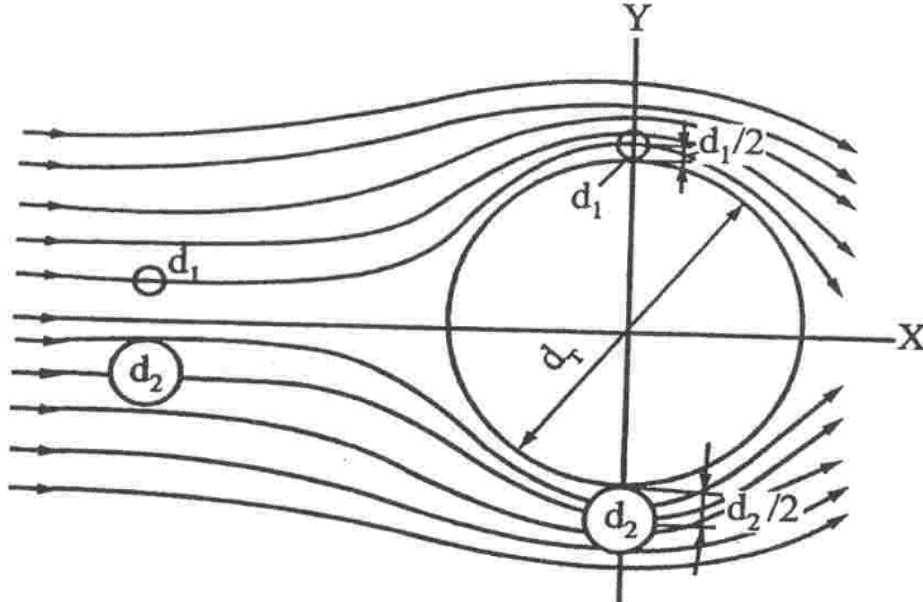


Рисунок 3 – Осаждение частиц на шаре за счет зацепления

При потенциальном обтекании шара, когда величина R столь мала, что можно пренебречь инерционными эффектами, эффективность зацепления составляет

$$\eta_R = (1 + R^2) - \frac{1}{1 + R} \approx 3 \cdot R, \quad (1.8)$$

В этом же случае для цилиндра верно соотношение

$$\eta_R = (1 + R) - \frac{1}{1 + R} \approx 2 \cdot R, \quad (1.9)$$

При обтекании шара эффективность механизма зацепления находится в пределах $2R \dots 3R$, а при обтекании цилиндра – $R \dots 2R$.

Эффективность осаждения частиц на обтекаемом теле зацеплением может быть представлена в критериальной форме. В этом случае помимо критерия Стокса следует учитывать и другой комплекс, представляющий собой отношение критериев:

$$\frac{Stk}{Re_T} = \frac{d_q^2 \cdot \rho_q}{d_T^2 \cdot \rho_T} = const, \quad (1.10)$$

Эффективность осаждения при зацеплении может быть представлена в виде

$$\eta_R = f\left(Stk; \frac{Stk}{Re_T}\right), \quad (1.11)$$

Эффект касания играет существенную роль при осаждении в фильтрах.

Осаждение частиц под действием электрических сил. Для осуществления процесса выделения частиц из газового потока под действием электрических сил необходима предварительная электрическая зарядка частиц, либо поверхности осадителя, либо разноименная зарядка и частиц, и осадителя.

Электрическая зарядка частиц может быть осуществлена тремя путями: при генерации аэрозоля, за счет диффузии свободных ионов и при коронном разряде. При применении первых двух способов число частиц, получивших положительный и отрицательный заряды, приблизительно одинаково. Коронный разряд, наоборот, приводит к зарядке частиц одним знаком.

Коронный разряд возникает в неоднородном электрическом поле между коронирующим электродом, например, тонкой проволокой и поверхностью осадительного электрода (в виде цилиндров или пластин).

В этом случае (в отличие от однородного электрического поля) удастся создать так называемый "тлеющий" разряд или "корону" без искрового перекрытия.

Так как корона переменного тока вызывает колебательные движения заряженных частиц, а корона постоянного тока обеспечивает их движение в сторону осадительной поверхности, для целей пылеулавливания необходим постоянный ток.

Отрицательная корона более устойчива, чем положительная. К тому же последняя имеет тенденцию к возникновению искрового пробоя при более низких значениях напряжения. Поэтому в пылеулавливании обычно используется отрицательная корона. Однако она приводит к образованию более высоких концентраций озона, в связи с чем в установках кондиционирования воздуха она не используется.

Зарядка частиц при коронном разряде осуществляется по двум механизмам: воздействием электрического поля (частицы бомбардируются ионами, движущимися в направлении силовых линий поля) и диффузии ионов.

Первый механизм доминирует при размерах частиц более 0,5 мкм, второй - при размерах частиц менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2 ... 0,5 мкм эффективны оба механизма, причем минимальная скорость зарядки наблюдается для частиц размером около 0,3 мкм.

Предельная величина заряда q (Кл), приобретаемого под действием электрического поля, проводимой частицей сферической формы может быть рассчитана по формуле

$$q = 3\pi d_{\text{ч}}^2 \varepsilon_0 E, \quad (1.12)$$

где ε_0 - диэлектрическая проницаемость, Ф/м ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$);

E - напряженность электрического поля, В/м.

Предельная величина заряда, приобретаемого непроводящей частицей, определяется по формуле

$$q = 3 \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2} \cdot \pi \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E, \quad (1.13)$$

где ε - относительная диэлектрическая проницаемость частицы.

При диффузионном механизме зарядки в обычно встречающихся на практике условиях (температура $T_{\text{г}} = 420 \dots 670$ К; концентрация ионов $n_{\text{и}} = 10^{14}$ ионов/м³, типичная для полей коронного разряда) величина заряда q_{D} (Кл) находится из выражения $q_{\text{D}} \approx 10^8 d_{\text{к}} e$

Таким образом, максимальная величина заряда частиц размером более 0,5 мкм пропорциональна квадрату диаметра частиц, а частиц размером меньше 0,2 мкм – диаметру частицы.

Электростатическая сила F_E (Н), действующая на заряженную частицу в электрическом поле напряженностью E , равняется $F_E = qE$.

Метод электрического осаждения частиц используется в электрофильтрах.

Суммарная эффективность улавливания частиц под воздействием различных механизмов осаждения. Обычно улавливание частиц аэрозоля осуществляется в пылеуловителе под воздействием нескольких механизмов осаждения одновременно. Поскольку отдельные механизмы осаждения взаимосвязаны, общую эффективность нельзя представить в виде суммы:

$$\eta = \eta_G + \eta_{Stk} + \eta_R + \eta_D \dots$$

Лучшее приближение достигается при допущении, что частицы, не уловленные в результате действия одного из механизмов, будут улавливаться за счет действия других. Общая эффективность осаждения в этом случае может быть описана уравнением вида

$$\eta = 1 - (1 - \eta_{Stk}) \cdot (1 - \eta_R) \cdot (1 - \eta_D) \dots, \quad (1.14)$$

Если один или два механизма играют решающую роль при улавливании частиц, то в этом конкретном случае следует рассчитывать величину η по наиболее вероятным механизмам осаждения. Остальные механизмы в этом случае будут играть второстепенную роль и ими можно пренебречь.

В том случае, когда улавливание взвешенных частиц в аппарате происходит в несколько последовательных стадий (постадийно), общая эффективность рассчитывается по формуле

$$\eta = 1 - (1 - \eta') (1 - \eta'') (1 - \eta''') \dots, \quad (1.15)$$

где η' , η'' , η''' - эффективность улавливания взвешенных капель соответственно на первой, второй, третьей стадиях.

1.6. Классификация пылеуловителей

Пылеулавливающие аппараты (рис. 4) подразделяют на сухие механические, фильтрующие, мокрые и электрические (электрофильтры).

Сухие механические пылеуловители используют гравитационный, инерционный и центробежный механизмы осаждения. Сухие пылеуловители отличаются простотой изготовления и широко используются (особенно циклоны).

Однако при улавливании мелкодисперсных пылей, а также при высокой входной запыленности газов эффективность их пылеулавливания недостаточна. Такие аппараты используют на первой ступени очистки газов.

Самостоятельную группу аппаратов сухой очистки составляют фильтрующие пылеулавливающие аппараты – **фильтры**, подразделяемые на три класса: волокнистые, тканевые и зернистые.

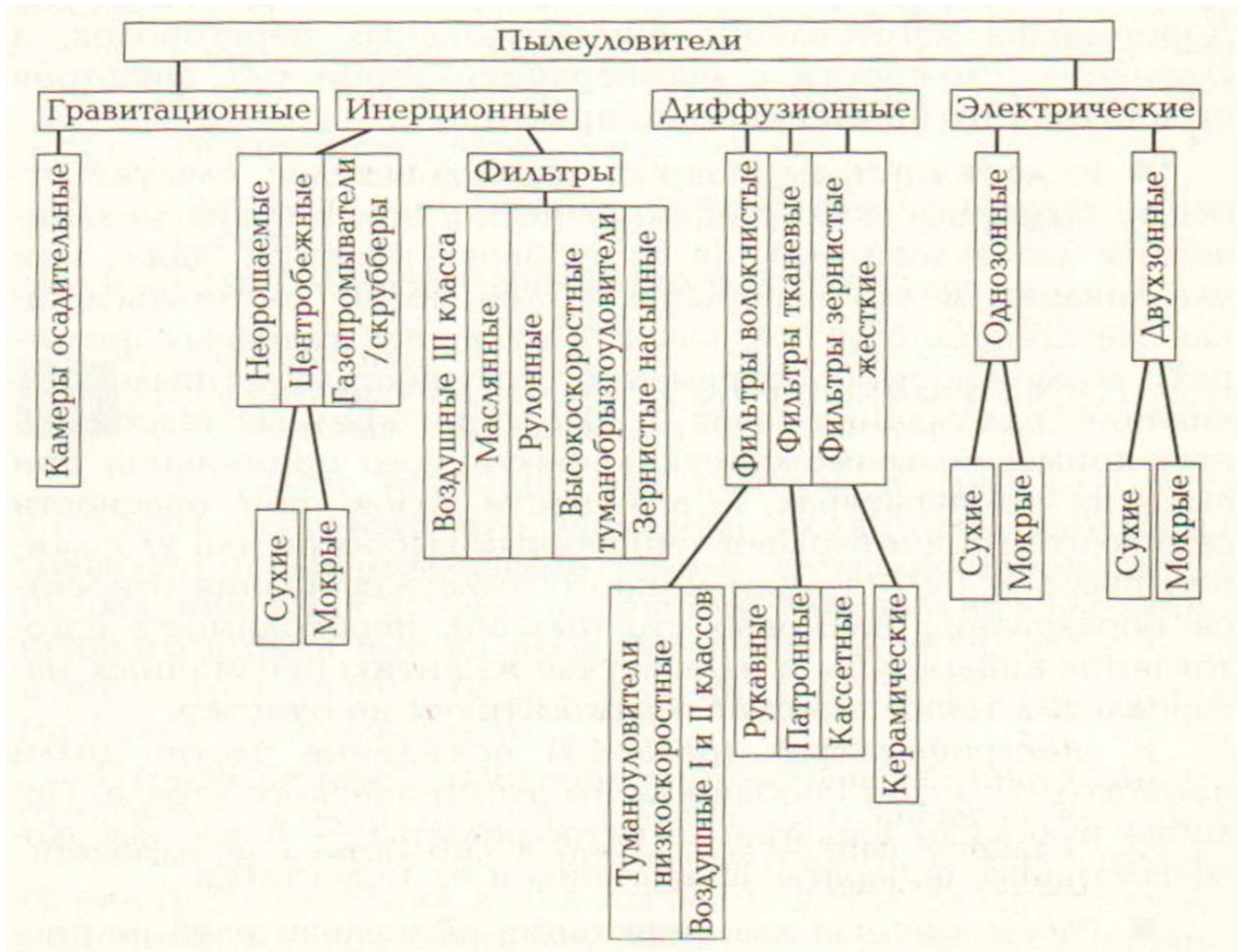


Рисунок 4 – Схема классификации пылеулавливающих аппаратов

К **волокнистым** относятся фильтры тонкой очистки, воздушные фильтры и туманоуловители, для улавливания жидких аэрозольных частиц (капель). Фильтровальные материалы в волокнистых фильтрах первых двух классов трудно регенерируются и подлежат замене.

Эти фильтры рассчитаны на работу с очень низкой начальной концентрацией пыли (первые - до 1 мг/нм^3 , вторые - менее 50 мг/нм^3) и применяются для очистки воздуха в системах приточной вентиляции и кондиционирования.

Тканевые (рукавные) фильтры – наиболее эффективные пылеулавливающие аппараты. Однако их использование связано со большими площадями для размещения и с необходимостью поддержания температуры очищаемых газов выше точки росы (для исключения конденсации паров воды на поверхности фильтровальной ткани).

Достоинством зернистых фильтров является возможность работы при высоких температурах очищаемых газов.

Недостатки зернистых фильтров, ограничивающие их применение:

- дороговизна изготовления фильтровальных перегородок из зернистых материалов;
- сложность с регенерации зернистых фильтров.

Электрофильтры. Осаждение частиц пыли происходит за счет сообщения им электрического заряда. Наряду с рукавными фильтрами электрофильтры - наиболее высокоэффективные аппараты; аналогичны и их недостатки.

Мокрые пылеуловители, в основе работы лежит контакт запыленных газов с орошающей жидкостью, при этом осаждение частиц пыли происходит на пленку жидкости, поверхность газовых пузырей и капли.

К достоинствам мокрых пылеуловителей относятся:

- более высокая степень очистки, чем в сухих механических пылеуловителях (в скрубберах Вентури даже при улавливании мелкодисперсных пылей может достигаться такая же степень очистки, как и в рукавных тканевых фильтрах);
- возможность одновременного осуществления пылеулавливания, охлаждения газов и абсорбции вредных газообразных примесей;
- возможность эффективного применения при высоких температурах и влажности газов, при опасности самовозгорания и взрывов очищаемых выбросов или уловленной пыли.

К недостаткам мокрого пылеулавливания относятся:

- образование шламовых сточных вод,
- необходимость изготовления аппаратуры в ряде случаев из антикоррозионных материалов;
- высокие энергозатраты на очистку при улавливании мелкодисперсных пылей.

1.7. Сухие механические пылеуловители

В сухих механических пылеуловителях, используются различные механизмы осаждения:

- гравитационный (пылеосадительные камеры);
- инерционный (осаждение за счет изменения направления движения газа);
- центробежный (циклоны, вихревые и т.п. пылеуловители).

Такие пылеуловители отличаются простотой изготовления и эксплуатации и достаточно широко (особенно циклоны) представлены в практике пылеулавливания. Однако эффективность улавливания в них пыли не всегда оказывается достаточной, поэтому они часто выполняют роль аппаратов предварительной очистки газов.

1.7.1. Пылеосадительные камеры

Гравитационное осаждение частиц пыли в осадительных камерах (рис. 5) происходит из горизонтально направленного газового потока.

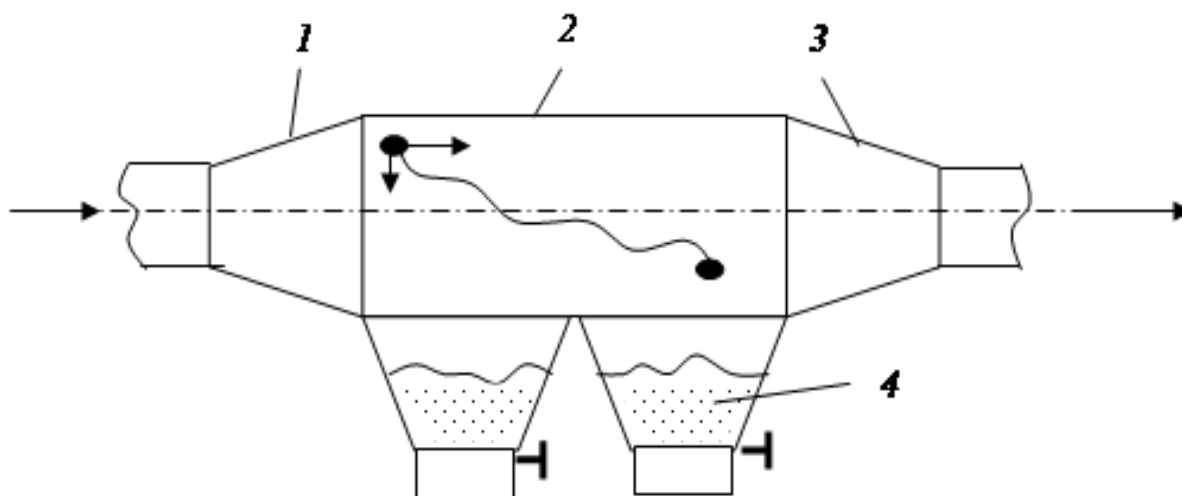


Рисунок 5 – Пылеосадительная камера: 1 – диффузор; 2 – корпус; 3 – конфузор; 4 – бункеры для сбора и отвода пыли

Достоинства осадительных камер:

- простота конструкции, низкая стоимости и небольшой расход энергии;
- возможность улавливания абразивной пыли;
- работа камер не зависит от температуры;
- пыль улавливается в сухом виде.

Недостаток – для высокой эффективности при улавливании мелкой пыли необходимы очень громоздкие камеры.

В осадительных камерах эффективно улавливаются частицы пыли размером 30-50 мкм, однако для высокодисперсной пыли с частицами менее 5 мкм, даже в камерах больших размеров, эффективность улавливания близка к нулю.

1.7.2. Инерционные пылеуловители

При резком изменении направления движения потока газа частицы пыли (под воздействием силы инерции) будут стремиться двигаться в прежнем направлении и таким образом могут быть выделены из общего потока (рис. 6).

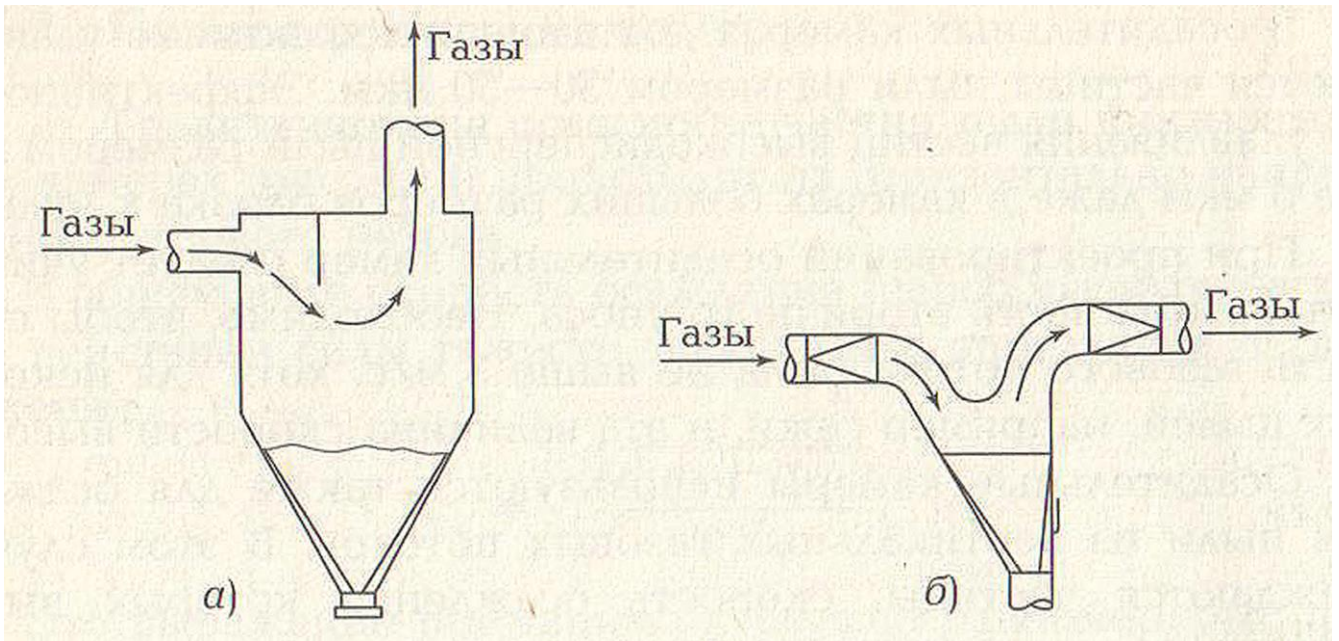


Рисунок 6 – Инерционные пылеуловители: а - камера с перегородкой; б - камера с плавным поворотом газового потока

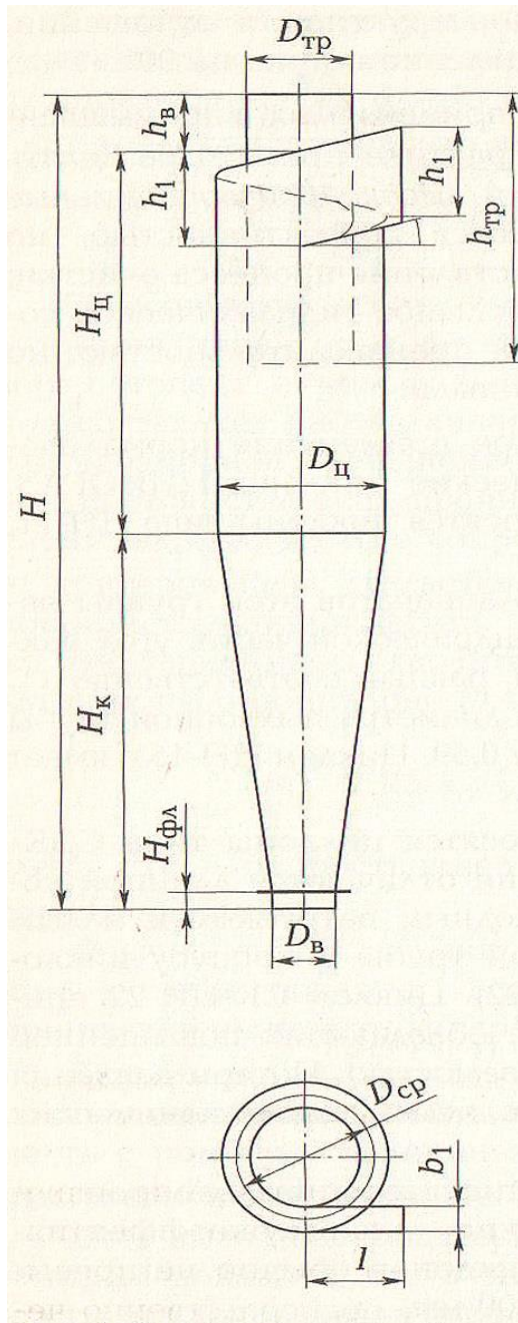
1.7.3. Циклоны

Наиболее распространенным типом сухого механического пылеуловителя являются циклонные аппараты, имеющие следующие преимущества:

- высокая производительность;
 - отсутствие движущихся частей в аппарате;
 - простота устройства, изготовления и обслуживания;
 - сравнительно небольшое сопротивление, оказываемое потоку газа;
 - почти постоянное гидравлическое сопротивление аппаратов;
 - надежное функционирование при температурах газов вплоть до 500°C без каких-либо конструктивных изменений, при более высоких температурах необходимы специальные материалы;
 - возможность улавливания абразивных материалов при защите внутренних поверхностей специальными покрытиями;
 - пыль улавливается в сухом виде;
 - аппараты успешно работают при высоких давлениях газов;
 - рост концентрации не снижает фракционную эффективность очистки.
- длительный (многие годы) срок надежной эксплуатации.

Недостатки:

- гидравлическое сопротивление высокоэффективных циклонов достигает 1250-1500 Па;
- частицы размером меньше 5 мкм улавливаются циклонами плохо.



Широкое применение получили нормализованные цилиндрические (рис. 7) и конические (рис. 8) циклоны разработки Научно-исследовательского института по промышленной и санитарной очистке газов (НИИОГАЗ).

Движение газов в циклоне носит весьма сложный характер. Циклоны различаются по способу подвода газов в аппарат. Считается, что наиболее предпочтительным по форме с учетом аэродинамики является подвод газов по спирали.

Рисунок 7 – Цилиндрический циклон конструкции НИИОГАЗ

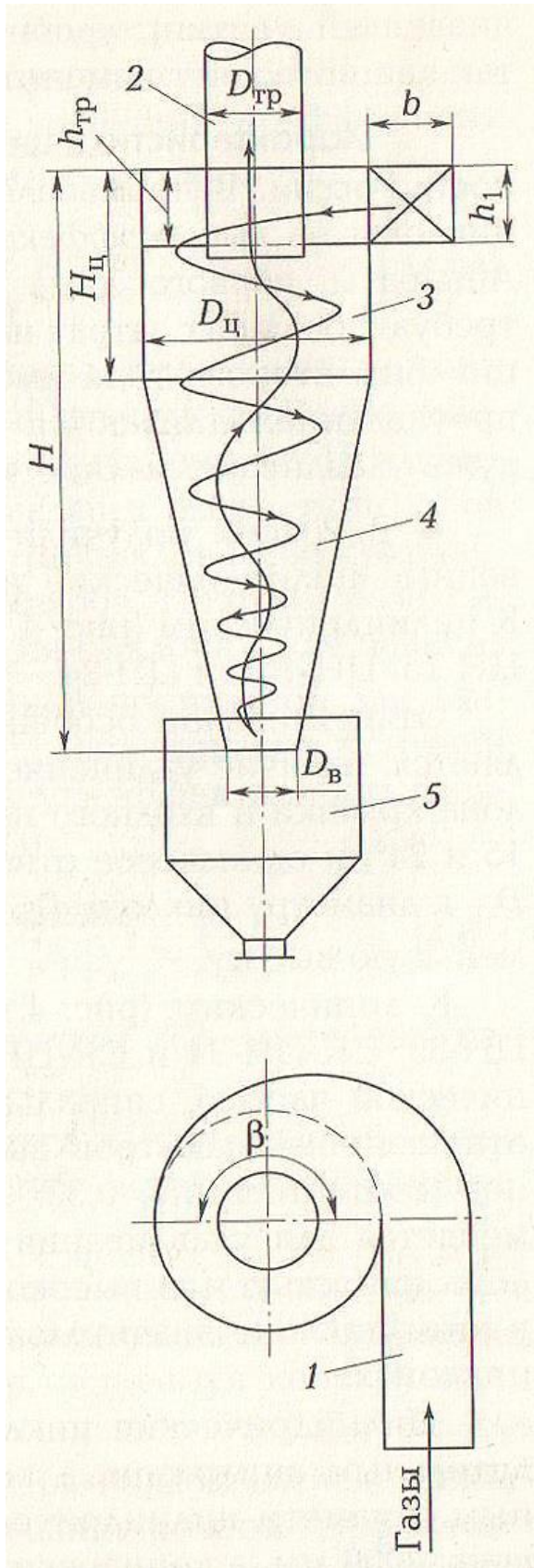
Оценить величину гидравлического сопротивления циклона $\Delta p_{\text{ц}}$ (Па) можно по общепринятой для однофазного потока формуле

$$\Delta p_{\text{ц}} = \zeta_{\text{ц}} \cdot \frac{v_{\text{г}}^2 \cdot \rho_{\text{г}}}{2}, \quad (1.16)$$

где $\zeta_{\text{ц}}$ - коэффициент гидравлического сопротивления аппарата;

$v_{\text{г}}$ - скорость газов в произвольном сечении аппарата, относительно которого рассчитана величина $\zeta_{\text{ц}}$, м/с.

Отличительными особенностями цилиндрических циклонов являются: наличие удлиненной цилиндрической части, угол наклона крышки и входного патрубка, равный соответственно 11 ... 24°, и одинаковое отношение диаметра выхлопной трубы $D_{\text{тр}}$ к диаметру циклона $D_{\text{ц}}$, равное 0,59.



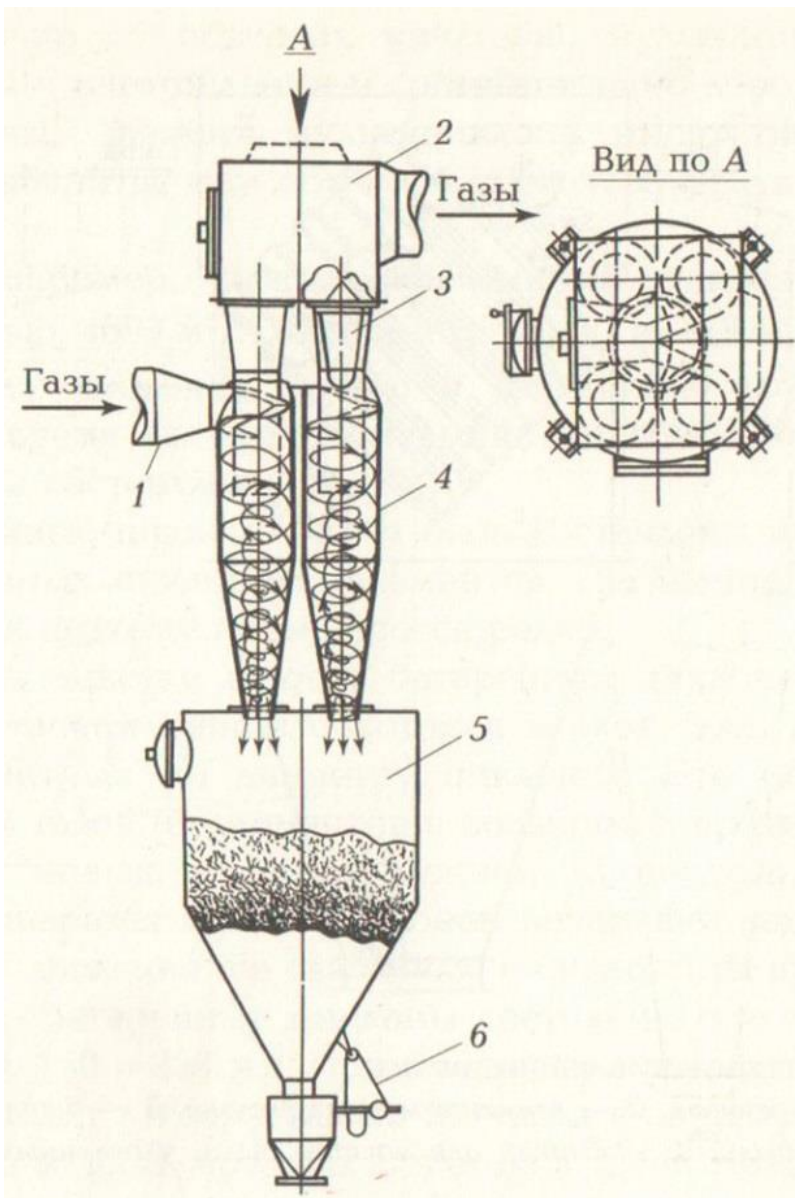
Конические циклоны (рис. 8) отличаются длинной конической частью, спиральным входным патрубком и малым отношением диаметров выхлопной трубы и корпуса циклонов.

Цилиндрические циклоны относятся к высокопроизводительным аппаратам, а конические - к высокоэффективным.

Диаметр цилиндрических циклонов обычно не превышает 2000 мм, а конических - 3000 мм

Рисунок 8 – Конический циклон конструкции НИИОГАЗ: 1- входной патрубок; 2 - патрубок выхода газа; 3 - цилиндрический корпус; 4 - конический корпус; 5 - бункер

Групповые циклоны. При больших количествах (расходах) очищаемых газов применяют групповую компоновку аппаратов (рис. 9).



Это позволяет, не увеличивая рабочий диаметр циклонного элемента (определяющий эффективность сепарации пыли), достичь большую эффективность очистки.

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется как

$$\zeta_{гц} = \zeta_{ц} + K, \quad (1.17)$$

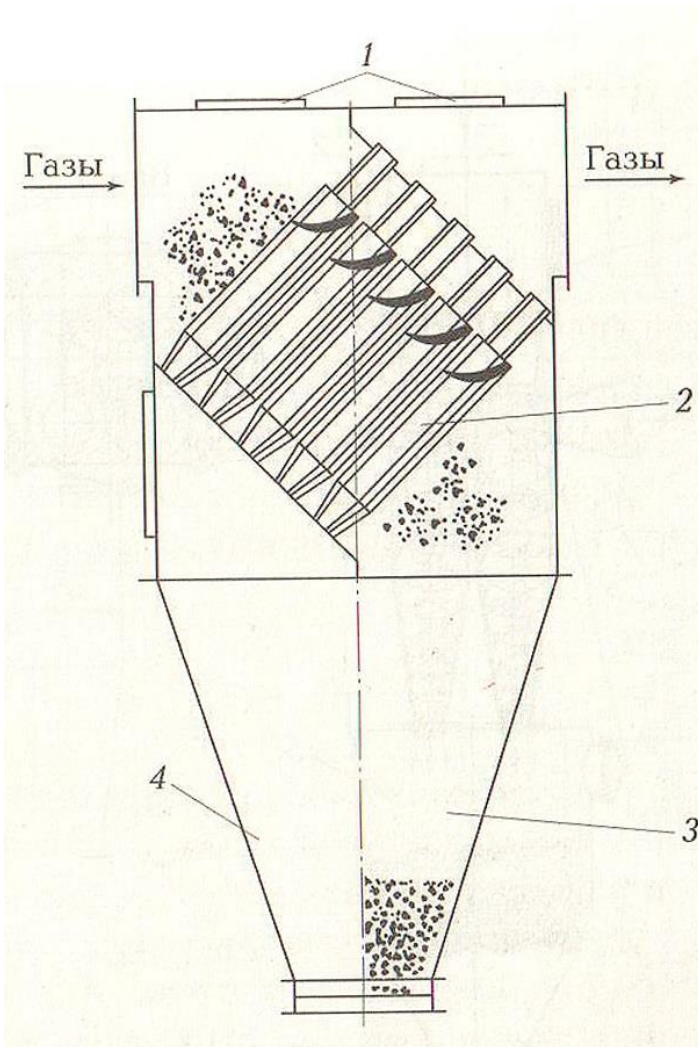
где $\zeta_{ц}$ - коэффициент гидравлического сопротивления одиночного циклона;

K - коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу

Рисунок 9 – Группа из четырех циклонов конструкции НИИОГАЗ: 1- входной патрубков; 2 - камера обеспыленных газов; 3 - кольцевой диффузор; 4 - циклонный элемент; 5 - бункер; 6 - пылевой затвор

Батарейные циклоны. Иногда в группу (батарею) объединяют несколько маленьких циклонных элементов, создавая так называемые мультициклоны (рис. 10). Снижение диаметра циклонного элемента $D_{ц}$ в этом случае преследует цель увеличения эффективности очистки, которая, как указывалось, несколько возрастает с уменьшением $D_{ц}$.

Мультициклоны более сложны в изготовлении и соответственно дороже обычных циклонов. При этом, мультициклон имеет значительно меньшие габариты, чем обычный, высокоэффективный циклон. Так, например, высокоэффективный циклон производительностью $4\ 600\ \text{м}^3/\text{ч}$ и диаметром $D_{ц} = 0,9\ \text{м}$ имеет общую высоту (включая бункер и выхлопную трубу) около $7,6\ \text{м}$, тогда, как высота мультициклона той же производительности равна около $2,4\ \text{м}$.



Обычно батарейные циклоны состоят из элементов диаметром 100, 150 и 250 мм. Применение элементов малого диаметра приводит к возрастанию их числа в аппарате, что увеличивает опасность перетоков газов между элементами. Чаще применяют элементы диаметром 250 мм.

Рисунок 10 – Мультициклон:
 1 - люк для ревизии;
 2 – циклонный элемент;
 3 - бункер для крупных частиц пыли;
 4 - бункер для, частиц пыли, уловленных в циклонных элементах

В циклонах допустимая концентрации частиц пыли связана со склонностью пыли к прилипанию к стенкам циклона, зависящей от физико-химических свойств газов и пыли, дисперсности частиц, влажности газов, материала и состояния поверхности стенок циклона.

1.7.4. Вихревые пылеуловители

Основным отличием вихревых пылеуловителей от циклонов является наличие вспомогательного закручивающего газового потока.

Запыленный газовый поток закручивается лопаточным завихрителем и движется вверх, при этом на него воздействуют струи вторичного газа (воздуха) выходящие из тангенциальных сопел. Под действием центробежных сил частицы, находящиеся в потоке газа, отбрасываются к периферии, а оттуда попадают спиральный поток вторичного газа, направляющий их вниз.

1.8. Мокрые пылеуловители (скрубберы)

Процесс мокрого пылеулавливания основан на контакте запыленного газового потока с жидкостью, которая захватывает взвешенные частицы и уносит их в виде шлама. Метод достаточно прост и весьма эффективен. В мокрых пылеуловителях чаще всего применяется вода.

Преимущества мокрого пылеулавливания.

1. Аппараты имеют сравнительно небольшую стоимость и более высокую эффективность относительно сухих механических пылеуловителей.
2. Применимость для очистки газов от частиц размером до 1,0 мкм (например, скрубберы Вентури).
3. Могут использоваться при высокой температуре и повышенной влажности газов, при опасности возгораний и взрывов очищаемых газов или улавливаемой пыли.
4. Могут одновременно с очисткой газов от взвешенных частиц улавливать парообразные и газообразные компоненты, то есть их можно использовать в качестве абсорберов.

Недостатки метода мокрого обеспыливания.

1. Улавливаемый продукт выделяется в виде шлама, то есть необходима обработка сточных вод, что удорожает процесс очистки.
2. При механическом уносе газовым потоком капель жидкости пыль может осаждаться в газопроводах, дымососах и дымовых трубах.
3. При очистке агрессивных газов аппаратуру и коммуникации необходимо защищать антикоррозионными материалами.

1.8.1. Теоретические основы мокрого пылеулавливания

Поверхность контакта фаз. При контакте запыленного газового потока с жидкостью образуется межфазная поверхность контакта (поверхность осаждения), состояние и размеры которой имеют большое значение при анализе работы и расчете эффективности мокрых пылеуловителей.

Поверхность контакта зависит от метода ввода (диспергирования) одной фазы в другую. Помимо пузырьков и капель в ряде аппаратов роль поверхности контакта играет пленка жидкости, стекающая по поверхности насадки или по внутренним стенкам аппарат.

Гидравлическое сопротивление мокрых пылеуловителей в общем виде ($\Delta p_{\text{ап}}$, Па) может быть описано уравнением

$$\Delta p_{\text{ап}} = \Delta p' + \Delta p'' + \Delta p_p + \Delta p_{\text{гу}} + \Delta p_{\text{ку}}, \quad (1.18)$$

где $\Delta p'$, $\Delta p''$ - гидравлическое сопротивление соответственно на входе и выходе из аппарата;

Δp_p - гидравлическое сопротивление зоны контакта газов с жидкостью (рабочей зоны аппарата);

$\Delta p_{\text{гу}}$ - гидравлическое сопротивление газораспределительного устройства;

$\Delta p_{\text{ку}}$ - гидравлическое сопротивление встроенного каплеуловителя.

Величины $\Delta p'$, $\Delta p''$ и $\Delta p_{\text{гв}}$ могут быть рассчитаны по общепринятым формулам, приведенным в справочниках. Гидравлическое сопротивление при двухфазном потоке выражают через перепад давления, затрачиваемый на прохождение сплошной фазы (газов) через дисперсную фазу (жидкость).

Этот перепад определяется не только сопротивлением, возникающим при движении газовой фазы, но и тем напором, который необходимо сообщить газовому потоку, чтобы компенсировать трение жидкостного потока. Гидравлическое сопротивление зоны контакта при двухфазном потоке рассчитывают по формуле

$$\Delta p_p = \zeta_{\text{г}} \cdot \frac{v_{\text{г}}^2 \cdot \rho_{\text{г}}}{2 \cdot \varphi^2} + \zeta_{\text{ж}} \cdot \frac{v_{\text{ж}}^2 \cdot \rho_{\text{ж}}}{2 \cdot (1 - \varphi)^2}, \quad (1.18)$$

где $\zeta_{\text{г}}$; $\zeta_{\text{ж}}$ - коэффициент гидравлического сопротивления соответственно для газов и жидкости;

$v_{\text{г}}$; $v_{\text{ж}}$ - линейная скорость соответственно газов и жидкости, м/с;

$\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{ж}}$ - плотность соответственно газов и жидкости, кг/м³;

φ - доля сечения аппарата, занятая газом.

1.8.2. Полые газопромыватели

В полых газопромывателях запыленные газы пропускают через завесу распыляемой жидкости. Частицы пыли захватываются каплями жидкости и осаждаются, а очищенные газы удаляются из аппарата. Наиболее распространенным аппаратом является полый форсуночный скруббер, в котором для контакта газов и капель жидкость распыливают форсунками и подают навстречу запыленному потоку газов.

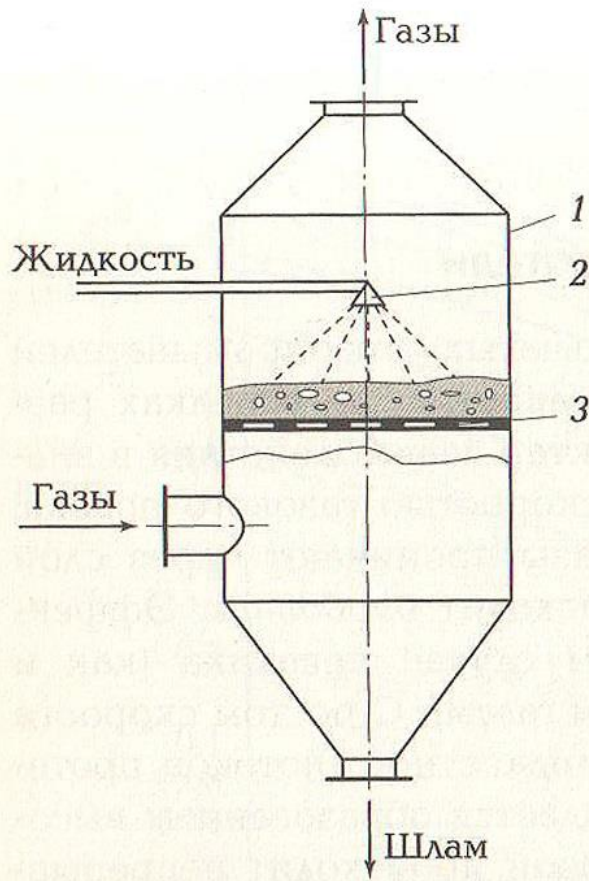
1.8.3. Насадочные газопромыватели

Насадочные газопромыватели (скрубберы) представляют собой цилиндрические аппараты, так называемые "колонны" с внутренней перфорированной горизонтальной перегородкой (опорной тарелкой), заполненные телами (насадкой) различной формы и вида. Насадочные колонны целесообразно применять при улавливании хорошо смачиваемой пыли (но не склонной к образованию твердых отложений), особенно в тех случаях, когда процессы улавливания пыли сопровождаются охлаждением газов или абсорбцией.

В пылеулавливании применяют противоточные насадочные скрубберы, а также конструкции с поперечным орошением жидкостью.

1.8.4. Тарельчатые газопромыватели

В основе работы тарельчатых газопромывателей лежит взаимодействие газов с жидкостью на тарелках различной конструкции. При малых скоростях (~1 м/с) газы проникают через слой жидкости в виде пузырей - происходит барботаж. С ростом скорости газов их взаимодействие с жидкостью протекает более интенсивно и сопровождается образованием высокотурбулизированной



пены, в которой происходит непрерывное разрушение, слияние и образование новых пузырьков. Такие газопромыватели называют пенными аппаратами.

Существует целый ряд конструкций тарельчатых (пенных) газопромывателей, например, на рис. 11 показано устройство аппарата с провальными тарелками. С учетом ограничений гидравлического сопротивления такие тарелки имеют толщину 4-6 мм, диаметр отверстий составляет 4-8 мм, а свободное сечение в пределах $0,2-0,25 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Рисунок 11 – Пенный пылеуловитель с провальной тарелкой: 1 - корпус; 2 - оросительное устройство; 3 – тарелка

1.9. Скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури)

Такие аппараты применяют для очистки газов от микронной и субмикронной пыли. Принцип действия этих аппаратов основан на интенсивном дроблении жидкости газовым потоком, движущимся с высокой скоростью (60 ... 150 м/с). Осаждению частиц пыли на каплях жидкости способствуют высокие относительные скорости между ними.

Скоростные газопромыватели (рис. 12) характеризуются высокой степенью очистки, большими гидравлическими потерями и необходимостью установки каплеуловителя.

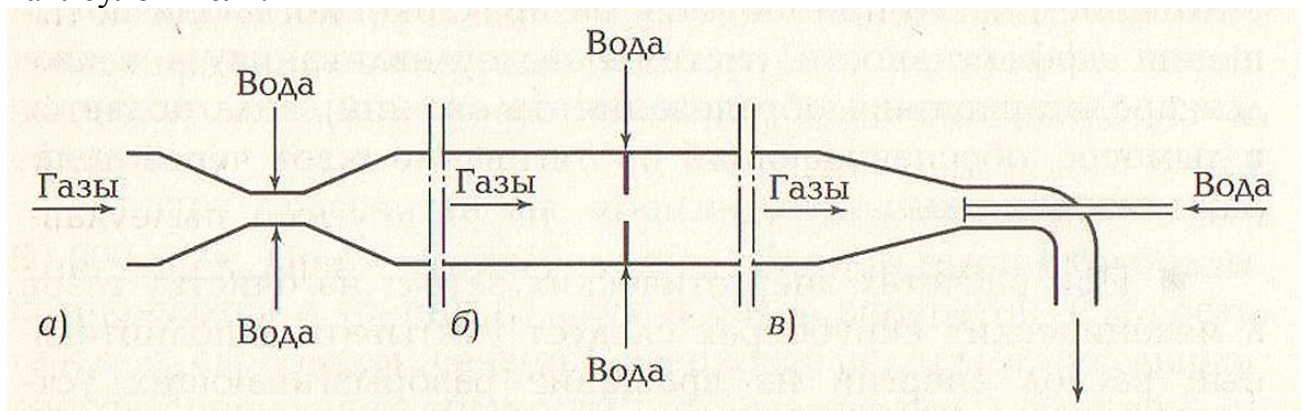


Рисунок 12 – Скоростные газопромыватели: а - Вентури; б – диафрагменный; в - с подвижным дисковым шибером

Скрубберы Вентури по конструкции отличаются сечением, длиной горловины, способом подвода орошающей жидкости, компоновкой и т.д. Иногда при больших объемах очищаемых газов используют батарейные или групповые компоновки скрубберов Вентури. Широкое применение получила труба Вентури кольцевого сечения (рис. 13), в которой вдоль оси перемещается регулирующий конус.

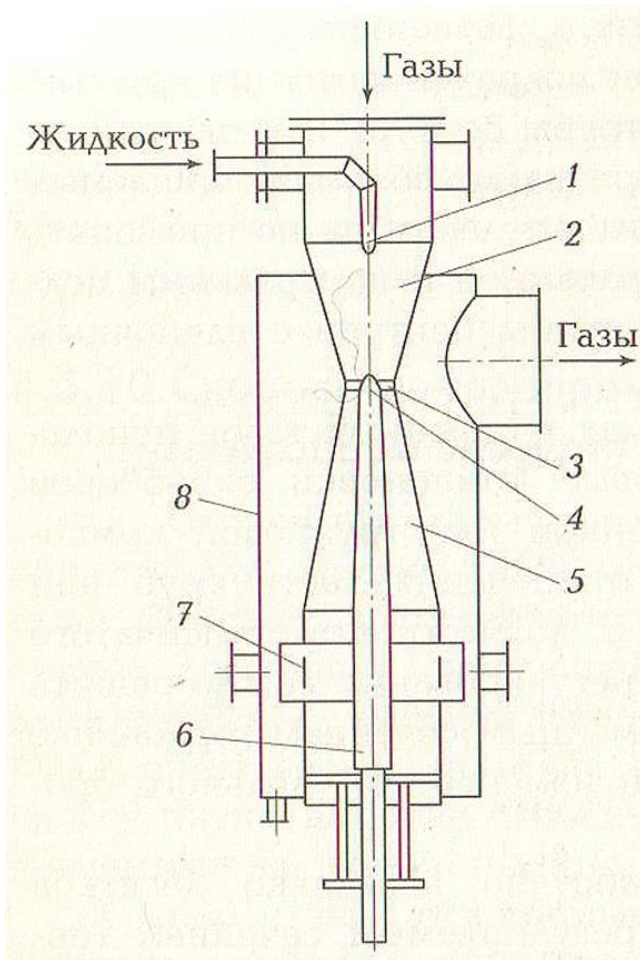


Рисунок 13 – Скруббер Вентури с регулируемым сечением кольцевой горловины:

- 1 - форсунка; 2 - конфузор;
- 3 - регулирующий конус;
- 4 - направляющий шток;
- 5 - диффузор;
- 6 - направляющий шток;
- 7 - центробежный каплеуловитель;
- 8 - корпус.

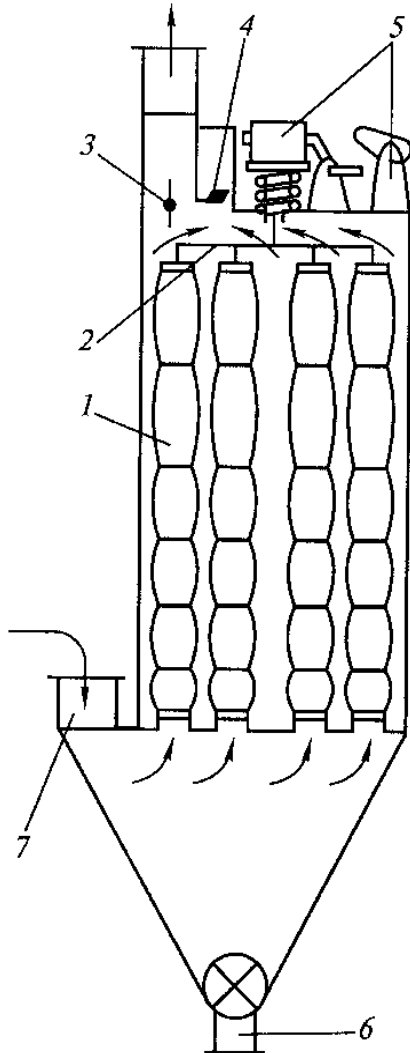
1.10. Тканевые фильтры

Тканевые фильтры содержат гибкую фильтровальную перегородку, имеющую обычно форму цилиндрических рукавов, закрепленных на трубных перегородках в корпусе, оборудованном устройствами для удаления с рукавов уловленного материала и выгрузки его из бункера. Корпус типичного многосекционного фильтра со встряхиванием и обратной продувкой разделен на герметизированные секции, в каждой из которых размещено несколько рукавов (рис. 14) .

Запыленный газ подводится в нижнюю часть каждой секции и поступает внутрь рукавов. Фильтруясь через ткань газ проходит через открытый выпускной клапан и поступает в газопровод чистого газа. Частицы пыли оседают на внутренней поверхности тканевых рукавов, вследствие чего сопротивление проходу газа, оказываемое тканью, постепенно увеличивается.

После достижения некоторого предельного значения перепада давления, фильтр (для освобождения рукавов от осевшей на них пыли) переводится на

режим регенерации. Регенерация может осуществляться обратной продувкой очищенным газом (воздухом), который через открытый продувочный клапан (при закрытом выпускном) направляет внутрь секции. При прохождении газа через ткань рукава в обратном направлении слой пыли разрушается, она падает в бункер и удаляется выгрузным устройством. Для повышения эффективности регенерации рукава одновременно встряхивают. Секции фильтра переводят на регенерацию по очереди.



регенерации рукава одновременно встряхивают. Секции фильтра переводят на регенерацию по очереди.

В тканевых фильтрах применяют материалы двух типов: обычные ткани, изготавливаемые на ткацких станках, и войлоки (фетры), получаемые механическим перепутыванием волокон или иглопробивным методом.

Рисунок 14 – Схема рукавного фильтра с механическим встряхиванием и с обратной продувкой:

- 1 – тканевые рукава;
- 2 – устройство подвешивания рукавов;
- 3 – регулирующий шибер;
- 4 – клапан обратной продувки;
- 5 – механизм встряхивания;
- 6 – механизм отвода уловленной пыли;
- 7 – патрубок ввода газа на очистку

Осаждение частиц пыли в начальный период работы фильтра за счет механизмов касания, инерции, диффузии происходит на волокнах, расположенных на поверхности нитей, а также в ворсе.

Эффективность очистки тонкой тканью после регенерации резко уменьшается по сравнению с запыленной, в то время как различие в эффективности очистки при применении более толстых объемных тканей значительно меньше. Когда в периоды между регенерациями на ткани образуется сплошной слой уловленной пыли, тогда достигается весьма высокая эффективность улавливания (даже субмикронных частиц).

Таким образом, ткань выполняет роль несущей поверхности, то есть служит основой для формирования и удержания фильтрующего пылевого слоя.

Способность большинства частиц с размерами менее 5 мкм коагулировать с образованием прочных агрегатов в потоке газа, в объеме ткани и на ее поверхности дает возможность использовать даже неплотные ткани качестве эффективной фильтрующей среды. В тканевых фильтрах целесообразно использовать небольшие скорости фильтрации, обычно 0,5 ... 2,0 см/с. При большей скорости происходит чрезмерное уплотнение пылевого слоя, сопровождающееся резким увеличением его сопротивления.

1.11. Электрическая очистка газов

1.11.1. Основные положения

Широкое применение электрофильтров для улавливания твердых и жидких частиц обусловлено их универсальностью и высокой степенью очистки газов при сравнительно низких эксплуатационных и энерго затратах (обычно 0,36-1,8 МДж электроэнергии на 1000 м³ газа). Установки электрической очистки газов работают с эффективностью до 99%, и даже до 99,9%, причем улавливают частицы любых размеров, включая и субмикронные, при концентрации частиц в газе до 50 г/м³ (иногда и выше). Гидравлическое сопротивление электрофильтра обычно не превышает 100-150 Па, то есть минимально по сравнению с другими газоочистными аппаратами. Преимущественной областью применения электрофильтров является тонкая очистка больших объемов газа.

При этом капитальные затраты на сооружение электрофильтров высоки так как они металлоемки и занимают большую площадь, а для электропитания снабжаются специальными повысительно-выпрямительными агрегатами.

Недостатком является высокая чувствительность процесса к отклонениям от заданного технологического режима и к незначительным механическим дефектам внутреннего оборудования.

Сущность процесса электрической очистки газов в электрофильтрах заключается в том, что аэрозоль (газ со взвешенными частицами), проходит через систему заземленных осадительных электродов и размещенных на некотором расстоянии коронирующих электродов, к которым подводится постоянный (выпрямленный) электрический ток высокого напряжения (рис. 15).

При достаточно большом напряжении в межэлектродном промежутке у поверхности коронирующего электрода происходит интенсивная ионизация газа, сопровождающаяся возникновением коронного разряда (короны), который на весь межэлектродный промежуток не распространяется и затухает по мере уменьшения напряженности электрического поля в направлении осадительного электрода.

Газовые ионы различной полярности, образующиеся в зоне короны, под действием сил электрического поля движутся к разноименным электродам, вследствие чего в межэлектродном промежутке возникает электрический ток, называемый *током короны*. Улавливаемые частицы из-за адсорбции на их поверхности ионов приобретают электрический заряд и под влиянием сил

электрического поля начинают двигаться в межэлектродном промежутке к электродам, осаждаясь на них.

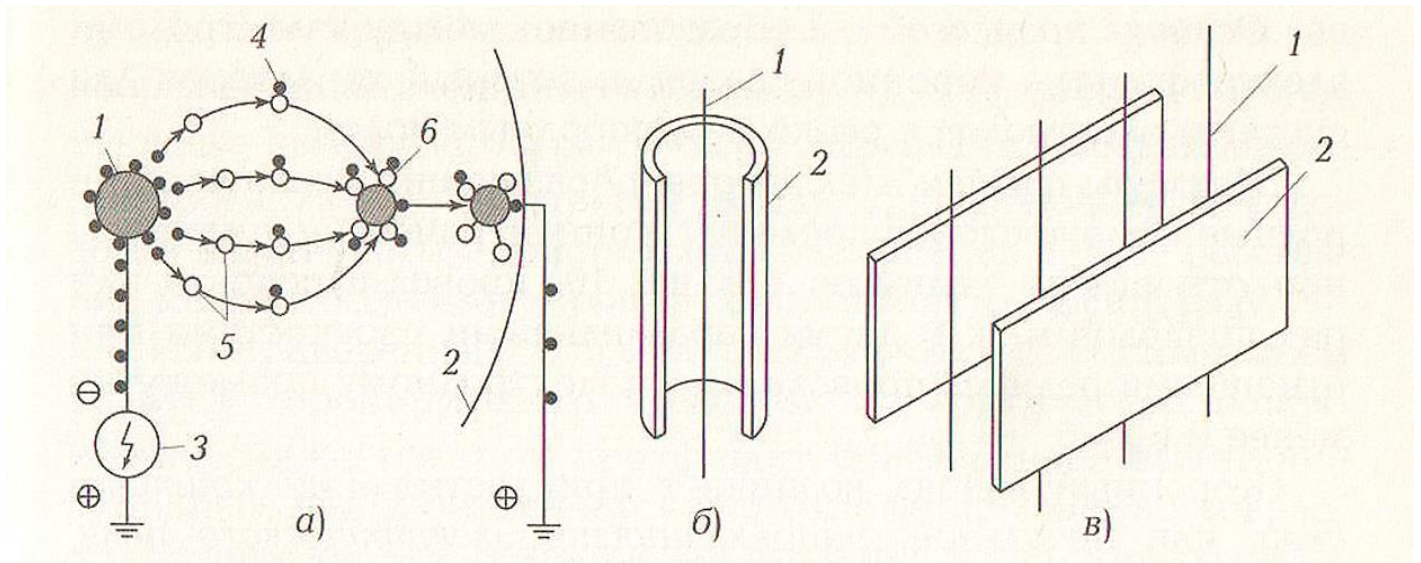


Рисунок 15 – Принципиальные схемы работы электрофильтров:

а – процесс электрического осаждения частиц; б – электрофильтр с трубчатыми электродами; в – электрофильтр с пластинчатыми электродами; 1 - коронирующий электрод; 2 - осадительный электрод; 3 - агрегат электропитания; 4 - электрон; 5 - молекула газа; 6 - осаждаемая частица

Основное количество частиц осаждается на развитой поверхности осадительных электродов, малая их часть попадает на коронирующие электроды. По мере накопления на электродах осажденные частицы удаляются встряхиванием или промывкой электродов.

Коронный разряд возникает при достижении определенной напряженности электрического поля, называемой критической или начальной, которая, например, для воздуха при атмосферном давлении и температуре 20°C составляет около 15 кВ/см. Критической напряженности электрического поля соответствует критическое напряжение или критическая разность потенциалов, подводимых к электродам.

Критическое напряжение определяет начало возникновения коронного разряда в электрофильтре. С увеличением напряжения выше критического возрастает напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве и соответственно увеличивается ток короны, что интенсифицирует процессы зарядки и осаждения частиц, то есть возрастает эффективность их улавливания. Однако напряжение на электродах не может быть поднято выше значения, при котором возникают искровые или дуговые электрические разряды, т.е. наступает пробой межэлектродного промежутка.

С уменьшением радиуса коронирующего электрода критическое напряжение снижается, то есть происходит более раннее зажигание короны, чем и объясняется использование тонкой проволоки, острых кромок и иголок для создания коронного разряда.

Обычно в электрофильтрах применяют проволочные коронирующие электроды с радиусом 0,001 ... 0,002 м и трубчатые осадительные электроды с радиусом 0,1 ... 0,15 м, тогда величина критического напряжения находится в пределах 20 ... 40 кВ.

Для электрической очистки газов используется, как правило, отрицательная корона, т.е. на коронирующий электрод подается отрицательное напряжение выпрямленного тока. Это объясняется большей подвижностью отрицательных ионов по сравнению с положительными, а также тем, что при отрицательной короне удастся поддерживать более высокое напряжение без искрового пробоя между электродами.

Применяются два вида электрофильтров:

- *однозонные*, в которых зарядка и осаждение осуществляются в одной зоне;
- *двухзонные*, где процессы проводятся в разделённых зонах (рис. 16) – ионизаторе и осадителе (преимущественно используются для тонкой очистки воздуха в системах кондиционирования и вентиляции).

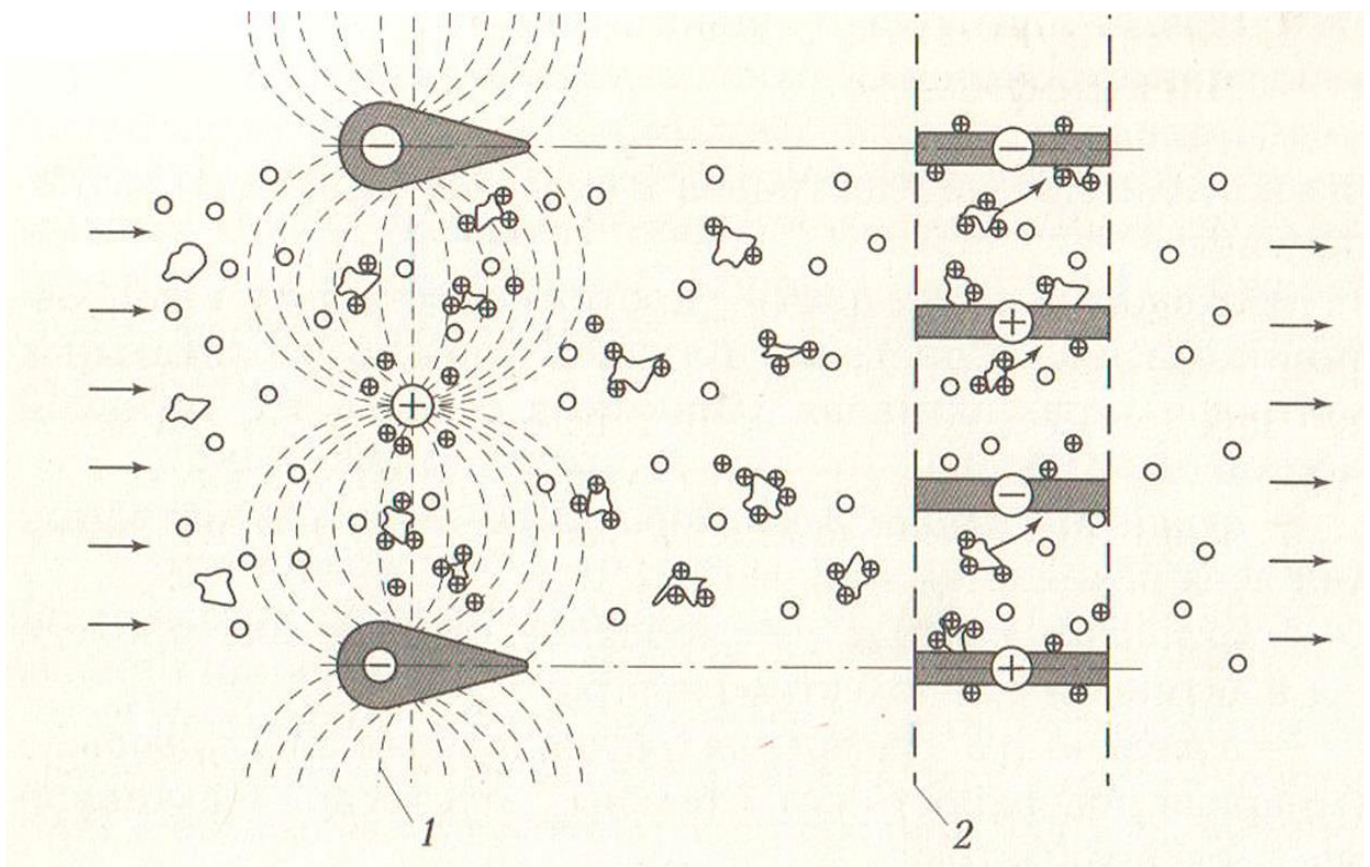


Рисунок 16 – Двухзонный электрофильтр: 1 - ионизатор; 2 - осадитель

Активная зона электрофильтра разделяется на несколько электрических полей, через которые очищаемый газ проходит последовательно. Системы коронирующих электродов каждого поля электрически изолированы друг от друга и имеют самостоятельный токоподвод. В зависимости от количества полей электрофильтры бывают однополюсными, двухполюсными и многополюсными.

1.11.2. Конструктивные особенности электрофильтров

по способу удаления частиц, осажденных на электродах, электрофильтры разделяются на сухие и мокрые.

В сухих электрофильтрах обычно улавливаются твердые частицы, которые удаляются с электродов встряхиванием.

Очищаемый в сухом электрофильтре газ должен иметь температуру, превышающую точку росы, во избежание конденсации влаги, появление которой может вызвать образование трудноудаляемых отложений на электродах и коррозию аппарата.

В мокрых электрофильтрах могут улавливаться твердые частицы, смываемые с поверхности электродов орошающей жидкостью (обычно водой).

Очищаемый в электрофильтре газ может проходить через активную зону в вертикальном или горизонтальном направлении, и, соответственно, электрофильтры могут быть вертикальными или горизонтальными.

Наиболее распространенным типом сухих электрофильтров является многополюсный горизонтальный электрофильтр. Наличие нескольких последовательных полей в электрофильтре улучшает условия улавливания частиц из-за возможности дифференциации электрического режима и режима встряхивания электродов по полям.

Системы осадительных электродов электрофильтров выполняются двух типов: с пластинчатыми электродами и с трубчатыми электродами.

В сухих электрофильтрах электроды должны хорошо отряхиваться и обладать достаточной механической прочностью, чтобы выдерживать ударные нагрузки при встряхивании и работать в условиях повышенных температур.

1.11.3. Системы сухой очистки (встряхивания) электродов

Встряхивание осадительных и коронирующих электродов сухих электрофильтров может производиться несколькими способами.

Встряхивание соударением осуществляется отводом эксцентрично подвешенных электродов кулачковым механизмом в горизонтальном направлении с последующим резким сбросом, в результате чего происходит столкновение электродов между собой

Ударно-молотковое встряхивание является наиболее распространенным способом встряхивания осадительных и коронирующих электродов. Механизм снабжен медленно вращающимся валом, привод которого расположен вне электрофильтра. При вращении вала бойки молотков, дойдя до определенного

положения, падают под действием силы собственного веса и производят удар по наковальням электродов.

1.11.4. Системы мокрой очистки (промывки) электрофильтров

Для удаления осажденных на электродах уловленных твердых частиц в мокрых электрофильтрах применяется периодическая и непрерывная промывка.

Периодическая промывка активной зоны электрофильтра осуществляется подачей большого количества жидкости в течение короткого срока (до 15 мин.). На время промывки однополюсных электрофильтров отключают промываемую секцию или весь электрофильтр.

В многополюсных мокрых электрофильтрах промывается только одно из полей, поэтому через такой электрофильтр можно продолжать пропуск газа при некотором ухудшении эффективности очистки.

Периодическая промывка применяется только, если осажденная на электродах пыль не склонна к схватыванию (цементации) или хорошо растворяется промывной жидкостью.

Непрерывная промывка осуществляется подачей на электроды минимально необходимого количества жидкости для создания на внутренней поверхности трубы электрода пленки, непрерывно смывающей осажденную пыль. Непрерывная пленочная промывка применяется обычно в трубчатых электрофильтрах и обеспечивает смыв осадка только с осадительных электродов.

1.11.5. Вспомогательное оборудование электрофильтров

Системы электрической изоляции электрофильтров.

Важнейшим условием, обеспечивающим надежность изоляторов, является поддержание температуры их поверхности, для исключения конденсации паров воды, присутствие которой на поверхности изолятора приводит к пробоям.

Газораспределительные устройства обеспечивают равномерное распределение газа по сечению аппарата, а перегородки предотвращают перетоки газа через так называемые "неактивные зоны" помимо активной, что важно для эффективной работы электрофильтра.

Создание равномерного газораспределения в электрофильтре осложняется тем, что аппарат разделен на большое количество параллельных газовых каналов. Для распределения газа по активному сечению электрофильтра применяются газораспределительные решетки, направляющие лопатки различного типа и другие устройства.

Агрегаты электрического питания являются неотъемлемой частью установок очистки газов, они снабжают электрофильтры выпрямленным током высокого напряжения (60 ... 80 кВ).

2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа - вид аттестационной работы, являющейся важной частью обучения по курсу рассматриваемой дисциплины.

Целью курсовой работы является приобретение навыков студентами в решении практических задач дисциплины в рамках заданной темы.

Для достижения поставленной цели в процессе выполнения курсовой работы **решаются следующие задачи:**

1. Систематизация и расширение теоретических и практических знаний студента по дисциплине;

2. Обучение студента:

- самостоятельной работе с учебно-методической и нормативно-технической литературой;

- использованию вычислительной техники в процессе проведения расчетов и при проектировании;

- оформлению принятых решений в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

3. ЗАДАНИЕ ПО КУРСОВОЙ РАБОТЕ

В процессе выполнения курсовой работы студенту следует выполнить следующие задания:

2.1. Изучить конструкции современных аппаратов (в том числе электрофильтров) для очистки газов от аэрозольных загрязняющих веществ.

2.2. Выбрать (по литературным и иным источникам научно-технической информации) и привести (в виде графиков, таблиц, рисунков, фотографий и прочих иллюстраций) характерные примеры современных электрофильтров:

- их конструкции;

- условий и особенностей их эксплуатации;

- достигаемых результатов по очистке аэрозолей.

2.3. Выполнить расчет горизонтального электрофильтра по заданным преподавателем вариантам исходным данным (варианты приведены в приложениях 3 и 4).

2.4. Оформить результаты в виде пояснительной записки, распечатанной на бумаге формата А4, и в виде электронной презентации в программе Power Point. Записать пояснительную записку и презентацию на электронный носитель информации, например, CD-диск.

4. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

При выполнении курсовой работы должны быть тщательно проработаны и технически правильно представлены все разделы в пояснительной записке.

Состав пояснительной записки.

1. Титульный лист.
2. Задание на курсовой проект.
3. Содержание.
4. Основная часть:
 - краткая теоретическая часть (основные характеристики современных электрофильтров, примеры);
 - расчеты по заданию.
5. Заключение (подведение итогов, полученные результаты, выводы,).
6. Список использованной литературы.
7. Приложение: распечатка презентации (10 - 15 слайдов на 3 – 4 стр.).

Титульный лист является первой страницей формата А4, не нумеруется, оформляется по форме, представленной в Приложении 2.

Задание на курсовую работу оформляется по форме, представленной в Приложении 1, в которой преподавателем проставляются номера вариантов исходных данных задания. По этим номерам из таблицы в Приложении 3 определяются заданный состав газа (аэрозоля, пыли), направляемого на очистку, а также из таблицы Приложения 4 определяются заданные технические характеристики фильтра для расчёта. В «Задании» также формулируются общие требования к курсовой работе.

Основная теоретическая часть:

- методы очистки от аэрозолей;
- основные характеристики современных электрофильтров;
- примеры.

Основная расчетная часть:

- предваряется описанием заданных исходных данных в соответствии с полученным номером задания;
- содержит промежуточные расчеты по изложенной далее методике;
- завершается расчетом величины общей степени очистки отходящего газа от аэрозоля (пыли – смеси твердых частиц).

Заключение – приводится обобщенная оценка полученных результатов расчетов, намечаются направления возможного повышения общей степени очистки и/ или производительности фильтра.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008 [11] как список ссылок на литературу и информационно-нормативные материалы, использованные студентом при работе над курсовой работой. В тексте пояснительной записки на каждую позицию списка

литературы обязательно должно быть приведено, как минимум, по одной ссылке. Ссылка представляет собой число, соответствующее номеру литературного источника в списке. Это число заключается в квадратные скобки, например, так "[7]", или так, как это сделано в других местах данного учебно-методического пособия.

Приложение содержит распечатку слайдов презентации по теме, согласованной с преподавателем, распечатанные по 4 слайда на 1 стр.

Возможные темы презентации:

- основные технические характеристики пыле-газоочистного оборудования;
- оборудование для очистки отходящих технологических газов от газо-парообразных примесей;
- оборудование для очистки отходящих технологических газов от аэрозоля;
- оборудование для очистки отходящих технологических газов от пыли;
- электрофильтры (виды, особенности конструкции, преимущества и недостатки);
- циклоны (виды, особенности конструкции, преимущества и недостатки);
- рукавные фильтры (виды, особенности конструкции, преимущества и недостатки);
- мокрая очистка газов от пыли (конструкция аппаратов, преимущества и недостатки).

Пояснительная записка должна быть оформлена с использованием стандартной программы *Microsoft Word* (документ *Word*) и напечатана на листах формата А4 с полями 3 см снизу и по 2 см со всех других сторон. Объём 17-23 страниц. Текст должен иметь размер шрифта (кегель) 14 пт, межстрочный интервал – полуторный, отступ – 1,25 см.

К пояснительной записке прилагается электронный носитель информации (например, CD-диск), с записью текста записки и соответствующей презентации.

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Работа над курсовой работой осуществляется студентом по календарному плану в соответствии с заданием на курсовую работу и графиком самостоятельной работы студента. Задание на курсовую работу выдает преподаватель-консультант, назначаемый на кафедре БПиЖД.

Для развития самостоятельности студентов в работе, справочные данные, необходимые для выполнения курсовой работы, могут быть заданы не полностью. Поэтому в начале выполнения работы студенту следует провести анализ технического задания и уточнить у преподавателя источники получения дополнительной информации для расчётов. Такими источниками могут быть ГОСТы, ОСТы, инженерные справочники, справочники по свойствам веществ,

нормативно-технические материалы, инструкции, технические характеристики выпускаемой аппаратуры и тому подобное.

Консультации по разделам курсовой работе осуществляются на кафедре БПиЖД в соответствии с графиком. Преподаватель-консультант устанавливает часы консультаций для студента на весь период выполнения курсовой работы. На консультациях обсуждаются ход и результаты расчетов, формулируются замечания, даются рекомендации, советы, пожелания по работе.

Выполнение курсовой работы содержит следующие этапы:

- получение задания и согласование с преподавателем исходных данных курсовой работы; оформление бланка задания (форму см. в Приложении 1);
- формирование информационной базы по теме и исходным данным;
- расчеты по полученному в задании варианту курсовой работы;
- согласование с преподавателем темы и направленности презентации;
- оформление материалов курсовой работы в виде пояснительной записки и презентации;

Выполненная курсовая работа подлежит защите комиссии из 2-х преподавателей кафедры БПиЖД.

В процессе защиты, студент в течение 5 - 8 минут устного сообщения докладывает о результатах выполненного задания, отмечая из числа полученных решений наиболее теоретически и практически значимые. Представляет в электронном и распечатанном видах презентацию, включающую 10 - 15 слайдов. Электронная версия выполняется по стандартной программе *Microsoft PowerPoint* (версия 97 – 2003).

6. СРОК И ПОРЯДОК СДАЧИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ, ЕЁ ОЦЕНКА

Срок сдачи (защиты) курсовой работы определяется графиком самостоятельной работы студентов.

Работа должна быть защищена до начала зачетно-экзаменационной сессии.

Защита курсовой работы проводится по мере её завершения в часы консультаций по курсовому проектированию, установленные преподавателем. Пояснительная записка завершённой курсовой работы подписывается "к защите" преподавателем, консультировавшим студента.

Защита студентами курсовых работ проводится перед комиссией, назначаемой кафедрой, с участием преподавателя-консультанта работы. Результат положительной защиты с соответствующей дифференцированной оценкой записывается в зачётно-экзаменационную ведомость и зачетную книжку. Ведомость подписывается членами комиссии по каждому студенту отдельно.

Незащищенная до начала экзаменационной сессии курсовая работа считается невыполненной в установленный срок. Зачётно-экзаменационная ведомость сдается в деканат до окончания зачетной недели.

Прочие правила проведения защиты курсовой работы определяются действующими в МГТУ ГА положениями о правилах и порядке защиты курсовых работ и проектов.

При успешной защите студенту в зачетную книжку и зачетно-экзаменационную ведомость проставляется оценка "отлично", "хорошо", "удовлетворительно". Оценка "неудовлетворительно" проставляется только в зачетно-экзаменационную ведомость.

Защита включает в себя:

- заслушивание устного сообщения студента о результатах работы, расчётах, подготовленной презентации;
- анализ комиссией выполненных расчётов и подготовленной презентации;
- общую беседу студента с комиссией по содержанию работы;
- дискуссию по проблемам, затрагиваемым в работе;
- ответы студента на вопросы, предлагаемые комиссией на тему разработки и возможные смежные темы, выявившиеся из ответов при беседе.

Оценка "отлично" выставляется, если:

- работа полностью соответствует требованиям по объёму, содержанию и качеству оформления;
- все расчёты выполнены правильно;
- даны обоснованные ответы на вопросы членов комиссии;
- ответы отличаются четкостью, мысли излагаются в необходимой логической последовательности;
- показано овладение рекомендованной литературой по тематике работы;
- в процессе защиты студент проявил полное понимание сути и знание теоретических основ технологических процессов очистки аэрозолей, в целом, и применительно с рассчитанному аппарату, в частности.

Оценка "хорошо" выставляется, если:

- работа, в основном, соответствует требованиям по объёму, содержанию и качеству оформления;
- расчёты выполнены с негрубыми ошибками;
- даны хорошие ответы на вопросы членов комиссии;
- ответы относительно четкие, излагаются с негрубыми отклонениями в логической последовательности;
- показано в целом знание рекомендованной литературой с неточностями;
- в процессе защиты студент проявил общее понимание сути и знание теоретических основ технологических процессов очистки аэрозолей, в целом, и применительно с рассчитанному аппарату, в частности, однако имелись отдельные неточности в ответах.

Оценка "удовлетворительно" выставляется, если:

- работа, в основном, соответствует требованиям по объёму, содержанию и качеству оформления, при этом имеются отдельные серьезные отклонения;
- расчёты выполнены с отдельными ошибками в промежуточных действиях;

- даны в целом удовлетворительные ответы на вопросы членов комиссии;
- ответы не четкие, не логичные;
- показано недостаточное знание рекомендованной литературой;
- в процессе защиты студент не проявил знание ряда теоретических основ технологических процессов очистки аэрозолей, в целом, и применительно с рассчитанному аппарату, в частности; имелись ошибки в ответах.

Оценка "неудовлетворительно" выставляется в случаях, когда не выполнены условия, позволяющие поставить оценку "удовлетворительно".

Примечание. Выполнение расчётов с использованием стандартной программы расчётов *Microsoft Excel* повышает качество работы и может быть использовано в качестве дополнительного основания для повышения оценки работы студента.

7. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ РАБОТЫ

Шрифт

Основной текст: шрифт *Times New Roman* имеет размер (кегель) 14 пт, отступ – 1,25 см, выравнивание текста – по ширине, начертание шрифта – обычный.

Заголовки: шрифт *Times New Roman* имеет размер (кегель) 16 пт, отступ – нет, выравнивание текста – по центру, начертание шрифта – полужирный.

Поля страницы формата А4

Слева, справа и сверху – 20 мм. Снизу – 30 мм.

Введение, заключение, список литературы, содержание, все главы основной части начинаются с новой страницы. Параграфы с новой страницы не начинаются.

Нумерация страниц, таблиц, рисунков

Страницы нумеруются снизу в центре листа. Первая страница не нумеруется.

Номера таблиц ставятся слева до заголовка следующим образом, в соответствии с ГОСТ 2.105-95 [10]:

Первая цифра номера таблицы соответствует номеру главы, вторая - порядковому номеру таблицы в главе. Нумерация таблиц в каждой главе начинается заново. Заголовок таблицы печатается полужирным шрифтом с размером (кеглем) 12 пт, выравнивание по левому краю.

Пример:

«Таблица 2.3 Сравнение для очистки от аэрозолей»

Формирование списка использованной литературы

Список литературы должен быть сформирован в соответствии с ГОСТ 2.105-95 [10]. Список литературы составляется в порядке упоминания тех или иных источников в тексте работы и размещается в конце работы перед приложениями. Весь перечень литературы должен нумероваться по порядку.

Сведения о книгах должны содержать: фамилию и инициалы автора, заглавие книги, место издания, издательство, год издания. При наличии трёх и более авторов допускается указывать фамилию и инициалы только первого из них со словами «и др.». Наименование места издания надо приводить полностью в именительном падеже: допускается сокращение издания только двух городов: Москва (- М.:) и Санкт-Петербург (- СПб.:).

Пример: если книга написана под редакцией, пишется следующим образом:

«15. Экономика предприятия / Под ред. Иванова А.А. - М.: Интел-Пресс, 2003. – 299 с.»

Ссылки на информационные источники ставятся в тексте пояснительной записки в квадратных скобках [...] – в порядке упоминания.

Интернет – источники указываются в общем списке использованных источников следующим образом.

Пример:

«17. Об использовании ...: Приказ Минприроды России от ... № ... / Архив документов по производственной безопасности. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tehdoc.ru/typereprotlabour.htm> (дата обращения 23.05.2019).»

8. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Условные обозначения, используемые в расчетах:

β - относительная плотность газов;

E - напряженность электрического поля (В/м);

E_0 - критическая напряженность электрического поля (В/м);

U_{cp} – напряжение - среднее значение, (В);

U_0 - критическая напряженность короны (В);

i_0 - линейная плотность тока короны (мА/м);

ν - коэффициент, зависящий от взаиморасположения электродов;

ε_0 - константа ($1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9$);

k - подвижность ионов [(м/сек) / (В/м) или м² / (В·сек)];

t - температура по шкале Цельсия (°С);

T - температура по шкале Кельвина ($T = 273 + t$);

A - константа (0,815 ... 1,63);

B - абсолютное атмосферное давление при нормальных условиях (н.у.);

C - константа вязкости газа (при н. у. – 0° С и 0,1013 МН/м²);

Примечание. Н. у. – *нормальные условия* — физические условия, определяемые давлением равным $B = 760$ мм рт. ст. = 0,1013 МПа = 1,013 • 10⁵ Н/ м² (нормальная атмосфера) и температурой 273,15 К (0 °С), при которых молярный объем газа $V_0 = 2,2414 \cdot 10^{-2}$ м³ /моль $\approx 22,4$ литра на моль.

ω_n - скорость движения частиц или скорость дрейфа (м/сек);

μ_0 - константа газа, (вязкость газа при н. у. – 0° С и 0,1013 МН/м²);

μ_n - вязкость газа [Па • сек = (Н • сек) / м²];

M - относительная молекулярная масса газа (кг / н моль);

$d = d_l = d_k$ – расстояние между коронирующими электродами в ряду (м);

η - степень очистки газа;

f - удельная поверхность осаждения [м²/(м³/сек)]

r_{cp}, r – средний радиус частиц пыли определённой фракции (мкм);

R_l – радиус коронирующего электрода (м);

S_M - средняя длина побега молекулы, м (для газов $S_M = 10^{-7}$ м).

8.1. Определение относительной плотности газов производится по формуле

$$\beta = \frac{B \pm \rho_r}{1,013 \cdot 10^5} \cdot \frac{273 + 20}{273 + t} \quad (8.1)$$

8.2. Определение критической напряженности электрического поля E_0 (В/м) производится по формуле

$$E_0 = 3,04 \cdot \left(\beta + 0,0311 \cdot \sqrt{\frac{\beta}{R}} \right) \cdot 10^6, \quad (8.2)$$

где $R=R_l$ – радиус коронирующего электрода.

8.3. Определение критической напряженности короны U_0 (В) производится по формуле

$$U_0 = E_0 \cdot R_l \left(\frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi R_l}{d} \right) \quad (8.3)$$

$$\ln \frac{2\pi R_l}{d} = 2,3 \lg \frac{2\pi R_l}{d}.$$

$$\text{Определяем } \frac{\pi H}{d}; \quad \text{Определяем } \ln \frac{2\pi R_l}{d} = 2,3 \lg \frac{2\pi R_l}{d},$$

где $d = d_l = d_k$ – расстояние между коронирующими электродами в ряду.

8.4. Определение линейной плотности тока короны i_0 (А/м) производится по формуле

$$i_0 = \frac{4\pi^2 k \nu}{9 \cdot 10^9 \cdot d^2 \left(\frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right)} \cdot U_{cp} \cdot (U_{cp} - U_0) \quad (8.4)$$

где k – подвижность ионов, принимаем $k = 2,1 \cdot 10^{-4}$ м²/ (В·сек);
 ν – коэффициент, зависящий от взаиморасположения электродов (см. табл. 8.1).

Таблица 8.1 – Зависимость коэффициента ν от взаиморасположения электродов в пластинчатом электрофилт্রে

H/d	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
ν	0,08	0,068	0,045	0,035	0,027	0,022	0,0175	0,015	0,013	0,0115

8.5. Определение напряженности электрического поля E (В/м) производится по формуле

$$E = \sqrt{\frac{8 i_0 H}{4 \pi \varepsilon_0 k d}}, \quad (8.5)$$

где ε_0 – константа; $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12}$.

8.6. Определение вязкости газов по формуле

$$\mu = \mu_n \cdot \frac{273 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (8.6)$$

где $T = 273 + t$;

μ_0 – вязкость газа при стандартных условиях (при температуре = 0° С и давлении = 0,101 мН/м²), н • сек/м² (см. таб. 8.2);

C – константа вязкости газа при стандартных условиях (см. таб. 8.2).

Находим вязкости всех компонентов газа, поступающего в электрофилтър:

$$\mu_{CO_2}; \quad \mu_{O_2}; \quad \mu_{H_2O}; \quad \mu_{N_2}$$

Определяем относительную молекулярную массу газов, поступающих на электрофилтър M (кг/кмоль). Далее вязкость газа, поступающих на очистку μ (Н•сек/м²), определяются по формуле

$$\frac{M}{\mu} = \frac{a_{CO_2} \cdot M_{CO_2}}{\mu_{CO_2}} + \frac{a_{O_2} \cdot M_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{a_{H_2O} \cdot M_{H_2O}}{\mu_{H_2O}} + \frac{a_{NO_2} \cdot M_{NO_2}}{\mu_{NO_2}},$$

где a – содержание компонента газа поступающего в электрофилтър, в долях единицы.

Таблица 8.2 – Вязкость, молекулярная масса и константа C_n для некоторых газов:

Наименование газа	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
μ_0 -вязкость газа при 0° С и 0,1013МН/м ² , (Н·сек)/м ²	0,137 · 10 ⁻⁴	0,09 · 10 ⁻⁴	0,2 · 10 ⁻⁴	0,17 · 10 ⁻⁴
C_n - константа при 0° С и 0,1013 МН/м ²	254	673	131	114
M_n - относительная молекулярная масса газа, кг/кмоль	44	18	32	28

8.7. Определение скорости дрейфа частиц в электрическом поле (м/сек)

Скорость движения частиц (скорость дрейфа) для частиц диаметром от 2 до 50 мкм определяется по формуле

$$\omega_n = 0,118 \cdot 10^{-10} \cdot E^2 \cdot \frac{r}{\mu} \quad (8.7)$$

Скорость движения частиц (скорость дрейфа) для частиц диаметром от 0,1 до 2 мкм определяется по формуле

$$\omega'_n = \omega_n \cdot \left(1 + A \cdot \frac{S_M}{r} \right) \quad (8.8)$$

При $A = 0,815 \dots 1,63$, принимаем $A = 1$, и S_M для газов = 10^{-7} (м)

Примечание. Для частиц разного размера, скорость дрейфа будет различной.

8.8. Расчет общей степени очистки газов.

Степень очистки газов определяется по формуле

$$\eta_{\Phi_n} = 1 - e^{-\omega \cdot f} \quad (8.9)$$

где удельная поверхность осаждения f [м²/(м³/сек)]

$$f = \frac{S}{v \cdot F} \quad (8.10)$$

Как установлено на практике, действительные скорости дрейфа частиц в электрическом поле электрофильтра, примерно в два раза меньше теоретически рассчитанных, поэтому при подсчете показателя степени в формуле (8.9) для частиц любого размера полученные значения скоростей дрейфа уменьшаем в два раза.

Примечание. Для упрощения расчетов рекомендуется полученные данные записать в виде таблицы (см. табл. 8.3):

Таблица 8.3. Рекомендуемая форма таблицы

Радиус частиц	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
Скорость дрейфа	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7
$\frac{\omega_n f}{2}$							
η_{Φ_n}							

Определяем фракционную степень очистки газа

$$\eta_{\Phi_n} = 1 - e^{-\frac{\omega_n \cdot f}{2}} \quad (8.11)$$

Определяем общую степень очистки газа

$$\eta = \frac{\eta_{\Phi_1} \cdot \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\Phi_2} \cdot \Phi_2}{100} \quad (8.12)$$

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Для подготовки к ответам на вопросы комиссии при защите курсовой работы студенты должны подготовиться к следующим вопросам.

1. Объясните общий принцип работы электрофильтров.
2. Перечислите основные типы и виды конструкции электрофильтров.
3. Назовите основные характеристики электрофильтров.
4. Каковы характерные диапазоны изменения основных характеристик электрофильтров?
5. Сравните основные характеристики электрофильтров и других пылеулавливателей.
6. Для каких целей на авиапредприятиях могут использоваться электрофильтры?
7. Нарисуйте принципиальную схему, иллюстрирующую основной механизм очистки газов в электрофильтрах.
8. От чего зависит площадь осадительных электродов в электрофильтрах?
9. В каких случаях применение электрофильтров не рационально?
10. Что означает выражение «фракционный состав» пыли?
11. Какими конструктивными доработками можно повысить эффективность пылеулавливания рассчитанного Вами фильтра?
12. Каковы характерные значения затрат на эксплуатацию электрофильтров?
13. К какому полюсу источника электрического тока подключают коронирующий, а к какому осадительный электроды?
14. Из чего состоит «корона» соответствующего электрода электрофильтра?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература:

1. Николайкин Н.И. Экология: учебник. Сер. Высшее образование: Бакалавриат (изд. 9-е, перераб. и доп.) / Н.И. Николайкин, Н.Е. Николайкина, О.П. Мелехова. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 615 с.
2. Николайкина Н.Е. Промышленная экология. Инженерная защита биосферы от воздействия воздушного транспорта: учебное пособие / Н.Е. Николайкина, Н.И. Николайкин, А.М. Матягина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 239 с.
3. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / В.Н. Ужов. – М.: Химия, 1967. – 344 с.
4. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Гостехнадзор, 1954. – 323 с.
5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1963. – 254 с.
6. Родионов А.И. Защита биосферы от промышленных выбросов / А.И. Родионов, Ю.П. Кузнецов, Г.С. Соловьев. – М.: Химия-КолосС, 2005. – 392 с.

Дополнительная литература:

7. Санаев Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами / Ю. И. Санаев. – М.: Кондор-Эко, 2009. – 163 с.
8. Родионов А.И. Технологические процессы экологической безопасности / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, В.Г. Систер. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000 – 800 с.
9. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепломассообмена / А.А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1967. – 304 с.
10. ГОСТ Р 2.105-2019. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам. – М.: Стандартинформ, 2019. – 32 с.
11. ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 41 с.
12. ГОСТ Р 7.0.100-2018 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2018. – 124 с.

« ... » _____ 20... г.

Приложение 2

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТАФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)**

Кафедра: «Безопасность полетов и жизнедеятельности»

РАСЧЕТНО – ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к курсовой работе по дисциплине

**«ЭКОБИОЗАЩИТНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ
НА ТРАНСПОРТЕ»**на тему: *«Защита атмосферы от выбросов аэрозолей на
авиапредприятиях»*

Выполнил студент группы БТП

подпись

(инициалы, фамилия)

Консультант:

должность

подпись

(фамилия, инициалы)

ЗАЩИЩЕНО с оценкой «

Защиту курсовой работы принимали:

должность

подпись

(фамилия, инициалы)

должность

подпись

(фамилия, инициалы)

« _____ » _____ 20.... г.

Варианты фракционного состава пыли (состав газа, отправляемого на очистку)

Вариант 1	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	5,0	10,0	10,0	15,0	20,0	20,0	20,0
Вариант 2	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	10,0	10,0	15,0	15,0	20,0	20,0	10,0
Вариант 3	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	5,0	5,0	10,0	10,0	15,0	25,0	30,0
Вариант 4	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	20,0	15,0	10,0	5,0	20,0	10,0	20,0
Вариант 5	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	10,0	10,0	10,0	20,0	20,0	15,0	15,0
Вариант 6	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	15,0	15,0	15,0	15,0	10,0	20,0	10,0
Вариант 7	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	20,0	20,0	20,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Вариант 8	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	10,0	10,0	10,0	15,0	20,0	10,0	10,0
Вариант 9	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	20,0	10,0	10,0	15,0	15,0	15,0	15,0
Вариант 10	r_{cp} [мкм]	0,5	2,5	5,0	10	15	20	25
	Φ_n [%]	15,0	10,0	15,0	10,0	20,0	10,0	20,0

Исходные данные для расчёта электрофильтра

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a_{CO_2} [%]	13,0	8,0	2,0	1,0	6,0	5,2	2,0	1,2	2,5	1,0
$a_{\text{H}_2\text{O}}$ [%]	8,5	6,8	7,4	10,0	8,8	7,6	6,6	9,3	7,8	7,7
a_{O_2} [%]	6,5	16,2	20,6	18,0	17,2	9,4	18,4	16,7	16,2	17,3
a_{N_2} [%]	72,0	69,0	70,0	71,0	68,0	77,8	73,0	72,8	73,5	74,0
t [°C]	25	40	30	35	20	40	10	15	30	5
p_r [кН/ м ²]	2,0	1,0	3,0	0,5	1,5	2,5	2,2	1,8	1,6	2,4
z [г/ м ³ н.у.]	40	42	39	41	35	44	38	37	43	45
V_r [м/сек]	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7	0,9	0,8
$R \cdot 10^{-3}$ [м]	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
d_k [м]	0,24	0,22	0,24	0,23	0,24	0,23	0,24	0,22	0,24	0,23
L_k [м]	924	910	914	920	928	924	910	914	920	910
N [шт]	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
$S_{\text{эл.ос}}$ [м ²]	242	236	242	240	242	240	242	236	242	240
H [м]	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
L [м]	4,8	4,6	4,8	4,4	4,6	4,8	4,4	4,8	4,6	4,8
$U_{\text{ср}} \cdot 10^3$ [В]	46	44	42	46	48	50	44	46	48	42
$F_{\text{ак. эл.}}$ [м ²]	7,5	7,3	7,4	7,6	7,5	7,3	7,4	7,6	7,5	7,5

Условные обозначения для исходных данных:

a – доля определенного компонента в газе, поступающем на очистку (% об.);

t – температура газа (°C);

p_r – разряжение в системе (кН/ м² принимается равным 200 мм вод. ст.)

z – содержание пыли в газе (г/ м³ при н.у.);

$r_{\text{ср}}, r$ – средний радиус частиц пыли определённой фракции (мкм);

Φ_n – доля (массовая) пыли определённой фракции от ее общего количества (%);

V_r – скорость газов в электрофильтре (м/сек);

R_l – радиус коронирующего электрода (м);

d_k – расстояние между коронирующими электродами в ряду (м);

L_k – активная длина коронирующих электродов (м);

n – количество осадительных электродов (шт.);

$S_{\text{эл.ос}}$ – площадь осадительных электродов (м²);

H – расстояние между плоскостями осадительных и коронирующих электродов (м);

L – длина активной зоны электрофильтра (м);

$U_{\text{ср}}$ – среднее значение напряжения (В);

$F_{\text{ак. эл.}}$ – активная площадь сечения электрофильтра (м²).