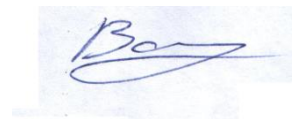


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ".

На правах рукописи



Ватузов Денис Николаевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ КАПЕЛЬНЫХ
ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В СИСТЕМАХ МЕСТНОЙ
ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Специальность: 05.23.03 – «Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

к.т.н., доцент С. М. Пуринг

Самара – 2017 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ	11
1.1 Воздействие производственных процессов на состояние атмосферы	11
1.2 Основные сведения об аэрозолях.....	22
1.3 Классификация и основные характеристики оборудования для очистки воздуха.....	26
1.4 Аппараты для очистки газовых выбросов от высокодисперсных аэрозольных частиц.....	29
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ АППАРАТОВ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА	44
2.1 Основные положения, определяющие движение турбулентного потока в трубах и каналах	44
2.1.1 Общие положения гидродинамики	44
2.1.2 Основные понятия турбулентности	45
2.1.3 Движение турбулентного потока в трубках и каналах	49
2.1.4. Турбулентная диффузия	55
2.2 Движение аэрозольных частиц в однородном турбулентном потоке	56
2.2.1 Сила сопротивления	56
2.2.2 Сила тяжести.....	56
2.2.3 Пульсация скоростей.....	57
2.2.4 Турбулентная диффузия	58
2.2.5 Оседание частиц в движущемся потоке	59
2.2.6 Осаждение аэрозольных частиц согласно миграционной теории процесса..	60
2.2.7 Расчет эффективности осаждения частиц аэрозоля на стенках труб и каналов	61
2.3 Многокритериальная оптимизация с использованием функции принадлежности.....	64

Выводы по главе 2	68
ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ	69
3.1 Создание опытных установок	69
3.2 Выполнение исследований	76
3.2.1 Определение основных параметров исследуемых адгезионно - осадительных элементов.....	76
3.2.2 Выявление геометрических характеристик проектируемых аппаратов	82
3.3 Использование многокритериальной оптимизации для обоснования характеристик аппарата очистки.....	87
3.4 Характерные зависимости, описывающие работу аппарата очистки	92
Выводы по главе 3	104
ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	106
4.1 Конструирование аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей.....	106
4.1.1 Коаксиальный трубчатый сепаратор	106
4.1.2 Пластинчатые сепараторы	109
4.1.2.1 Пластинчатый сепаратор с прямыми пластинами.....	109
4.1.2.2 Пластинчатый сепаратор с изогнутыми адгезионно-осадительными элементами	111
4.3 Методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей	114
4.4 Оценка экономичности применения аппарата очистки в системе вентиляции	120
Выводы по главе 4	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А.Копии патентов на изобретение	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении	147
ПРИЛОЖЕНИЕ В Определение доходов и расходов при внедрении аппарата очистки	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Оценка экономической эффективности установки аппарата очистки	150

ВВЕДЕНИЕ

Среди множества аспектов, определяющих состояние окружающей среды, особое место занимают проблемы охраны атмосферного воздуха. Практическое и научное значение этих проблем определяется тем, что атмосферный воздух, являясь с одной стороны источником жизни человека, растительного и животного мира, с другой стороны служит основой для всех технологических процессов, связанных с получением энергии, материалов, переработкой продуктов и сырья, сопровождающихся выбросами загрязняющих веществ.

Загрязнение атмосферного воздуха (Z) выбросами вредных веществ от различных источников, расположенных на какой-либо территории, обусловлено, как интенсивностью производственной деятельности (I), так и той мерой ответственности за загрязнение (M), которую в состоянии принять на себя население данной территории. Таким образом, загрязнение Z есть многофакторная функция, главными составляющими которой являются интенсивность производственной деятельности I и мера ответственности M . То есть, $Z=f(I, M)$. Причем $\lim_{I \rightarrow \infty} Z \rightarrow \infty$, что ведет к экологической катастрофе. А $\lim_{M \rightarrow \infty} Z \rightarrow 0$, что ведет к экономической катастрофе. То есть бесконечное усиление I или M непременно приведет к негативному результату. Поэтому на современном этапе в индустриально развитых странах функционирование промышленного производства должно включать в себя защиту атмосферы за счет комплекса технических и организационных мер, прямо или косвенно направленных на прекращение или уменьшение загрязнения атмосферы.

Значительный вклад в загрязнение атмосферы вносят вентиляционные выбросы промышленных предприятий, содержащие твердые или жидкие взвешенные частицы. Неотъемлемой частью природоохранных мероприятий является разработка технологических процессов и оборудования, предназначенных для снижения выбросов от существующих промышленных источников, то есть очистка вентиляционных выбросов.

С другой стороны, функционирование промышленных предприятий невозможно без правильно организованной системы вентиляции, работа которой обеспечивает не только регламентируемый тепловлажностный режим, но и требуемую чистоту воздуха в помещении. Для повышения эффективности работы вентиляционной системы целесообразно в ее составе предусматривать установку аппаратов очистки воздуха.

Учитывая, что для современной промышленности характерно с одной стороны, возрастание применения материалов высокой дисперсности, с другой стороны, увеличивающееся внедрение в производственный процесс технологий, сопровождающихся выбросами субмикронных частиц, и наконец, постоянно растущие требования к обеспечению чистоты производственных помещений, особое значение приобретает создание и совершенствование аппаратов очистки воздуха от высокодисперсных аэрозольных частиц с размерами менее 1 мкм, оказывающих наиболее неблагоприятное воздействие на организм человека.

Малые размеры и масса таких частиц исключают или значительно ограничивают применение традиционных методов их отделения от воздуха - гравитационных, инерционных и электростатических. Для улавливания высокодисперсных аэрозолей обычно используются электростатические, тканевые, волокнистые и бумажные фильтры, а также скоростные промыватели (скрубберы) Вентури.

Анализ существующих методов и аппаратов очистки показал, что они имеют ряд существенных недостатков, ограничивающих их применение для очистки высокодисперсных аэрозолей, особенно при наличии жидкой дисперсной фазы (например, аэрозолей пластификаторов – веществ, добавляемых в полимерную композицию для придания пластичности, таких как диоктилфталат, дибutilфталат и других согласно ГОСТ 8728-88).

Таким образом, актуальна задача проектирования высокоэффективных аппаратов очистки вентиляционных выбросов от капельных аэрозолей субмикронных размеров, имеющих невысокое гидравлическое сопротивление,

небольшую стоимость, удобных и недорогих в монтаже и эксплуатации, способствующих возвращению уловленного сырья в производство.

Степень разработанности темы исследования.

Используя накопленный опыт отечественных и зарубежных ученых по проблемам очистки воздуха от мелких аэрозольных частиц (Фукса Н. А., Идельчика И.Е., Альтшуля А.Д., Медникова Е.П., Вальдберга А.Ю., Уайта П., Смита С., Шевелева Ф.Х., Никурадзе И., Шиллера Л., Шлихтинга Г., Талиева В.Н., Ужова В.Н., Мягкова Б.И., Лаптева А.Г., Зайчика Л.И., Сугака Е.В., Щибраева Е.В. и др.), сформулированы цель и задачи диссертационной работы. Следует отметить, что в данных работах не отражено влияние конструктивных параметров и режимов работы осадительных элементов на эффективность осаждения высокодисперсных аэрозолей, а также процессов коагуляции и адгезии, эффект от которых интенсифицируется в случае жидкой дисперсной фазы аэрозоля.

Диссертационное исследование является итогом работ, проведенных автором в 2000-2015 гг.

Целью исследования является повышение эффективности системы местной вытяжной вентиляции путем создания эффективного механического устройства по очистке вентиляционных выбросов от высокодисперсных капельных аэрозолей.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

– анализ, моделирование и определение основных закономерностей движения, взаимодействия, осаждения и сепарации мелкодисперсных аэрозольных частиц в турбулентных газодисперсных потоках;

– разработка методов интенсификации и повышения эффективности очистки вентиляционных выбросов от аэрозольных частиц в газодисперсных потоках;

– создание экспериментальной установки для определения конструктивных характеристик проектируемых аппаратов очистки и выявления возможных расчетных аналитических зависимостей;

– проверка адекватности разработанных моделей и экспериментальные исследования аэродинамических характеристик осадительных элементов различного типа;

– проведение экспериментальных исследований по определению особенностей осаждения аэрозолей пластификаторов и процессов их улавливания в аппаратах очистки за счет использования свойств турбулентной диффузии и турбулентной миграции частиц;

– определение оптимальных параметров процессов и аппаратов и оценка эффективности очистки вентиляционных выбросов от высокодисперсных капельных аэрозолей в турбулентных газодисперсных потоках;

– разработка методики расчета и подбора аппарата очистки вентиляционных выбросов от высокодисперсных капельных аэрозолей.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

– теоретически и экспериментально определены параметры работы аппаратов для сепарации аэрозольных частиц в трубках и щелевых каналах при очистке вентиляционных выбросов от высокодисперсных капельных аэрозолей, обеспечивающие высокую эффективность очистки;

– получены математические зависимости эффективности улавливания капельных аэрозолей от соотношения геометрических размеров осадительных элементов (трубок и щелевых каналов) и их аэродинамических характеристик;

– на основании решения задачи многокритериальной оптимизации с использованием функции Харрингтона получено оптимальное значение отношения длины трубы или канала к их эквивалентному диаметру $L/D = 250$, обеспечивающее максимальную эффективность осаждения частиц с размерами $0,1 \text{ мкм} \leq d_p \leq 1 \text{ мкм}$ при минимальных энергозатратах, предложены математические зависимости эффективности очистки от потерь давления и скорости потока.

Теоретическая и практическая значимость работы.

– Использование предложенных конструктивных решений позволяет усовершенствовать процесс очистки вентиляционных выбросов от субмикронных частиц аэрозолей: уменьшить габаритные размеры аппарата, увеличить производительность, повысить эффективность очистки.

– Разработанные рекомендации для расчета, установленные зависимости и значения режимно-конструктивных параметров могут быть использованы для проектирования эффективных систем местной вытяжной вентиляции с аппаратами очистки от высокодисперсных капельных аэрозолей.

– Предложенная методика подбора и расчета аппаратов очистки для установки их в системе местной вытяжной вентиляции позволяет определить конструктивные параметры аппаратов очистки воздуха, оценить объем уловленного материала и подобрать наиболее приемлемый аппарат, ориентируясь на требуемую производительность вентиляционной системы, необходимые степень очистки и площадь для установки аппаратов.

– Разработанные конструкции сепараторов внедрены в производство проектными организациями, повышают эффективность работы систем местной вытяжной вентиляции, позволяют предприятиям, выбросы которых содержат жидкие аэрозольные частицы высокой дисперсности, сократить потери сырья, уменьшить выбросы в атмосферу, повысить энергоэффективность предприятия.

– Расчётный годовой экономический эффект от использования аппарата очистки на ОАО комбинат «Полимерстройматериалы» в г. Отрадный Самарской области составляет 223 тыс. рублей в ценах 2016 г., экономия уловленного материала (диоктилфталата) - 3,91 т/год.

Методология и методы исследований в диссертационной работе основаны на системном анализе проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Методология включала в себя общепринятые для технических наук абстрактно-логические, эмпирические, монографические методы, системный подход, математическое моделирование, аналитическое обобщение известных научных и практических результатов. Использовались методы вычислительного и

натурного эксперимента, планирования и обработки экспериментальных данных с получением соответствующих моделей и последующей их оптимизацией, методы теории вероятности и математической статистики, экспертных оценок, метод граничных интегральных уравнений, методы решения дифференциальных уравнений.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается применением классических положений теоретического анализа; использованием апробированных математических моделей, полученных с применением теории турбулентной диффузии и турбулентной миграции частиц, согласованием результатов расчетов и опытов с известными экспериментальными и аналитическими данными; использованием современных математических методов обработки эксперимента; патентной чистотой разработанных технических решений.

На защиту выносятся:

– результаты исследований по разработке основных теоретических принципов организации процесса улавливания высокодисперсных капельных аэрозолей с использованием предлагаемых сепараторов аэрозолей;

– экспериментальные и аналитические зависимости эффективности улавливания высокодисперсных капельных аэрозолей от геометрических размеров адгезионно-осадительных элементов и их аэродинамических характеристик;

– результаты оценки влияния параметров пылегазового потока в аппаратах на эффективность очистки и практические рекомендации по использованию этого механизма для создания высокоэффективных и энергосберегающих аэрозолеуловителей;

– математическая многокритериальная оптимизационная модель, определяющая лучшее сочетание конструктивных особенностей очистного устройства, его аэродинамических характеристик и эффективности очистки воздуха.

– модели эффективных механических устройств по очистке вентиляционных выбросов от высокодисперсных аэрозолей.

– методика подбора и расчета аппаратов очистки для установки их в системе местной вытяжной вентиляции.

Личное участие автора состоит в постановке цели и задач диссертации, разработке программы теоретических и экспериментальных исследований, получении результатов научных исследований, их обобщении и анализе.

Публикации и апробация результатов. Основные положения диссертации изложены в 23 печатных работах, в том числе 5 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 1 статье в журнале SCOPUS. Получены 3 патента на изобретения.

Основные результаты исследования доложены на 65, 66, 67, 68, 69, 71 Научно-технических конференциях (НТК) по итогам НИР СГАСУ, г. Самара, в 2008 - 2013 г.г., на V международной НТК МГСУ, г. Москва, 2013 г.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 197 источников и 4 приложений; общий объем 152 страницы, 15 таблиц, 38 рисунков.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ

1.1 Воздействие производственных процессов на состояние атмосферы

1.1.1 Общие сведения о выбросах загрязняющих веществ при работе промышленных предприятий

Опасность загрязнения окружающей среды в значительной мере связана с широким внедрением энергоемких и химических технологий, производством новых химических продуктов [108,109,137,151].

Несовершенство используемых технологий, как в технологическом, так и в экологическом отношении, невозможность изъятия из производственной сферы многих необходимых для современной цивилизации химических веществ определяют необходимость введения и неукоснительного соблюдения нормативов качества окружающей среды.

В соответствии с концепцией защиты атмосферы, принятой в большинстве промышленно развитых стран, загрязнением атмосферы считается прямое или косвенное введение в нее любого вещества в таком количестве, которое воздействует на качество воздуха, нанося вред людям, экосистемам, строительным конструкциям, природным ресурсам и всей окружающей среде [41,53,143]. Соответственно, защита атмосферы включает комплекс технических и организационных мер, прямо или косвенно направленных на прекращение или уменьшение загрязнения атмосферы вследствие функционирования промышленного производства.

В Российской Федерации в соответствии с [48,53,101,137] основой оценки загрязнения и регулирования качества атмосферного воздуха, являются гигиенические нормативы, преимущественно направленные на профилактику неблагоприятного воздействия химических веществ на здоровье человека: предельно допустимые концентрации (ПДК) атмосферных загрязнений

химических и биологических веществ. Установлено два вида гигиенических нормативов: максимальная разовая предельно допустимая концентрация (ПДК_{м.р.}) и среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК_{с.с.}).

Считается, что соблюдение этих нормативов обеспечивает отсутствие прямого или косвенного влияния на настоящее или будущие поколения, не снижает работоспособность человека, не ухудшает его самочувствия и санитарно-бытовых условий жизни.

В зависимости от токсичности и опасности атмосферные загрязнители подразделяются на четыре класса опасности: чрезвычайно опасные, высоко опасные, умеренно опасные и малоопасные. Для веществ I и II классов опасность достижения токсических концентраций в случае превышения ПДК, ныне действующими документами РФ ПДК в атмосферном воздухе населенных мест установлены для 589 веществ, выброс 39 веществ в атмосферный воздух запрещен [108, 115]; еще для 1495 веществ установлены ОБУВ (ориентировочно-безопасный уровень воздействия). Наряду с гигиеническими нормативами (ПДК) для отдельных веществ в [115] приведены коэффициенты комбинированного действия 56 смесей, состоящих из двух, трех и четырех веществ.

Значительный вклад в загрязнение атмосферы вносят выбросы промышленных предприятий, содержащие твердые или жидкие взвешенные частицы, образуются в результате механической, термической или химической переработки различного сырья и полуфабрикатов в соответствии с рисунком 1.1 [145,154,155]. Диапазон взвешенных частиц достаточно широк.

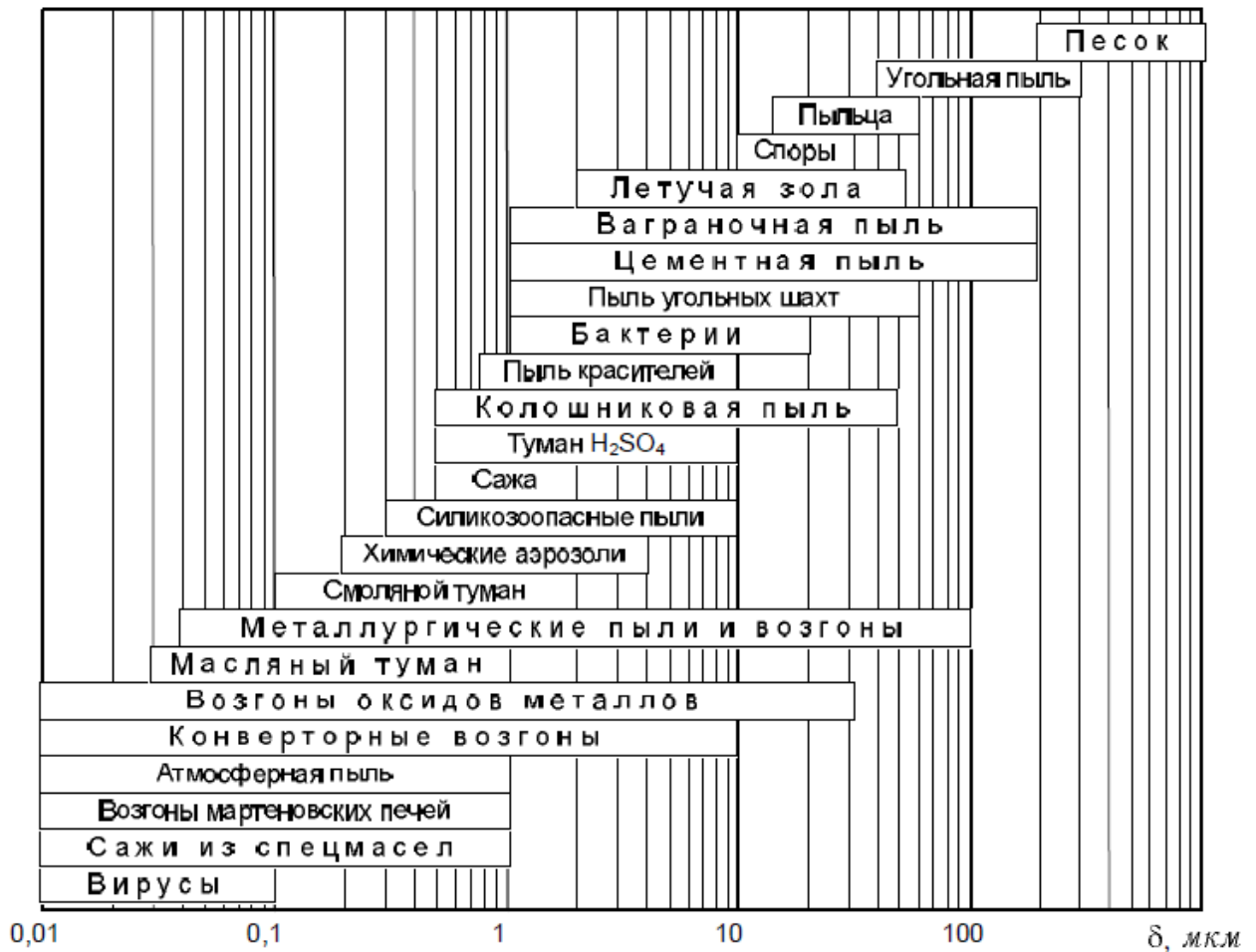


Рисунок 1.1 – Размеры частиц промышленных газовых выбросов

Для защиты атмосферы выбросы вентиляционных систем должны очищаться с максимально возможной по технико-экономическим условиям полнотой.

Концентрация аэрозолей c_k , мг/м³, в выбросах не должна превышать величины

$$c_k = 100k, \quad (1.1)$$

где k - коэффициент, принимаемый в зависимости от предельно допустимой концентрации (ПДК) аэрозолей в воздухе рабочей зоны производственных помещений, согласно таблице 1.1.

Таблица 1.1

ПДК, мг/м ³	До 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10
k	0,3	0,6	0,8	1,0

Концентрация, рассчитанная по формуле (1.1) не должна превышать в результате рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосфере с учетом фоновой загрязненности атмосферы, установленных нормативов качества:

а) в приземном слое атмосферы населенных пунктов - концентраций, указанных в [9];

б) в воздухе, поступающем в производственные и вспомогательные здания и сооружения через приемные отверстия систем приточной вентиляции и через открывающиеся проемы, - 30 % ПДК тех же аэрозолей, в рабочей зоне помещений [54].

Кроме того, учитывая тенденцию к росту цен на топливо, целесообразно учитывать возможность рециркуляции воздуха в производственных помещениях, согласно СП60.13330.2012 п.п.11.4.1, 11.4.5.

Основными факторами, определяющими степень отрицательного воздействия аэрозольных частиц на организм человека, являются их размеры, концентрация и химический состав [53,54,55,101].

Снижение вредных выбросов от промышленных источников в ряде случаев может достигаться в результате изменения или совершенствования основных технологических процессов. Однако неотъемлемой частью краткосрочных и среднесрочных природоохранных мероприятий являются меры по предотвращению дальнейшего загрязнения атмосферы путем разработки технологических процессов и оборудования, предназначенных для снижения выбросов от существующих промышленных источников, то есть очистки газовых выбросов от газообразных и дисперсных примесей [138-142,149,152-155].

1.1.2 Производство полимерных изделий как источник выделения загрязняющих веществ

В настоящее время выпускаются различные виды полимерных изделий, технологический процесс изготовления которых заключается в получении полимерных соединений из мономеров при участии катализаторов,

пластификаторов и др. Для современного производства пластмассы характерен непрерывный способ ведения технологического процесса. Переработка пластмассы в изделия путем экструзии, вальцевания, прессования, литья под давлением, сопровождается поступлением в воздух загрязняющих веществ, состав которых зависит от рецептуры. Выделяющиеся в окружающую среду химические соединения, образующиеся в процессе производства, обладают высокой токсичностью (фенол и формальдегид при выработке фенопластов, стирол в производстве полистирола, диизоцианаты при изготовлении полиуретана, хлорвинил в производстве полихлорвинила, дифторфосген в производстве фторопластов и т. д.) [61,117]. При наличии пластификатора происходит выделение его в воздух в виде аэрозоля.

Одним из примеров производства материалов на основе полимеров является производство ПВХ-изделий (в частности линолеума). ПВХ-линолеум — рулонный материал, изготавливаемый из поливинилхлорида, пластификаторов (веществ, вводимых в полимер для придания эластичности и пластичности), наполнителей (веществ, вводимых в ПВХ массу для улучшения внешнего вида и расцветки, облегчения обработки, придания необходимых физико-механических и химических свойств и удешевления линолеума), стабилизаторов (веществ, которые вводят в ПВХ композиции для торможения их старения в условиях переработки и эксплуатации линолеума), пигментов и красителей, растворителей и некоторых технических добавок (катализаторов, порообразователей, антивспенивателей, антипиренов, антистатиков).

В производстве ПВХ линолеума, на данный момент, в качестве пластификаторов применяют [117]: диоктилфталат ДОФ (сложный эфир 2-этилгексилового спирта и ортофталевой кислоты, плотность 0,982 – 0,986 г/см³ при 20 °С, ПДК_{р.з.} 1 мг/м³); дибутилфталат ДБФ (сложный эфир *n*-бутилового спирта и ортофталевой кислоты, плотность 1,047 г/см³, ПДК_{р.з.} 0,5 мг/м³); бутилбензилфталат ББЗФ (сложный эфир ортофталевой кислоты и смеси *n*-бутилового и бензилового спиртов, плотность 1,1 г/см³, ПДК_{р.з.} 1 мг/м³; ДИ-(*n*-

алкил)-фталат ДАФ (сложный эфир ортофталевой кислоты и спиртов, плотность 0,975-0,98 г/см³, ПДК_{р.з.} 1 мг/м³).

В качестве наполнителя применяют: тальк, мел, каолин, известняк. Наиболее эффективные стабилизаторы, применяемые при производстве линолеума свинцовые, барио-кадминивые твердые и жидкие соединения и стеарат кальция.

ПВХ линолеум изготавливают тремя способами: промазным, вальцево-каландровым и экструзионным [127].

Вальцево-каландровый способ производства бесосновного линолеума в соответствии с рисунком 1.2 состоит из следующих основных операций: приготовления композиционной массы, вальцевания и каландрирования.

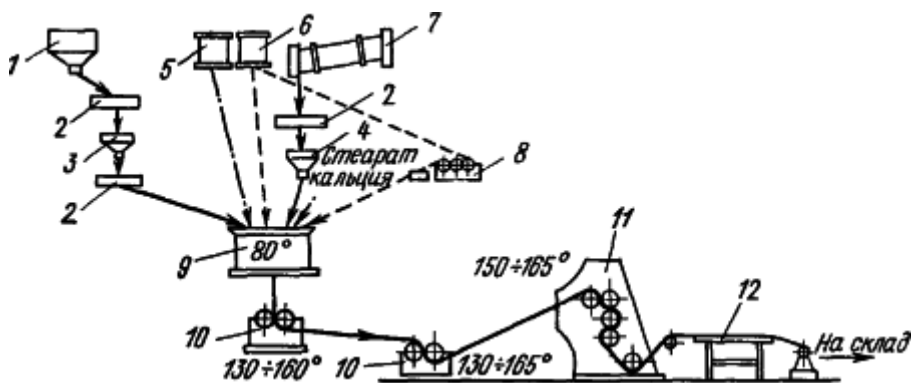


Рисунок 1.2 – Технологическая схема производства поливинилхлоридного линолеума вальцево-каландровым способом: 1,3-бункер для поливинилхлорида; 2-вибрационные сита; 4-бункер для барита; 5-мерник дибутилфталата; 6-мерник трансформаторного масла; 7-сушильный барабан для барита; 8-краскотерка; 9-смеситель; 10-смесительные вальцы; 11-каландр; 12-браковочный стол.

Приготовление композиционной массы осуществляется в смесителе, куда последовательно загружают дибутилфталат, трансформаторное масло, краситель, стеарат кальция, поливинилхлорид, стабилизатор и наполнитель. Смесь перемешивают в течении двух часов при температуре 80°C, после чего выдерживают для набухания и созревания в емкостях при нормальной температуре 130-165°C до получения пластика с гладкой поверхностью.

Затем материал срезают с вращающегося валика и направляют на обогреваемые паром каландры. Каландрирование производят при температуре 150-165°C, при этом происходит формирование непрерывной ленты линолеума необходимой толщины и ширины, уплотнение массы и удаление из нее воздуха. С каландров лента поступает на холодильные барабаны, а оттуда на разбраковочный стол для обрезки кромок и разрезки полотна на куски определенной длины, сортировки и упаковки.

Примерный состав линолеумной массы однослойного безосновного линолеума (% по массе) следующий: поливинилхлорид-30-40, наполнитель (асбест) -50-60, пластификатор (дибутилфталат)-10-15, технологические добавки-1-2 и краситель-1-2.

Изготовление линолеума на тканевой основе промазным способом в соответствии с рисунком 1.3 можно разделить на следующие основные операции: подготовку сырья и материалов, приготовление линолеумной массы, нанесение линолеумной массы на тканевую или войлочную основу, тепло обработку, охлаждение, обрезку, сортировку и упаковку.

Сначала готовят смесь из поливинилхлорида -60%, пластификатора (дибутилфталата) и разбавителя (минерального масла)-40%. Затем готовят линолеумную массу, состоящую из поливинилхлоридной пасты -45%, порошка поливинилхлорида -9%, пигмента, тертого на пластификаторе -3% и наполнителя (барит)-43%. В течение двух часов все перечисленные выше компоненты перемешивают в смесителе а затем направляют в краскотерку для лучшего смешения компонентов.

Полученная масса поступает в грунтовальный агрегат для одноразового нанесения слоя или для нанесения 6...7 тонких слоев на ткань с тепловой обработкой каждого слоя в сушильно-желировочной камере при 160-190 °С, где происходит образование пленки на поверхности линолеумной массы, а затем на вальцах с температурой 140-145°C.

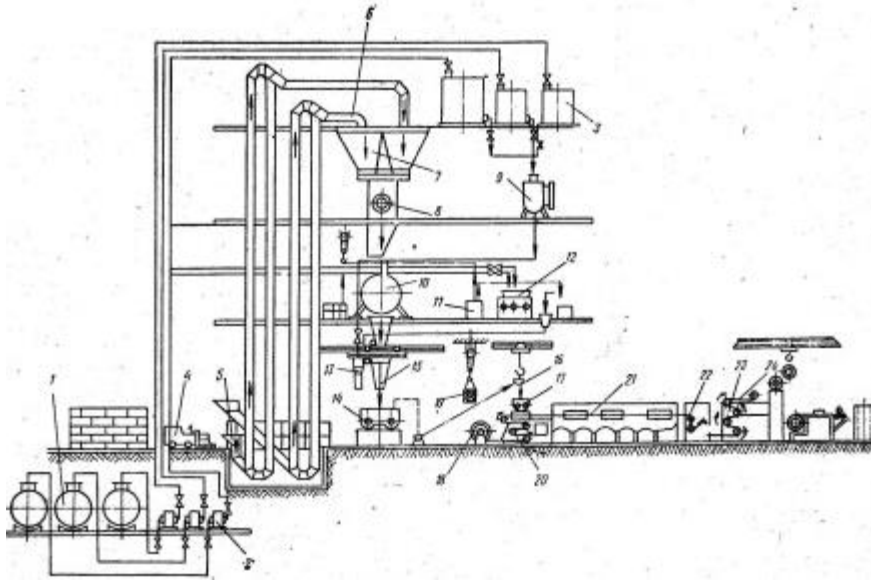


Рисунок 1.3 – Технологическая схема производства поливинилхлоридного линолеума промазным способом: 1-складские емкости для жидких компонентов; 2-насосы; расходные баки смесительного отделения; 4-электрокара; 5-приемный бункер элеватора; 6-трубопровод элеватора; 7-бункера для поливинилхлорида и наполнителей; 8-дозатор; 9-эмульгатор для пластификаторов; 10 смеситель; 11-специальный расходный бункер; 12-краскотерка; 13-раздаточный бункер; 14-смеситель; 15-раздаточный бункер; 16, 19-тельфер; 17-грунтовальный станок; 18-рулон с войлоком; 21-термоизолированная камера; 20, 22-уплотнительные вальцы; 23, 24-холодильные валки.

После этого линолеум поступает на холодильные валки с температурой до 25°C , где он охлаждается постепенно. Заключительными процессами являются продольная обрезка кромок, поперечная разрезка полотна, разбраковка, сматывание в рулоны и упаковка их в бумагу или ткань.

Экструзионный способ в соответствии с рисунком 1.4. Используется в производстве двухслойного ПВХ-линолеума. Сырьевая смесь пластифицируется в специальной машине – экструдере, затем выдавливается из него через щелевидную головку. Верхний и нижний слои (различные по составу) выдавливаются одновременно, в результате каландрирования в гладильном цилиндре они спрессовываются между собой. Затем полотно охлаждают и обрезают до нужного размера.

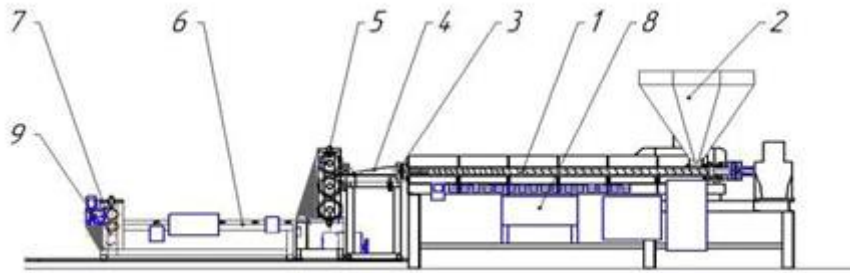


Рисунок 1.4 - Схема экструзионной линии: 1-экструдер, 2- загрузочный бункер, 3- фильтр, 4 – щелевая головка, 5- каландр, 6- рольганг, 7 –вытяжное устройство, 8- централизованный пульт управления, 9 – устройство отрезки.

Экструдирование двух слоев осуществляется на двух различных экструдерах, расположенных рядом под углом друг к другу. Полимерная смесь поступает их двух экструдеров одновременно в одну головку, в которой имеются два распределительных канала в соответствии с рисунком 1.5.

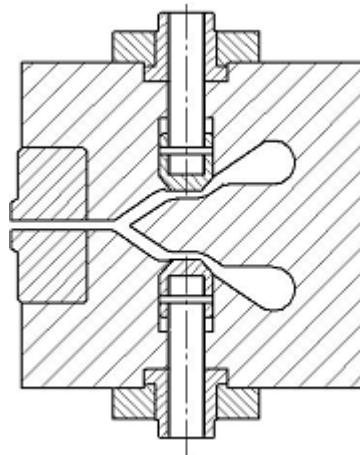


Рисунок 1.5 - Схема экструзионной головки для получения двухслойного линолеума

Экструдеры подают в каналы смесь для формирования верхней и нижней пленок. В каналах смесь растекается в обе стороны по всей ширине головки, и подается в зазор между дроссельными призмами, которые предназначены для регулирования равномерного течения массы по всей ширине головки, далее направляется в щель, образованную верхними и нижними губками. Готовый линолеум выходит из головки в виде двухслойного непрерывного полотна определенной толщины. Непосредственно после выхода линолеума из

плоскощелевой головки плотно входит в зазор между валками гладильного каландра, для окончательной отделки лицевой и нижней поверхности готового линолеума и придания ему заданных размеров. После каландра для снятия напряжений, получения усадки и охлаждения полотно подается в термокамеру. Усадка происходит при температуре до 130 °С. Охлажденный линолеум подвергается окончательной обработке и упаковке.

Вне зависимости от метода производства линолеума технологический процесс сопровождается выделением загрязняющих веществ, качественный и количественный состав которых зависит от технологии производства и от компонентов исходного сырья.

При вопросе о целесообразности очистки вентиляционных выбросов от технологического оборудования, при производстве изделий из поливинилхлорида, следует учитывать процессы, происходящие при движении исходного материала по технологической цепочке, а также состав, токсичность и количество вредностей, выделяющихся от производственного оборудования. Следует отметить, что наибольшее количество выделений образуется на тех участках производственной цепочки, где присутствует устойчивый конвективный поток, связанный с высокими температурами обрабатываемой полимерной композиции. Выделяющиеся в процессе испарения и разложения отдельных компонентов смеси, загрязняющие вещества имеют вид густого тумана. Туман представляет собой мелкодисперсные аэрозоли пластификаторов. Кроме того, часть пластификаторов присутствует в виде паров. Выделяются также газообразные компоненты: углеводороды, окись углерода и хлористый водород.

Анализ вентиляционных выбросов на содержание вредных веществ сводится к определению концентрации их по известным методикам [15,18,20,52,55,81,86,88,89,100,102,125].

Необходимо отметить, что все пластификаторы в воздухе вентиляционных выбросов содержатся в двух фазах: паровой или иначе молекулярной фазе и жидкой фазе или в виде мелкодисперсного аэрозоля. Поэтому все перечисленные методы определения пластификаторов (ДОФ, ДОС, ДБФ) в воздухе

характеризуют лишь некоторую суммарную концентрацию паров и аэрозоля. Причем, паровая (молекулярная) фракция аэрозолей пластификаторов мала и составляет, как правило, 3-8% от аэрозольной [152]. Это объясняется тем, что упругость паров выше перечисленных пластификаторов очень незначительна при температуре вентиляционных выбросов в интервале от 30 до 40 °С. Так, например, для ДОФ давление пара даже при температуре 150 °С составляет всего лишь 1,33 Па.

При исследовании вентиляционных выбросов от установки каландра и от вальцов на содержание различных вредных веществ установлено, что колебания концентраций их находятся в довольно широких пределах и зависят от технологического регламента производства линолеума и процентного содержания отдельных компонентов сырья [152] таблица 1.2.

Таблица 1.2 – Выделение загрязняющих веществ при производстве ПВХ изделий

Точка отбора проб	Концентрация загрязняющих веществ, мг/м ³				
	Аэрозоли пластификаторов	Сложные эфиры	Углеводороды	Окись углерода	Хлористый водород
Каландровая установка	80÷300	8÷20	5÷10	3÷20	1÷12
Вальцы	60÷110	5÷15	5÷15	3÷22	2÷15

Основное выделение вредностей (аэрозоля пластификатора) происходит при нагреве смеси либо в каландрах (см. рисунки 1.2, 1.4), либо в термоизолировочной камере (см. рисунок 1.3).

Как видно из таблицы, содержание углеводородов в выбросах значительно ниже их ПДК в рабочей зоне ($\text{ПДК}_{\text{р.з}}^{\text{C1-C10}} = 900 \text{ мг/м}^3$), а окиси углерода – не выше ПДК рабочей зоны ($\text{ПДК}_{\text{р.з}}^{\text{CO}} = 20 \text{ мг/м}^3$). Хлористого водорода в вентиляционных выбросах данных систем содержится, как правило, не более 1÷2 ПДК рабочей зоны ($\text{ПДК}_{\text{р.з}}^{\text{HCl}} = 5 \text{ мг/м}^3$). Что же касается суммарной концентрации аэрозолей пластификаторов, то она значительно превышает ПДК р.з. ($\text{ПДК}_{\text{р.з}}^{\text{ДОФ}} = 1 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{р.з}}^{\text{ДБФ}} = 0,5 \text{ мг/м}^3$).

Удаление вредностей (аэрозоля), основываясь на его физико-химических свойствах, необходимо осуществлять либо от встроенных в производственное

оборудование местных отсосов, либо от зонтов, расположенных над валками и каландром.

При удалении загрязненного воздуха от технологической линии системами местной вытяжной вентиляции, выброс осуществляется на территории промышленной площадки, что приводит к значительному загрязнению воздушной среды. Кроме того, наблюдается достаточно высокое количество потерь пластификаторов (потери пластификаторов с вентиляционными выбросами составляют: от каландровой линии $1,4 \div 5,25$ кг/ч, от вальцев $0,9 \div 1,7$ кг/ч).

Таким образом, на данный момент, даже с учетом усовершенствования технологии производства ПВХ изделий, очистка вентиляционных выбросов от туманов пластификаторов (аэрозолей) требует особого внимания. Кроме того, возможно и необходимо утилизировать тепловыделения от технологического оборудования при проектировании приточно-вытяжной вентиляции цехов по производству изделий из ПВХ.

1.2 Основные сведения об аэрозолях

Аэрозолями называются дисперсные системы, состоящие из твердых или жидких аэрозольных частиц (дисперсной фазы), взвешенных в воздушной (дисперсионной) среде. Размер наиболее крупных частиц определяется их способностью более или менее длительное время находиться во взвешенном состоянии, наиболее мелкие (тонкие) аэрозольные частицы по размерам близки к крупным молекулам. Аэрозоли подразделяются на пыли, туманы и дымы [142,153].

Пыли состоят из твердых частиц, образовавшихся в результате механического измельчения твердых тел в порошки, взвешенных в газообразной среде. К этому классу аэрозолей относится, например, аспирационный воздух, отсасываемый от станков для механической обработки изделий, отделений упаковки порошкообразных материалов, дробильных, размольных и бурильных агрегатов, транспортных устройств, пескоструйных аппаратов, и т.п. Пыли

являются полидисперсными (с размером частиц от 5 до 50 мкм и более) малоустойчивыми системами.

Дымы представляют собой аэродисперсные системы, состоящие из частиц размером от 5 до 0,1 мкм и менее с малым давлением пара и с малой скоростью седиментации. К дымам относятся аэрозоли, образующиеся в результате химических и фотохимических реакций, при возгонке и конденсации паров.

Туманы состоят из капелек жидкости, в которых могут содержаться растворенные вещества или суспендированные твердые частицы, взвешенных в газообразной среде.

Частицы в аэрозольной системе находятся в постоянном движении, при котором происходит непрерывное взаимодействие частиц, в результате чего происходит их укрупнение, разрушение конгломератов, осаждение частиц и т. д. Аэрозоли, как правило, содержат частицы различных размеров, т. е. являются полидисперсными.

Дисперсность - важнейшее свойство аэрозолей. Под дисперсностью аэрозолей понимают совокупность размеров всех частиц, составляющих данную аэродисперсную систему.

Дисперсный состав характеризует аэрозоль с различных сторон. Кроме химических и физических свойств, дисперсный состав определяет в значительной мере характер и условия распространения аэрозолей в воздушной среде. Чем мельче размеры частиц аэрозоля, тем медленнее происходит их осаждение, а особо мелкодисперсная аэрозоль практически вовсе не осаждается. Таким образом, рассеивание аэрозольных частиц в воздухе в значительной мере определяется дисперсным составом аэрозоли. Важнейший вопрос улавливания аэрозоля – выбор улавливающего оборудования – решается главным образом на основании дисперсного состава аэрозоля.

Существуют различные классификации аэрозолей.

Согласно [125] дисперсность определяется положением графика фракционного состава данного аэрозоля на классификационной номограмме в соответствии с рисунком 1.6. В соответствии с зонами, выделенными на

номограмме прямыми линиями, различают пять основных классификационных групп, а именно:

- I - очень крупнодисперсная пыль;
- II - крупнодисперсная пыль;
- III - среднедисперсная пыль;
- IV - мелкодисперсная пыль;
- V - очень мелкодисперсная пыль.

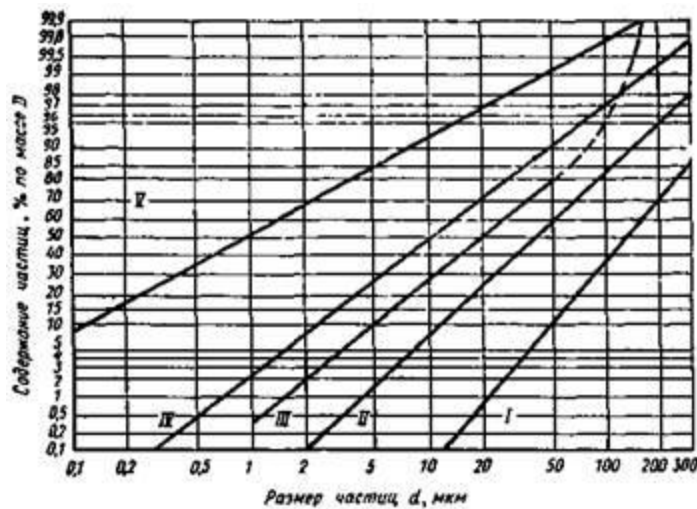


Рисунок 1.6 – Классификационная номограмма пылей

Некоторые авторы предлагают свою классификацию. Согласно Медникову [99] аэрозольные системы предлагается классифицировать следующим образом (см. таблица 1.3):

Таблица 1.3 – Классификация частиц по дисперсности

Аэрозольная система	Аэрозоли			Аэровзвеси тонкие
	Высокодисперсные	Тонкодисперсные	Грубодисперсные	
Диаметр частиц, мкм	0,001÷1,0	0,8÷10	10÷100	100÷1000

Зная дисперсный состав аэрозоля возможно отнести его к тому или иному классу и рекомендовать к использованию наиболее подходящий аппарат очистки. Например, на рисунке 1.7 показано интегральное распределение частиц диоктилфталата [154].

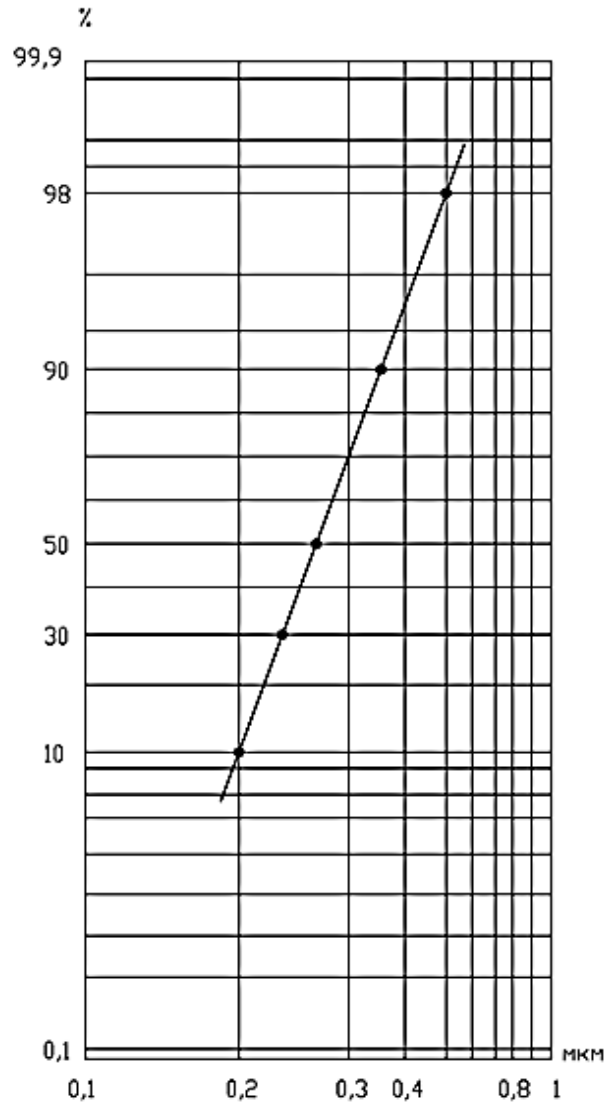


Рисунок 1.7 – Интегральное распределение частиц тумана диоктилфталата

Поскольку, в вероятностно-логарифмической системе координат график имеет вид прямой линии, это говорит о том, что распределение частиц аэрозоля диоктилфталата имеет нормальный характер и по дисперсности данный аэрозоль можно отнести к высокодисперсным или к V классификационной группе (очень мелкодисперсная пыль).

1.3 Классификация и основные характеристики оборудования для очистки воздуха

Воздухоочистное оборудование широко применяется во всех отраслях производства. Оно служит для очистки технологических и вентиляционных выбросов в атмосферу, а также для очистки приточного и рециркуляционного воздуха. Разнообразие очистного оборудования определяется его принципом действия и конструктивными особенностями.

В зависимости от способа отделения взвешенных частиц от воздушного потока очистное оборудование подразделяют на улавливающее пыль сухим способом и улавливающее пыль мокрым способом.

Оборудование, улавливающее пыль сухим способом (частицы осаждаются на сухую поверхность), подразделяется на четыре группы: гравитационное, инерционное, фильтрационное и электрическое.

Оборудование для улавливания пыли мокрым способом (отделение частиц от воздушного потока осуществляется с использованием жидкостей) подразделяется на три группы: инерционное, фильтрационное и электрическое [143-145].

В каждой группе виды оборудования также дифференцируются. Классификация оборудования производится по основному принципу действия. Практически же все устройства работают с использованием не одного, а нескольких физических явлений.

Основной задачей проектирования аппаратов очистки является обеспечение требований к эффективности очистки выбросов по остаточной концентрации с наименьшими затратами и с обеспечением надежности работы пылеуловителей и удобства их эксплуатации.

К основным характеристикам оборудования для улавливания аэрозольных частиц относятся: степень очистки воздуха от аэрозоля (эффективность), производительность, гидравлическое сопротивление, расход электрической энергии, стоимость очистки [154,155].

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

$$\eta = \frac{G_y}{G_{вх}} \quad (1.2)$$

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

$$\eta = \frac{c_{вх} - c_{вых}}{c_{вх}} \quad (1.3)$$

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

$$\eta = [1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n)] \quad (1.4)$$

где η_1 , η_2 , ..., η_n — эффективность очистки каждого из аппаратов, входящих в каскад (в долях единицы). На эффективность очистки ориентируются при выборе пылеулавливающего оборудования в соответствии с допустимой остаточной концентрацией пыли в очищенном воздухе. Сравнивая два аппарата, сопоставляют проценты пропущенной пыли. Если эффективность одного аппарата 99%, а другого 98%, то они пропускают соответственно 1 % и 2% пыли. Следовательно, эффективность первого аппарата в два раза выше, чем второго.

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

$$\eta_{fn} = \frac{g_n}{G_n} \quad (1.5)$$

где g_n — количество уловленной пыли n-й фракции;

G_n — количество поступившей в аппарат пыли n -й фракции. Общую эффективность аппарата η определяют по фракционной эффективности следующим образом:

$$\eta = \frac{G_1\eta_{\phi 1} + G_2\eta_{\phi 2} + \dots + G_n\eta_{\phi n}}{G_1 + G_2 + \dots + G_n} \quad (1.6)$$

где G_1, G_2, \dots, G_n — количество пыли соответствующих фракций, поступившей в аппарат; $\eta_{\phi 1}, \eta_{\phi 2}, \dots, \eta_{\phi n}$ — фракционная эффективность улавливания по данной фракции.

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

Гидравлическое сопротивление аппарата имеет важное значение, так как от его величины зависит требуемое давление вентилятора, а следовательно, и расход электроэнергии. Гидравлическое сопротивление аппарата определяют по формуле:

$$\Delta P = A v^n \quad (1.7)$$

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

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

Расход электрической энергии зависит в значительной мере от гидравлического сопротивления аппарата. В электрофильтрах электроэнергия расходуется в основном на создание электростатического поля. Расход электроэнергии при одноступенчатой очистке находится в пределах от 0,035 до 1,0 кВт·ч на 1000 м³ воздуха.

Стоимость очистки является важнейшим показателем, так как характеризует экономичность очистки. Она зависит от многих факторов: капитальных затрат на оборудование, эксплуатационных расходов и др. Стоимость очистки в различных аппаратах может превышать одна другую в 30-35 раз.

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

Для очистки воздуха, удаляемого вытяжными аспирационными системами от аэрозольных частиц, применяются пылеуловители пяти классов (таблица 1.4) [125]. В таблице 1.4 указаны границы эффективности пылеуловителей каждого из классов на основе классификации аэрозолей в соответствии с рисунком 1.6.

Таблица 1.4 – Классификация пылеуловителей

Класс пылеуловителя	Размер эффективно улавливаемых частиц пыли, мкм	Группа пыли по дисперсности	Эффективность пылеуловителей, %
I	Более 0,3 - 0,5	V	< 80
		IV	99,9 - 80
II	Более 2	IV	92 - 45
		III	99,9 - 92
III	» 4	III	29 - 80
		II	99,9 - 99
IV	» 8	II	99,9 - 95
		I	> 99,9
V	» 20	I	>99

1.4 Аппараты для очистки газовых выбросов от высокодисперсных аэрозольных частиц

Нарастающее загрязнение воздушной среды ужесточает требования по эффективности очистки отходящих промышленных газов от высокодисперсных аэрозольных частиц с размерами менее 1 мкм, оказывающих наиболее неблагоприятное воздействие на организм человека [9,55,118]. Малые размеры и масса таких частиц исключают или значительно ограничивают применение традиционных методов разделения - гравитационных, инерционных и электростатических.

Аппараты, использующие только один из механизмов сепарации (пылеосадительные камеры, ротационные пылеотделители, циклоны, насадочные,

пенные и полые скрубберы), применяются в основном для улавливания сравнительно крупных частиц. Для улавливания высокодисперсной пыли (или золы) обычно используются электростатические, тканевые, волокнистые и бумажные фильтры, а также скоростные промыватели (скрубберы) Вентури в соответствии с рисунком 1.8 [158,159,153-155].

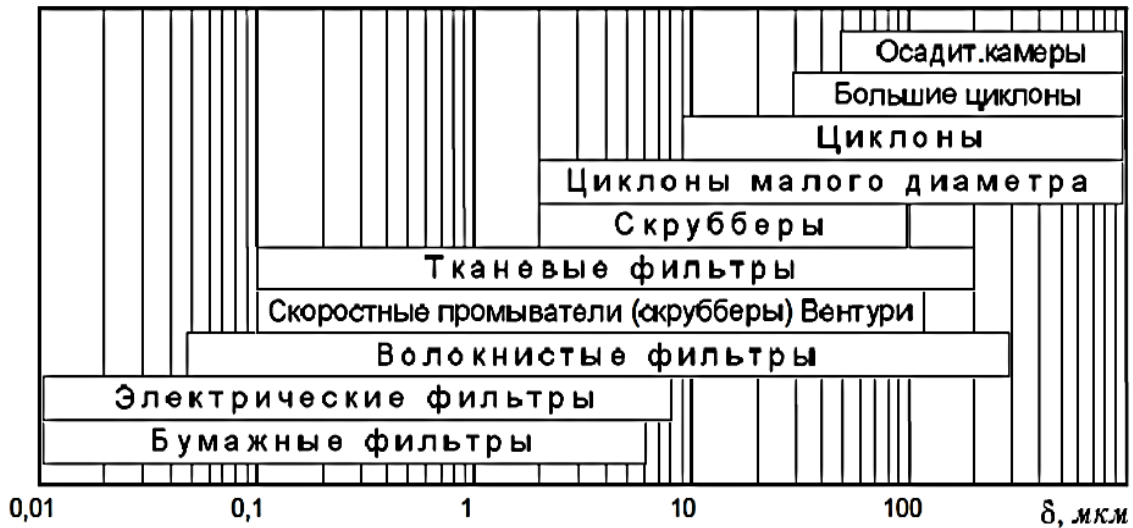


Рисунок 1.8 – Интервалы применения аппаратов для очистки газов от аэрозольных частиц

Электрофильтры, принцип действия которых основан на использовании зарядки частиц коронным разрядом и их осаждения на электродах, отличаются незначительным гидравлическим сопротивлением, достаточно эффективны и надежны, наиболее автоматизированы из известных устройств [143,145].

Как правило, электрофильтры конструктивно представляют пакет металлических пластин, между которыми натянуты металлические нити. Между нитями и пластинами создаётся разность потенциалов порядка нескольких киловольт, а в промышленных масштабах десятка киловольт. Данная разность потенциалов приводит к образованию сильного электрического поля между нитями и пластинами. При этом на поверхности нитей возникает коронный разряд, что в сочетании с электрическим полем обеспечивает ионный ток от нитей к пластинам. Загрязнённый воздух подаётся в пространство между пластинами, при этом пыль и мелкие частицы загрязнённого воздуха приобретает

электрический заряд, под воздействием ионного тока, после чего под действием электрического поля притягивается к пластинам и оседают на них.

В зависимости от вида улавливаемых частиц и способа их удаления с электродов, электрофильтры подразделяются на сухие и мокрые. В сухих электрических фильтрах для очистки поверхности электродов от пыли, используются механизмы встряхивания ударно-молоткового типа. Пыль из сборных бункеров выводится в сухом виде или в виде шлама. В мокрых электрофильтрах уловленный продукт с поверхности электродов, смывается жидкостью или стекает самотеком, а из бункеров удаляется в виде жидкости или шлама.

По направлению движения газа электрические фильтры делятся на горизонтальные и вертикальные. По форме осадительных электродов электрофильтры делят на две группы: трубчатые и пластинчатые. В трубчатых электрофильтрах осадительными электродами являются круглые или шестигранные металлические трубы, а коронирующими электродами служат проволоки, натянутые по оси труб. В пластинчатых электрофильтрах в качестве осадительных электродов используется ряд параллельных поверхностей, между которыми подвешены коронирующие провода в соответствии с рисунком 1.9.

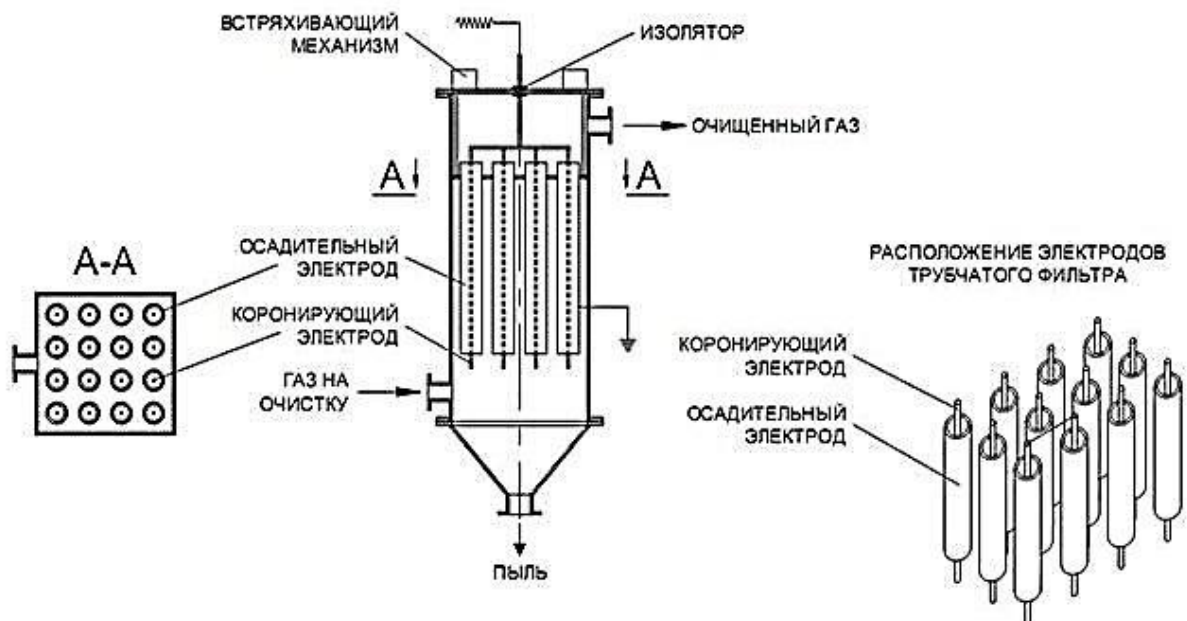


Рисунок 1.9 – Трубчатый электрофильтр

Однако для обеспечения улавливания частиц размером менее 1 мкм в электрофильтрах необходимо поддерживать низкую скорость потока, тщательно подготавливать очищаемые газы: увлажнять, охлаждать, проводить грубую очистку [143]. Это значительно усложняет схемы очистки, увеличивает расходы на эксплуатацию. Кроме того, теория и практика электростатического пылеулавливания показывают, что электрофильтры не могут обеспечить полной очистки газов от аэрозольных частиц с очень низким или, наоборот, очень высоким удельным электрическим сопротивлением.

Способ электрического осаждения пригоден для самых разнообразных аэрозолей. Эффективность улавливания аэрозолей пластификаторов в электрическом фильтре достигает 85-90%. Кроме того, очистка больших объёмов вентиляционных выбросов от аэрозолей пластификаторов с помощью электрофильтров связано с большими капитальными затратами, сложностью в эксплуатации и пожароопасностью [153,154].

Таким образом, к недостаткам электрофильтров относится более высокая стоимость по сравнению с другим пылеулавливающим оборудованием, а также возможность воспламенения или взрыва горючих и взрывоопасных газовых смесей под воздействием электрического разряда. В ряде случаев электрофильтры не могут быть применены в связи с тем, что свойства газопылевого потока неблагоприятны для осуществления процесса электрогазоочистки. Это относится, например, к случаям, когда удельное электрическое сопротивление пыли чрезмерно велико.

Аппараты фильтрационного действия (тканевые, волокнистые, бумажные и др.), разделение в которых происходит вследствие зацепления и инерционного взаимодействия частиц с фильтрующим материалом, при определенных условиях могут обеспечить высокую степень улавливания довольно мелкой пыли. Однако такие аппараты рассчитаны на небольшую скорость фильтрации и низкую концентрацию дисперсной фазы, их эксплуатация требует периодической регенерации фильтрующего материала [139-142,154]. Кроме того, внедрение

тканевых фильтров часто сдерживается также ограниченным выбором термостойких и химически стойких фильтрующих тканей [8,13].

Возможности использования аппаратов фильтрующего типа для очистки от жидких аэрозолей значительно расширяются в связи с разработкой новых синтетических, и металлических материалов, которые могут быть применены для приготовления фильтрующих элементов. Аэрозоли, проходя через фильтрующую насадку, осаждаются на её поверхности под действием сил диффузии, эффекта касания, инерционных, электростатических и гравитационных сил. По мере накопления жидкости в пористой перегородке она может удаляться из неё самопроизвольно или принудительно.

Для улавливания жидких аэрозолей возможно применять волокнистые материалы. Однако, существует вероятность разрушающего характера влияния на микроструктуру волокнистых фильтрующих материалов жидких аэрозольных частиц, причем даже современные материалы не являются исключением. Влияние аэрозолей на коэффициенты фильтрации фильтрующих материалов ускоряется, если волокнообразующий полимер набухает или заметно растворяется в жидкости, из которой состоят аэрозольные частицы. В зависимости от этого существуют допустимые пределы накопления жидких частиц в фильтрующих материалах, которые изменяются от десятых долей до десятков г/м².

Высокоэффективными, также, являются устройства, основанные на использовании абсорбционной способности активированного угля или силикагеля. Но очистка больших объемов вентиляционных выбросов будет связана с необходимостью частой регенерации фильтрующих кассет с углем или их заменой, что экономически вряд ли будет оправдано. Регенерация таких фильтров осложняется тем, что пластификаторы имеют высокую температуру кипения (231-340 °С), и для её осуществления потребуются специальные устройства.

Использование же для очистки вентиляционных выбросов от аэрозолей пластификаторов крупнопористых зернистых фильтров, а также насадочных

скрубберов, заполненных гравием, металлическими шариками, кольцами Рашига и т.п., неэффективно из-за мелкодисперсности частиц аэрозолей.

При очистке вентиляционных выбросов от аэрозолей пластификаторов в фильтрах с использованием дополнительного орошения, возникают трудности связанные, например, с разделением орошающей жидкости от уловленных пластификаторов, имеющих различную плотность. Так плотность диоктилфталата при температуре 20 °С 0,982 г/см³, что несколько меньше плотности воды, а дибутилфталата - 1,045 г/см³, сланцевого не более 0,980 г/см³. Кроме того, в вентиляционных выбросах содержится незначительное количество пыли, стеарата кальция и сажи, которые будут способствовать зарастанию войлоков, что приведет к значительному росту аэродинамического сопротивления таких устройств. По этой же причине не нашли своего применения для этих целей и различные тканевые фильтры, а также скрубберы с волокнистыми слоями.

Целесообразность использования мокрых аппаратов обычно определяется не только задачами очистки газов от пыли, но и необходимостью одновременного охлаждения или увлажнения газов, улавливания туманов и брызг, абсорбции газовых примесей и др. По эффективности мокрые пылеуловители конкурируют с такими высокоэффективными аппаратами, как рукавные фильтры и электрофильтры.

Основными преимуществами мокрых пылеуловителей являются сравнительно небольшая стоимость (без учета шламового хозяйства) и более высокая эффективность улавливания частиц (по сравнению с сухими механическими пылеуловителями), меньшие габариты (по сравнению с тканевыми и электрофильтрами), возможность применения для очистки газов от частиц размером до 0,1 мкм, а также использования в качестве абсорберов, для охлаждения и увлажнения (кондиционирования) газов в качестве теплообменников смешения, а также в тех случаях, когда другие высокоэффективные пылеуловители применяться не могут (например, при высокой влажности и температуре, при очистке взрыво- и пожароопасных газов или от взрывоопасной пыли и т.д.) [154,156]. К недостаткам мокрых пылеуловителей

относятся возможность забивания газоходов и оборудования пылью (при охлаждении газов или брызгоуносе) и потери жидкости вследствие брызгоуноса, необходимость антикоррозионной защиты оборудования при очистке агрессивных газов, получение большого количества шлама (и, соответственно, необходимость организации оборотного цикла водоснабжения и шламоудаления), сравнительно высокие энергозатраты [143,153,154]. Основные конструктивные и технологические усовершенствования мокрых аппаратов направлены на ликвидацию или снижение этих недостатков.

В мокрых пылеуловителях в качестве орошающей жидкости чаще всего применяется вода, при совмещении пылеулавливания и химической очистки газов выбор орошающей жидкости (абсорбента) обуславливается процессом абсорбции. Мокрые пылеуловители подразделяются на группы в зависимости от поверхности контакта или по способу действия: полые газопромыватели (оросительные устройства, промывные камеры, полые форсуночные скрубберы); насадочные скрубберы; тарельчатые газопромыватели (барботажные и пенные аппараты); газопромыватели с подвижной насадкой; мокрые аппараты ударно-инерционного действия (ротоклоны); мокрые аппараты центробежного действия; механические газопромыватели (механические скрубберы, динамические скрубберы); скоростные газопромыватели (скрубберы Вентури, эжекторные скрубберы) [145]. К мокрым пылеуловителям можно также отнести мокрые электрофильтры, орошаемые волокнистые фильтры и аппараты конденсационного действия.

Надежная и эффективная работа мокрых пылеуловителей, принцип действия которых основан на взаимодействии улавливаемых частиц с каплями орошающей жидкости (полых форсуночных скрубберов, скрубберов Вентури, эжекторных аппаратов и др.), существенно зависит от правильного выбора распыливающих устройств - механического, пневматического или электрического действия.

Скрубберы Вентури являются наиболее эффективными аппаратами мокрого типа, с помощью которых можно успешно очищать технологические выбросы от мелкодисперсных аэрозолей, как твердых, так и жидких. Общей конструктивной

особенностью этих аппаратов является наличие трубы-распылителя в виде нормализованной трубы Вентури, в которой происходит дробление орошающей жидкости пылегазовым потоком, движущимся со скоростью до 150-200 м/с, и установленного за ней каплеуловителя. Осаждению частиц пыли на каплях способствует турбулентность газового потока и высокие относительные скорости частиц и капель [143].

Скруббер Вентури состоит из плавно сужающегося конфузора, цилиндрической или прямоугольной средней части (горловины) и плавно расширяющегося диффузора. В конфузоре на некотором расстоянии от горловины обычно с помощью форсунок подводится жидкость в соответствии с рисунком 1.10.

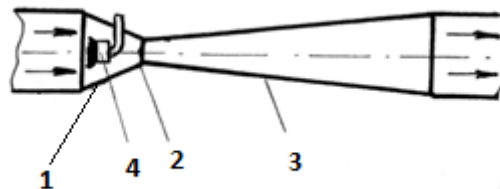


Рисунок 1.10 – Скруббер Вентури: 1-конфузор; 2-горловина; 3-диффузор; 4-форсунка.

Чтобы привести частицы в соприкосновение с жидкостью, её форсунками подают в виде брызг, которые быстро набирают скорость. Однако, ввиду высокой начальной относительной скорости происходит соударение между каплями и частицами аэрозолей. При дальнейшем движении газа через диффузорный участок трубы скорость потока снижается, в результате происходит укрупнение мелких капель. Их улавливание может быть осуществлено установкой за скруббером Вентури циклонов, крупнозернистых фильтров и других каплеуловителей. Очистку значительных объемов газа осуществляют, устанавливая несколько труб Вентури, объединенных в группу или даже в целую батарею труб.

В улавливании частиц размером больше 0,1 мкм решающая роль принадлежит инерционным силам, что достигается за счет высоких относительных скоростей между газами и жидкостью в горловине (порядка 100-120 м/с).

Низконапорные трубы Вентури, сопротивление которых менее 5000Па, могут быть использованы лишь для очистки газов от частиц крупнее 3 мкм. Для очистки же вентиляционных выбросов от аэрозолей пластификаторов могут быть использованы только высоконапорные трубы Вентури с сопротивлением 5000-25000 Па. Поэтому стоимость очистки из-за чрезвычайно высоких энергозатрат, а также в связи со сложностью эксплуатации насосного хозяйства очень велика.

Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик турбулентных промывателей с тканевыми и электрическими фильтрами показывает их значительные преимущества [154]. Основными достоинствами скрубберов Вентури являются простота изготовления, монтажа и обслуживания, не-большие габариты и высокая эффективность улавливания сравнительно мелких аэрозольных частиц. Кроме того, в аппаратах этого типа одновременно с очисткой можно проводить охлаждение [145,149,153], увлажнение и абсорбцию газов, что делает их перспективными при использовании для комплексной очистки отходящих промышленных газов. Скрубберы с распылением жидкости потоком газа наиболее просты по конструкции и компактны по сравнению с другими аппаратами, не подвержены забиванию (в отличие от форсуночных).

Существует большое количество конструкций скрубберов Вентури, отличающихся компоновкой (одиночные, групповые, батарейные), геометрическими размерами, способом подвода орошающей жидкости (с центральным подводом, с периферийным орошением, с пленочным орошением, форсуночные и бесфорсуночные в соответствии с рисунком 1.11, конфигурацией поперечного сечения (круглые, щелевые и кольцевые) и конструкцией каплеуловителя. В качестве каплеуловителей используются почти все известные типы аппаратов для разделения, чаще всего применяются аппараты центробежного действия - прямоточные и с тангенциальным входом (циклоны).

Несмотря на широкое использование и большое разнообразие конструкций скрубберов Вентури методики их расчета до настоящего времени фактически не существует. Фракционная эффективность улавливания рассчитывается в основном по эмпирическим зависимостям исходя из физико-химических свойств пыли и расходных параметров газа и орошающей жидкости.

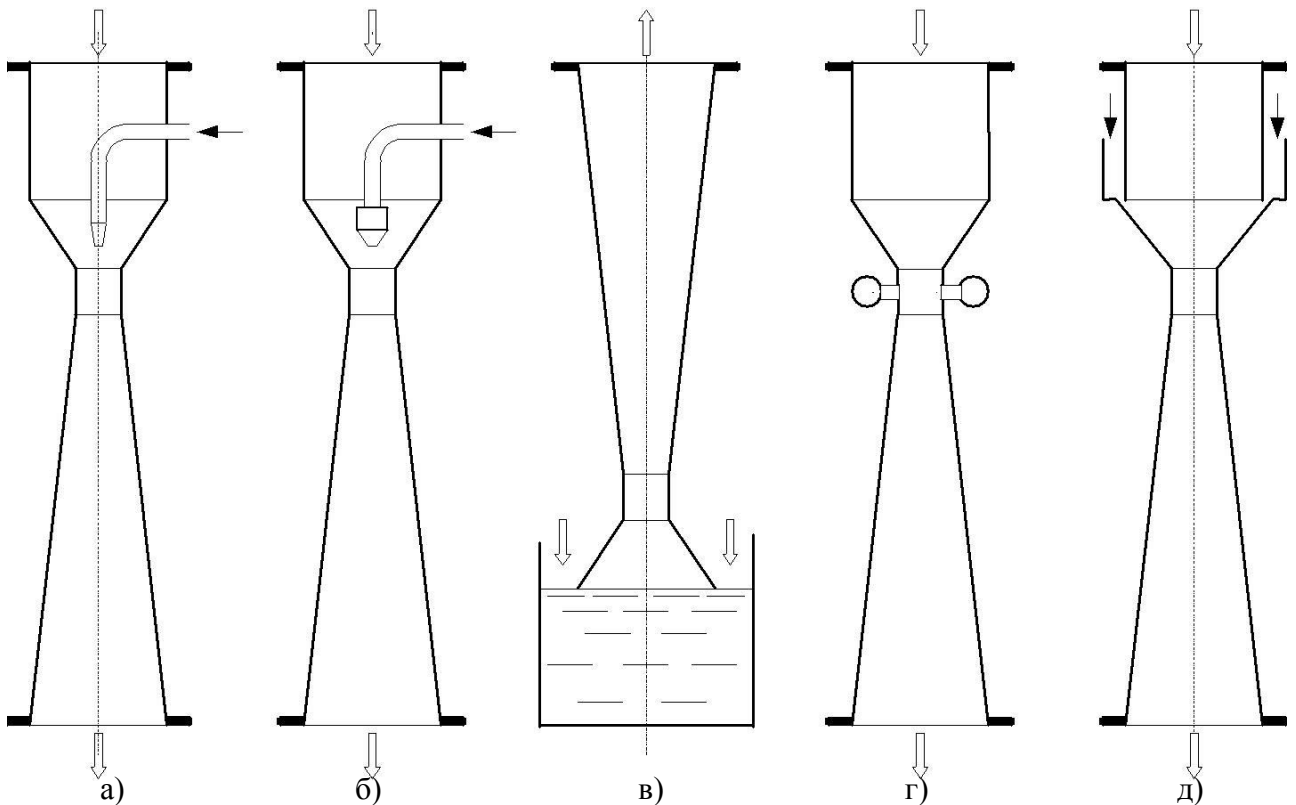


Рис.1.11 – Классификация скрубберов Вентури по способу подачи орошающей жидкости: а- с центральным подводом; б- форсуночные; в- бесфорсуночные; г- с периферийным орошением; д- с пленочным орошением

Основными недостатками скрубберов Вентури являются большой расход орошающей жидкости, высокое гидравлическое сопротивление и, как следствие, большие энергозатраты на очистку. Почти все существующие конструктивные усовершенствования скрубберов Вентури направлены на снижение этих недостатков [24,40,41,70,76,103,108,141,142,144]. Уменьшение энергозатрат может быть достигнуто как конструктивными изменениями аппаратов, так и изменением режима их работы, например созданием условий для конденсационного укрупнения частиц.

Существует ряд аппаратов, принцип работы которых основан на конденсационном методе. Повышение эффективности улавливания в режиме конденсации паров происходит под действием трех основных факторов [143,145]: гидродинамического течения, направленного перпендикулярно к поверхности растущей капли или другой поверхности осаждения и захватывающего мелкие частицы; увеличения размеров и утяжеления частиц; образования на частице пленки конденсата, благодаря чему повышается вероятность ее захвата каплей. Степень влияния каждого из трех факторов зависит от условий процесса и характеристик системы - размера, происхождения, концентрации частиц и т.д. Гидродинамическое течение (первый фактор) оказывает существенное влияние на эффективность улавливания только частиц диаметром менее 0,1 мкм [145]. Скорость конденсационного роста частиц зависит от их концентрации, растворимости и смачиваемости - наиболее интенсивно конденсация происходит на растворимых частицах, несколько хуже - на нерастворимых, но с хорошо смачиваемой поверхностью, еще хуже - на частицах с несмачиваемой поверхностью. Толщина пленки конденсата, обеспечивающая эффективный захват частицы каплей, зависит от дисперсности и расхода орошающей жидкости.

Разработано несколько конструкций мокрых пылеуловителей, в которых используется конденсационный эффект, отличающихся конструктивными особенностями, способами насыщения газа и создания условий для конденсации паров [143-145] согласно рисунку 1.12. Однако, использование для насыщения распыленной воды или смеси воды с паром не устраняет основного недостатка всех мокрых пылеуловителей - большого количества получаемого шлама. Наличие в парогазовой смеси не успевших испариться капель жидкости приводит к тому, что на их поверхности конденсируется часть пара, из-за чего замедляется конденсационный рост улавливаемых частиц и снижается эффективность их сепарации.

Разработано несколько конструкций аппаратов, в которых используется эффект конденсационного укрупнения частиц при смешении газа с паром и последующим охлаждении парогазовой смеси [143-145] согласно рисунку 1.13.

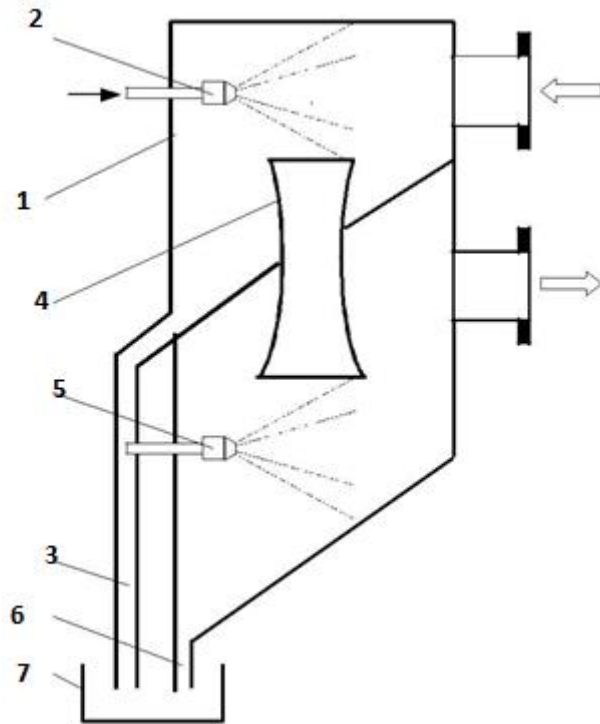


Рисунок - 1.12 – Конденсационный скруббер Вентури: 1- корпус; 2- форсунка тонкого распыла; 3- слив шлама с крупными частицами; 4- труба Вентури; 5- форсунка грубого распыла; 6- слив шлама с мелкими частицами; 7- отстойник.

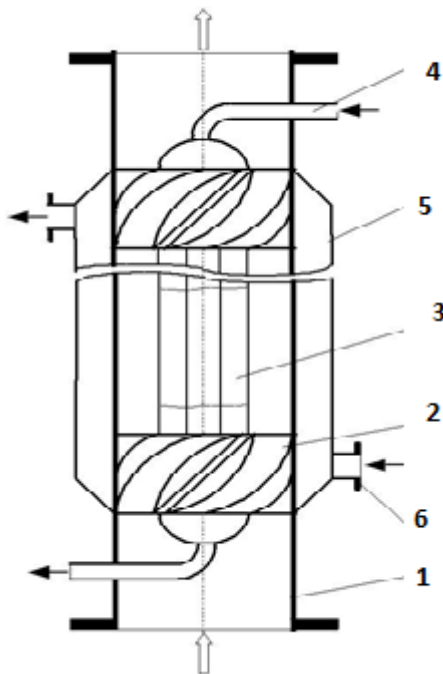


Рисунок - 1.13 – Конденсационный аппарат для осаждения аэрозолей: 1- наружная труба; 2- закручивающее устройство; 3- внутренняя пористая трубка; 4- патрубок для подачи пара; 5- охлаждающая рубашка; 6- штуцер для подачи хладагента.

В пароинжекционных скрубберах Вентури пар используется в качестве рабочего тела. В некоторых аппаратах одновременно с конденсационным ростом осуществляется сепарация частиц в центробежном поле в прямоточном закрученном потоке или в охлаждаемом циклоне [143-145]. В целом большинство конденсационных сепараторов при оптимальном соотношении основных конструктивных и технологических параметров обеспечивает высокую эффективность очистки газов от высокодисперсных аэрозольных частиц (до 94,5% для частиц с размерами от 0,01 до 1 мкм).

Основными преимуществами конденсационного метода очистки являются возможность достижения высокого улавливания высокодисперсных аэрозольных частиц с использованием традиционных методов разделения и гораздо меньший, по сравнению с обычными мокрыми пылеуловителями, удельный расход жидкости на очистку и, соответственно, выход загрязненного шлама.

Однако широкое внедрение метода сдерживается сложностью и недостаточной изученностью процессов, обеспечивающих конденсационное укрупнение и сепарацию аэрозольных частиц в турбулентном осевом или закрученном парогазовом потоке, что, соответственно, затрудняет подбор оптимальных технологических параметров процесса и разработку простых, эффективных и экономичных аппаратов и схем очистки газов.

Таким образом, несмотря на обилие методов и устройств в данной области, очистка воздуха от аэрозолей пластификаторов и каких-либо других маслянистых жидкостей не получила должного практического решения.

Выводы по главе 1

1. Выполнена оценка влияния производственных процессов на состояние атмосферы. Определены требования к качеству очищенного вентиляционного воздуха и аппаратам, обеспечивающим выполнение этих требований.

2. Рассмотрены технологические процессы при производстве изделий из поливинилхлорида. Определены основные выделяющиеся вредности и факторы, влияющие на уровень загрязнения. Отмечено, что на данный момент, даже с учетом усовершенствования технологии производства ПВХ изделий, очистка вентиляционных выбросов от туманов пластификаторов (аэрозолей) требует особого внимания. Кроме того, возможно и необходимо утилизировать тепловыделения от технологического оборудования при проектировании приточно-вытяжной вентиляции цехов по производству изделий из ПВХ.

3. Указаны основные сведения об аэрозольных системах, представлена их классификация на основании существующих литературных источников и классификация существующего пылеулавливающего оборудования в зависимости от дисперсности аэрозольных частиц и принципа работы.

4. Определены достоинства рассмотренных методов и аппаратов очистки вентиляционных выбросов от жидких аэрозольных частиц высокой дисперсности и указаны их недостатки.

5. Использование фильтров, несмотря на низкое гидравлическое сопротивление, требует частой замены фильтрующих материалов, поскольку само воздействие жидких аэрозольных частиц может вести к быстрому снижению коэффициента фильтрации материала. При очистке вентиляционных выбросов от аэрозолей пластификаторов с использованием дополнительного орошения, возникают трудности связанные, например, с разделением орошающей жидкости от уловленных пластификаторов, имеющих различную плотность.

6. Электрофильтры, несмотря на возможность обработки больших объемов газа при малых гидравлических сопротивлениях, малые энергозатраты; возможность полной автоматизации, имеют высокую металлоемкость и громоздкость аппаратов и значительные капитальные затраты. Кроме того, к недостаткам электрофильтров, наряду с их высокой стоимостью следует отнести высокую чувствительность процесса электрической очистки газов к отклонениям от заданного технологического режима, а также к механическим дефектам внутреннего оборудования. Иногда свойства газопылевого потока являются

серьезным препятствием для осуществления процесса электрогазоочистки (например, при высоком удельном электрическом сопротивлении пыли или когда очищаемый газ представляет собой взрывоопасную смесь).

7. Лучшие эксплуатационные характеристики по сравнению с тканевыми и электрическими фильтрами показывают скрубберы Вентури, основными достоинствами которых являются простота изготовления, монтажа и обслуживания и небольшие габариты. Основными недостатками скрубберов Вентури являются большой расход орошающей жидкости, высокое гидравлическое сопротивление и, как следствие, большие энергозатраты на очистку

8. Все мокрые способы очистки твердых и жидких аэрозолей имеют существенный недостаток - необходимость отделения уловленного загрязнителя от улавливающей жидкости, что зачастую связано с технической трудностью процесса и возрастанием стоимости очистки. По этой причине мокрые способы следует применять только при отсутствии других методов очистки, отдавая предпочтение способам с минимальным расходом жидкости.

9. Таким образом, достаточно актуальна задача конструирования высокоэффективного аппарата очистки от капельных аэрозолей с $d_{ч} \leq 1$ мкм, имеющим невысокое гидравлическое сопротивление, небольшую стоимость, удобного и недорогого в монтаже и эксплуатации, способствующего возвращению уловленного сырья в производство.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ АППАРАТОВ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

2.1 Основные положения, определяющие движение турбулентного потока в трубах и каналах

2.1.1 Общие положения гидродинамики

Теория движения жидкости (газов) базируется на двух основных уравнениях гидродинамики [148]: уравнении неразрывности движения и динамическом уравнении несжимаемой жидкости (уравнении Навье-Стокса).

Уравнение неразрывности (сплошности) потока:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho_x v_x)}{dx} + \frac{d(\rho_y v_y)}{dy} + \frac{d(\rho_z v_z)}{dz} = 0 \quad (2.1)$$

где ρ - плотность среды (газа), кг/м³, t - время, с, v - скорость среды (газов), м/с, x, y, z – направление осей координат.

Уравнение иллюстрирует закон сохранения энергии, согласно которому изменение массы определенного элементарного объема газов, компенсируется соответствующим изменением его плотности. В случае установившегося движения $d\rho/dt = 0$.

Второе основное уравнение определяет систему сил, действующих в жидкости (газе) и может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} -\frac{dp_x}{dx} + \mu \left(\frac{d^2 v_x}{dx^2} + \frac{d^2 v_x}{dy^2} + \frac{d^2 v_x}{dz^2} \right) &= \rho \left(\frac{dv_x}{dt} + \frac{v_x dv_x}{dx} + \frac{v_y dv_x}{dy} + \frac{v_z dv_x}{dz} \right) \\ -\frac{dp_y}{dy} + \mu \left(\frac{d^2 v_y}{dx^2} + \frac{d^2 v_y}{dy^2} + \frac{d^2 v_y}{dz^2} \right) &= \rho \left(\frac{dv_y}{dt} + \frac{v_x dv_y}{dx} + \frac{v_y dv_y}{dy} + \frac{v_z dv_y}{dz} \right) \\ -\rho g - \frac{dp_z}{dz} + \mu \left(\frac{d^2 v_z}{dx^2} + \frac{d^2 v_z}{dy^2} + \frac{d^2 v_z}{dz^2} \right) &= \rho \left(\frac{dv_z}{dt} + \frac{v_x dv_z}{dx} + \frac{v_y dv_z}{dy} + \frac{v_z dv_z}{dz} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

где p - давление в рассматриваемой точке потока, Н/м², μ - динамическая вязкость среды, кг/(м·с).

В этом уравнении учтено действие четырех сил: тяжести, давления, внутреннего трения (вязкости) и инерции.

Дифференциальные уравнения характеризуют внутренний механизм процесса и помогают установить взаимосвязь между физическими условиями процесса и изменениями этих условий во времени.

2.1.2 Основные понятия турбулентности

Турбулентность – это форма движения газов и жидкостей, характеризующаяся потерей гидродинамической устойчивости движения потока [2,4,65,94-99].

Основными параметрами, характеризующими турбулентное течение, являются: число Рейнольдса, динамическая скорость, степень турбулентности (интенсивности), масштаб турбулентности, частота турбулентных пульсаций, их распределение и характерные значения.

Течение становится турбулентным с момента превышения безразмерного параметра – числа Рейнольдса над критическим:

$$\text{Re}_L = \frac{u_m L}{\nu} \quad (2.3)$$

где u_m – средняя скорость течения газа или жидкости, м/с, ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с (при 20°C $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$, м²/с), L – характерный размер потока, м (для труб – внутренний диаметр D , каналов – эквивалентный диаметр $D_{\text{э}}$).

Турбулентный режим характеризуется, в отличие от ламинарного, перемешиванием объемов газа между собой, хаотическими пульсациями скорости в различных направлениях, интенсивной диффузией газа и резким падением скорости у стенок. И поэтому распределение концентрации частиц по поперечному сечению турбулентного потока значительно отличается от распределения частиц в ламинарном потоке, а интенсивность осаждения частиц из турбулентного потока резко возрастает.

Причиной возникновения турбулентных пульсаций являются периодически повторяющиеся бурные локальные выбросы массы газа из гидродинамически неустойчивых замедленных участков пристеночной области, где газ испытывает сильное торможение и имеется значительный градиент (сдвиг) скорости течения. Выбросы газа порождают подковообразные вихри, уходящие вглубь потока, где стимулируют появление новых локальных его отрывов.

Масштаб первичных вихрей (внешний или основной), сравним с масштабом потока, а скорость – со скоростью течения; частота же их сравнительно невелика. При больших числах Re_L движение этих наиболее крупных вихрей оказывается неустойчивым и порождает более мелкие вихри и т. д. вплоть до мельчайших вихрей, для которых $Re_L < 1$. Движение внутри таких собственно турбулентных вихрей носит ламинарный характер и уже существенно зависит от молекулярной вязкости. На движении мелкомасштабных вихрей не сказывается ориентирующее действие поступательного движения потока, все направления равновероятны, пульсации изотропны. Вихри этого масштаба, называемого внутренним масштабом или просто масштабом, движутся как одно целое, частота пульсаций постоянна и равна наивысшему значению.

При математическом описании турбулентного движения мгновенная скорость потока в рассматриваемой точке для каждой из трех ее составляющих: продольной (ось X) – u_t , поперечной (ось Y) – v_t , тангенциальной (ось Z) – w_t , представляется в виде суммы осредненной скорости и скорости пульсаций (u', v', w').

$$u_t = \bar{u} + u' ; v_t = \bar{v} + v' ; w_t = \bar{w} + w' \quad (2.4)$$

При прямолинейном течении вдоль оси x:

$$u_t = \bar{u} + u' ; v_t = v' ; w_t = w' \quad (2.5)$$

Для давления, не зависящего от направления, принимаем

$$p_t = \bar{p} + p' \quad (2.6)$$

Подстановка этих выражений в дифференциальные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости — уравнения Навье — Стокса — и усреднение по

времени и пространству приводит к дифференциальным уравнениям осредненного движения, называемым уравнениями Рейнольдса. Эти уравнения отличаются от уравнений Навье — Стокса наличием добавочных касательных напряжений, определяемых при поступательном движении газа вдоль оси X выражениями:

$$\tau_{xx} = -\overline{\rho u'^2} ; \tau_{xy} = -\overline{\rho u'v'} ; \tau_{xz} = -\overline{\rho u'w'} \quad (2.7)$$

где ρ — плотность газа, кг/м³.

Повышение вязкости газа и соответственно гидродинамического сопротивления в турбулентном потоке как раз и обусловлено появлением этих напряжений (с повышением температуры растет динамическая и кинематическая вязкости при 20 °С $\mu = 18,4 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с) и $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ м²/с соответственно).

Появление дополнительных касательных напряжений в турбулентном потоке неизбежно связано с появлением в нем определенных градиентов скорости, поэтому по аналогии можно предполагать, что здесь, как и в случае молекулярной вязкости, справедлива зависимость типа закона Ньютона

$$\tau_{xy} = \nu \rho \frac{du}{dy} \quad (2.8)$$

где ν - кинематический коэффициент турбулентной вязкости.

Порядок величины скорости турбулентных пульсаций характеризует динамическая скорость (скорость трения), м/с

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_{xy}^w}{\rho}} \quad (2.9)$$

где τ_{xy}^w - касательное напряжение на стенке.

Степень турбулентности определяется (для каждой составляющей отношением средней квадратичной скорости пульсаций к средней скорости течения) по формуле:

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{\overline{u}} \quad (2.10)$$

В потоке внутри трубы: в центральной его части $I \sim 3-5\%$, в пристеночной области $I \sim 30-50\%$.

Масштаб турбулентности характеризует средний размер пульсационных объемов (молей, вихрей), обладающих одинаковой скоростью и ведущих себя некоторое время как одно целое. Поперечное расстояние, на котором данный пульсационный объем теряет целостность, называется путем перемешивания (или – смешения). Оно лежит в основе полуэмпирической теории турбулентности.

В пристеночной области его длина – l_m пропорциональна расстоянию до стенки – y .

$$l_m = k \cdot y = 0,4 \cdot y, \quad (2.11)$$

где k – коэффициент Кармана, равный $0,4$.

Частота пульсаций характеризует число изменений амплитудных значений пульсационной скорости в секунду. Их численное значение зависит от масштаба вихря и, поскольку в турбулентном потоке существует целый спектр частот, то частота пульсаций будет не одна, а множество, которое можно разбить на три группы: 1 – интервал низких частот (энергоемких вихрей), 2 – интервал средних частот (инерционный интервал), 3 – интервал высоких частот (интервал рассеяния механической энергии в тепло (диссипации))

Использование в интервалах высоких и средних частот гипотез подобия А.Н. Колмогорова позволило получить следующие зависимости.

Внутренний масштаб турбулентности:

$$l_\lambda = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad (2.12)$$

Максимальная скорость мелкомасштабных пульсаций определяется выражением:

$$u_\lambda = \frac{1}{4} (\varepsilon \nu)^{1/4} \quad (2.13)$$

где ε – скорость диссипации, выражаемая соотношением:

$$\varepsilon \approx u_m^3 / D \quad (2.14)$$

Интенсивность турбулентности:

$$I = \frac{1}{4} \text{Re}^{-1/4} \quad (2.15)$$

Нижний предел частоты турбулентных пульсаций, с^{-1} , принадлежащий наиболее крупномасштабным вихрям с масштабом D , определяется отношением

$$w_0 \approx u_m / D \quad (2.16)$$

где u_m – средняя скорость потока м/с; D – масштаб.

Верхний предел частоты турбулентных пульсаций, с масштабом l_λ :

$$w_{l_\lambda} \cong \frac{1}{4} \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

2.1.3 Движение турбулентного потока в трубках и каналах

Особенность такого потока – наличие твердых границ – стенок, приводящие к сдвигу осредненной и пульсационных составляющих скорости течения (см. рисунок 2.1) [99].

Аналитическое решение этой гидродинамической задачи в случае турбулентного режима невозможно, поэтому она решается полуэмпирическими методами с использованием опытных данных.

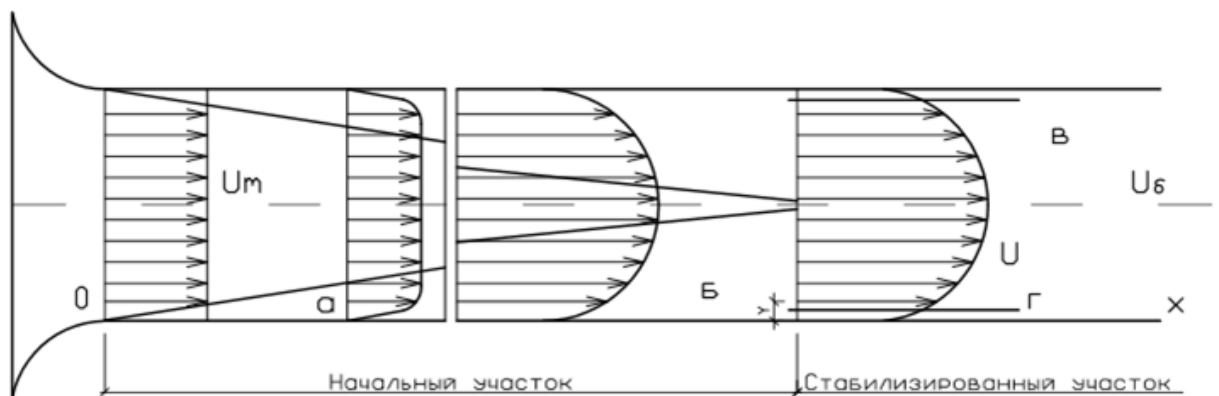


Рисунок 2.1 – Схема формирования стабилизированного турбулентного потока в трубе и канале: а – ламинарный пограничный слой; б – переходная область течения; в – стабилизированный турбулентный поток; г – вязкий подслой

В качестве масштаба потока в трубе принимается внутренний диаметр D , а в каналах – эквивалентный диаметр – $D_э$, равный $4R_э$ ($R_э$ – гидравлический радиус)

$$R_3 = \frac{F}{P} \quad (2.18)$$

$$D_3 = \frac{4F}{P} \quad (2.19)$$

где F и P – соответственно площадь поперечного сечения и периметр.

Нижнее критическое значение числа Re_D , при котором ламинарное движение невозможно для прямых гладких труб ~ 2000 , для щелевых каналов – 1200.

Устойчивое турбулентное течение наблюдается для труб, при $Re_D > 4000$, для каналов – $Re_D \geq 2000$ [15].

Стабилизированный, т. е. устоявшийся с неизменным профилем скорости, турбулентный поток, устанавливается в трубах и каналах не сразу, а лишь на довольно значительном расстоянии от входа в соответствии с рисунком 2.1. Газ вступает в трубу или канал с достаточно равномерным распределением скорости по поперечному сечению, но соприкасаясь со стенкой, притормаживается силами вязкостного трения, а на самой стенке даже прилипает, т. е. имеет нулевую скорость. По мере продвижения вдоль трубы или канала заторможенный слой газа вес более и утолщается, образуя ламинарный пограничный слой с толщиной δ_l .

По ходу течения газа на стенке образуется пограничный слой, в котором скорость изменяется от нуля на стенке до максимальной осредненной U_m . Толщина ламинарного слоя на стенке, по ходу течения газа, возрастает, по закону $\delta_l \cong 5\sqrt{(v/u_m)x}$.

Толщина ламинарного пограничного слоя является постоянной до достижения критического значения числа Re_D , после чего он разрушается, превращаясь в пограничный слой турбулентной структуры.

Поскольку количество притекающего газа остается неизменным, торможение газа приводит к определенному повышению скорости в ядре потока, «вытягивания» профиля скорости. При сверхкритических значениях Re_D это вытягивание, однако, не успевает привести к характерному для ламинарного

течения параболическому профилю скорости, так как ламинарный пограничный слой вскоре теряет гидродинамическую устойчивость и преобразуется в турбулентный пограничный слой. Это происходит после того, как характеризующее течение в пограничном слое число Рейнольдса превысит критическое значение: $Re_{\delta} = \frac{u_m \delta}{\nu} \geq Re_{\delta}^{kp} = 2000$.

Толщина турбулентного пограничного слоя растекается быстрее ламинарного ($\sim x$, а не \sqrt{x}) и он быстро заполняет все поперечные сечения канала, образуя логарифмический профиль скорости. Однако непосредственно у стенки остается очень тонкий слой за счет влияния сил вязкости ($Re_{\delta} < 1$), в котором сохраняется линейный профиль скорости.

Формирование стабилизированного турбулентного потока крайне неустойчиво, особенно при Re_D мало превышающим Re_D^{kp} .

Расстояние, на котором завершается переход к стабильному турбулентному течению l_n называется длиной начального участка, зависящей не только от Re , но и от шероховатости стенок и, что особенно важно, в поведении концентраций, от формы входа (и пути подвода) газа в трубу, при плавном подводе (лемнискате). Для круглых гладких и шероховатых труб с плавным входом это расстояние может быть определено по формуле Филиппова:

$$l_{нач} = \frac{2,45}{\sqrt{\lambda}} D \quad (2.20)$$

где: λ – коэффициент сопротивления трению.

Существенное значение при этом имеет степень турбулентности в поступающем в канал потоке. Ее увеличение сокращает $l_{нач}$. Это тоже очень существенно в отношении гидродинамики аэрозоля, особенно при канальной структуре его частиц [92,95,98,130,135,136].

Как уже указывалось выше, турбулентный поток в трубе характеризуется наличием турбулентного ядра, включающего основную часть потока, и присутствием около стенок трубы пограничного слоя, состоящим из тонких ламинарного и переходного слоев (рис. 2.2).

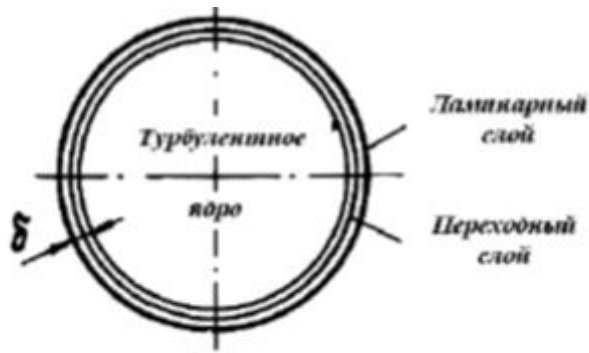


Рисунок 2.2 – Границы слое при движении турбулентного потока

Толщина ламинарного слоя δ определяется по формуле

$$\delta = \frac{30D}{Re\sqrt{\lambda}} \quad (2.21)$$

Поскольку стенки труб имеют шероховатость k , в зависимости от отношения k/δ , различают гидравлически гладкие ($k < \delta$) и гидравлически шероховатые трубы ($k > \delta$).

При различных числах Рейнольдса одна и та же труба может быть как гладкой, так и шероховатой.

При турбулентном режиме при $k < \delta$ и $2300 < Re < 10^5$ ($2300 < Re < 10D/k$) теоретическое значение величины λ определяется по формуле Блазиуса, используемой для гладких труб

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (2.22)$$

или формуле Конакова:

$$\lambda = (1,8 \lg Re - 1,5)^{-2} \quad (2.23)$$

Когда $k > \delta$ и $(10D/k < Re < 560D/k)$ используется формула Альтшуля:

$$\lambda = \frac{0,11}{(68 / Re + k / D)^{-0,25}} \quad (2.24)$$

где Re – критерий Рейнольдса, $Re = \frac{U_m D}{\nu}$, k – эквивалентная шероховатость,

m (для гладких стальных труб $k = 2 \cdot 10^{-5}$, для латунных и медных $k = 2 \cdot 10^{-6}$), ν – кинематическая вязкость воздуха, m^2/c (при $20^\circ C$ $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$).

Для значения $Re < 10^5$ толщина пограничного слоя в трубе также может быть определена по эмпирической зависимости [15].

$$\delta = 62,8D Re^{-0,875} \quad (2.25)$$

Трубу считают гладкой, относительная шероховатость внутренней поверхности которой, равная отношению средней высоты выступов (величина абсолютной шероховатости) k к внутреннему диаметру трубы D , составляет [15].

$$\varepsilon = \frac{k}{D} \leq 17,85 Re^{-0,875} \quad (2.26)$$

Обычно многообразие профилей осредненной скорости стабилизированного течения, аналитически описывают безразмерными параметрами:

безразмерной скоростью

$$u_+ = u/u_* \quad (2.27)$$

безразмерным расстоянием от стенки

$$y_+ = yu_*/\nu \quad (2.28)$$

где значение динамической скорости определяется в общем случае по формуле:

$$u_* = u_m \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \quad (2.29)$$

Для гладких труб:

$$u_* = 0,2u_m / Re_D^{1/8} \quad (2.30)$$

Безразмерная осредненная скорость является функцией безразмерного расстояния до стенки

$$u_+ = f(y_+) \quad (2.31)$$

Аналитическая форма распределения осредненной скорости по поперечнику трубы имеет вид

$$u/u_0 = (y/R)^{1/n} \quad (2.32)$$

где $n = f(Re_D)$, u_0 – скорость газа на оси трубы или канала.

Или по формуле Альтшуля:

$$u/u_0 = (y/R)^{0,9\sqrt{\lambda}} \quad (2.33)$$

В вязком подслое течение потока имеет резко выраженный пульсационный характер, происходит непрерывная смена квазиламинарного и турбулентного режимов течения, с периодическим вторжением турбулентных вихрей из смежных областей потока.

Наибольшая неравномерность пульсационной скорости наблюдается близ стенок, наименьшая – в центре потока, градиент скорости на оси равен нулю. Составляющие пульсационной скорости u' , v' , w' – не одинаковы по величине повсюду. Исключение – центральная часть, где амплитуда пульсационной скорости – 72-75% динамической скорости u^* . Теоретического описания закона распределения составляющих пульсацию скорости поперек потока, не существует, обычно используются частные решения.

Наиболее значительны продольные пульсации с пиком $u'_{пик} \approx 2,6u^*$ около стенки: при $y_+ \approx 15$. Наименее значительны вдали от стенки с пиком $v'_{пик} \approx u^*$ при $y_+ \approx (0,05 - 0,15)R$ в зависимости от Re_D .

Относительная амплитуда поперечных пульсаций скорости и интенсивность турбулентности для u' , v' , w' вблизи стенки не зависит от Re_D .

В вязком подслое (стенка) наблюдается повышенная интенсивность продольной турбулентности (30-32%), превосходящая ее на порядок в ядре потока.

Наиболее энергоемки низкочастотные пульсации, принадлежащие крупномасштабным вихрям. Их частота определяется как:

$$\omega_E = u_* / l_E \cong u_* / 0,1R, \quad (2.34)$$

где l_E – масштаб энергоемких пульсаций, равный $0,1R$, R – радиус трубы.

С нижним пределом частоты пульсации ω_0 значение ω_E связано как

$$\omega_E = 20\omega_0 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \quad (2.35)$$

С приближением к стенке частотный спектр расширяется за счет более высоких пульсаций в связи с уменьшением масштаба вихрей вблизи стенки.

Средняя частота пульсаций не зависит от расстояния до стенки. Ее значение прямо пропорционально средней скорости потока: $f = k u_m$, где k зависит от размера канала [94-99].

2.1.4 Турбулентная диффузия

Очень маленькие частицы подвергаются воздействию броуновского движения молекул или турбулентной диффузии. Величина среднего квадратичного рассеяния частиц среды от первоначального положения определяется зависимостью:

$$\overline{y^2} = 2D_t t \quad (2.36)$$

t – время смещения, с., D_t – коэффициент диффузии,

Для развитой турбулентной диффузии справедлив закон Фликаса (молекулярная диффузия):

$$j = -D_t \frac{dc}{dy} \quad (2.37)$$

где j – поток диффундирующих частиц в течение 1 с через 1 м² поверхности, dc/dy – градиент концентрации частиц.

Применимо так же дифференциальное уравнение конвективной диффузии

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_t \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (2.38)$$

Уравнение (2.37) и (2.38) фиксируют факт равенства количества частиц, вносимых в объем конвективным путем и количества частиц, уносимых из него диффузией.

Коэффициент турбулентной диффузии принимают равным коэффициенту турбулентной вязкости [99]:

$$D_t = \nu_t \quad (2.39)$$

Распределение ν_t по поперечному сечению трубы сходно с распределением v' (поперечная составляющая скорости пульсации).

В вязком подслое рост турбулентной вязкости и, соответственно, турбулентной диффузии, происходит существенно быстрее, чем за его пределами [92].

2.2 Движение аэрозольных частиц в турбулентном потоке

На частицу в турбулентном потоке могут оказывать влияние следующие явления: сопротивление среды, гравитационное осаждение, турбулентная диффузия, пульсация скорости и др. [99]. В зависимости от размера частиц и режима движения, меняется значимость воздействия указанных явлений.

2.2.1 Сила сопротивления

Гидродинамическое сопротивление частиц движению газа при размере частиц, сравнимом с длиной пробега газовых молекул ($0,2 < d < 2$ мкм), описываются линейным законом Стокса [153,154] с учетом поправки Кенингема-Милликена C_k

$$F_c = 3\pi\mu d u_p / C_k \quad (2.40)$$

где μ – динамическая вязкость среды, кг/(м·с).

$$C_k = 1 + \frac{2l_i}{d} \left(1,257 + 0,4e^{-1,1d/2l_i} \right) \quad (2.41)$$

$$l_i = \mu / \rho (\pi M / 2RT)^{0,5} \quad (2.42)$$

где l_i – свободный пробег газовых молекул, м, ρ – плотность газа, кг/м³, R – универсальная газовая постоянная, $R = 8314$ Дж/(кмоль·К), T – температура газов, К, M – масса 1 кмоль газов, кг/кмоль.

2.2.2 Сила тяжести

Сила тяжести, под влиянием которой частицы оседают со скоростью определяется по формуле [153,158,159]:

$$F_g = \tau g \quad (2.43)$$

где g – ускорение свободного падения, м²/с, τ – время релаксации частицы, с.

Для высоко- и тонкодисперсных частиц

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{\rho_p}{\mu} d^2 \quad (2.44)$$

В общем виде конечная скорость частицы u_p (м/с), достигается при установлении равенства между силой сопротивления среды F_c и внешней силой (в Н) действующей на частицу, определяется по формуле при $F_g = F_c$

$$u_p = F_b C_k / 3\pi d \mu \quad (2.45)$$

2.2.3 Пульсация скоростей

Частицы аэрозоля малых размеров наряду с поступательным движением вместе с потоком совершают пульсационные с колебательными движения относительно несущих их молей газа и беспорядочно перемещаются вместе с ними (турбулентная диффузия частиц). Оседание частиц под действием силы тяжести происходит также беспорядочно вместе с несущими их молями.

Пульсационное движение частицы в течение одного периода пульсаций газа для продольной составляющей, ($\bar{v} = \bar{\omega} = 0$ - как частный случай этого) описывается так:

$$u = \bar{u} + u' \sin \omega t \quad (2.46)$$

где ω – лагранжевая частота пульсации, t – время.

Результатом решения линейного дифференциального уравнения движения стоковой частицы [99] являются два очень важных (при оценке степени осаждения частиц аэрозоля) показателя: μ_p – степень увлечения частицы пульсирующей средой и μ_g – степень обтекания частиц.

Брандт [170], установил, что частица, взвешенная в турбулентном потоке, тем точнее следует за пульсациями газа, чем меньше ее радиус и плотность, чем больше вязкость газа и ниже частота пульсации. А также, что условием полноты

увлечения частиц пульсирующей средой ($\mu_p = 1$) является $\omega\tau \ll 1$, а увеличением полноты ее обтекания - $\omega\tau \gg 1$.

Абсолютно полного увеличения взвешенных частиц в пульсационное движение среды, однако, не может быть, т.к. частицы вовлекаются в него силами вязкости, которые проявляют себя лишь при наличии относительно скорости среды.

Дальнейшее развитие этого вопроса в работах [161], позволило получить следующую взаимосвязь:

$$\bar{\mu}_p^2 = \frac{1}{1 + \omega_E \tau} \quad (2.47)$$

$$\bar{\mu}_g^2 = \frac{\omega_E \tau}{1 + \omega_E \tau} \quad (2.48)$$

2.2.4 Турбулентная диффузия

Если частицы очень малы, их движение не отличается от движения несущих молей газа ($\omega_E \tau \ll 1$) и, следовательно, имеет место равенство коэффициентов турбулентной диффузии среды и частиц [170]:

$$D_t = D_p \quad (2.49)$$

Значит, действительны все законы турбулентной диффузии сплошной среды.

1. Закон рассеивания (блуждания).

$$\overline{y^2} = 2D_p t \quad (2.50)$$

2. Первый закон диффузии Фика.

$$j = -D_p \frac{dc}{dy} \quad (2.51)$$

3. Дифференциальное уравнение конвективной диффузии при установившемся состоянии.

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + \omega \frac{\partial c}{\partial z} = D_p \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial c}{\partial z^2} \right) \quad (2.52)$$

С учетом воздействия турбулентных пульсаций коэффициент поперечной диффузии определяется по формуле [170]:

$$D_p = \frac{1}{1 + \omega_E \tau} D_t \quad (2.53)$$

2.2.5 Оседание частиц в движущемся потоке

Некоторые другие воздействия, оказывающие влияние на движущуюся частицу, такие как скольжение частиц и подъемная миграция имеют значимую величину только для грубодисперсных аэрозолей.

Анализ существующих экспериментальных данных и аналитических зависимостей показал, что для частиц с размерами $0,1 \text{ мкм} \leq d_p \leq 100 \text{ мкм}$, из всех воздействий наиболее значительной является величина турбулентной диффузии.

Математический анализ движения частиц, взвешенных в градиентном поле поперечных пульсаций турбулентного потока газа, [99] показал наличие еще одной формы поперечного движения частиц, называемого турбулентной миграцией частиц.

Причем в вопросе об осаждении частиц аэрозоля, наибольший интерес представляет именно турбулентная миграция частиц. Его влияние на картину турбулентного переноса частиц весьма основательно.

В гидродинамически чистом виде явление турбулентной миграции проявляется лишь в каналах и трубах при строго вертикальном их положении, т.к. силы тяжести и градиент скорости турбулентных поперечных пульсаций образуют прямой угол в силу чего не влияют на процесс формирования миграционного движения частиц.

В наклонных и горизонтальных каналах миграционное движение находится под действием сил тяжести [98].

2.2.6 Осаждение аэрозольных частиц согласно миграционной теории процесса

Аэрозольные частицы при своем перемещении на том или ином этапе достигают пристеночной области и, когда расстояние до стенки становится равным их радиусу R , касаются ее и осаждаются на ней, если поверхность стенки удерживает частицы, т.е. она является поглощающей.

Процесс формирования осадка частиц после входа в трубу, происходит в соответствии с формированием гидродинамического пограничного слоя.

Мерой интенсивности осаждения является скорость турбулентного осаждения частицы V_t , м/с: количество частиц (весовые) или численное, осаждающихся на 1 м^2 поверхности за 1 с, отнесенное к единичной концентрации частиц [99]:

$$V_t = j_w / c_m, \quad (2.54)$$

где j_w – удельный поток частиц к стенке, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$,

c_m – средняя по поперечному сечению концентрация частиц, $\text{г}/\text{м}^3$.

В теоретических исследованиях обычно пользуются безразмерной скоростью оседания частицы [99]:

$$V_{t+} = V_t / u_* \quad (2.55)$$

где u_* - по (2.29)

Основной движущей силой процесса осаждения являются, как было указано выше, турбулентная диффузия и турбулентная миграция частиц.

Причем первая – не может обеспечить наблюдаемых в экспериментах, высоких значений V_t и поэтому ей уделяется лишь роль подвода частиц к пристеночной области на участке стабилизированного участка трубы [180].

В противоположность турбулентной диффузии турбулентная миграция обладает высокой интенсивностью именно в пристеночной области, где она имеет конечное значение, а не равные нулю, как коэффициент турбулентной диффузии.

Вектор скорости этой формы движения в пристеночной области всегда направлен в сторону стенки в отличие от подъемной миграции частиц, направленной в эту сторону лишь в отдельных случаях.

Численное же значение скорости турбулентной миграции у стенки, вполне объясняет экспериментальные значения величины V_t .

Теоретических моделей процесса турбулентного осаждения аэрозолей в трубах и каналах существует более двух десятков, однако турбулентно-миграционная модель приводит (даже статистически) к результатам наиболее близким к экспериментальным данным [97].

Теоретические расчеты численным методом показали, что величина V_t сильнее всего зависит от: скорости газа u_m , диаметра частиц – d_p и вязкости газа – μ .

Понятно, что знание численного значения V_t позволяет рассчитать долю частиц, осаждающихся на каком-то участке или по всей длине трубы, что является основным условием при конструировании очистных устройств.

Эмпирические формулы для скорости турбулентного осаждения частиц достаточно многообразны и могут быть представлены в общем виде:

$$V_t = a + bu_m^n \quad (2.56)$$

$$V_{t+} = A \left(\frac{\tau_+}{1 + \omega_E \tau} \right)^2 \quad (2.57)$$

где a , b , A - коэффициенты, определяемые опытным путем, ω_E – частота энергоемких пульсаций газа, s^{-1} , $\tau_+ = \pi u_*^2 / \nu$ - безразмерное время релаксации.

2.2.7 Расчет эффективности осаждения частиц аэрозоля на стенках труб и каналах

Основным показателем интенсивности осаждения частиц является массовая доля частиц выпадающих на стенку из потока в единицу времени на единицу

поверхности. На участке dx (м), трубы за 1 секунду будет осаждаться по периметру P (м), количество частиц [75,99,145]:

$$Pj_w dx = PV_t c_x dx \quad (2.58)$$

где j_w – удельный поток частиц к стенке, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; V_t – скорость осаждения частиц, $\text{м}/\text{с}$; c_x – средняя концентрация частиц в данном сечении $F(\text{м}^2)$ трубы, $\text{г}/\text{м}^3$.

В связи с выпадением из потока, движущегося со средней скоростью u_m (м/с), частиц, его средняя концентрация в секундном объеме Fu_m уменьшится в конце участка dx на величину dc_x , а общее количество частиц – на величину $Fu_m dc_x$. На основании (2.58):

$$Fu_m dc_x = -PV_t c_x dx \quad (2.59)$$

$$-\frac{dc_x}{c_x} = \frac{PV_t}{Fu_m} dx \quad (2.60)$$

Интегрирование этого уравнения в пределах от $x=0$ до $x=l$ при условии, что при $x=0$, $c_x=c_n$ (c_n – начальная концентрация частиц при входе в трубу), приводит к следующему уравнению:

$$\ln \frac{c_x}{c_n} = -\frac{P}{Fu_m} \int_0^l V_t dx \quad (2.61)$$

На стабилизированном участке труб и каналов, скорость оседания частиц V_t не зависит от продольной координаты, в силу чего уравнение (2.61) сводится к экспоненциальной зависимости.

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{PV_t l}{Fu_m}} \quad (2.62)$$

Для круглых труб $P = \pi D$ и $F = \pi D^2/4$, а их отношение $P/F = 4/D$.

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{4LV_t}{Du_m}} \quad (2.63)$$

Для плоскощелевых каналов $P = 2H$ и $F = Hh$ (H – ширина плоскостей, h – расстояние между ними) и соответственно $P/F = 2/h$ и для них

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{2LV_t}{hu_m}} \quad (2.64)$$

Поскольку R/h , $h/2$ и $D/4$ являются гидравлическим радиусом R_3 ($R_3 = F/P$), уравнение принимает вид:

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{LV_i}{R_3 u_m}} \quad \text{или} \quad \frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{4LV_i}{D_3 u_m}} \quad (2.65)$$

Поскольку в этой зависимости слева величина проскока частиц – Π , эффективность осаждения η будет равна:

$$\eta = 1 - \frac{c_x}{c_n} = 1 - e^{-\frac{LV_i}{R_3 u_m}} \quad (2.66)$$

Поскольку отношение L/u_m есть время пребывания частицы в трубе – t_{np} , то очевидно

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{V_i t_{np}}{R_3}} \quad (2.67)$$

Увеличение u_m уменьшает t_{np} , но происходит усиление эффекта осаждения частиц т.к. V_i растет пропорционально u_m , что компенсирует снижение t_{np} .

Из приведенных уравнений следует, что полного осаждения частиц возможно достичь только при бесконечно большом времени пребывания частиц в канале. Пределом этому при создании очистных аппаратов является экономическая целесообразность.

В процесс осаждения частиц, описанный формулами (2.58)-(2.67) входят турбулентно - диффузионные и турбулентно - миграционные составляющие.

Следует также отметить, что данные формулы отражают процесс полного оседания всех частиц, достигших стенки трубы или канала, то есть отсутствие явления вторичного уноса частиц со стенок. Полное оседание частиц возможно в случае высокой адгезии между частицами аэрозоля и стенками осадительного элемента, что определяется как свойствами материала осадительного элемента, так и свойствами аэрозоля.

Экспоненциальный закон падения концентрации частиц по ходу потока хорошо согласуется со многими опытными данными, в том числе и проведенные нами при осаждении высокодисперсных частиц диоктилфталата.

Расчет общего количества частиц, осаждающихся за время t на стенках трубы турбулентным путем G , г:

$$G = \frac{\pi D_э^2}{4} u_m (c_n - c_x) t \quad (2.68)$$

По всей длине трубы, количество оседающих в единицу времени частиц G_l , г/с:

$$G_l = (c_m - c_k) L_0 \quad (2.69)$$

где L_0 – расход газа, м³/с; $D_э$ – эквивалентный диаметр, м; c_m – средняя концентрация аэрозоля, г/м³:

$$c_m = \frac{c_n - c_k}{\ln \frac{c_n}{c_k}} \quad (2.70)$$

Удельный поток частиц к стенке по всей длине трубы будет равен, г/(м²·с):

$$j = \frac{G}{Pl} \quad (2.71)$$

2.3 Многокритериальная оптимизация с использованием функции принадлежности

Известно, что эксперимент занимает центральное место в науке. Для повышения эффективности экспериментальных исследований, целесообразно четко спланировать эксперимент, т.е. определить число и условия проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Причем поиск оптимальных условий, выбор значимых факторов, минимизация числа опытов являются существенными задачами при планировании экспериментальных исследований [3,10,19,63,66]. В этом случае целесообразно определить влияющие критерии и решить задачу многокритериальной оптимизации.

Реализовать принцип оптимальности - это решить экстремальную задачу вида [3,151,157]:

$$\begin{aligned} \max(\min) \quad & f(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad & \{ \leq, =, \geq \} b_i, \quad i=1, m, \\ x_j \geq 0, \quad & j = 1, n \end{aligned} \tag{2.72}$$

где $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – целевая функция, включающая в себя критерий оптимальности;

$x_j, j = 1, n$ – набор управляющих переменных;

$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_i, i=1, m$ – система ограничений.

Вектор \bar{X} (x_j) является допустимым решением, или планом задачи оптимального программирования, если он удовлетворяет системе ограничений. Тот план \bar{X} , который доставляет максимум или минимум целевой функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – оптимальный.

Для решения многокритериальных задач используются различные методы определения обобщенного показателя оптимальности. В случае разноразмерных критериев выбор оптимального варианта, возможно, выполнить с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона $d(x)$ [3,66,110]. Она возникла в результате наблюдений за реальными решениями экспериментаторов и обладает свойствами непрерывности, монотонности и гладкости. Значимые параметры пересчитываются в числовые значения, а затем определяется общий показатель.

Эта функция была выведена эмпирическим путем. Ось координат X называется шкалой частных показателей, ось d – шкалой желательности.

Шкала Харрингтона устанавливает соответствие между лингвистическими оценками желательности значений показателя x и числовыми интервалами $d(x)$.

Таблица 2.1 – Числовые интервалы шкалы Харрингтона

Лингвистическая оценка	Интервалы значений функции желательности $d(x)$
Очень хорошо	1,00-0,80
Хорошо	0,80-0,63
Удовлетворительно	0,63-0,37
Плохо	0,37-0,20
Очень плохо	0,20-0,00

Функция желательности Харрингтона представляет собой монотонно возрастающую функцию, изменяющуюся от 0 до 1 (см. рисунок 2.3). Ее формула определяет функцию с двумя участками насыщения в ($d \rightarrow 0$ и $d \rightarrow 1$) и линейным участком (от $d=0,2$ до $d=0,63$).

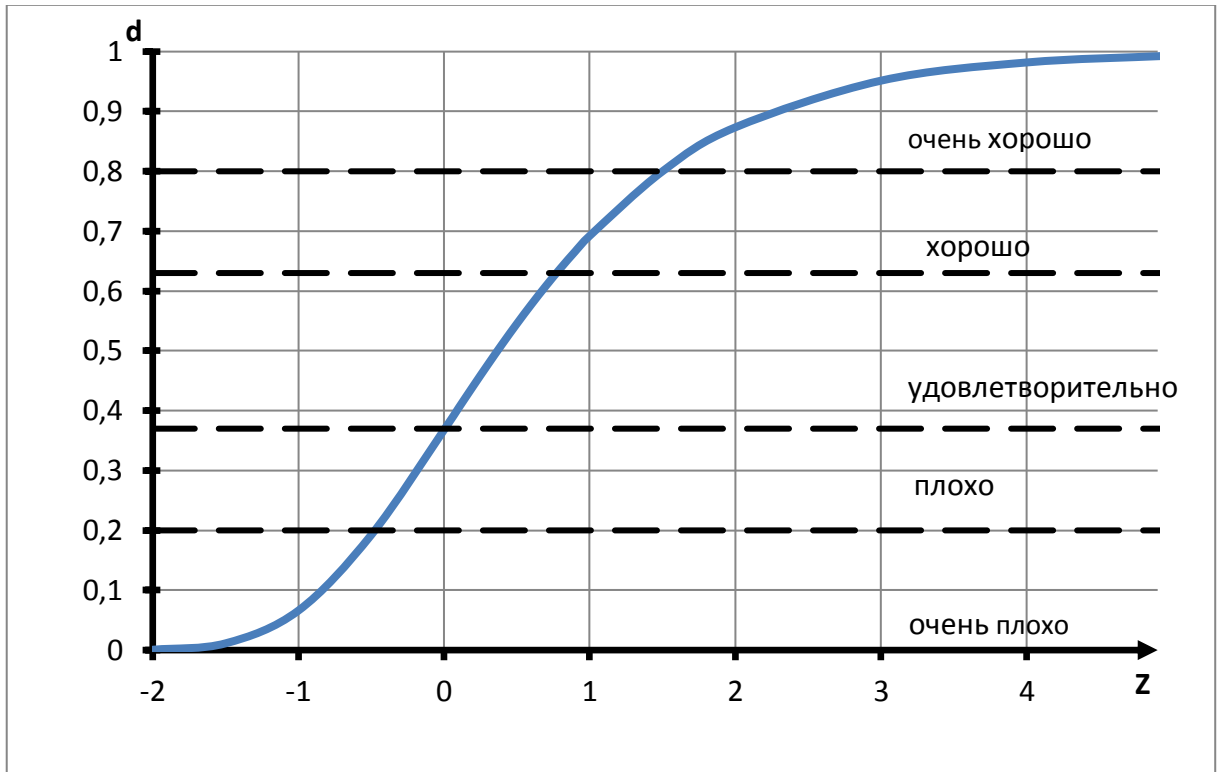


Рисунок 2.3 – Функция желательности Харрингтона

Практически часто ограничиваются тремя градациями шкалы Харрингтона, отвечающим лингвистическим категориям «плохо», «удовлетворительно», «хорошо» в соответствии с рисунком 2.4. В этом случае область, соответствующая уровню «удовлетворительно», расширяется от 0,37 до 0,69, а области «плохо» и «хорошо» характеризуются интервалами $[0,00; 0,37]$ и $[0,69; 1,00]$ соответственно.

Аналитически для монотонных по предпочтениям критериев, характерных, функция желательности Харрингтона задается следующей формулой:

$$d_i = d(z_i) = \exp(-\exp(-z_i))$$

$$z_i = (x_i - x_{i0}) / (x_{i1} - x_{i0}), \quad (2.73)$$

где z_i – кодированные значения i -го показателя, представляющие собой безразмерные величины; x_i – значение i -го информативного показателя; x_{i0} и x_{i1} – границы области «удовлетворительно» в исходной шкале:

$$d_{i0} = d(z_i(x_{i0})) = 0,37; \quad d_{i1} = d(z_i(x_{i1})) = 0,69. \quad (2.74)$$

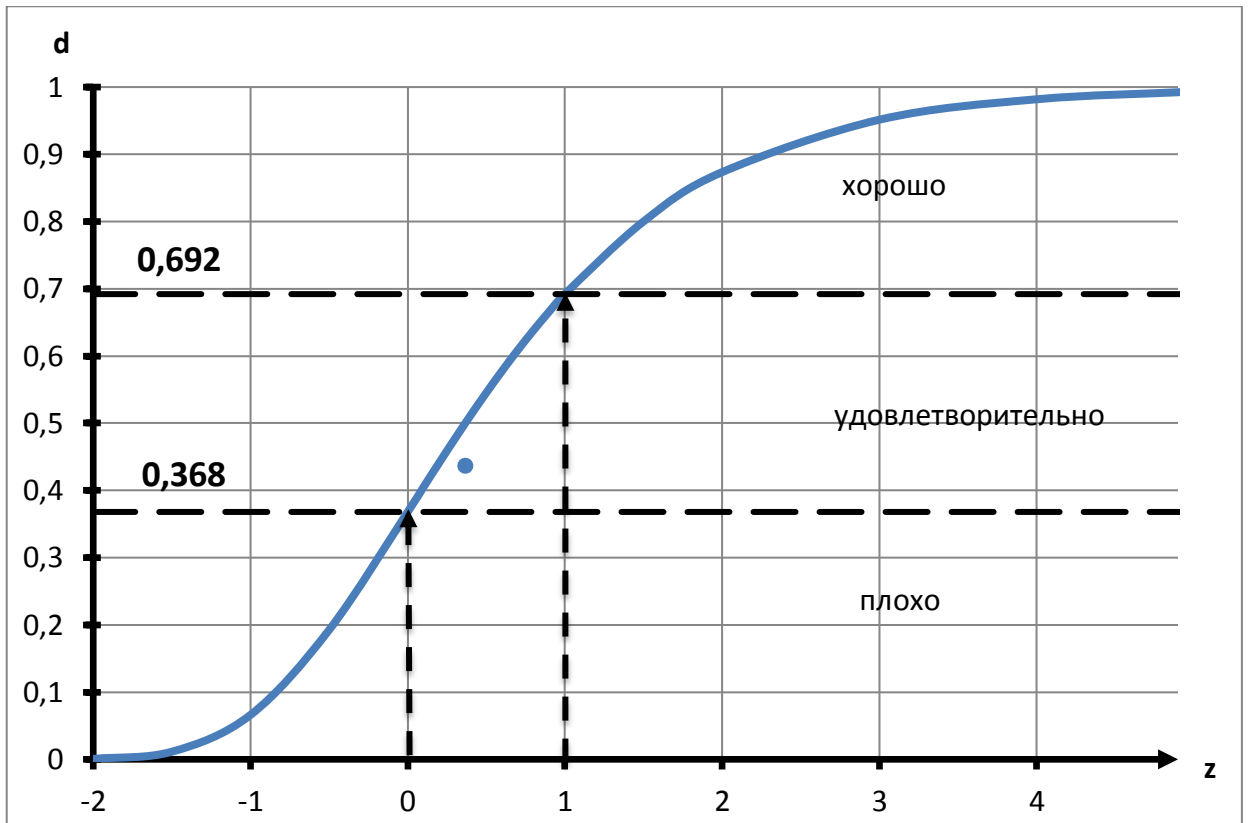


Рисунок 2.4 – Функция желательности Харрингтона с тремя градациями шкалы

При кодированном значении информативного показателя $z=0$ (нижняя граница области «удовлетворительно») функция желательности принимает значение 0,368, при $z=1$, т.е. нижняя граница области «удовлетворительно», $d(z)=0,692$. Для ее построения достаточно, указать границы исходных показателей x_{i0} и x_{i1} , внутри показатели исследуемого параметра можно считать удовлетворительным. В частности, можно эти значения положить равными $x_{i1}=x_{\max}$ и $x_{i0}=x_{\min}$, т.е. соответственно максимальному и минимальному значению показателя по массиву расчетных данных.

Введение шкалы желательности позволяет свести исходную многокритериальную задачу принятия решения с разноразмерными критериями к

многокритериальной задаче с критериями, измеряемыми в одной и той же шкале, поэтому следующим этапом является свертка частных функций желательности d_i в обобщенный критерий Des .

$$Des = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} \quad (2.75)$$

Таким образом, задача оптимального программирования по критерию «максимум эффекта» математически запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} f(d_1, d_2, \dots, d_n) &= \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} \rightarrow \max & (2.76) \\ 0,368 \leq d_i &\leq 0,692, \quad i = 1, n \\ d_i &= d(z_i) = \exp(-\exp(-z_i)) \\ z_i = z_i(x) &= (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \end{aligned}$$

Выводы по главе 2

1 Выполнен анализ основных положений гидродинамики и турбулентности с позиций влияния на осаждение аэрозольных частиц в трубах и каналах. Определены основные факторы, влияющие на частицу в турбулентном потоке, их зависимость от размера частиц и режима движения.

2 Проведенные исследования показали, что осаждение частиц аэрозоля в трубках и щелевых каналах, зависящее от турбулентной диффузии и турбулентной миграции частиц, сформировано геометрическими размерами осадительного элемента и режимом движения турбулентного потока.

3 Для поиска оптимальных условий проведения эксперимента, выбора значимых факторов, минимизации числа опытов, предлагается выполнить многокритериальную оптимизацию с использованием функции желательности Харрингтона.

ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Создание опытных установок

Основными параметрами, характеризующими эффективность работы аппарата по очистке воздуха от тонкодисперсных частиц, являются эффективность очистки воздуха, конструкция осадительного элемента и потери давления (аэродинамическое сопротивление) аппарата [8,13,26-38,84,111,119-124,134,156]. Причем коэффициент эффективности очистки аппарата в соответствии с (2.66) представляет собой зависимость:

$$\eta = f(L, D_э, u_m, V_t) \quad (3.1)$$

где: L – длина осадительного элемента, м, $D_э$ – диаметр трубы (эквивалентный диаметр канала), м, u_m – средняя скорость движения аэрозоля (м/с); V_t – скорость осаждения частиц (м/с).

Согласно п.п. 2.2.5 и 2.2.6. в общем случае зависимость скорости осаждения имеет следующий вид:

$$V_t = f(\rho_ч, d_ч, u_m, \lambda, D_э, \nu), \quad (3.2)$$

где: $\rho_ч$, – плотность частиц (г/м³), $d_ч$ – размер частицы (м); λ – коэффициент сопротивления трения; ν – коэффициент кинематической вязкости дисперсионной среды.

Поскольку величина турбулентной скорости осаждения частиц V_t зависит от гидродинамических параметров дисперсионной среды и от физических свойств частиц аэрозоля, то существует возможность применить результаты единичного эксперимента с каким-то аэрозолем, для расчета величины V_t другого аэрозоля с такими же физическими свойствами и в такой же дисперсионной среде.

Тогда эффективность осаждения частиц можно оценить зависимостью:

$$\eta = f(L, D_э, u_m, \lambda, \rho_ч, d_ч, \nu) \quad , \quad (3.3)$$

Поскольку потери давления аппарата равно:

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{L}{D_3} + \xi \right) \frac{\rho}{2} u_m^2 \quad (3.4)$$

То имеет место зависимость:

$$\Delta p = f(\lambda, L, D_3, u_m, \xi, \rho) \quad (3.5)$$

где D_3 – гидравлический диаметр; ξ – потери в местных сопротивлениях.

Неизвестные значения параметров возможно определить по полуэмпирическим зависимостям или опытным путем [77,99,184,174,178,197]. Но, определение опытным путем предпочтительнее, поскольку дает более точные результаты применительно к конкретному типу аэрозоля и условиям гидродинамики рассматриваемой дисперсной среды.

Анализируя выражения (3.2), (3.3) и (3.5) можно предположить, что возможно опытным путем определить функциональные зависимости $\eta=f(\Delta p)$, $\eta=f(u_m)$, $\eta=f(L/D_3)$, $V_t=f(u_m)$, определяющие характеристики и режим работы аппарата.

Для определения значимых для конструкции аппаратов очистки параметров и выявления возможных расчетных аналитических зависимостей был проведен ряд экспериментов на двух сконструированных установках.

Первая установка (рис. 3.2, 3.3) представляет собой аэродинамический стенд с линией всасывания, где выправленный лемнискатным входом поток рассчитан на малые скорости течения. Побудителем движения является центробежный вентилятор ВВД № 3,15 на одном валу с электродвигателем мощностью $N_y = 3,5$ кВт с частотой вращения 2770 об/мин. Для регулирования расхода воздуха после вентилятора установлен шибер со сменными диафрагмами. В напорной части, наоборот, возможно достижение достаточно высоких скоростей и избыточного давления. Здесь, в камере давления, установлены сетка и тарированный коллектор, коэффициент сопротивления которого $\xi = 0,02$, к которому через патрубок происходит присоединение испытуемого элемента.

Трубы малого диаметра $D=8\div 25$ мм, «продувались» в виде пучка из 8-10 трубок, собранного в пакет в соответствии с рисунком 3.1.



Рисунок 3.1 – Трубный пакет

Эти трубки и щелевые каналы испытывались при их прямолинейном положении относительно потока воздуха, кроме трубы диаметром $D = 25$ мм и длиной $l = 6,5$ (сваренного или соединенного на муфте из двух (3x2) элементов) которая была изогнута для удобства в двух местах «калачем» с относительным радиусом изгиба $R/D \geq 8$. Такой изгиб не вносит существенных изменений, как в отношении сопротивления, так и в случае последующей сепарации аэрозоля.

С использованием аэродинамического стенда проводились опыты по определению коэффициентов сопротивления трения λ и полного аэродинамического сопротивления Δp труб и каналов, знание величины которых необходимо для последующих исследований по сепарации аэрозолей.

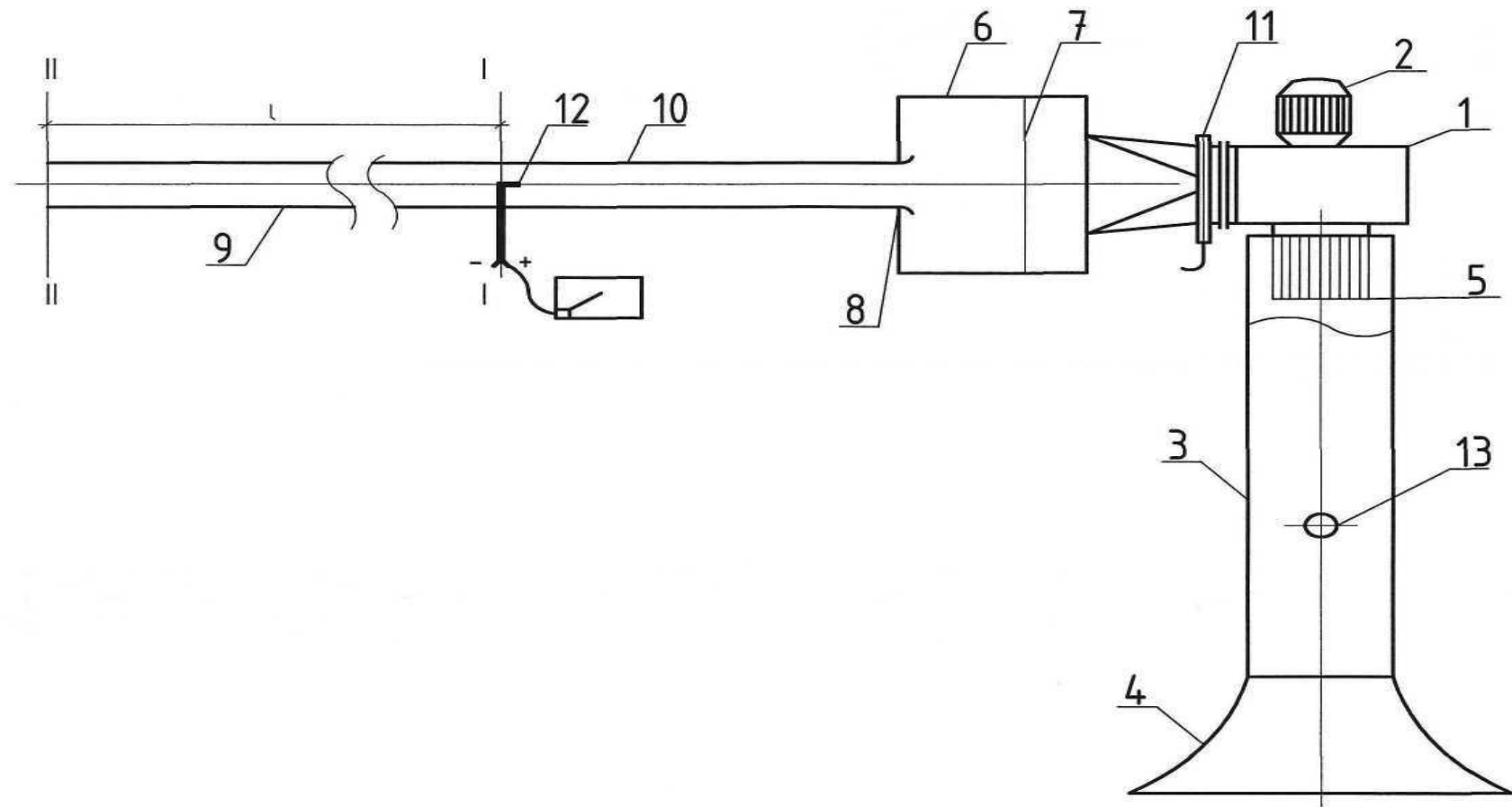


Рисунок 3.2 – Аэродинамический стенд для проведения опытных исследований по определению коэффициентов сопротивления трения λ и потерь давления Δp в трубах и каналах: 1 – вентилятор; 2 – электродвигатель; 3 – аэродинамическая труба; 4 – приемный коллектор; 5 – хонейкомб; 6 – камера давления; 7 – сетка; 8 – нагнетательный элемент; 9 – испытуемый элемент; 10 – соединительная труба; 11 – шиббер; 12 – пневмометрическая трубка; 13 – окно для замера давления, температуры, скорости.

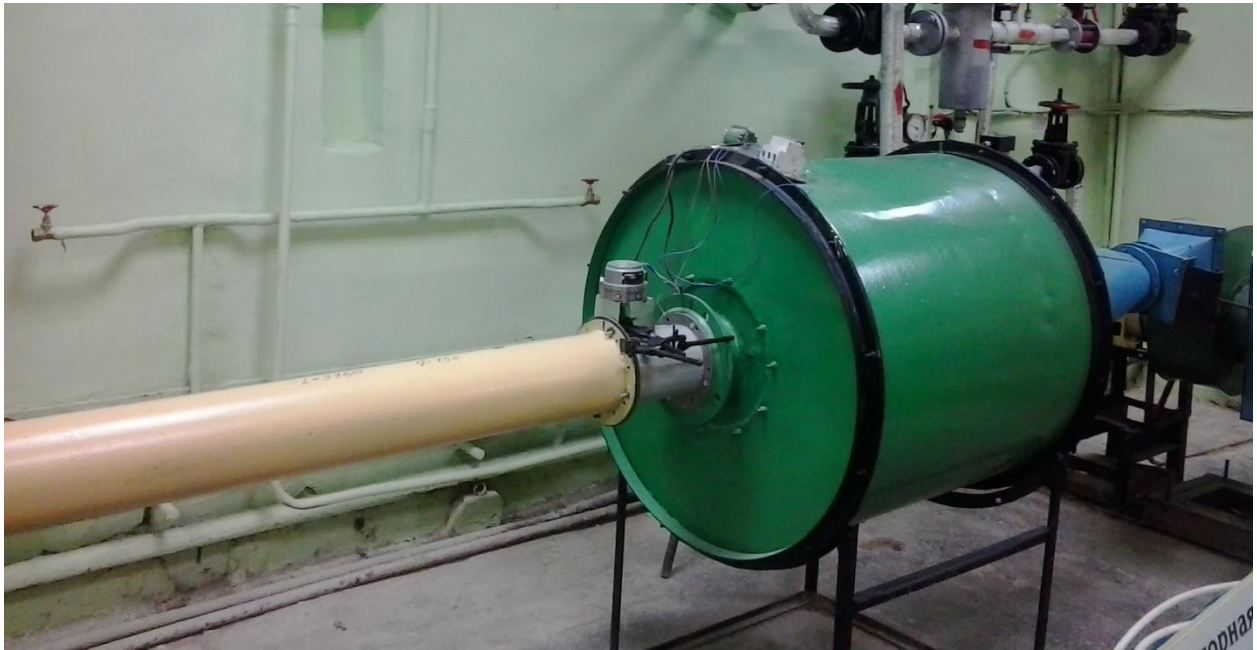


Рисунок 3.3 – Фотография аэродинамического стенда

Определение геометрических характеристик осадительных элементов, и выявление возможных аналитических зависимостей выполнялось с использованием опытной установки (рисунок 3.4). Принципиальная схема опытной установки приведена на рисунке 3.5.

Аэрозоль формировался в герметичном, остекленном шкафу с внутренней подсветкой. Шкаф при высоте 1,7 м, в плане 0,6x1,2 м ($V \approx 1 \text{ м}^3$) имеет в передней торцевой стенке две герметичных дверцы. Для проведения исследований использовался аэрозоль диоктилфталата, функция распределения частиц которого изменяется по нормальному закону и размер 99 % частиц составляет менее 1 мкм (см. табл.3.1).

Таблица 3.1 - Распределение частиц диоктилфталалата

Размер частиц, мкм	<0,1	<0,35	<0,45	<0,72	<1,0	<1,5	<3,0
Количество частиц, %	1	10	25	50	92	95	99

Аэрозоль диоктилфталата образовывался из паров пластификатора, вырабатываемых за счет регулируемого нагрева, которые смешивались с воздухом в верхней части шкафа. Концентрация высокодисперсного аэрозоля диоктилфталата поддерживалась 200-250 мг/м³ (близка к промышленной

концентрации в вентиляционном укрытии каландра). Регулирование требуемой концентрации аэрозоля осуществлялось степенью интенсивности испарения пластификатора.

Далее подготовленный туман попадал в осадительный элемент. Определение концентрации на входе c_n и выходе из исследуемого элемента c_k , проводилось весовым методом с использованием аллонжей, которые взвешивались до и после опыта совместно с присоединительными шлангами, в которых также оседают частицы аэрозоля.

Измерение скорости в исследуемых трубах и каналах проводилось косвенным методом по расходу аэрозоля, определяемого с помощью коллекторов различного диаметра, сменяемых в зависимости от величины расхода G , кг/ч. В коллекторах профиль входного отверстия выполнен по лемнискате с коэффициентом $\xi = 0,02$.

В качестве побудителя движения принят вентилятор с возможным расходом от 50 м³/ч при давлении $P = 0,3-0,35$ кПа.



Рисунок 3.4 – Фотография опытной установки

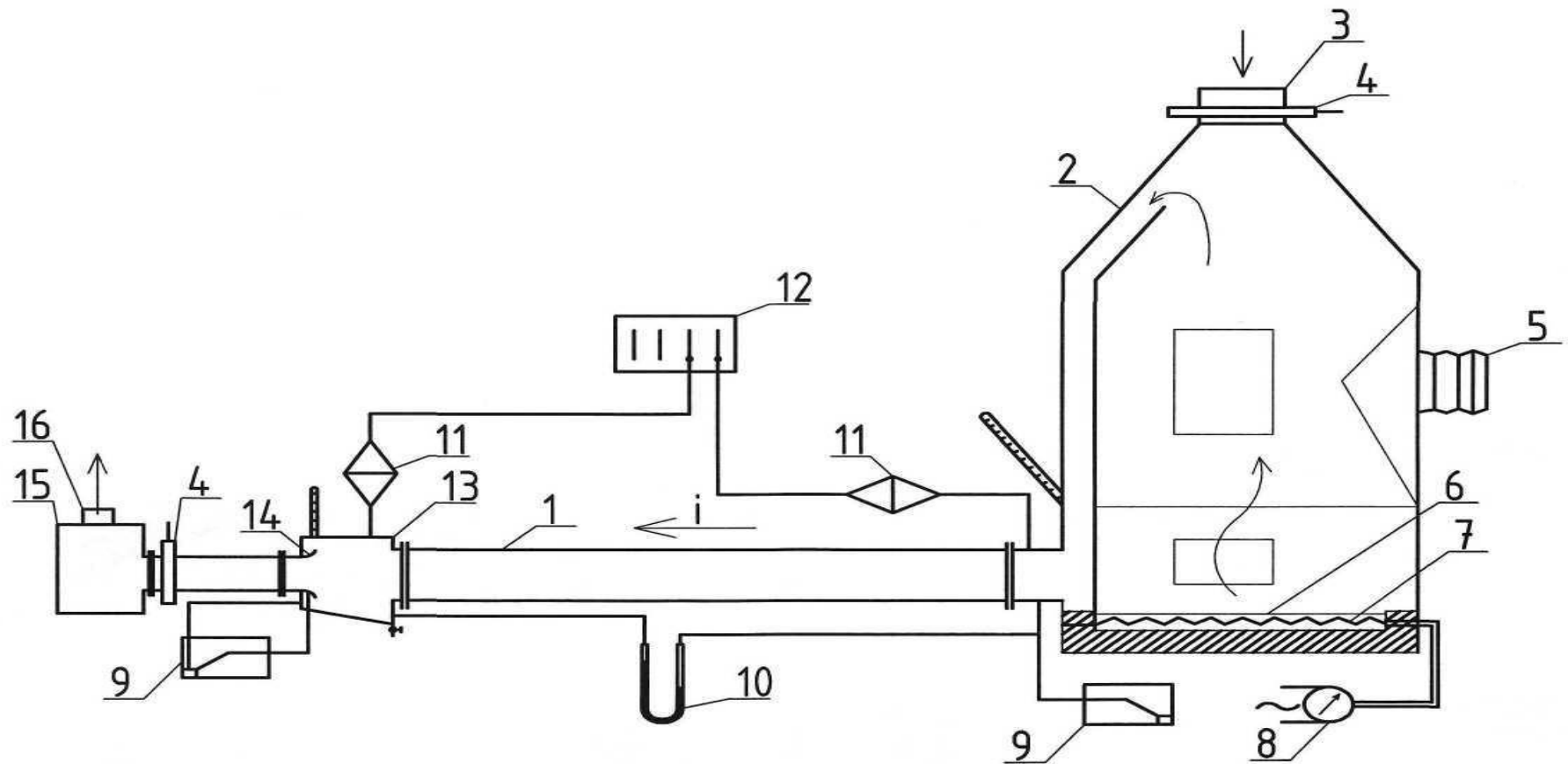


Рисунок 3.5 – Опытная установка для определения эффективности очистки в зависимости от геометрических параметров адгезионно-осадительного элемента и характеристик потока: 1-осадительный элемент; 2-вентиляционный шкаф; 3-штуцер под измерение АСО-3; 4-шибер-регулятор расхода с винтом; 5-герметизированный рукав; 6-испаритель; 7-нагреватель; 8-регулятор тока; 9-микроманометр; 10-U-образный дифманометр; 11-аллонж; 12-переносная ротационная установка (ПРУ); 13-резервуар равных статических давлений; 14-коллектор; 15-вентилятор; 16- удаление воздуха в атмосферу

3.2 Выполнение исследований

3.2.1 Определение основных параметров исследуемых адгезионно - осадительных элементов

Определение коэффициентов сопротивления трения λ и полных потерь давления Δp труб и каналов проводились с использованием аэродинамического стенда.

Экспериментальные значения коэффициента сопротивления трения определяются с использованием уравнения Дарси- Вейсбаха:

$$\Delta p_{mp} = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho}{2} u_m^2, \quad (3.6)$$

где Δp_{mp} – потери давления на трение, Па, L – длина исследуемого элемента, м, D – диаметр воздуховода (для круглых труб) или эквивалентный диаметр (для каналов), м.

Потери давления на участке равны, с одной стороны, сумме потерь давления на трение $\Delta p_{тр}$ и в местных сопротивлениях Δp_m

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_m, \quad (3.7)$$

где $\Delta p_m = \xi \frac{\rho}{2} u_m^2$, ξ – потери в местных сопротивлениях (выход и вход из труб и каналов принят свободным, соответственно $\xi_{вх}=0,5$, $\xi_{вых}=1,0$).

А, с другой стороны, потери давления на участке равны разности полных давлений в начале и конце участка

$$\Delta p = p_{п}^I - p_{п}^{II} = (p_{ст}^I + p_{д}^I) - (p_{ст}^{II} + p_{д}^{II}), \quad (3.8)$$

где $p_{ст}^I$, $p_{ст}^{II}$ и $p_{д}^I$, $p_{д}^{II}$ - статическое и динамическое давления в сечениях I-I и II-II.

Учитывая, что для труб постоянного сечения при постоянном расходе газовой смеси $p_{д}^I = p_{д}^{II}$ и для концевой сечения II-II $p_{ст}^{II}=0$ формула (3.6) принимает вид

$$\Delta p = p_{ст}^I, \quad (3.9)$$

Поскольку $p_0 = \rho u_m^2 / 2$, с использованием формул (3.6- 3.8)

$$\lambda = \frac{p_{cm}' / p_0' - \xi}{L/D} \quad (3.10)$$

Достоверность проведенных исследований проверялась расчетом по теоретическим формулам.

При ламинарном движении ($Re < 2300$) коэффициент трения определяется по формуле Пуазейля: $\lambda = \frac{64}{Re}$

Известно, что в случае турбулентного движения на коэффициент трения помимо числа Рейнольдса, может также влиять относительная шероховатость стенок трубы: $\lambda = f(Re, k/D)$ [15,16].

Турбулентный поток в трубе характеризуется наличием турбулентного ядра, включающего основную часть потока, и присутствием около стенок трубы пограничного слоя δ , м.

Поскольку стенки труб имеют шероховатость k , в зависимости от отношения k/δ , различают гидравлически гладкие ($k < \delta$) и гидравлически шероховатые трубы ($k > \delta$). При различных числах Рейнольдса одна и та же труба может быть как гладкой, так и шероховатой.

При турбулентном режиме при $k < \delta$ и $2300 < Re < 10^5$ ($2300 < Re < 10D/k$) теоретическое значение величины λ определяется по формуле Блазиуса (2.22), используемой для гладких труб

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$$

или формуле Конакова (2.23):

$$\lambda = (1,8 \lg Re - 1,5)^{-2}$$

Когда $k > \delta$ и $(10D/k < Re < 560D/k)$ используется формула Альтшуля (2.24)

$$\lambda = \frac{0,11}{(68 / Re + k / D)^{-0,25}}$$

где Re – критерий Рейнольдса, $Re = \frac{U_m D}{\nu}$, k – эквивалентная шероховатость, м (для гладких стальных труб $k = 2 \cdot 10^{-5}$, для латунных и медных $k = 2 \cdot 10^{-6}$), ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с (при 20°C $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$).

Для значения $Re < 10^5$ толщина пограничного слоя в трубе может быть определена по эмпирической зависимости [15].

$$\delta = 62,8 D Re^{-0,875} \quad (3.11)$$

Трубу считают гладкой, относительная шероховатость внутренней поверхности которой, равная отношению средней высоты выступов (величина абсолютной шероховатости) k к внутреннему диаметру трубы D , составляет [15].

$$\varepsilon = \frac{k}{D} \leq 17,85 Re^{-0,875} \quad (3.12)$$

Оценка влияния шероховатости труб на значение коэффициента трения произведена с использованием формул (3.11, 3.12). Результаты расчетов приведены в таблице 3.1. Согласно представленным расчетам все исследуемые адгезионно - осадительные элементы в диапазоне $2300 < Re < 33300$ относятся к гидравлически гладким трубам (для стального канала с $D_{\text{э}} = 0,01$ м $2000 < Re < 16700$).

Полученные в опытах значения коэффициента сопротивления трения имеют хорошую сходимость с определенными расчетным путем по формулам Блазиуса, Альтшуля и Конакова (см. рисунок 3.6).

На рисунке 3.7 представлены результаты опытных данных для разных осадительных элементов в виде зависимости $\lambda = f(Re)$. Анализ проведенных зависимостей показал, что на коэффициент сопротивления трения λ , материал адгезионно - осадительных элементов (медь, латунь, сталь) не оказывает особого влияния. Значения коэффициента λ , отличаются не более чем на 5-7% для адгезионно - осадительных элементов из различных материалов, что подтверждает предположения о том, что трубки являются гидравлически гладкими в диапазоне исследованных чисел Рейнольдса.

Таблица 3.2 – Оценка влияния шероховатости труб на значение коэффициента трения

Медная трубка D = 0,008 м; $\epsilon=0,00025$; $k=0,000002$ м

Re	2293,333	3200	4266,667	5333,333	6400	7466,667	8533,333	9600	10666,67	13333,33	16000
δ , м	0,000576	0,000431	0,000335	0,000275	0,000235	0,000205	0,000183	0,00016465	0,00015	0,000124	0,000105
$17,85Re^{-0,875}$	0,020475	0,015298	0,011894	0,009784	0,008341	0,007289	0,006485	0,00584993	0,005335	0,004389	0,003741

Стальная трубка D = 0,025 м; $\epsilon=0,0008$; $k=0,00002$ м

Re	5000	6666,667	10000	13333,33	16666,67	20000	23333,33	26666,67	30000	33333,33
δ , м	0,000910544	0,000708	0,000496	0,000386	0,000318	0,000271	0,000237	0,00021	0,00018985	0,000173
$17,85Re^{-0,875}$	0,010352362	0,008049	0,005645	0,004389	0,00361	0,003078	0,002689	0,002393	0,00215853	0,001968

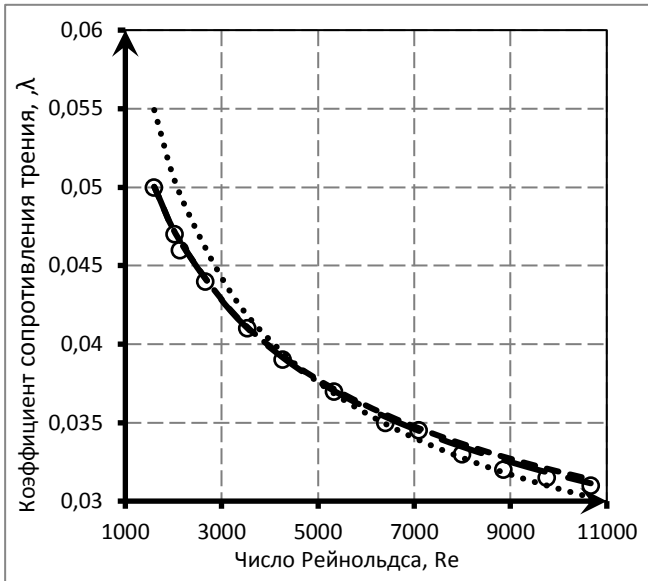
Латунная трубка D = 0,016 м; $\epsilon=0,000125$; $k=0,000002$ м

Re	3200	4266,667	6400	8533,333	10666,67	12800	14933,33	17066,67	19200	21333,33
δ , м	0,000861139	0,00067	0,00047	0,000365	0,0003	0,000256	0,000224	0,000199	0,00017955	0,000164
$17,85Re^{-0,875}$	0,015297906	0,011894	0,008341	0,006485	0,005335	0,004548	0,003974	0,003536	0,0031897	0,002909

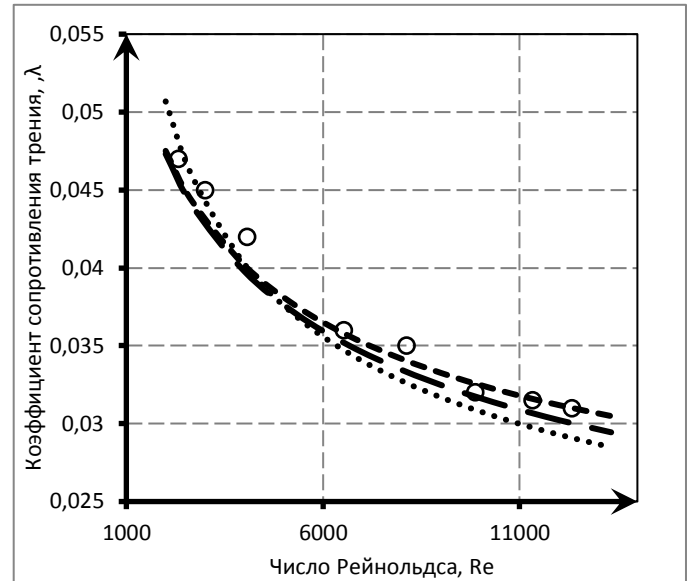
Стальной канал Dэ = 0,01 м; $\epsilon=0,002$; $k=0,00002$ м

Re	2000	2666,667	4000	5333,333	6666,667	8000	9333,333	10666,67	12000	13333,33	16666,67
δ , м	0,000812004	0,000631	0,000443	0,000344	0,000283	0,000241	0,000211	0,000188	0,00016931	0,000154	0,000127
$17,85Re^{-0,875}$	0,023080062	0,017944	0,012584	0,009784	0,008049	0,006862	0,005996	0,005335	0,00481232	0,004389	0,00361

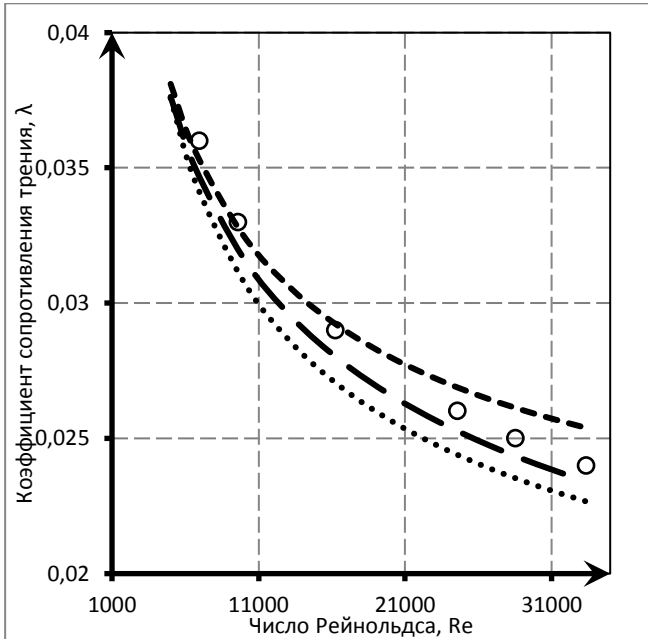
а)



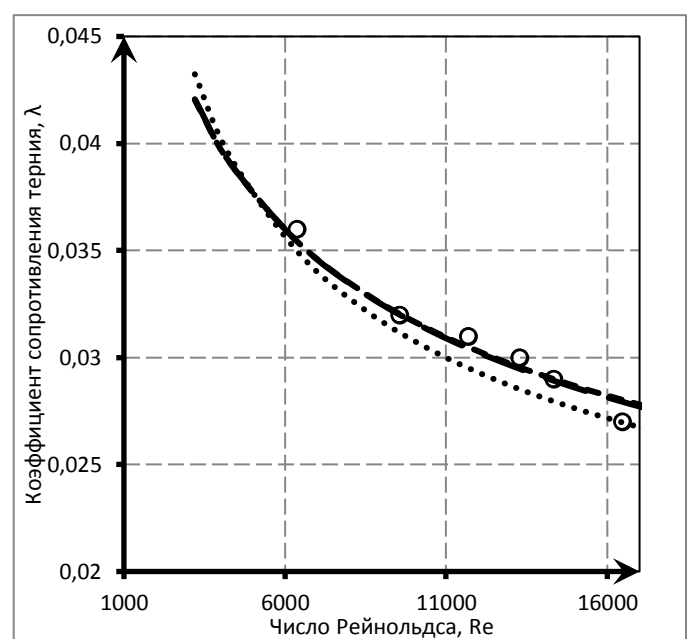
б)



в)



г)



○ Опытные данные - - - Формула Блазиуса ••• Формула Конакова - · - · Формула Альтшуля

Рисунок 3.6 – Зависимости $\lambda=f(Re)$: а) медная трубка $D=0,008$ м, б) стальной канал $D_3=0,01$ м, в) стальная трубка $D=0,025$ м, г) латунная трубка $D=0,016$ м

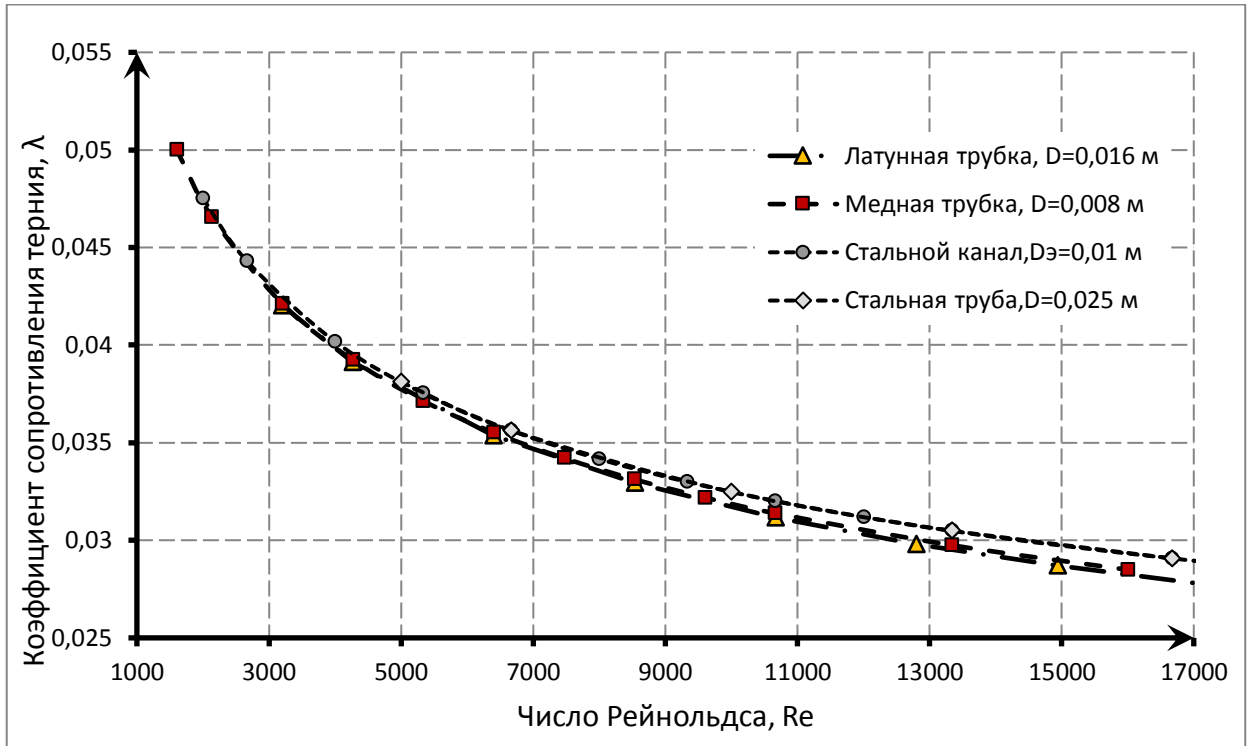
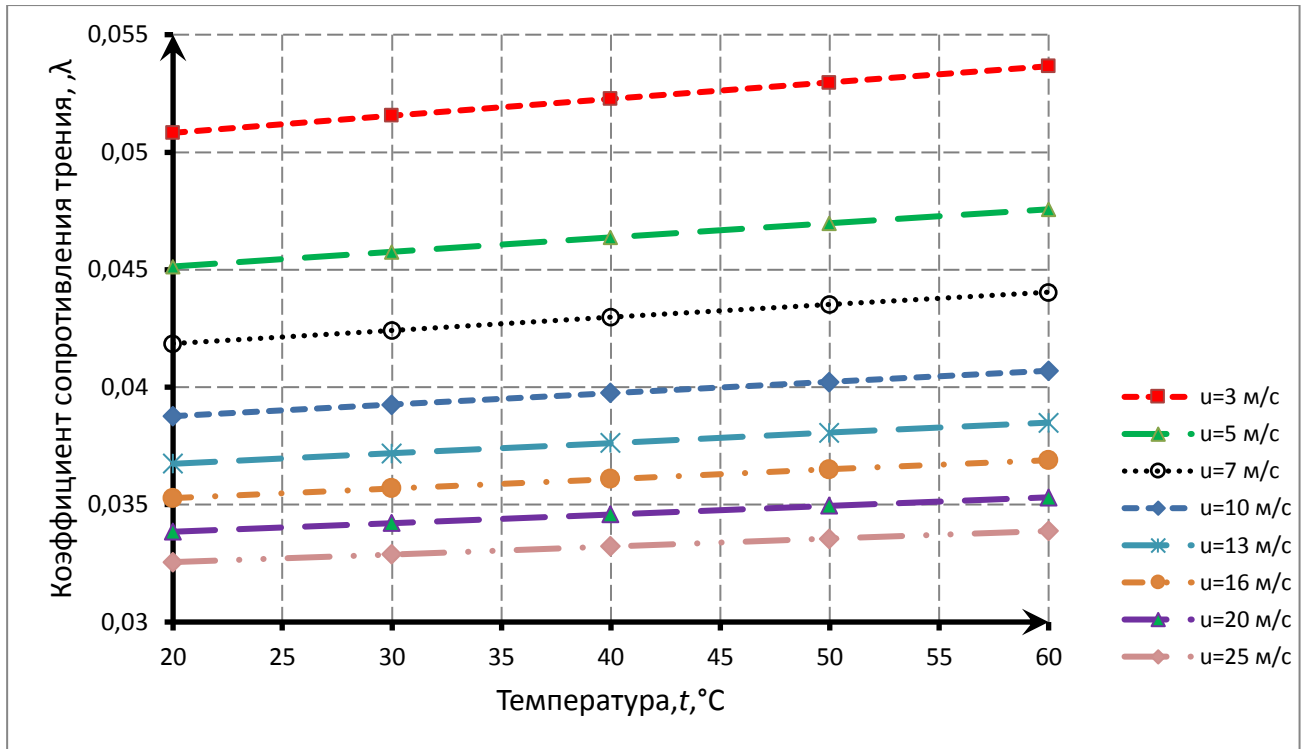


Рисунок 3.7 – Зависимость $\lambda=f(Re)$ для разных адгезионно - осадительных элементов.

Были проведены исследования влияния температуры воздуха на коэффициент сопротивления λ в диапазоне температур воздуха от 20 °С до 60 °С, что определяется работой вентилятора в нормальном режиме. Результаты исследования приведены на рисунке 3.8. Анализ проведенных исследований показал, что влияние температуры воздуха на коэффициент сопротивления трения λ незначительно. Изменение коэффициента λ при $u_m = const$ составляет не более 5%.

Расчет аэродинамического сопротивления (потерь давления) исследуемого элемента проводится по зависимости, полученной на основании (3.7)

$$\Delta p_n = \left(\lambda \frac{L}{D} + \xi \right) p_0 \quad (3.13)$$

Рисунок 3.8 – Зависимость $\lambda=f(t)$

3.2.2 Выявление геометрических характеристик проектируемых аппаратов

При проектировании аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей наиболее значимыми факторами являются определение конструктивных характеристик установки и поиск оптимального режима работы проектируемого аппарата [84,111,134]. Главным звеном в аппаратах рассматриваемого типа является адгезионно - осадительный элемент, выполненный либо в виде трубки, либо в виде щелевого канала. Эффективность очистки η аппарата с адгезионно - осадительным элементом в виде трубки или щелевого канала можно представить зависимостью:

$$\eta = 1 - \frac{c_x}{c_n} = 1 - e^{-\frac{4LV_t}{D_s u_m}} \quad (3.14)$$

где c_x – средняя концентрация частиц в данном сечении адгезионно - осадительного элемента, г/м³, c_n – начальная концентрация частиц при входе в трубу (канал), г/м³, V_t – скорость осаждения частиц, м/с, L – длина адгезионно -

осадительного элемента, м, $D_э$ – гидравлический радиус, м, средняя скорость потока u_m (м/с).

Из уравнения (3.14) следует, что полного осаждения частиц можно достичь при бесконечной длине адгезионно - осадительного элемента, т.е. при бесконечно большом времени пребывания частицы в канале. Понятно, что размеры очистного аппарата, зависящие от длины адгезионно - осадительного элемента, влияют на удобство его монтажа и эксплуатации. И здесь, ограничителем является экономически целесообразная степень очистки аэрозоля.

Значительная серия опытов была посвящена поиску оптимального значения эффективности осаждения частиц в зависимости от отношения длины трубы или канала l к их эквивалентному диаметру $D_э$. Роль этого параметра была отмечена еще в 1977г. в опытах [184] с водяным туманом, в которых при $L/D = 152$ был получен эффект сепарации $\eta = 98\%$ при скорости аэрозоля в трубе $u_m = 43,5$ м/с. В наших опытах было исследовано несколько разновидностей трубок различного диаметра и длины и из разных материалов.

Также при разработке конструкции аппарата следует обращать особое внимание на его аэродинамическое сопротивление (потери давления).

Поскольку потери давления описываются уравнением (3.4) или в общем виде (3.5), то анализируя уравнения (3.3) и (3.5) можно предположить корреляционную зависимость между эффективностью очистки и потерями давления в устройстве и эффективностью очистки скоростью потока: $\eta=f(\Delta p)$, $\eta=f(u_m)$. На рисунках 3.8 и 3.9 представлены результаты экспериментов для трубок из различных материалов с разными значениями L/D в диапазоне $2300 < Re < 34000$. Каждая точка-индекс соответствует среднестатистическим данным нескольких опытов при практически одинаковом режиме движения аэрозоля.

Эффективность сепарации η представлена в виде зависимости от потерь давления Δp , являющегося доминирующим параметром при оценке экономической (с позиции энергетики) целесообразности при выборе способа сепарации в тех или иных случаях (рисунок 3.9). Как видно из рисунка все

опытные данные хорошо аппроксимируются логарифмическими зависимостями вида

$$\eta_i = A_i \times \ln(\Delta p) + B_i, \quad (3.15)$$

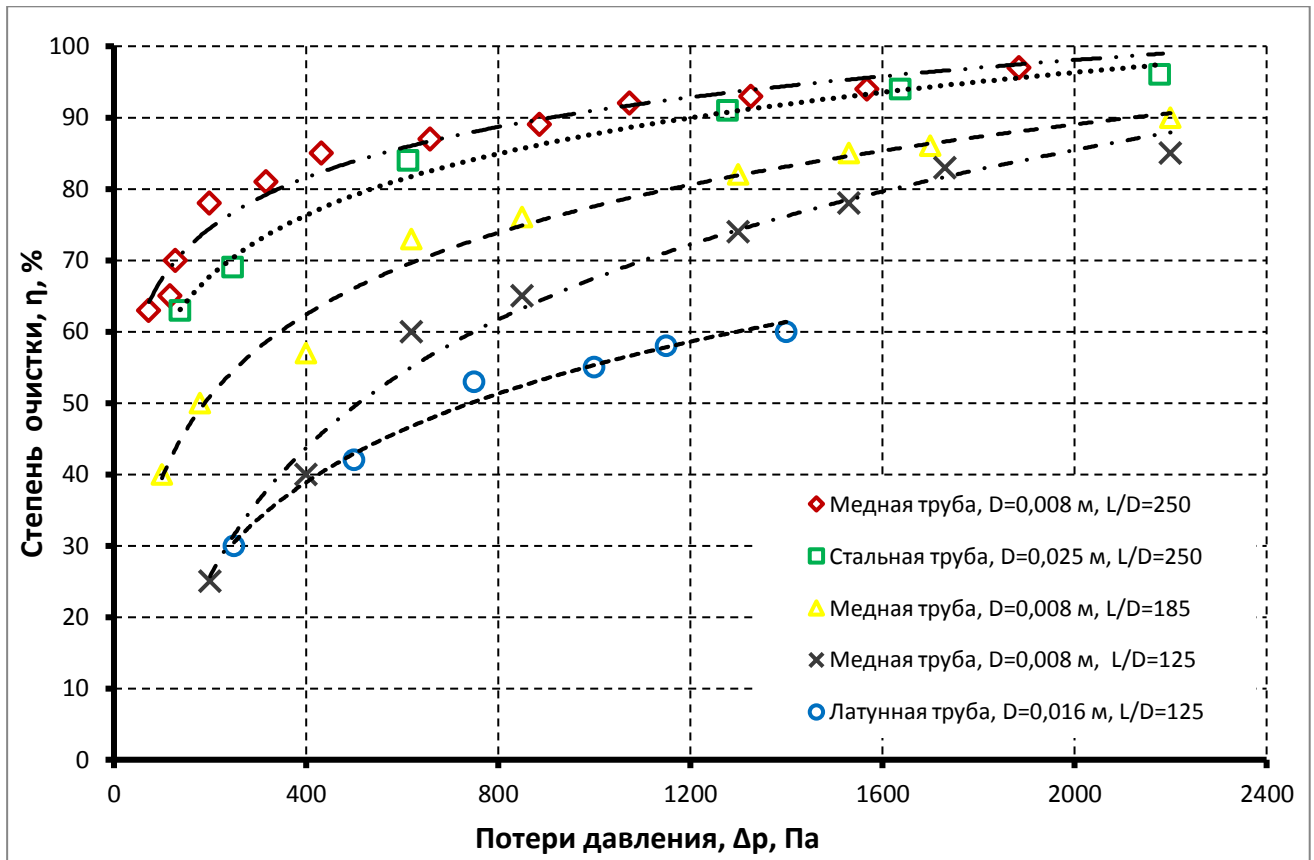


Рисунок 3.9 – Зависимость степени сепарации от потерь давления

Представленные на рисунке 3.10. зависимости степени сепарации от скорости потока также можно представить в виде логарифмических зависимостей вида:

$$\eta_i = C_i \times \ln(u_m) + D_i, \quad (3.16)$$

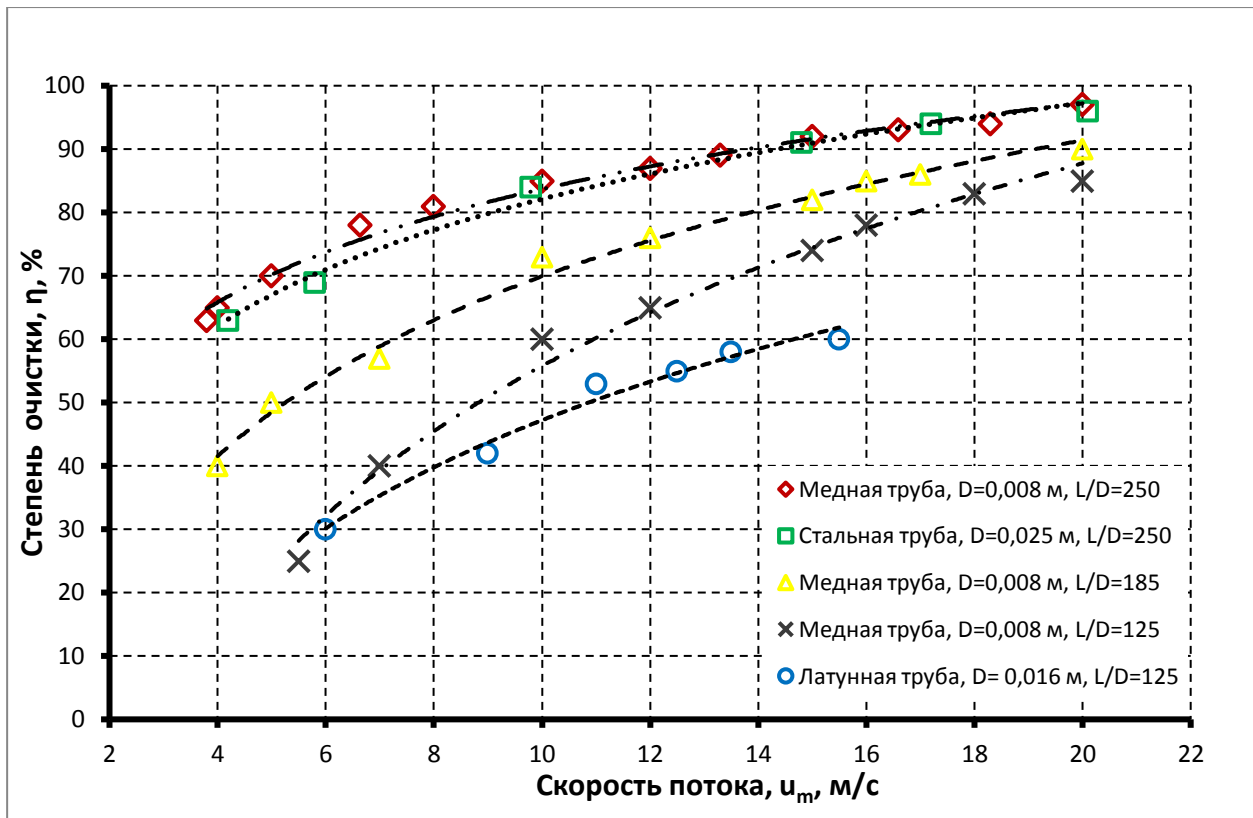


Рисунок 3.10 – Зависимость степени сепарации от скорости потока

Анализ графиков на рисунках 3.9 и 3.10 показал увеличение коэффициента эффективности при увеличении значения L/D . Результаты опытов показали, что лучший коэффициент эффективности достигается при соотношении $L/D = 250$. При соотношении $L/D < 250$, эффект сепарации значительно снижен, что объясняется тем, что время пребывания частиц аэрозоля в них меньше чем в трубах более длинных. Увеличение значения $L/D > 250$ ведет к значительному увеличению размеров аппарата. Также рост коэффициента эффективности наблюдается с ростом скорости потока и потерь давления в аппарате.

Для удобства дальнейшего анализа представим результаты проведенных исследований в другой системе координат в виде зависимостей $\eta = f(L/D)$ при фиксированных значениях Δp (рисунок 3.11).

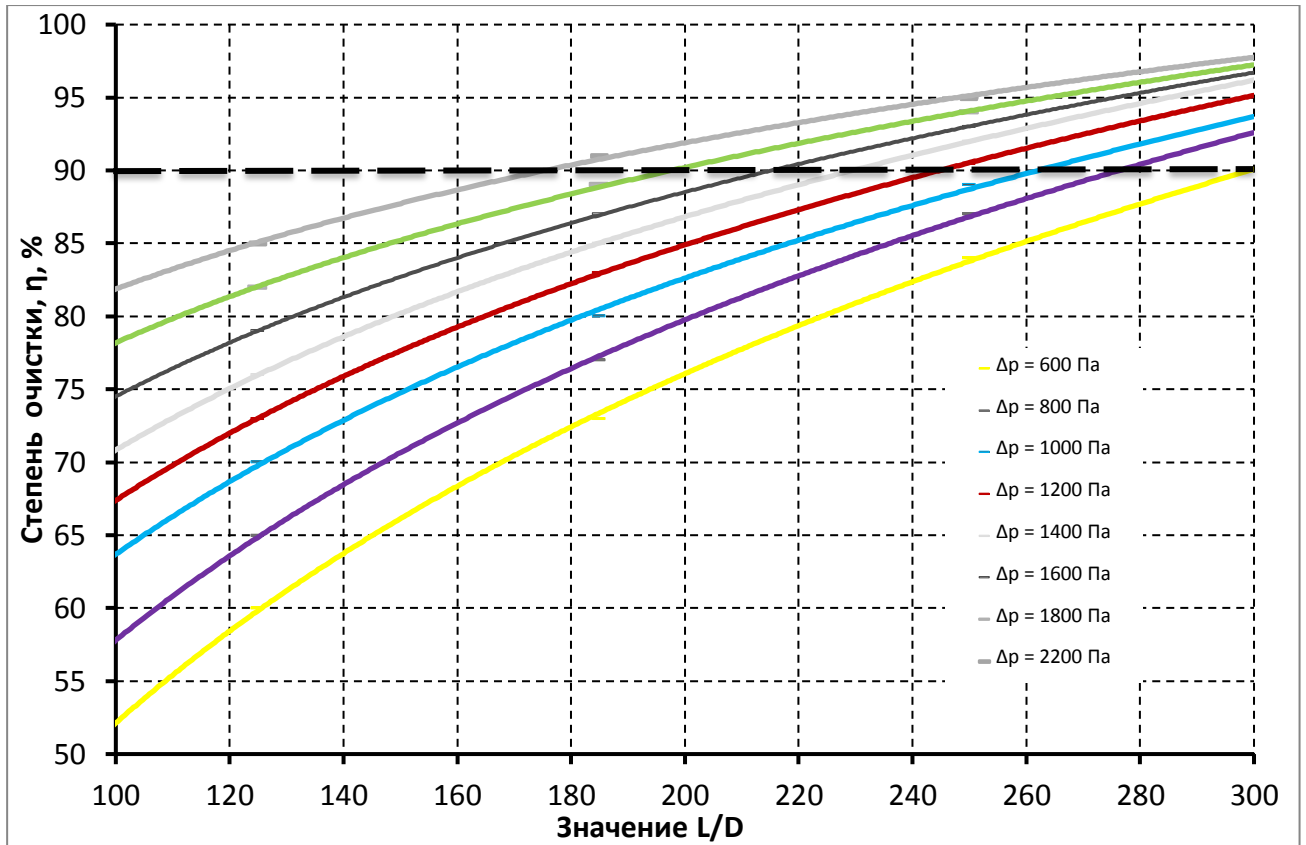


Рисунок 3.11 – Зависимость степени сепарации от величины L/D

Анализируя рисунок 3.11 можно увидеть, что добиться заданной величины эффективности очистки возможно комбинацией пар значений (L/D ; Δp) (см. таблицу 3.3). Наибольший интерес представляют значения в диапазоне $\eta \geq 90\%$. Очевидно, что для одинакового значения эффективности увеличение значения L/D ведет к уменьшению потерь давления Δp . Задачей является нахождение оптимального сочетания значений L/D и Δp .

Таблица 3.3 – Значение степени очистки η , % при различных сочетаниях L/D и Δp

Δp , Па	Отношение L/D					
	175	200	225	250	275	300
800					90,5	91,5
1000				90,0	92,0	93,0
1200				91,0	93,5	95,0
1400			90,0	92,0	94,0	96,0
1600			91,0	93,0	95,0	96,5
1800		90,0	92,5	94,0	96,0	97,0
2000		91,0	93,0	94,5	96,5	97,5
2200	90,0	92,0	93,5	95,0	97,5	98,0

3.3 Использование многокритериальной оптимизации для обоснования характеристик аппарата очистки

Поскольку добиться заданного коэффициента очистки возможно при различных сочетаниях пар значений $(L/D; \Delta p)$ целесообразно для уменьшения количества опытов и поиска однозначного ответа об оптимальных размерах адгезионно - осадительного элемента и оптимальном гидравлическом сопротивлении для получения максимального эффекта целесообразно решить задачу многокритериальной оптимизации [3,10,66].

Для решения многокритериальных задач используются различные методы определения обобщенного показателя оптимальности. В нашем случае выбор оптимального варианта предлагается выполнить с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона $d(x)$.

Введение шкалы желательности позволяет свести исходную многокритериальную задачу принятия решения с разноразмерными критериями к многокритериальной задаче с критериями, измеряемыми в одной и той же шкале. Для каждого критерия определяется частная функция желательности, далее производится свертка частных функций желательности d_i в обобщенный критерий Des (согласно п.2.3 формулы 2.75).

Согласно п. 2.3 задача оптимального программирования по критерию «максимум эффекта» математически запишется следующим образом:

$$f(d_1, d_2, \dots, d_n) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} \rightarrow \max \quad (3.17)$$

$$0,368 \leq d_i \leq 0,692, \quad i = 1, n$$

$$d_i = d(z_i) = \exp(-\exp(-z_i))$$

$$z_i = z_i(x) = (x_i - x_{i\min}) / (x_{i\max} - x_{i\min})$$

где d_i – влияющий параметр; z_i – кодированные значения i -го параметра, представляющие собой безразмерные величины; x_i – значение i -го информативного параметра; $x_{i\max}$ и $x_{i\min}$ – максимальное и минимальное значение информативного параметра:

Для поиска оптимального сочетания геометрических размеров адгезионно - осадительного элемента, потерь давления в аппарате и его коэффициента эффективности очистки целесообразно найти обобщенный критерий желательности, пользуясь следующими критериями:

- эффективность очистки: диапазон изменения критерия находится в промежутке $\eta \in [90; 98]$;

- геометрические размеры адгезионно - осадительного элементы: диапазон изменения $L/D \in [175; 300]$;

- потери давления в аппарате : диапазон изменения $\Delta p \in [800; 2200]$.

По этим показателям сравниваются различные сочетания пар значений $(L/D; \Delta p)$, определяющие характеристику конструируемого аппарата очистки. Конкретные параметры сравниваемых вариантов, соответствующих определённым парам значений $(L/D; \Delta p)$, распределяются на промежутке эффективных значений шкалы частных показателей. Затем соответствующие им показатели пересчитываются в отметки на шкале желательности (см. рисунок 3.12). Полученное значение d_i для i -го параметра пересчитывается вместе с другими в обобщенный коэффициент желательности Des .

Функция желательности для эффективности очистки

d_1 – критерий, зависящий от эффективности очистки;

$$x_{1\max} = 98 \text{ и } x_{1\min} = 90; z_1 = (x_1^j - 90)/(98 - 90)$$

x_1^j - значения коэффициента эффективности очистки, $x_1^j \in [90; 98]$; $j = 1, m$

Значения функции желательности приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Функция желательности для эффективности очистки

Эффективность очистки	Кодированное значение	Функция желательности
x_1	z_1	d_1
90	0	0,367879
91	0,125	0,413749
92	0,25	0,458956
93	0,375	0,502938
94	0,5	0,545239
95	0,625	0,585516
96	0,75	0,623525
97	0,875	0,659112
98	1	0,692201

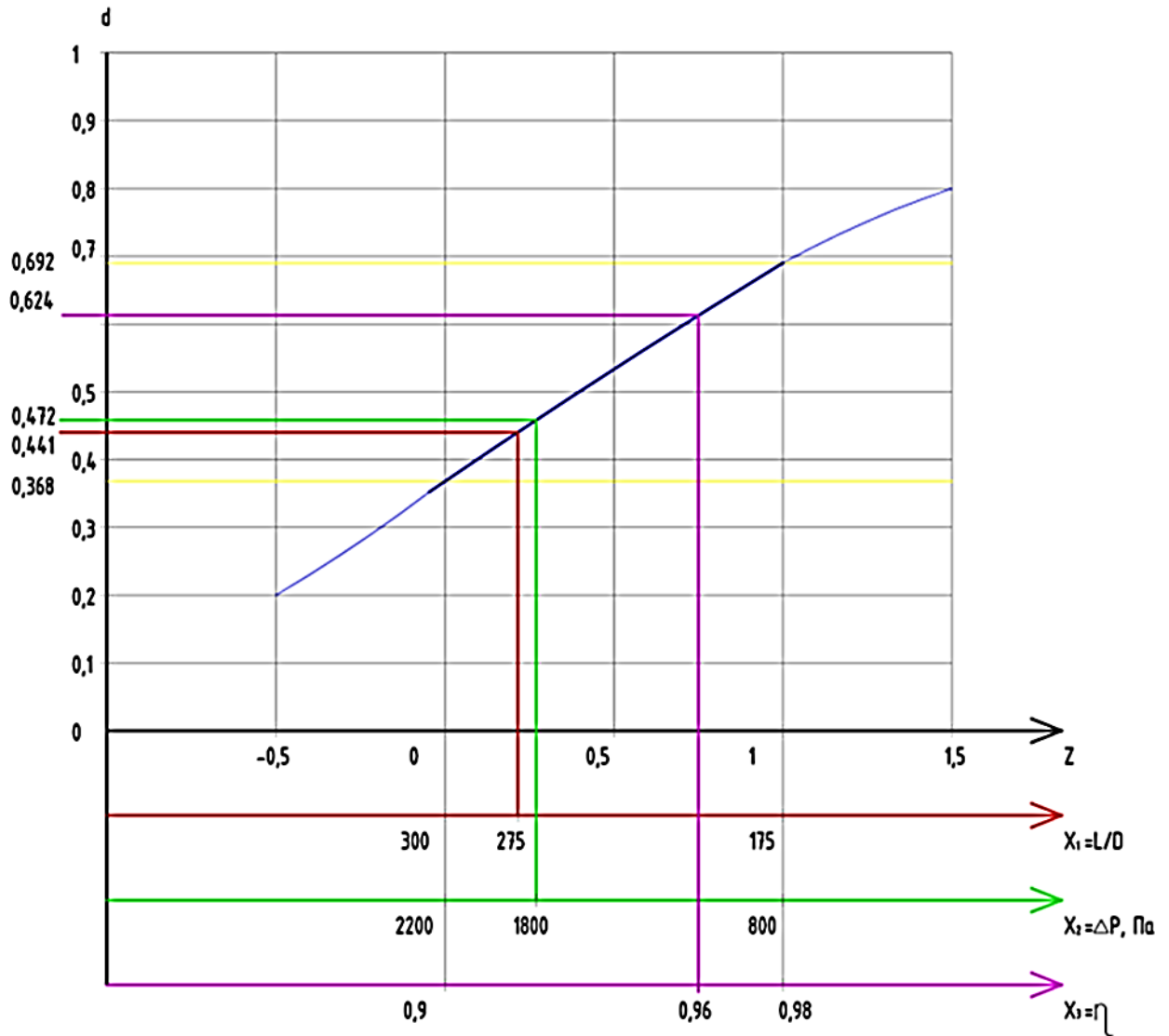


Рисунок 3.12 – Определение частных значений желательности

Функция желательности для геометрических размеров адгезионно - осадительного элемента

d_2 – параметр, зависящий от геометрических размеров адгезионно - осадительного элемента L/D ;

$$x_{2\max} = 175 \text{ и } x_{2\min} = 300$$

$$z_2 = (x_2^k - 300) / (175 - 300)$$

x_2^k - значения величины L/D , $x_2^k \in [175; 300]$

Значения функции желательности приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Функция желательности для геометрических размеров адгезионно - осадительного элемента

Значение L/D	Кодированное значение	Функция желательности
x_2	z_2	d_2
175	1	0,692201
200	0,8	0,638056
225	0,6	0,577636
250	0,4	0,511545
275	0,2	0,440991
300	0	0,367879

Функция желательности для аэродинамического сопротивления

d_3 – параметр, зависящий от потерь давления, Δp ;

$x_{3\max} = 2200$ и $x_{3\min} = 800$

$z_3 = (x_3^m - 800) / (2200 - 800)$

x_3^m - значения величины Δp , $\Delta p \in [800; 2200]$.

Таблица 3.6 – Функция желательности для потерь давления

Значение L/D	Кодированное значение	Функция желательности
x_3	z_3	d_3
800	1	0,692201
1000	0,857143	0,65418
1200	0,714286	0,612907
1400	0,571429	0,56852
1600	0,428571	0,521295
1800	0,285714	0,471669
2000	0,142857	0,420262
2200	0	0,367879

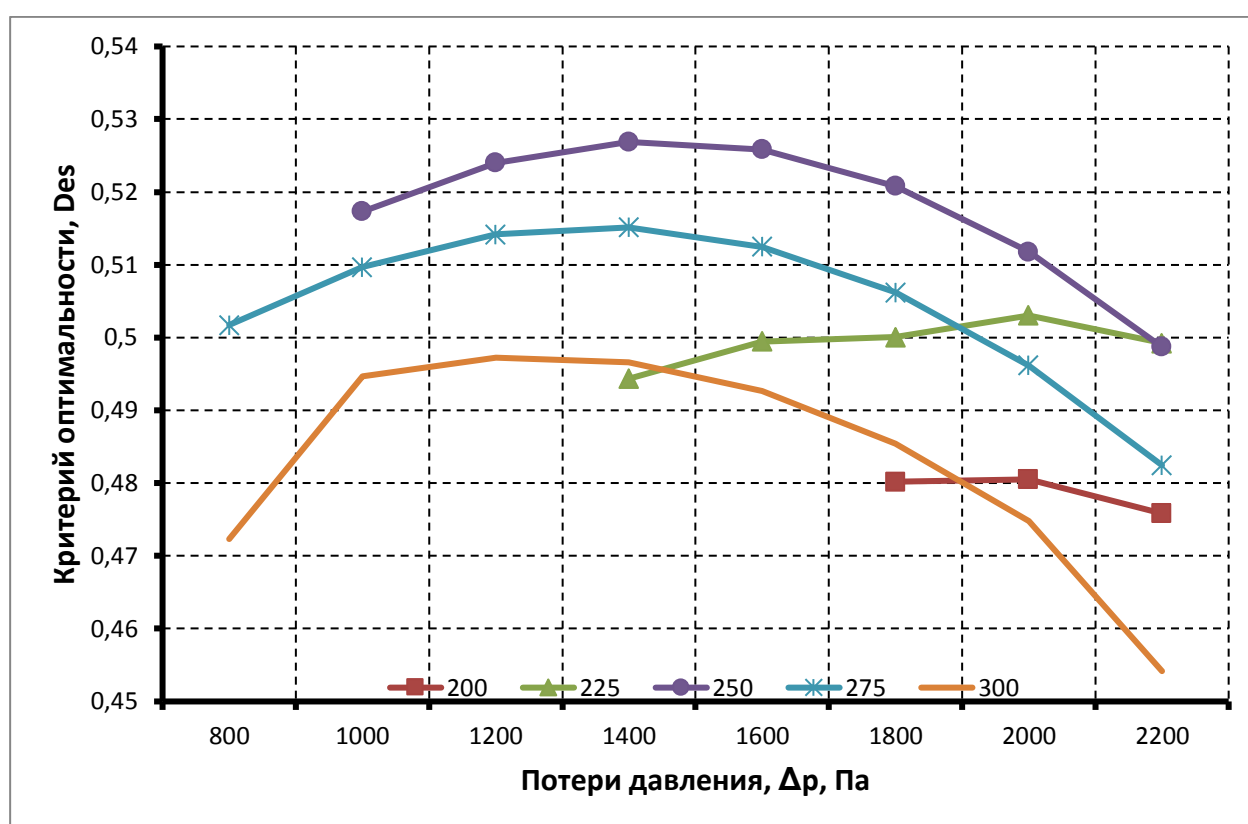
Обобщенный критерий желательности

$$Des = \sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 d_i} \rightarrow \max \quad (3.18)$$

Значения обобщенного критерия оптимальности приведены в таблице 3.7 и на рисунке 3.13.

Таблица 3.7 – Значение критерия оптимальности

ΔP , Па	Отношение L/D					
	175	200	225	250	275	300
800					0,502	0,472
1000				0,517	0,510	0,495
1200				0,524	0,514	0,497
1400			0,494	0,527	0,515	0,497
1600			0,499	0,526	0,512	0,493
1800		0,480	0,500	0,521	0,506	0,485
2000		0,481	0,503	0,512	0,496	0,475
2200	0,454	0,476	0,499	0,499	0,482	0,454

Рисунок 3.13 – Значения обобщенного критерия оптимальности при различных соотношениях L/D

Проведенный многокритериальный анализ позволил выявить оптимальные геометрические характеристики адгезионно - осадительных элементов и соответствующего им потерь давления. Согласно выполненным расчетам лучший результат наблюдается при значении $L/D = 250$ и потерям давления Δp в диапазоне [1200 Па; 1600 Па].

3.4 Характерные зависимости, описывающие работу аппарата очистки

Таким образом, дальнейшие опыты проводились для адгезионно - осадительных элементов с геометрическими параметрами $L/D = 250$. Все опыты по сепарации аэрозоля проводились в трубах и каналах, скомпонованных в пакеты, установленных с небольшим уклоном i по ходу течения потока аэрозоля.

С целью уменьшения рабочей длины L опытного устройства, было проведено некоторое количество опытов по осаждению аэрозоля в изогнутых трубах $D = 8$ мм, повышенный эффект сепарации в которых отмечается без детальной проработки, в опытах Штрёма [194].

Установлено, что при $R_{изг}/D \leq 1,5$ и стабилизирующих участков между изгибами $l_0 \geq 5$, эффект сепарации заметно выше, чем в трубах без изгибов. Так, в горизонтальной трубе с изгибами, при $L/D = 200$ эффект осаждения частиц будет таким же, как и в прямой при $L/D = 250$. Однако при этом увеличиваются потери давления в аппарате Δp с 1200 Па до 1800 Па.

Снижение величины L/D в трубке с изгибами позволяет сократить длину очистного устройства, но наличие изгибов создает определенные проблемы при конструировании аппарата, особенно при его горизонтальном положении.

На рисунках 3.12, 3.13 даны обобщенные результаты исследований по определению эффективности осаждения частиц аэрозоля диоктилфталата в трубах и каналах, при соотношении $L/D=250$ в диапазоне чисел Рейнольдса от 2000 до 34000. Каждая точка-индекс соответствует среднестатистическим данным нескольких опытов при практически одинаковом режиме движения аэрозоля.

Эффективность сепарации η представлена в однозначной зависимости от потерь давления Δp , которые становятся доминирующим параметром при оценке экономической (с позиции энергетики) целесообразности при выборе способа сепарации в тех или иных случаях.

Таким образом, для прогнозной оценки эффективности очистки аппарата с адгезионно - осадительным элементом с параметрами $L/D=250$ можно предложить следующие зависимости:

$$\eta = 0,107 \times \ln(\Delta p) + 0,153 \quad (3.19).$$

Зависимость $\eta = f(\Delta P_n)$ может быть трансформирована в $\eta = f(U_m)$

$$\eta = 0,189 \times \ln(u_m) + 0,412 \quad (3.20).$$

Опытные данные имеют хорошую сходимость с предложенными зависимостями, что характеризуется коэффициентами детерминации $R^2=0,9835$ и $0,9815$ соответственно.

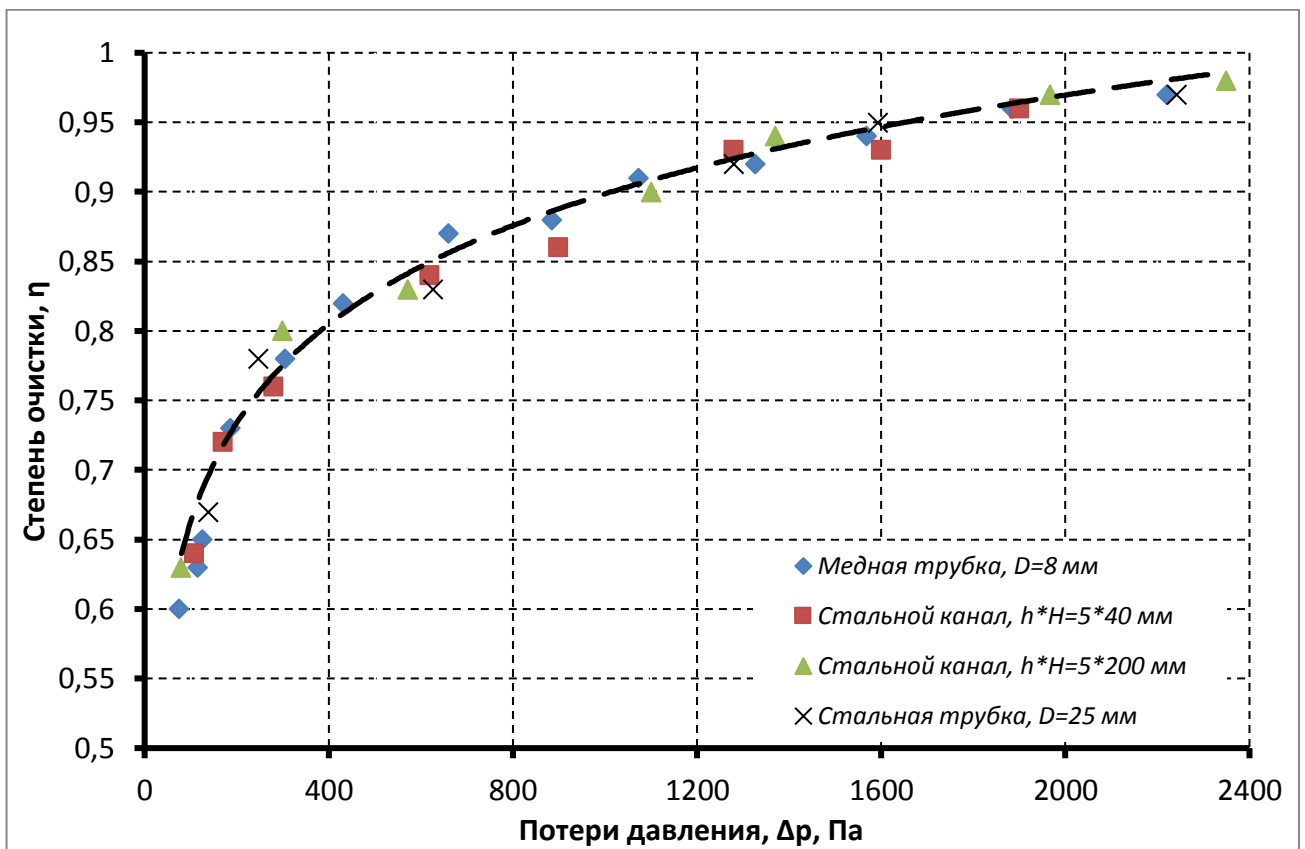


Рисунок 3.14 – Зависимость $\eta=f(\Delta p)$ при $L/D=250$

Как видно из рисунков 3.13, 3.14 эффективность сепарации $\eta = \eta^{\min} = 90\%$ (весьма хороший показатель при осаждении высоко- и тонкодисперсных частиц аэрозоля), достигается при потерях давления в аппарате $\Delta p \approx 1000$ Па, и скорости $u_m \approx 13$ м/с. Дальнейший его медленный асимптотический рост вызывается более быстрым ростом потерь давления и скорости потока. Очевидно, при расчете

очистного устройства следует руководствоваться этими предпосылками и принимать за исходные данные параметры. В случае особой необходимости (высокая токсичность, ценность улавливаемого продукта) можно добиться более высоких значений степени сепарации за счет увеличения скорости потока аэрозоля как это было в опытах [184]. Однако здесь необходимо взвешивать целесообразность повышения η в связи с ростом энергетических потерь.

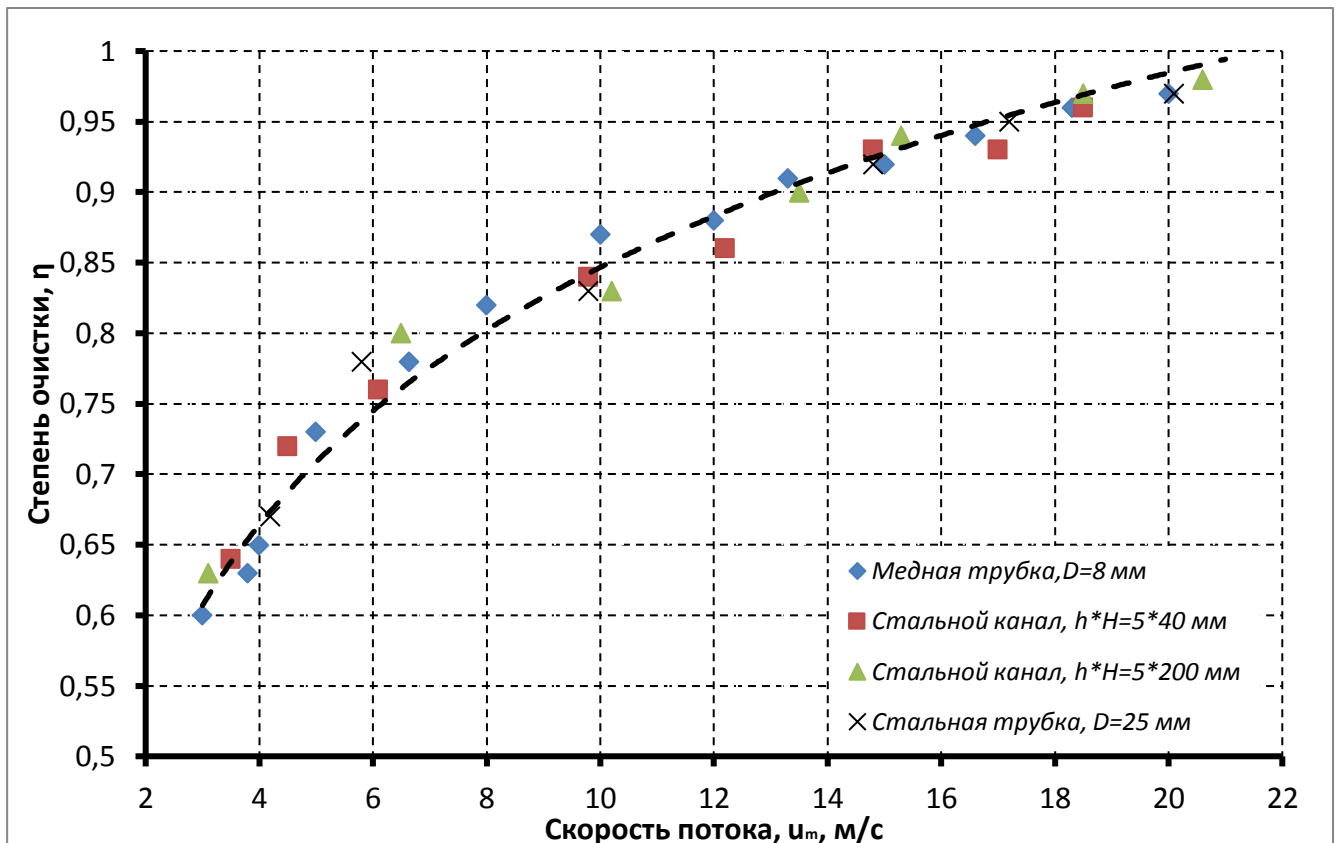
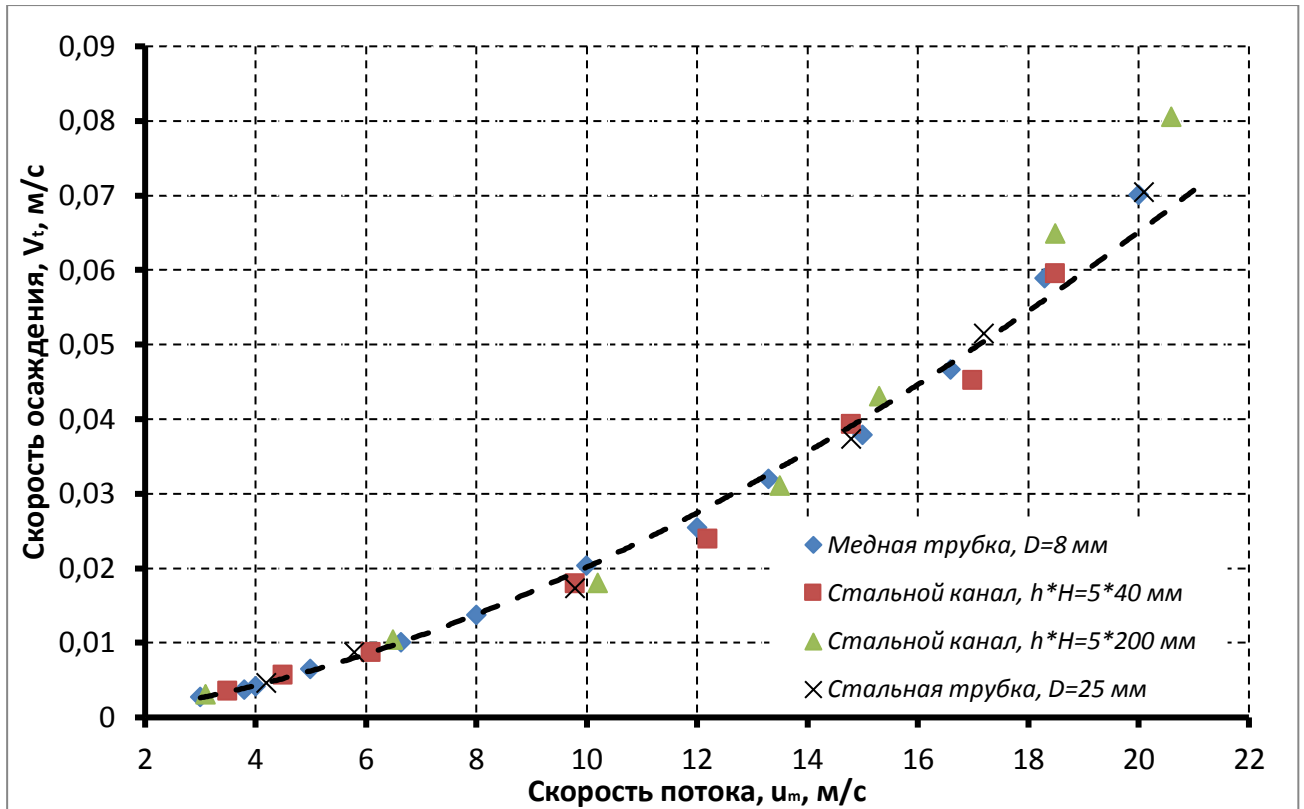


Рисунок 3.15 – Зависимость $\eta=f(u_m)$ при $L/D=250$

Учитывая, что эффективность осаждения определяется скоростью осаждения целесообразно согласно формуле (3.12) определить функцию $V_t = f(u_m)$.

Значения $V_t = f(u_m)$ в соответствии с опытными данными приведены на рисунке 3.16.

Рисунок 3.16 – Зависимость $V_t=f(u_m)$ при $L/D=250$

Значения V_t , полученные с использованием теоретической зависимости (3.12) и опытных данных, хорошо аппроксимируются зависимостью вида:

$$V_t=0,0004u_m^{1,64} \quad (3.21)$$

Значения, определенные по теоретической зависимости (3.14), и полученная эмпирическая зависимость (3.21) показали хорошую сходимость результатов с данными других экспериментаторов [76,99,145,168,173,182,184,191], что подтверждает достоверность проведенных исследований.

Представленные результаты опытных исследований в виде обобщенной зависимости эффективности сепарации аэрозоля диоктилфталата от скорости осаждения его частиц V_t , м/с, из которой следует, что ее опытное значение $\eta \approx 90\%$ достижимо при $V_t = 3,2$ см/с, что несколько выше, чем ее значение, полученное расчетным путем по полуэмпирической зависимости (2.57) [99].

Это можно объяснить тем, что осаждение частиц аэрозоля с жидкой дисперсной фазой происходит иначе, чем с твердой. Очевидно, что в первом случае частицы соударяются (коагулируют) по всему поперечному сечению

канала, вопреки теоретической предпосылке о независимости друг от друга поведения частиц любого аэрозоля, как с твердой, так и жидкой дисперсионной фазами. Соответственно, коагуляция частиц ведет к увеличению диаметра частицы, далее, к увеличению времени релаксации частицы и, наконец, к увеличению скорости осаждения и эффективности очистки.

Столь относительно высокие скорости осаждения частиц аэрозоля V_t в вертикальных и, в меньшей степени, горизонтальных каналах, характерны для полидисперсных водяных туманов, аэрозоля оливкового масла, твердых частиц на стенках, орошаемых водой (поглощающие стенки).

3.5 Оценка погрешности измерений в эксперименте

Практическое использование результатов измерений требует оценки точности измеряемых физических величин. Точность измерения отражает степень приближения результатов измерений к некоторому действительному значению и позволяет качественно сравнивать измерительные операции. Количественной оценкой точности измерения служит погрешность или ошибка измерений. Оценка погрешности необходима для обеспечения достоверности измерений.

Погрешности могут быть систематические и случайные. К систематическим можно отнести погрешности, связанные с непосредственным измерением величин приборами, к случайным относятся погрешности, появляющиеся в опытах при многократных измерениях.

3.5.1 Определение случайной погрешности

Для определения случайных погрешностей используют методы математической статистики [20,45,156,164]. Если в результате n равнозначных измерений получено n значений искомой величины для оценки точности используются следующие показатели.

Среднее арифметическое значение определяемого параметра x_i при числе повторенных серий опытов ($n=3$):

$$x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.22)$$

Для нормального распределения случайных величин дисперсия $\sigma^2 = \int (\bar{x} - x)^2 f(x) dx$ показывает среднеквадратичный разброс измерений относительно наиболее вероятного значения \bar{x} . Среднеквадратичное отклонение σ , характеризующее метод измерения: $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

Среднеквадратичное отклонение σ , для результатов n измерений:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (3.23)$$

При заданной доверительной вероятности α величина доверительного интервала (погрешность серии) при малом числе измерений определяется с использованием коэффициента Стьюдента:

$$\Delta x = t_{cm} \sigma \quad (3.24)$$

Для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ и числе опытных серий $n = 3$ коэффициент Стьюдента $t_{cm} = 4,30$.

Относительная погрешность измерений серии опытов

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% \quad (3.25)$$

Коэффициент вариации серии опытов

$$K_i = \frac{\sigma}{x} \quad (3.26)$$

По указанным формулам выполнялся анализ погрешностей измерений для всех типов, исследуемых адгезионно - осадительных элементов. В таблице 3.8 приведены результаты определения случайной ошибки для опытов с адгезионно - осадительными элементами в виде трубок с $D=8$ мм.

Коэффициент вариации во всех случаях не превышал значения 5%, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Таблица 3.8 – Определение случайной ошибки многократных измерений

$\Delta p, \text{Па}$	η_1	η_2	η_3	$\tilde{\eta}$	σ^2	σ	σ	$\Delta x_{сл}$	$\delta, \%$	$K_i, \%$
75,6	0,583	0,581	0,619	0,594	0,00046	0,02139	0,01234	0,05309	8,9	3,6
115	0,607	0,641	0,637	0,628	0,00035	0,01858	0,01072	0,04613	7,3	3,0
125	0,638	0,662	0,645	0,648	0,00015	0,01234	0,00712	0,03064	4,7	1,9
187	0,741	0,719	0,721	0,727	0,00015	0,01217	0,00702	0,03020	4,2	1,7
305	0,778	0,789	0,781	0,783	0,00003	0,00569	0,00328	0,01411	1,8	0,7
432	0,815	0,816	0,826	0,819	0,00004	0,00608	0,00351	0,01510	1,8	0,7
660	0,871	0,869	0,863	0,868	0,00002	0,00416	0,00240	0,01033	1,2	0,5
885	0,865	0,877	0,885	0,876	0,00010	0,01007	0,00581	0,02499	2,9	1,1
1073	0,912	0,916	0,901	0,910	0,00006	0,00777	0,00448	0,01928	2,1	0,9
1326	0,915	0,922	0,924	0,920	0,00002	0,00473	0,00272	0,01173	1,3	0,5
1568	0,942	0,939	0,933	0,938	0,00002	0,00458	0,00264	0,01137	1,2	0,5
1884	0,963	0,958	0,957	0,959	0,00001	0,00321	0,00185	0,00798	0,8	0,3
2220	0,968	0,971	0,974	0,971	0,00001	0,00300	0,00173	0,00744	0,8	0,3

3.5.2 Инструментальные ошибки при измерении физических величин

При проведении исследований по очистке воздуха на экспериментальной установке производились измерения потерь давления в аэрозолеуловителе, расхода очищаемого воздуха, концентрации аэрозолей пластификаторов в очищаемом воздухе. Для суждения о достоверности этих исследований необходимо оценить точность указанных измерений.

1. Погрешность при определении величины перепада давления.

Для определения потерь давления в аэрозолеуловителе, а также расхода воздуха с помощью нормальной диафрагмы, использовался микроманометр ММН-240 с миллиметровой шкалой деления. Измеряемое по нему давление выражается следующим образом:

$$p_1 - p_2 = [(A - a)\sin\alpha + \Delta H]\gamma, \quad (3.27)$$

где A, a – конечный и начальный отсчет по шкале;

α – угол наклона трубки микроманометра;

ΔH – изменение уровня спирта в бачке микроманометра.

Согласно теории погрешности [74,112,164] предельная относительная ошибка δ функции нескольких независимых переменных равняется дифференциалу натурального логарифма этой функции. В конечных величинах относительная ошибка измерения по формуле 3.20 составит:

$$\delta = \frac{\Delta(p_1 - p_2)}{p_1 - p_2} = \frac{\Delta[\gamma(A - a)\sin\alpha + \Delta H \gamma]}{p_1 - p_2} \quad (3.28)$$

Так как отношение площади трубки S_2 к площади резервуара со спиртом S_2 составляет 0,0016, изменение уровня спирта в бачке микроманометра ММН можно не учитывать, тогда измеряемое давление приближенно будет:

$$p_1 - p_2 = \gamma(A - a)\sin\alpha \quad (3.29)$$

Учитывая выражение 3.20, получим:

$$\delta = \frac{\Delta[\gamma(A - a)\sin\alpha + \gamma\Delta H]}{\gamma(A - a)\sin\alpha} = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta(A - a)}{A - a} + \frac{\Delta\sin\alpha}{\sin\alpha} + \frac{\gamma\Delta H}{\gamma(A - a)\sin\alpha} \quad (3.30)$$

Согласно полученному выражению относительная погрешность микроманометра будет складываться из относительных погрешностей:

а) измерения удельного веса спирта $\delta_c = \frac{\Delta\gamma}{\gamma}$;

б) отсчета по шкале микроманометра $\delta_m = \frac{\Delta(A - a)}{A - a}$;

в) измерения угла наклона трубки микроманометра $\delta_u = \frac{\Delta\sin\alpha}{\sin\alpha}$;

г) погрешности, связанной с изменением уровня в бачке микроманометра

$$\delta_y = \frac{\Delta(\Delta H)}{(A - a)\sin\alpha}.$$

Следовательно,

$$\delta = \delta_c + \delta_m + \delta_u + \delta_y \quad (3.31)$$

Величина удельного веса спирта ($\gamma=0,81$ г/см³) определялась поплавковым ареометром с точностью до 0,001 г/см³. При этом относительная погрешность:

$$\delta_c = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{0,001}{0,81} = 0,123 \%$$

Относительная погрешность измерения показания шкалы микроманометра зависит от самой величины $A - a$ и от точности отчета. Максимальный отсчет по

микроманометру может быть не более длины трубки – 250 мм (300 мм). Минимальный – 20 мм – при определении расхода очищаемого воздуха по перепаду давления нормальной диафрагмы, который ограничивается требуемой точностью измерения. Минимальный отсчет по микроманометру при определении аэродинамического сопротивления аэрозолеуловителя составлял около 50 мм и ограничивался нецелесообразностью проведения исследований аэрозолеуловителей более низкого сопротивления из-за их низкой эффективности.

При миллиметровой шкале микроманометра без каких-либо оптических приспособлений точность отсчета будет 0,5 мм. Следовательно, относительная ошибка при непосредственном измерении показаний микроманометра δ_m изменялась в пределах от 0,20 до 2,5%. Относительная погрешность определения угла наклона трубки, включая ошибки на неточность установки и уровня, не превышает 0,2% [112] и, следовательно,

$$\delta_n = \frac{\Delta \sin \alpha}{\sin \alpha} = 0,2\%$$

Относительная погрешность, возникающая из-за перемещения уровня жидкости в баке микроманометра, при замерах с постоянной прибора $K=0,2$, будет

$$\delta_y = \frac{\Delta(\Delta H)}{(A-a)\sin \alpha} = \frac{S_2}{S_1} \frac{1}{\sin \alpha} = 0,0016 \frac{1}{0,25} = 0,64\%$$

По мере увеличения наклона шкалы микроманометра ($K>0,2$) $\sin \alpha$ будет возрастать, а относительная погрешность уменьшаться.

После вышеприведенного анализа и на основании проведенных расчетов можно сделать вывод, что относительная погрешность микроманометра не превышала при определении:

- аэродинамического сопротивления аэрозолеуловителя

$$\delta \leq 0,52 \div 1,96\%;$$

- перепада давления нормальной диафрагмы установки по очистке воздуха

$$\delta \leq 1,16 \div 3,56\%.$$

2. Погрешность при измерении температуры газа.

Измерение температуры очищаемого воздуха производилось стандартным хромелькапелевыми термопарами и вторичными приборами – переменными потенциометрами постоянного тока (ПП-63). Относительная погрешность ее при температуре воздуха $293 \div 323$ °К не превышает 0,2% [78]. Для каждой термопары предварительно проводилась индивидуальная градуировка. Свободные концы термопар помещались в сосуд Дьюара с тающим льдом, температура которого контролировалась по лабораторному термометру с ценой деления 0,1 °С.

Погрешность переносного потенциометра ПП-63 класса точности 0,05 не превышает $\pm(5 \cdot 10^{-4} U \div 0,5 \Delta U)$ вольт. Поэтому при измерении температуры воздуха в диапазоне $+293 \div 323$ °К относительная ошибка $\delta \leq 0,1\%$. Инструментальная погрешность комплекта термопары и потенциометра определяется суммированием погрешностей каждого из составляющих и составляет $\delta_m \leq 0,3\%$.

3. Погрешность измерения расхода.

При измерении расхода воздуха ($\text{м}^3/\text{ч}$) по перепаду давления в нормальной диафрагме необходимо учитывать погрешности при определении отдельных величин, входящих в уравнение расхода:

$$Q_0 = 1,252 \cdot 10^{-2} \alpha * \varepsilon * d^2 \sqrt{\Delta p / \rho} \quad (3.32)$$

где $1,252 \cdot 10^{-2} = 3600 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{4} \sqrt{2 * 9,81}$;

9,81 – множитель для перевода значения Δp , выраженного в $\text{кгс}/\text{м}^2$, в значение, выраженное в Па;

α – коэффициент расхода сужающего устройства;

ε – поправочный множитель на расширение измеряемой среды;

d – диаметр отверстия сужающего устройства при температуре измеряемой среды, мм; согласно формуле $F_0 = 10^{-6} \frac{\pi}{4} d^2$, м^2 ;

ρ – плотность измеряемой среды в рабочих условиях при давлении и температуре непосредственно перед диафрагмой;

Δp – перепад давления в сужающем устройстве, Па.

Учитывая, что измеренные температуры очищаемого воздуха не превышали 50 °С, то изменение диаметра отверстия диафрагмы и внутреннего диаметра трубопровода за счет температурных расширений согласно [116] можно не учитывать.

Предельная относительная погрешность измерения расхода [52] δ_a равна:

$$\delta_Q = 2\sigma_Q + \delta_l \quad (3.33)$$

где σ_Q – средняя квадратичная относительная погрешность измерения расхода, %;

σ_l – погрешность, учитывающая влияние уменьшения длины прямого участка трубопровода перед сужающим устройством, %.

Согласно [116] σ_l может быть принята равной 0,5% из-за сокращения в два раза необходимой наименьшей длины прямого участка трубопровода постоянного диаметра перед диафрагмой.

Предельная относительная погрешность измерения расхода, отнесенная к верхнему пределу измерений комплекта $Q_{в.н.}$, равна:

$$\delta_Q = \frac{(2\sigma_Q + \delta_l)Q}{Q_{в.н.}} \quad (3.34)$$

где Q - измеренный расход.

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода подсчитывается по формуле:

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + 4\sigma_d^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4}\sigma_\rho^2} \quad (3.35)$$

Погрешность $4\sigma_d^2$ можно пренебречь, так как диаметр цилиндрического отверстия нормальной диафрагмы был выполнен в соответствии с требуемыми допусками, и согласно [52] величина ее мала по сравнению с остальными слагаемыми. Формула определения σ_Q упрощается:

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4}\sigma_\rho^2} \quad (3.36)$$

где σ_α – средняя квадратическая относительная погрешность коэффициента расхода, %;

σ_ε - средняя квадратическая относительная погрешность поправочного множителя на расширение измеряемой среды, %;

$\sigma_{\sqrt{\Delta p}}$ - средняя квадратическая относительная погрешность показаний по шкале комплекта при измерении расхода Q в % по расходу;

σ_ρ - средняя квадратическая относительная погрешность значения плотности измеряемой среды, %.

Погрешность отдельных величин, входящих в уравнение расхода, были определены для нормальной диафрагмы установки по очистке воздуха с $d=25$ мм и $d=50$ мм в соответствии с [52] и составили для измеряемого диапазона расхода:

$$\sigma_\alpha = 0,871; \sigma_\varepsilon \approx 0; \sigma_{\sqrt{\Delta p}} = 0,25 \div 0,833; \sigma_\rho \approx 0.$$

В результате расчетов по формуле (3.29) установлено, что σ_Q не превышала в опытах величины $0,94 \div 1,21\%$ при измерении перепада давления Δp с помощью микроманометра ММН при $K=0,2$; а предельная относительная погрешность измерения расхода σ_Q соответственно составила $2,38 \div 2,92\%$.

4. Относительная ошибка при определении концентрации аэрозолей пластификаторов в очищаемом воздухе.

Согласно обычной методике определения концентрации весовым методом ее величина вычисляется по формуле:

$$C = \frac{10^3 \Delta G}{L * \tau} \quad (3.37)$$

ΔG – привес пластификатора на аналитическом фильтре, мг;

L – расход анализируемого воздуха, определяемый по показанию ротаметра ПРУ в л/мин;

τ – продолжительность опыта, мин.

Таким образом, относительная ошибка при этом равна:

$$\delta_c = \pm \left[\frac{\Delta(G)}{\Delta G} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \tau}{\tau} \right] \quad (3.38)$$

Учитывая изложенные выше положения, были произведены соответствующие расчеты относительной ошибки, которая составила от 8,5 до 9 % при определении расхода анализируемого воздуха с помощью ротаметров ПРУ.

Из приведенного сопоставления относительных ошибок при определении концентраций пластификаторов в очищаемом воздухе можно сделать вывод, что основная погрешность при определении концентрации получается за счет ошибки в расходе анализируемого воздуха. Поэтому в опытах на это должно быть обращено особое внимание и для большей надежности и точности расход анализируемого воздуха необходимо определять двумя приборами одновременно, включая их последовательно.

Выводы по главе 3

1. Для определения значимых для конструкции аппаратов очистки параметров и выявления функциональных зависимостей был проведен ряд экспериментов на двух сконструированных опытных установках. С использованием аэродинамического стенда проводились опыты по определению коэффициентов сопротивления трения λ и потерь давления Δp в трубах и каналах, знание величины которых необходимо для последующих исследований по сепарации аэрозолей. На второй опытной установке выполнялось определение геометрических характеристик адгезионно - осадительных элементов, и выявление возможных аналитических зависимостей конструируемых аппаратов очистки.
2. Был проведен ряд исследований для определения наиболее эффективного сочетания параметров адгезионно - осадительного элемента (длины и эффективного диаметра), а также его потерь давления.
3. Для уменьшения объемов опытных исследований и поиска значений L/D и Δp , дающих максимальный эффект, решена задача многокритериальной оптимизации с использованием следующих критериев: эффективность очистки ($\eta \in [90; 98]$), геометрические размеры адгезионно - осадительного элемента ($L/D \in [175; 300]$), потери давления ($\Delta p \in [800; 2200]$). На основании проведенного исследования получен обобщенный критерий оптимальности, максимальные значения которого наблюдаются при

значении $L/D = 250$ и потерь давления аппарата в диапазоне [1200 Па; 1600 Па].

4. Для очистного аппарата с адгезионно - осадительными элементами в виде трубок или щелевых каналов со значением $L/D=250$ предложены функциональные зависимости, характеризующие работу аппарата: $\eta=f(\Delta p)$, $\eta=f(u_m)$, $\eta=f(L/D)$, $V_t=f(u_m)$. Достоверность проведенных исследований подтверждается хорошей сходимостью результатов с опытными исследованиями других авторов, коэффициентом вариации для серий опытов не превышающем 5%, относительной ошибкой измерений не более 9 % при доверительной вероятности $\alpha=0,95$.

ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Конструирование аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей

Опытные исследования и практика показали, что осаждение взвесей путем турбулентной коагуляции является очень эффективным способом. Техническая задача решается тем, что в качестве адгезионно - осадительных элементов используют либо тонкостенные металлические цилиндры, либо тонкие металлические пластины, скомпонованные в вертикальном плоскопараллельном пакете. Однако, при любом из вышеперечисленных способов осаждения физические явления (гидродинамика и массоперенос) будут идентичны. Важнейшей составляющей, независимо от профиля канала с одинаковыми значениями эквивалентных диаметров $D_э$, является соотношение $L/D_э=250$.

При этом количество элементов в одном корпусе практически не ограничено и определяется только производительностью аппарата, конструктивными особенностями и экономической целесообразностью [84,11,134]. С целью увеличения производительности очистного устройства, отдельные его элементы komponуются в общем корпусе круглой или прямоугольной формы с развальцовкой концов трубок в трубных решетках.

4.1.1 Коаксиальный трубчатый сепаратор

Предлагаемый коаксиальный сепаратор является одним из наиболее эффективных устройств для осаждения частиц капельного аэрозоля при очистке вентиляционных выбросов. Адгезионно - осадительные элементы его выполнены в виде тонкостенных металлических цилиндров коаксиально скомпонованных в пакет с зазором между цилиндрами $\delta=6$ мм, при этом отношение длины

адгезионно - осадительного элемента к эквивалентному диаметру зазора $L/D_0=250$. На рисунке 4.1 представлен коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля и стабилизирующее устройство [84].

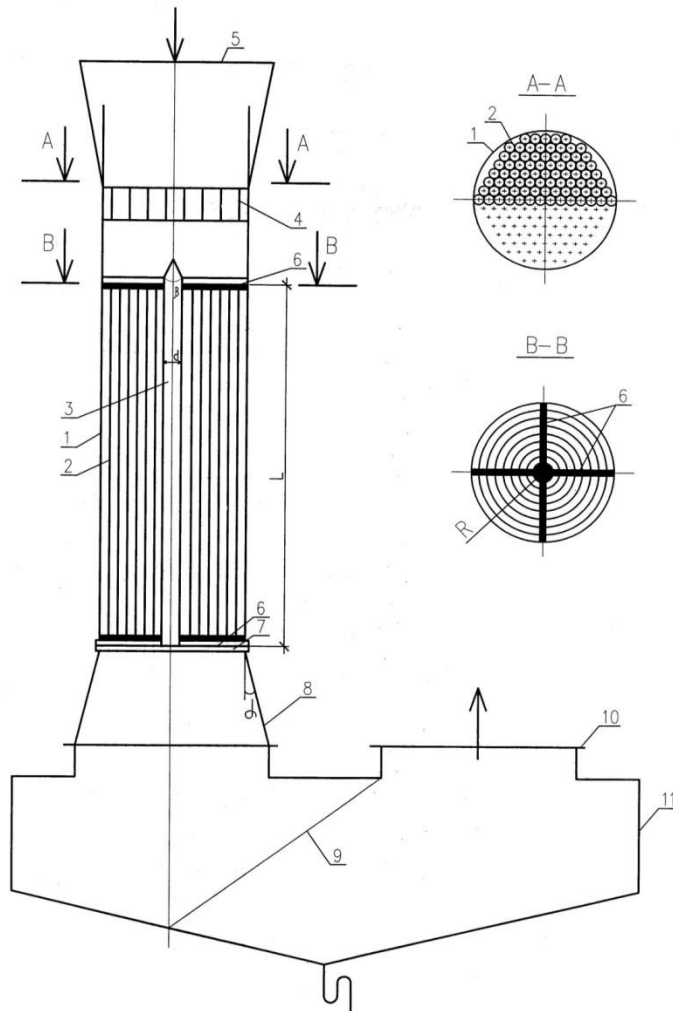


Рисунок 4.1 – Коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля: 1-сварной корпус, 2-адгезионно-осадительный элемент, 3-внутренний стержень, 4-стабилизирующее устройство, 5-конфузор для подвода очищаемого аэрозоля, 6-«гребенка», 7-опорная крестовина, 8-фланец диффузора, 9-стабилизирующая сетка, 10-патрубок отвода очищенного воздуха, 11-бункер для сбора и удаления коагулянта

Коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля содержит сварной корпус 1, адгезионно - осадительный элемент 2 с внутренним стержнем 3, стабилизирующее устройство 4, конфузор 5 для подвода очищаемого аэрозоля, «гребенку» 6, опорную крестовину 7, приваренную к фланцу диффузора 8,

стабилизирующую сетку 9, патрубок отвода очищенного газа 10 и бункер 11 сбора и удаления коагулянта.

С целью придания устойчивости адгезионно - осадительному пакету его торцы фиксируются «гребенками» 6 из полосовой стали, к которым привариваются наружная и внутренняя стенки адгезионно - осадительных элементов 2.

Для стабилизации турбулентного поля скоростей на входе аэрозоля в сепаратор установлено стабилизирующее устройство 4 (хонейкомб), а после адгезионно - осадительных элементов 2 - стабилизирующая сетка 9 с живым сечением 80%.

В предлагаемом устройстве с целью защиты от уноса предусмотрено снижение скорости газа за счет расширения каналов транспорта на выходе из адгезионно - осадительного элемента 2 и из бункера 11 сбора и удаления коагулянта. Угол раскрытия конфузора 5 и диффузора 8 $2\alpha=15^\circ$ выбран исходя из условий минимального гидравлического сопротивления. Снижение гидравлического сопротивления позволяет увеличить эффективность сепарации за счет увеличения скорости течения газа. По этим же соображениям внутренний цилиндр с конусным обтекателем ($\beta=45^\circ$) на входе аэрозоля должен иметь диаметр не менее $2r=200$ мм.

Зазор $\delta=6$ мм между адгезионно - осадительными элементами, выполненными в виде тонкостенных металлических цилиндров коаксиально скомпонованных в пакет, принят исходя из масштаба турбулентности, при котором наиболее эффективно осаждаются частицы субмикронных размеров. Отношение длины адгезионно - осадительного элемента к эквивалентному диаметру зазора $L/D_0=250$.

Устройство работает следующим образом: аэрозоль, подлежащий очистке, поступает в сепаратор через конфузор 5 и стабилизирующее устройство 4, в щелевые коаксиальные каналы адгезионно - осадительного элемента 2, на стенках которого выпадает коагулянт, стекающий вниз в бункер 11, а очищенный газ

через стабилизирующую сетку 9 и патрубков отвода очищенного газа 10 удаляется из сепаратора.

При компоновке трубок коаксиально в корпусе сепаратора с $\delta=6$ мм между рядами трубок, их количество уменьшается, но поскольку наружные стенки трубок представляют собой стенки плоскопараллельного канала, где также происходит осаждение аэрозольных частиц, то объем очищаемого газа (производительность) больше чем в других типах трубчатых сепараторов.

4.1.2 Пластинчатые сепараторы

Известно, что для высокоэффективного осаждения частиц аэрозоля движение газа должно быть развитым турбулентным, т.е. при эквивалентном диаметре канала D , число Рейнольдса составляет: в трубках $Re_D \geq 10000-12000$, в плоских каналах $Re_{D_0} \geq 4800$. Следовательно, в плоских каналах длина начального участка L_H будет в 2 – 2,5 раза короче, чем в круглом канале при одинаковых прочих характеристиках. Это условие позволяет сократить длину адгезионно - осадительного канала L и, следовательно, габаритный размер очистного устройства.

В качестве адгезионно - осадительных элементов в следующих аппаратах используют тонкие металлические листы прямые или с изгибами [111,134].

4.1.2.1 Пластинчатый сепаратор с прямыми пластинами

В случае использования в качестве адгезионно - осадительных элементов вертикально расположенных тонких металлических пластин, их компонуют в плоскопараллельный пакет с щелевыми зазорами $h=4$ мм между пластинами [111]. Размер h принят исходя из масштаба турбулентности, при котором наиболее эффективно осаждаются частицы субмикронных размеров (см. рисунок 4.2.).

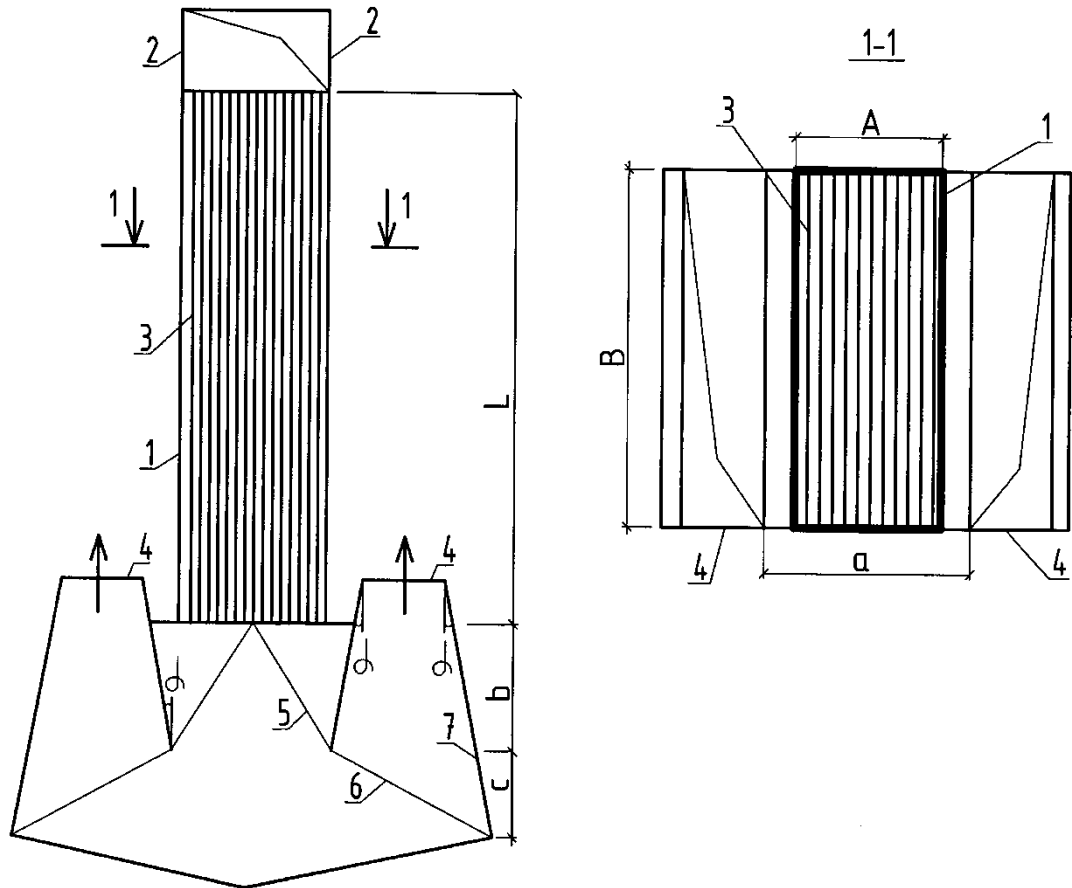


Рисунок 4.2 – Пластинчатый сепаратор аэрозоля: 1-корпус сепаратора, 2-воздуховод равномерной раздачи, 3-плоские пластины, 5-сетки-укрупнители капель, 7-бункер, 6-сетка, 4-стабилизирующие конфузорные патрубки.

С целью равномерного распределения потока в адгезионно - осадительном канале патрубков ввода очищаемого газа принят в виде канала равномерной раздачи 2. С целью защиты от уноса предусмотрено снижение скорости газа за счет расширения каналов транспорта на выходе, где последовательно установлены два стабилизирующих конфузора 4 и сетки 5 с живым сечением $f_{жс} \geq 80\%$ - укрупнители капель коагулята. Кроме того, конструктивные размеры осадительного бункера $a/A=1,3$, $b/A=1,3$, $c/A=0,8$ также приняты из условия, обеспечивающего отсутствие каплеуноса. Роль стабилизирующих конфузоров 4 сводится к тому, что в них происходит стягивание линии тока, в силу чего взвешенные частицы отстают от несущего газа и отклоняются от линии тока в

сторону стенок, по которым они стекают в поддон. Угол раскрытия стабилизирующих конфузоров $4 \quad 2\alpha=15^\circ$, выбран, исходя из условий минимального гидравлического сопротивления. Снижение гидравлического сопротивления позволяет увеличить эффективность сепарации за счет увеличения скорости течения газа.

Пластинчатый сепаратор аэрозоля содержит: корпус 1, в верхней части которого располагается воздухопровод равномерной раздачи 2 для подвода очищаемого газа, адгезионно - осадительные пластины 3, стабилизирующие конфузурные патрубки 4 для вывода очищаемого газа, сеток 5 и 6, бункера сбора и отвода коагулята 7.

Принцип работы пластинчатого сепаратора аэрозоля заключается в следующем. Очищаемый газ, поступает в корпус сепаратора 1, через воздухопровод равномерной раздачи 2, проходит в щелевые каналы между адгезионно - осадительными пластинами 3. На стенках пластин выпадает коагулянт, который стекает вниз через сетки-укрупнители капель 5 в бункер 7, а очищенный газ через сетку 6 и стабилизирующие конфузурные патрубки 4 отводится из сепаратора.

4.1.2.2 Пластинчатый сепаратор с изогнутыми адгезионно-осадительными элементами

Важным фактором, влияющим на эффективность сепарации аэрозоля являются изгибы каналов, которые оцениваются отношением радиуса изгиба $R_{из}$ к эквивалентному диаметру $D_э$. опыты показали, что при $R_{из} > 8D_э$ влияние изгибов на формирование пограничного слоя незначительно и при одинаковой длине прямого и изогнутого канала эффективность осаждения частиц η будет практически одинаковой.

Однако, с уменьшением $R_{из}/D_э$ картина меняется. При сравнении двух одинаковых по начальной длине каналов ($L_1=L_2, D_{э1} = D_{э2}$), один из которых снабжен изгибами при $R_{из}/D_э < 1,5$, показало, что при одинаковом полном аэродинамическом сопротивлении Δp , канал с изгибами обладает более

эффективной степенью осаждения частиц. Так, например, при $R_{из}/D_3 = 0,75$ коэффициент эффективности очистки $\eta > 99\%$, тогда как в прямом канале при аналогичных условиях величина η не превышает 95%

Сепаратор туманов с изогнутыми элементами состоит из корпуса 1, в верхней части которого располагается канал равномерной раздачи 2, адгезионно-осадительных элементов 3 с крепежными рейками 4, стабилизирующих конфузоров для отвода отсепарированного тумана 5, сеток-укрупнителей мелких капель 6 и бункера сбора и удаления коагулянта 7 (см. рисунок 4.3).

В случае использования изогнутых пластинчатых элементов, металлические листы с углом раскрытия $\beta=60^\circ$ компонуются в пакет с щелевыми зазорами между листами $\delta=6\text{мм}$, расположенный вертикально и обеспечивающий развитый турбулентный режим течения [134]. Такой размер δ принят исходя из масштаба турбулентности, при котором наиболее эффективно осаждаются частицы субмикронных размеров. Подтверждением этому являются результаты наших опытов и опытов зарубежных исследователей по осаждению таких частиц в трубках диаметром $d_{вн} \leq 8$ мм.

Конструктивно сепаратор аэрозоля выполнен из адгезионно-осадительных элементов, скомпонованных в адгезионно-осадительный пакет, который устанавливается в корпус. Для придания устойчивости пакету в щелевые зазоры между листами, с торцов, вставляются деревянные рейки (типа оконного штапика) толщиной 6мм. Эти рейки можно закрепить мелкими гвоздями в процессе сборки адгезионно-осадительного пакета.

Количество адгезионно-осадительных элементов в пакете определяется расчётом.

Принятые размеры бункера сбора осажденного коагулянта $b/a = 1,5$ обеспечивают отсутствие каплеуноса. Живое сечение сеток-укрупнителей мелких капель $f_{жс} = 80\%$. Угол раскрытия конфузоров $2\alpha=15^\circ$ обеспечивает снижение гидравлического сопротивления и увеличение скорости течения газа.

При расстояниях $l_0/D_3 \geq 5$, поток аэрозоля после отрыва за первым сопряжением отводов полностью растекается по сечению канала, и условия течения получаются примерно такими же, как и перед предыдущими изгибами.

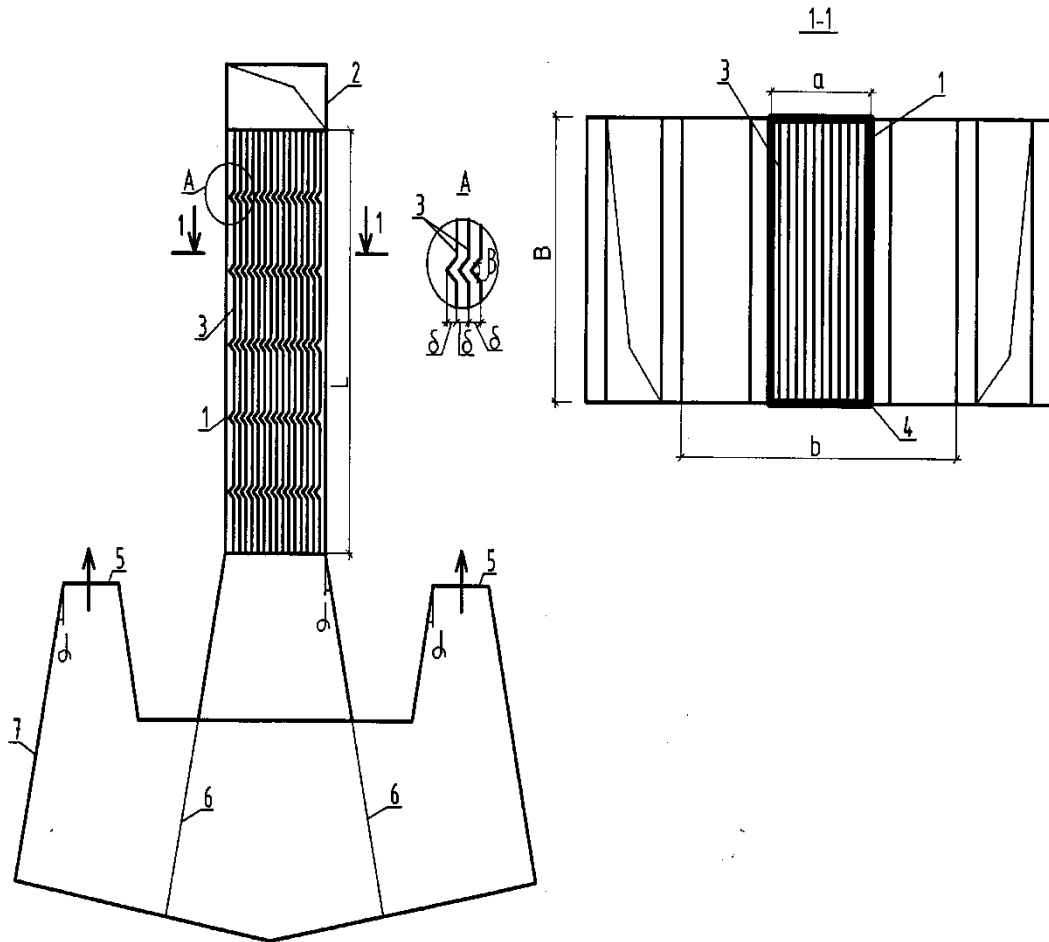


Рисунок 4.3 – Сепаратор туманов с изогнутыми пластинчатыми адгезионно-осадительными элементами: 1-корпус сепаратора, 2-воздуховод равномерной раздачи, 3-изогнутые пластины, 5-сетки-укрупнители капель, 7-бункер, 6-сетка, 4-стабилизирующие конфузورные патрубки.

Собранный сепаратор аэрозоля устанавливается вертикально, работает по схеме «сверху-вниз» и может включаться в транспортирующую сеть, как со стороны всасывания, так и нагнетания. Вторая схема предпочтительнее.

В данном устройстве с целью защиты от уноса предусмотрено снижение скорости газа за счет расширения каналов транспорта на выходе последовательной установки двух конфузоров и сеток - укрупнителей капель коагулянта. Роль конфузоров сводится к тому, что в них происходит стягивание линии тока, в силу чего взвешенные частицы отстают от несущего газа и

отклоняются от линии тока в сторону стенок, по которым они стекают в поддон. Угол раскрытия конфузоров $2\alpha=15^\circ$, выбран исходя из условий минимального гидравлического сопротивления. Снижение гидравлического сопротивления позволяет увеличить эффективность сепарации за счет увеличения скорости течения газа.

Реализация предлагаемого устройства позволяет значительно упростить его конструкцию и создает предпосылки для увеличения эффективности сепарации аэрозоля.

4.3 Методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей

Одним из основным видов производств, в процессе функционирования которого выделяются мелкодисперсные капельные аэрозоли, является производство изделий из полимерных материалов

Производство изделий из полимерных материалов включает в себя множество различных процессов. Согласно технологическим регламентам, при изготовлении полимерных составов используется смешивание полимеров с различными добавками, в том числе с пластификаторами [28].

Пластификаторы - вещества, вводимые в полимерные материалы для придания (или повышения) эластичности и (или) пластичности при переработке и эксплуатации. Пластификаторы классифицируют обычно по химической природе и степени совместимости с полимером. Наиболее распространенные пластификаторы - сложные эфиры фталевой кислоты (фталаты составляют ~ 80% всего объема выпускаемых в промышленности пластификаторов), алифатических дикарбоновых кислот, фосфорной кислоты (фосфаты) и низкомолекулярные полиэфиры.

Пластифицировать можно практически все полимеры, однако эффективность пластифицирующего действия, свойства пластифицирующих

полимеров определяются в первую очередь химическим составом и молекулярной массой пластификатора. Содержание пластификатора в полимерной композиции может составлять от 1-2 до 100% и более от массы полимера, в резиновой смеси - до 100% от массы каучука.

Использование в производственном процессе изготовления полимеров различных добавок сопровождается выделением аэрозолей [117].

Например, при производстве поливинилхлоридных изделий в качестве пластификаторов используются диоктилфталат, дибутилфталат, диоктилсебаценат и сланцевое масло. Их количество, процентное соотношение зависит от требований, предъявляемых к производимому материалу. Технологический процесс изготовления полимера происходит при повышенной температуре (120-190 °С) и сопровождается выделением тумана, состоящего из мелкодисперсных аэрозолей пластификаторов и газообразных примесей.

Загрязнение воздуха производственных помещений и атмосферы аэрозолями пластификаторов, которые испаряясь, превращаются в высокодисперсный аэрозоль, и, даже в молекулярную фракцию, может привести к серьезным заболеваниям.

Для локализации выбросов загрязняющих веществ и недопущения их попадания в общее цеховое пространство применяется наиболее близкое размещение местных отсосов к очагам выделения вредностей, по возможности полное укрытие загрязняющего воздух цеха технологического оборудования. Следует отметить, что поскольку вентиляционные выбросы, имеют, как правило, более низкие концентрации, чем технологические выбросы, вопросу их очистки уделяется недостаточно внимания. Кроме того, частицы пластификаторов, попавшие в вентиляционную систему, не улавливаются и не возвращаются в производство, в то время как их количество может быть значительным, особенно при высокой производительности вентиляционных систем.

Поэтому, для повышения эффективности работы вентиляционной системы целесообразно в ее составе предусматривать установку разработанных пылеуловителей [104,133].

Для размещения аппаратов очистки можно предложить следующие две схемы (см. рисунки 4.4 и 4.5). Использование 1 варианта размещения пылеуловителя позволяет очищать вентиляционные выбросы до концентраций, создающих загрязнение атмосферы на уровне значительно меньшем, чем установлено санитарными нормами. Использование 2 варианта размещения помимо экологической эффективности дает значительную экономию энергии, т.е. повышает энергоэффективность предприятия в целом.

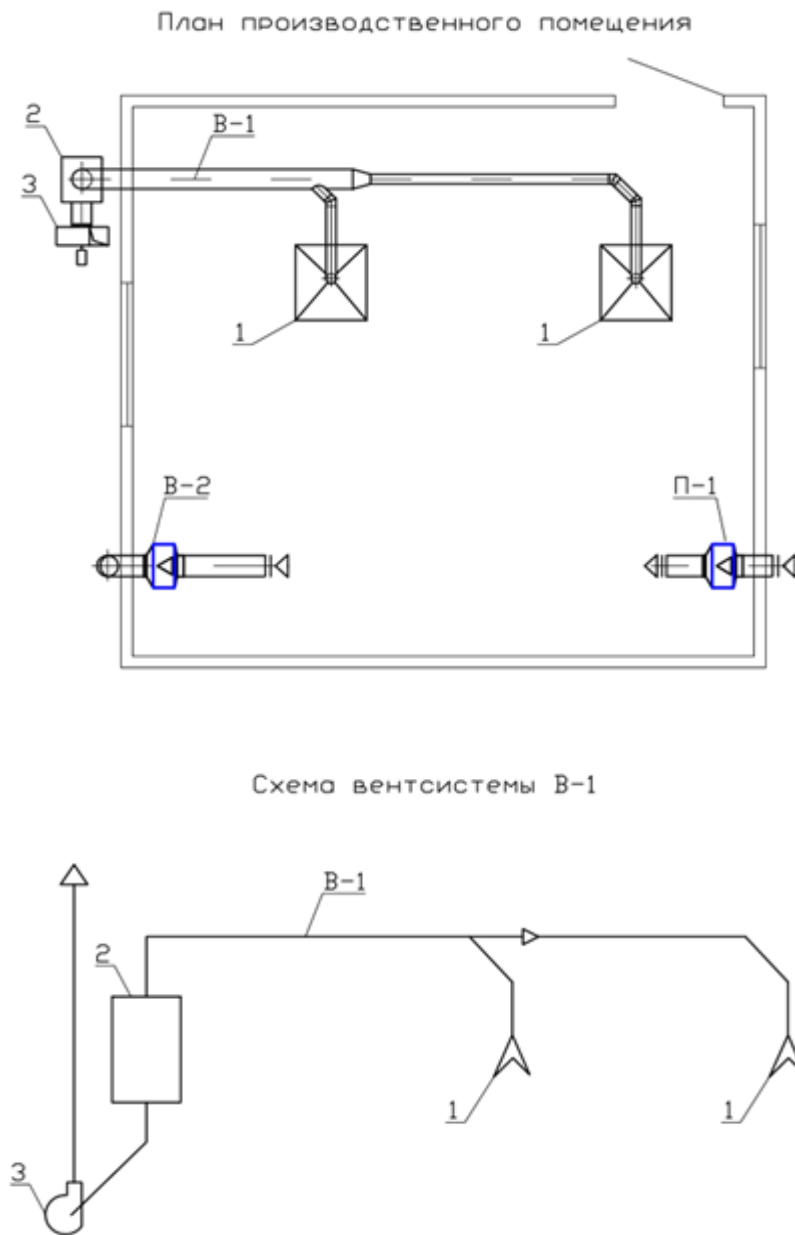


Рисунок 4.4 – 1 вариант размещения аэрозолеуловителя в системе вентиляции:
1-местный отсос, 2- очистное устройство, 3- вентилятор.

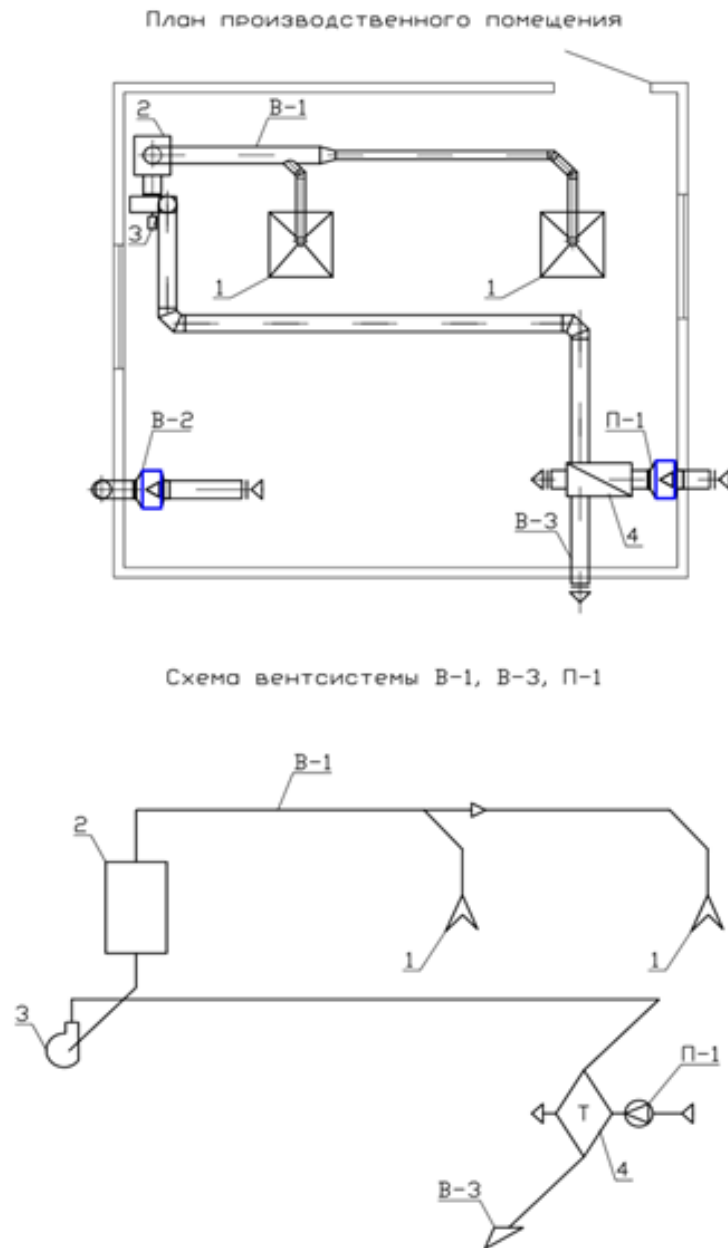


Рисунок 4.5 – 2 вариант размещения аэрозолеуловителя в системе вентиляции: 1-местный отсос, 2-очистное устройство, 3-вентагрегат, 4- теплоутилизатор (рекуператор).

Для подбора аппарата очистки необходимо подготовить следующую исходную информацию:

Объем удаляемого воздуха от местного отсоса задается технологическим процессом производства L_p , м³/ч.

Концентрация аэрозоля удаляемого от технологического оборудования принимается по опытным данным или по данным производителя технологического оборудования, c_p , мг/м³;

Эффективность очистки аппарата, η находится в диапазоне [0,92-0,98].

Для предварительного подбора пластинчатого аэрозолеуловителя можно пользоваться данными, приведенными в таблице 4.1. В таблице приведены данные для вентиляционной системы производительностью, $L = 10000$ м³/ч и начальной концентрации $c_H = 100$ мг/м³.

Таблица 4.1 – Подбор пластинчатого аэрозолеуловителя

Эффективность аппарата, η	Потери давления, Δp , Па	Скорость потока, u_m , м/с	Площадь живого сечения, $F_{ж.с.}$ *, м ²	Габариты аппарата, $A \times B^*$, м	Количество уловленного вещества, M^{**} , т/час
1	2	3	4	5	6
0,9	900	13	0,2137	0,500×0,514	900
0,92	1100	15	0,1852	0,500×0,445	920
0,94	1300	16	0,1736	0,500×0,418	940
0,96	1600	18	0,1543	0,500×0,371	960
0,98	2000	20	0,1389	0,500×0,334	980

* - Для определения параметров аппарата при расчетной производительности вентиляции, L_p , м³/час, в столбцах 4 и 5 значения $F_{ж.с.}$ и B необходимо умножить на коэффициент $a = L_p/10000$.

** - При известной начальной концентрации c_p , мг/м³, в столбце 6 значение M необходимо умножить на коэффициент $b = c_p/100$.

Общий алгоритм подбора и расчета очистного аппарата заключается в следующем:

1. Определяем объем удаляемого воздуха от оборудования через местный отсос, L_p , м³/ч.
2. Определяем концентрацию аэрозоля удаляемого от технологического оборудования по опытным данным (при отсутствии данных от производителя технологического оборудования) c_p , мг/м³.
3. Задаемся требуемой степенью очистки воздуха, η .
4. По рисункам 3.13 и 3.14 или по таблице 4.1 определяем скорость потока аэрозоля в очистном аппарате u_m , м/с, и потери давления Δp , Па.

5. По формуле $F_{\text{ж.с.}} = \frac{L}{3600 \cdot u_m}$, м² определяем необходимую площадь живого сечения.

6. Ширина аппарата A постоянная величина и принимается равной 0,5 м. Величину B определяем по формуле $B = 2,4 \times F_{\text{ж.с.}} + 0,001$, м.

При использовании коаксиального сепаратора определяется диаметр адгезионно-осадительной камеры по формуле: $D = 1,142 \times \sqrt{\frac{4F_{\text{ж.с.}}}{\pi}}$, м

7. Количество уловленного материала, M , г/ч определяем по формуле: $M = c_p \times L_p \times \eta \times 10^{-3}$.

Пример:

Объем удаляемого воздуха от оборудования через местный отсос, $L_p=7000$ м³/ч, концентрация аэрозоля, удаляемого от технологического оборудования $c_p=150$ мг/м³.

Задаемся КПД пластинчатого сепаратора аэрозоля 0,96.

Определяем по таблице скорость потока аэрозоля в пластинчатом сепараторе $u_m=18$ м/с и потери давления $\Delta p=1600$ Па.

Находим площадь живого сечения пластинчатого сепаратора аэрозоля

$$F_{\text{ж.с.}} = 0,1543 \times \frac{7000}{10000} = 0,108, \text{ м}^2$$

Определяем размеры пластинчатого сепаратора аэрозоля: $B = 0,371 \times \frac{7000}{10000} = 0,2597$, м

Таким образом размеры сепаратора $A \times B = 0,500 \text{ м} \times 0,260 \text{ м}$.

Количество уловленного материала определяем с использованием таблицы 4.1 или по приведенной формуле: $M = 960 \times \frac{150}{100} = 1440$, г/ час.

Приведенная методика позволяет определить конструктивные параметры аппарата очистки воздуха от капельного аэрозоля, оценить объем уловленного материала и подобрать наиболее приемлемый в каждом конкретном случае аппарат, ориентируясь на требуемую производительность вентиляционной системы, необходимые степень очистки и площадь для установки аппарата.

Использование той или иной схемы подсоединения аппарата определяется, в первую очередь, необходимостью повышения энергосбережения. Целесообразность использования в схеме рекуператора обосновывается технико-экономическим сравнением вариантов.

4.4 Оценка экономичности применения аппарата очистки в системе вентиляции

Для оценки экономичности применения аппарата очистки от капельного аэрозоля целесообразно провести сравнительный расчет экономических показателей вентиляционной системы с установленным аппаратом и без него.

Оценка экономичности применения разработанного сепаратора выполнена для установки на предприятии ОАО комбинат «Полимерстройматериалы» в г. Отрадный Самарской области.

Сравнение экономичности вариантов систем вентиляции производится по разности приведенных затрат. Экономический эффект рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = (C_1 - C_2) + 0,12(K_1 - K_2) \text{ руб./год}, \quad (4.1)$$

где C_1 и C_2 - сумма эксплуатационных затрат по базовому (система без аппарата) и новому (с аппаратом) вариантам;

K_1 и K_2 - сумма капитальных затрат для тех же вариантов;

0,12 - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

К капитальным затратам C_2 относится стоимость аэрозолеуловителя. К эксплуатационным затратам K_2 относится стоимость расходуемой электроэнергии и затраты на техобслуживание аппарата.

Поскольку уловленный материал возможно вернуть в производственный процесс экономия его стоимости необходимо отнести к эксплуатационным затратам K_1 по базовому варианту, здесь же целесообразно учесть экономию платы за выбросы загрязняющих веществ.

Для проведения расчета использовались следующие данные:

Производительность установки с пластинчатыми осадительными элементами 10000 м³/час.

Начальная концентрация диоктилфталата: 200 мг/м³.

Эффективность очистки 94%.

Аэродинамическое сопротивление аппарата: 1300 Па.

Капитальные затраты K_1 на изготовление и монтаж пылеуловителя с соотношением осадительных элементов $L/D=250$: 154282 руб.

Эксплуатационные затраты C_1

Затраты на электроэнергию составят: 70681 руб/год

Затраты на техобслуживание принимаются в размере 2 % стоимости пылеуловителей: 3086 руб/год.

Таким образом, годовые эксплуатационные затраты составляют:

$70681 + 3086 = 73767$ руб./год.

Эксплуатационные затраты C_0

Стоимость сырья составляет: 312832 руб/год

Плата за выбросы диоктилфталата: 2351 руб/год

Расчет затрат приведен в Приложении А.

Подставляя полученные величины затрат в формулу (4.1), получим, что годовой экономический эффект от применения одного аэрозолеуловителя производительностью 10000 м³/ч составляет:

$\mathcal{E} = (312832+2351) - (73767 + 0,12 \times 154282) = 222902$ руб./год.

Для оценки экономичности применения пластинчатого сепаратора аэрозоля выполнен также сравнительный экономический анализ при использовании аппаратов других типов: электростатического фильтра типа ФЭС и фильтра механической очистки типа ФМС (см. табл. 4.1).

Выполненный экономический анализ показал эффективность использования разработанного пластинчатого сепаратора по сравнению с электрофильтром и механическим фильтром. Приведенные затраты при установке пластинчатого

сепаратора меньше, чем при установке других аппаратов (электрофилтра в 2,87 раз, механического фильтра в 3,15 раз).

Таблица 4.2 – Сравнительные экономические показатели очистки воздуха по различным вариантам

Показатели	Базовый вариант: без очистки	Вариант 1: пластинчатый сепаратор	Вариант 2: электрофилтр типа ФЭС	Вариант 3: механический фильтр типа ФМС
Капитальные затраты, К: стоимость аппарата, руб.	-	154282	852500	662800
Эксплуатационные затраты, С: стоимость эл.энергии, руб/год	-	70681	77518	77518
техобслуживание, руб/год	-	3086	85250	133256
плата за выбросы, руб/год	2351	-	-	-
стоимость сырья, руб/год	312832	-	-	-
Приведенные затраты, руб./год: $\Pi = C + 0,12 \times K$	315183	92280	265068	290310
Экономический эффект от применения аппарата, руб/год	-	222902	50115	24873
Сравнение экономичности аппаратов по 1 и 2 вариантам, руб/год		172288		
Сравнение экономичности аппаратов по 1 и 3 вариантам, руб/год		198030		

Выводы по главе 4

1. Сконструированы три типа аппаратов очистки с размерами адгезионно-осадительных элементов $L/D=250$, обеспечивающими наиболее оптимальный режим работы.

2. Сконструированный коаксиальный сепаратор за счет компоновки трубок в пакет с зазором между цилиндрами $\delta=6$ мм, позволяет улучшить конструкцию устройства, уменьшив количество трубок и создает предпосылки для повышения очистки.

3. Сконструированные пластинчатые сепараторы в которых в качестве адгезионно-осадительных элементов используются пакеты пластин с расстоянием между пластинами $h=4 \div 6$ мм позволяют уменьшить размер аппарата за счет сокращения длины начального участка для скорейшего достижения

устойчивого турбулентного движения.

4. Дополнительно для уменьшения продольного размера пластинчатого сепаратора предлагается использовать изогнутые пластинчатые элементы с углом раскрытия $\beta=60^\circ$, с $R_{из}/D_0 \leq 1,5$ что реализовано в пластинчатом сепараторе с изогнутыми элементами. При одинаковом полном аэродинамическом сопротивлении аппарата Δp канал с изгибами имеет более высокую эффективность осаждения частиц аэрозоля.

5. Конструктивные размеры адгезионно-осадительных бункеров сбора коагулята приняты из условия обеспечения отсутствия каплеуноса.

6. Предложена методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей, с использованием которой возможно определить конструктивные параметры аппарата очистки воздуха от капельного аэрозоля, оценить объем уловленного материала и подобрать наиболее приемлемый в каждом конкретном случае аппарат, ориентируясь на требуемую производительность вентиляционной системы, необходимую степень очистки и площадь для установки аппарата.

7. Разработаны схемы подсоединения аппарата очистки в вентиляционную систему цеха. В 1 варианте размещения пылеуловителя очищенный вентиляционный воздух выбрасывается непосредственно в атмосферу, во 2-м варианте очищенный воздух, используется в системе рекуперации, после которой удаляется на улицу, повышает энергоэффективность предприятия в целом.

8. Правильно подобранные аппараты очистки воздуха и схемы их подключения позволяют повысить эффективность работы вентиляционных систем, улучшить качество воздуха в помещении, снизить уровень загрязнения атмосферы на промышленной площадке, повысить энергосбережение предприятия.

9. Годовой экономический эффект от использования аппарата очистки при производительности системы вентиляции 10000 м³/час составляет 223 тыс. рублей, экономия уловленного материала - 3,910 т/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературных источников обоснована актуальность создания высокоэффективных механических аппаратов очистки от капельных аэрозолей с $0,1 \text{ мкм} \leq d_{\text{ч}} \leq 1 \text{ мкм}$, имеющих невысокое аэродинамическое сопротивление, небольшую стоимость, удобных и недорогих в монтаже и эксплуатации, способствующих возвращению уловленного сырья в производство. Показано, что особенности турбулентного движения газодисперсного потока в тонких трубках и щелевых каналах позволяют интенсифицировать процесс очистки вентиляционных выбросов от высокодисперсных капельных аэрозолей.

2. Теоретически обосновано и экспериментально установлено, что осаждение аэрозольных частиц в трубках и щелевых каналах, обусловлено геометрическими размерами адгезионно-осадительного элемента и аэродинамическими характеристиками турбулентного потока, определяющими конструкцию аппарата.

3. На основании экспериментальных исследований выявлен характер зависимости эффективности очистки аппарата (η) от параметров осадительного элемента (длины и эффективного диаметра, L/D), потерь давления (Δp) и скорости потока (u_m) в диапазоне чисел Рейнольдса $2300 < Re < 34000$.

4. На основе решения задачи многокритериальной оптимизации с использованием функции Харрингтона получено оптимальное сочетание эффективности очистки (η), геометрических размеров адгезионно-осадительного элемента (L/D) и потерь давления в (Δp). Максимальные значения обобщенного критерия оптимальности наблюдаются при значении $L/D = 250$ и величине Δp в диапазоне [1200 Па; 1600 Па].

5. На основании экспериментальных исследований для аппаратов очистки с значением отношения длины трубы или канала к их эквивалентному диаметру $L/D = 250$, обеспечивающим максимальную эффективность сепарации частиц при минимальных энергозатратах, предложены математические

зависимости эффективности очистки от потерь давления и скорости потока в диапазоне $2300 < Re < 34000$.

6. Проведенные теоретические и опытные исследования позволили разработать три типа аппаратов очистки с адгезионно-осадительными элементами в виде тонких трубок и щелевых каналов с размерами $L/D=250$, обеспечивающими наиболее оптимальный режим работы при улавливании аэрозоля с размерами частиц в диапазоне $0,1 \text{ мкм} \leq d_{\text{ч}} \leq 1 \text{ мкм}$.

7. Предложена методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от высокодисперсных капельных аэрозолей, с использованием которой возможно определить конструктивные параметры аппарата очистки воздуха, оценить объем уловленного материала и подобрать наиболее приемлемый в каждом конкретном случае аппарат, ориентируясь на требуемую производительность вентиляционной системы, необходимую степень очистки и площадь для установки аппарата. Разработаны схемы подсоединения аппарата очистки в вентиляционную систему цеха.

8. Годовой экономический эффект от использования аппарата очистки на ОАО комбинат «Полимерстройматериалы» в г. Отрадный Самарской области при производительности системы вентиляции $10000 \text{ м}^3/\text{час}$ составляет 223 тыс. рублей в ценах 2016 г., экономия уловленного материала (диоктилфталата) 3,91 т/год. Выполненный экономический анализ показал эффективность использования разработанного пластинчатого сепаратора по сравнению с электрофильтром и механическим фильтром. Приведенные затраты при установке пластинчатого сепаратора меньше, чем при установке аппаратов других типов (электрофильтра в 2,87 раз, механического фильтра в 3,15 раз).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика . М: Наука, 1976. 888 с.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматиздат, 1960. 715 с.
3. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
4. Алипченков В.М., Зайчик Л.И. Моделирование турбулентного движения частиц в вертикальном канале // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. № 4. С. 50–65.
5. Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 414 с.
6. Амелин А.Ф. Теоретические основы образования тумана в химических производствах. М.:Госхимиздат,1951. 170 с.
7. Андоньев С. М., Филипьев О. В. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. М. : Металлургия. 1979. 192 с.
8. Аппараты для улавливания мелкодисперсной пыли АПР-АПРК Электронный ресурс. URL: <http://www.ekovent.ru/produkcziya/apparaty-dlya-ulavlivaniya-melkodispersnoy-pyli-aprk-apr/>
9. Атмосферный воздух и воздух закрытых помещений. Санитарная охрана воздуха. Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест: САНПИН 2.1.6.1032-01. М, 2001. 8 с.
10. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М. : Высш. шк., 1985. 327 с.
11. Базовые нормативы платы за выбросы (сбросы) загрязняющих веществ в окружающую природную среду и размещение отходов: Мин. Охраны окр. среды и природных ресурсов. М., 1999. 49 с.
12. Баренблат Г. И. Движение взвешенных частиц в турбулентном потоке. М. : Металлургия, 1979. 89 с.

13. Басманов П.И., Кириченко В.Н., Филатов Ю.Н., Юров Ю.Л. Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова. М.: 2002. 193 с.
14. Батурин В. В. Основы промышленной вентиляции. М. : Профиздат, 1990. 448 с.
15. Белоусов В. В. Теоретические вопросы процессов газоочистки. М. : Metallurgia, 1988. 256 с.
16. Богуславский Е. И., Харченко В. А., Тяглов С. Г. Обработка гранулометрического состава дисперсных материалов // Науч. тр. /Ростовск. гос. академия стр-ва. Ростов-на-Дону, 1995. С. 113-118.
17. Бобылев С.Н., Сидоренко В.Н., Сафонов Ю.В., Авалиани С.Л., Струкова Е.Б., Голуб А.А. Макроэкономическая оценка издержек для здоровья населения России от загрязнения окружающей среды. М.: Институт Всемирного Банка, Фонд защиты природы, 2002. 32 с.
18. Богуславский Е. И., Азаров В. Н. Оценка процесса выделения и накопления пыли в, производственных помещениях // Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону: РИЦ Ростов, гос. строит, универ., 1997. С. 49-50.
19. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии. Киев : Вища шк., 1976. 184 с.
20. Бронштейн Л. П., Александров И. И. Современные средства измерения загрязнения атмосферы. Л. : Гипрометеиздат, 1989. 328 с.
21. Бувевич Ю.А. О диффузии взвешенных частиц в поле изотропной турбулентности – Изв. АН СССР. МЖГ, 1968, №5. С. 89-99.
22. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975. 384с.
23. Бутаков С. Е. Основы вентиляции горячих цехов. Свердловск : Metallurgizdat, 1962. 288 с.
24. Вальдберг А.Ю. Каталог газоочистительного оборудования. Текст. /Центр обеспечения экологического контроля при гос. комитете РФ по охране окр. ср. при содействии НИИОГАЗ. //- СПб., 1997. 100 с.

25. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с.
26. Ватузов Д.Н., Пуринг С.М., Тюрин Н.П. Особенности проектирования аппаратов для очистки воздуха от капельных аэрозолей // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре Электронный ресурс: материалы 71-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2013 года. под редакцией М.И. Бальзанникова, Н.Г. Чумаченко. Самара, 2014. С. 785-786.
27. Ватузов Д.Н., Пуринг С.М., Хурин И.А. Совершенствование устройств очистки вентиляционных выбросов загрязняющих веществ при производстве изделий из пластмасс // Экология и промышленность России. 2013. № 8. С. 22-26.
28. Ватузов Д.Н., Пуринг С.М. Методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. № 2 (23). С. 14-18.
29. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Методика расчета устройств очистки вентиляционных выбросов от капельного аэрозоля // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Материалы 69-ой Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР университета за 2011г. РИО СГАСУ. 2012. Ч.2 С. 288-289.
30. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Совершенствование устройств очистки вентиляционных выбросов от капельного аэрозоля // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Материалы 68-ой Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР университета за 2010г. РИО СГАСУ. 2011. С. 806-807.
31. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Особенности осаждения частиц аэрозоля в аппаратах для улавливания капельного аэрозоля // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Материалы 67-ой Всероссийской научно-

- технической конференции по итогам НИР университета за 2009г. РИО СГАСУ. 2010. С. 653.
32. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Особенности конструирования аппаратов для улавливания капельного аэрозоля // Архитектурные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика. Материалы 66-ой Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР университета за 2008 г. РИО СГАСУ. 2009. Ч.2 С. 192.
33. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Тарасова Е.В. Расчет коаксиального сепаратора капельного аэрозоля // Архитектурные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика. Материалы 65-ой Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР университета за 2007 г. РИО СГАСУ. 2008. С. 425-426.
34. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Конструктивные особенности коаксиального сепаратора капельного аэрозоля // Архитектурные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика. Материалы 64-ой Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР университета за 2006 г. РИО СГАСУ. 2007. С. 446-447.
35. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Особенности проектирования устройств для осаждения частиц капельного аэрозоля // Тезисы докладов на региональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика». Самара. 2006 г. С. 177-178.
36. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Особенности очистки газовых сред от конденсационных частиц в инерционных аппаратах // Тезисы докладов на региональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика». Самара 2004г. С. 131-132.
37. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Конструктивные особенности аппаратов по очистке газовых сред от мелкодисперсных частиц маслянистых жидкостей // Тезисы докладов на региональной научно-технической конференции

- «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика». Самара 2003 г. С. 112-113.
38. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Хурин И.А. Колмогоров С.В. Испытание вытяжной системы В-1 от установки по обработке полимерных лент высоковольтным ускорителем «Аврора» // Тезисы докладов на региональной научно-технической конференции «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика». Самара 2003 г. С. 122-124.
39. Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П. Хурин И.А. Экологический менеджмент на предприятии ОАО «Трубоизоляция» // Тезисы докладов областной научно-технической конференции «Исследования в области архитектуры и строительства. Самара 2001г. С. 129-130.
40. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных предприятий / М. И. Гримитлин и др.. М., 1993. 288 с.
41. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Текст.: учеб.пособие для вузов/А.Г. Ветошкин.-М.: высш. школа, 2008 г. 639 с.
42. Виленский П.П., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. М.: Дело, 2001. 832 с.
43. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 3. Кн. 2. Вентиляция и кондиционирование воздуха/ Под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. М. : Стройиздат, 1992 г. 416 с.
44. Внутренние санитарно-технические устройства: В 3-х ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха: справочник проектировщика / В.Н. Богословский и др.; под ред. И.Г. Староверова, Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1992. 378 с.
45. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М. : Финансы и статистика, 1981. 262 с.
46. Волков О. Д. Проектирование вентиляции промышленного здания. Харьков : Выща шк., 1989. 240 с.

47. Воскобойников В. Г., Кудрин В. А., Якушев А. М. Общая металлургия. М. : ИКЦ Академкнига, 2005. 768 с.
48. Временная методика по определению предотвращенного экологического ущерба / Гос. ком. РФ по охране окружающей среды. М., 1999. 173 с.
49. Газоочистные системы и фильтры. Электронный ресурс. URL: <http://www.irimex.ru/>
50. ГОСТ 8.586.5-2005 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 87 с.
51. ГОСТ 8.586.5-2005 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2007. 21с.
52. ГОСТ 8.586.5-2005 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений. М.: Стандартинформ, 2007. 87 с.
53. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. М. : Изд-во стандартов, 1989. 7 с.
54. ГОСТ 12.1.005-88. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования. М. : Изд-во стандартов, 1989. 76 с.
55. ГОСТ Р 54597-2011/ISO/TR 27628:2007. Воздух рабочей зоны. Ультрадисперсные аэрозоли, аэрозоли наночастиц и наноструктурированных частиц. Определение характеристик и оценка воздействия при вдыхании. М.: Стандартинформ, 2012. 58 с.
56. ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. М. : Изд-во стандартов, 1996. 18 с.

57. ГОСТ 17.2.4.07-90. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. М.: Изд-во стандартов, 1996. 18 с.
58. ГОСТ Р 50820-95. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. М. : Изд-во стандартов, 1996. 18 с.
59. ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010. Высокоэффективные фильтры очистки воздуха ЕРА, НЕРА и ULPA. Часть 1. Классификация, методы испытаний, маркировка. EN 1822-1:2009. Москва.: Стандартиформ, 2011. 15 с.
60. ГОСТ Р ЕН 1822-2-2012. Высокоэффективные фильтры очистки воздуха ЕРА, НЕРА и ULPA. Часть 2. Генерирование аэрозолей, испытательное оборудование, статистика счета частиц. EN 1822-2:2009. Москва.: Стандартиформ, 2014. 20 с.
61. ГОСТ 8728-88 Пластификаторы. Технические условия. М.: ИПК Издательство Стандартов, 2003. 11 с.
62. Градус Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. М. : Химия, 1979. 232 с.
63. Грановский Ю.В. Основы планирования экстремального эксперимента для оптимизации многофакторных технологических процессов Текст. : учеб. пособие /Ю.В. Грановский. М., 1971. 50 с.
64. Гримитлин М. .И., Павлухин Л. В. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха производственных объектов. М. : ВЦШГИОТ, 1987. 113 с.
65. Гусев И.Н., Зайчик Л.И. Моделирование динамики частиц в пристеночной области газодисперсного турбулентного потока // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1991. № 1. С. 50–60.
66. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. М.: «Изд-во Машиностроение-1», 2004. 397 с.

67. Дробышевский Н.И., Зайчик Л.И., Мукин Р.В., Стрижов В.Ф., Филиппов А.С. Развитие и применение диффузионно-инерционной модели для расчета газодисперсных турбулентных течений // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 14. С.553-572.
68. Евсина Е.М. Математическое моделирование аэродинамических систем при создании средств очистки атмосферного воздуха: автореф. дис. канд техн. наук, Астрахань, 2008. 20 с.
69. Егiazаров А. Г. Устройство и изготовление вентиляционных систем. М.: Высш. шк., 1987. 304 с.
70. Ефремов Г. И., Лукачевский Б. П. Пылеочистка. Харьков : Химия, 1990. 72 с.
71. Журавлев Б. А. Справочник мастера вентиляционника. М.: Строй-издат, 1983. 368 с.
72. Забарин В.И. Математическое моделирование некоторых задач пограничного слоя в газовзвесьях: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук, Томск, 2005. 23 с.
73. Зажигaeв Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М. : Атом-издат, 1978. 232 с.
74. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л. : Ленигр. отделение, Наука, 1974. 112 с.
75. Зайчик Л.И., Алипченков В.М. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. М.: Физматлит.2007. 312 с.
76. Заостровский Ф.П., Шабалин К.Н. Скорость улавливания пыли в скрубберах. Хим. Пром-сть, 1951, №5. С.148-149.
77. Заостровский Ф.П. Скорость улавливания крупнодисперсной пыли в скрубберах. Хим. Пром-сть, 1953 № 8. С. 299-300.
78. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Издательство МЭИ. 2005. С. 458.
79. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. 194 с.

80. Кадер Б.А. К строению вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости. – Изв. АН СССР. МНСТ, 1966, №6. С.157-163.
81. Калинушкин М. П. Измерение осадочной запыленности. // Очистка вентиляционных выбросов и защита воздушного бассейна : всесоюз. науч. конф. г. Ростов-на-Дону, 1977. С. 183-185.
82. Каменев П.Н., Тертичник Е.И. Вентиляция. Учебное пособие. М., Изд-во АСВ, 2006. 616 с., 280 илл.
83. Киселев А. Д., Тулуевский Ю. Н., Зинуров И. Ю. Повышение эффективности газоудаления дуговых сталеплавильных печей. М. : Металлургия, 1992. 112 с.
84. Коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля: пат. 2327508 Рос. Федерация. № 2007100310/15; заявл. 09.01.07; опубл. 27.06.08, Бюл. №18.
85. Колобов А.М., Неверов Г.С. Избранные главы высшей математики. Т.3. Минск: Высшая школа, 1971. 312 с.
86. Климанов А.Д. Определение скорости движения воздуха, необходимой для выноса осевших в трубопроводе пылевых частиц. – Научн. тр. по вопросам горн. дела. Моск. горн. ин-та, 1955, №16. С. 101-113.
87. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). Определения, теоремы, формулы. Изд. 5. М. : Наука, 1984. 832 с.
88. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л. : Химия, 1987. 264 с.
89. Коузов П. А., Скрябина Л. Я. Методы определения физикохимических свойств промышленных пылей. Л. : Химия, 1983. 143 с.
90. Кузьмин М. С., Овчинников П. А. Вытяжные и воздухораспределительные устройства. М. : Стройиздат, 1987. 168 с.
91. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Фарахова А.И. Явления турбулентного переноса тонкодисперсных частиц в жидкой фазе динамических сепараторов. – Научный журнал КубГАУ, 2011, № 68(04). С. 475-505.
92. Левич В.Г., Кучанов С.И. Движение частиц, взвешенных в турбулентном потоке. – Докл. АН СССР, 1967, т.174, №4. С.763-766.

93. Логачев И. Н., Логачев К. И. Аэродинамические основы аспирации. Санкт-Петербург : Химиздат, 2005. 659 с.
94. Медников Е.П. Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 264 с.
95. Медников Е.П. К теории явления турбулентной миграции аэрозольных частиц. – Коллоидн. журнал, 1979, т.41, №2, С.250-257.
96. Медников Е.П. Миграционная теория осаждения аэрозольных частиц из турбулентного потока на стенках труб и каналов. – Докл. АН СССР, 1972, т.206, №1. С. 51-54.
97. Медников Е.П. Миграционная теория турбулентно-инерционного осаждения аэрозолей в трубах и каналах: сравнение с экспериментом – Коллоид. Журн., 1975, т.37, №2. С. 292-299.
98. Медников Е.П. Турбулентная миграция и оседание аэрозолей Текст.: Е. П. Медников. Коллоидный журн.1980.-Т 42 №6. С.700-705.
99. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей .М.: Наука,.1980. 176 с.
100. Метод комплексного определения концентрации и дисперсного состава пыли в вентиляционных выбросах : метод. Указания / разработ. В. Т. Самсонов ; Моск. Науч.-исслед. Ин-т охраны труда. М., 1992. 17 с.
101. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД 86 / Госкомгидромет. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 93 с.
102. Милютин В.Н., Подвысоцкий А.М., Шрайбер А.А. Экспериментальное исследование распределения дисперсного материала в сечении вертикального потока газозвеси. – Физ. аэродинамических систем, 1977, №16. С. 84-87.
103. Минко В. А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов. Воронеж, 1981. 175 с.
104. Молчанов Б. С. Проектирование промышленной вентиляции : пособие для проектировщиков. Л. : Стройиздат, 1970. 240 с.

105. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. Учебное пособие, изд. 3, доп. М., изд-во «Высшая школа», 1971. 460 с.
106. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков. ГОСТ Р 50820-95. М.: Изд-во стандартов, 1985. 18 с.
107. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Ч. 1. Теоретические основы создания микроклимата здания / В. И. Полушкин и др.. СПб : Профессия, 2002. 176 с.
108. Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест: Гигиенические нормативы. – М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава России, 1998. – 132 с.
109. Охрана окружающей среды и инженерное обеспечение микроклимата на предприятиях стройиндустрии / А. И. Еремкин и др.. Пенза : Пенз. гос. ун-т архитектуры и стр-ва, 2003. С. 105-109.
110. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда.- 2012. - № 1. С.25-28.
111. Пластинчатый сепаратор аэрозоля: пат. 2246340 Рос. Федерация. № 2002135269/15; заявл. 25.12.02; опубл. 20.02.05, Бюл. №5.
112. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1974. 479 с.
113. Попов Ю. А., Дубинская Ф. Е., Скрыбина Л. Я. Системы очистки промышленных газов от пыли, применяемые в различных производствах. М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1984. 33 с.
114. Посохин В. Н. Местная вентиляция. Казань : КГ АСУ, 2005. 73 с.
115. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест: Гигиенические нормативы. – М.:

- Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава России, 1998.– 69 с.
116. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978. С. 703.
117. Производство пластмасс [Электронный ресурс] // URL: <http://www.medical-enc.ru/15/plastmassa-proizvodstvo.shtml> (дата обращения: 17.07.2016).
118. Проектирование чистых помещений [Электронный ресурс] // URL: <http://kronaservice.net/uayt-v-proektirovanie-chistykh-pomeshcheniy-razdel-2page=1> (дата обращения: 7.01.2014).
119. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. К вопросу о конструировании аппаратов для очистки воздуха // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 94-97.
120. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Очистка воздуха от мелкодисперсных капельных аэрозолей // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. Энергосбережение. 2014. № 1. С. 109-111.
121. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Очистка воздуха от капельных аэрозолей // Сборник докладов V Международной научно-технической конференции МГСУ 20-22 ноября 2013 г. С. 212-217.
122. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Способы повышения эффективности вихревых пылеуловителей // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2013. № 1-2. С. 10-12.
123. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Экспериментальные исследования по определению конструктивных особенностей аппаратов по очистке воздуха от субмикронных частиц // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 90-93.
124. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Экспериментальные исследования – основа проектирования установок по очистке воздуха от тонкодисперсных частиц // Международный научно-исследовательский журнал = Research Journal of International Studies. 2014. № 1 (20). Ч. 1. С. 40-43.
125. Рекомендации по проектированию очистки воздуха от пыли в системах вытяжной вентиляции / ЦНИИпромзданий. М. : Стройиздат, 1985. 36 с.

126. Рекомендации по расчету отсосов от оборудования, выделяющего тепло и газы АЗ-877. М. : ГПЧ «Сантехпроект», 1983. 32с.
127. Рецептуры производства линолеума [Электронный ресурс] // URL: <http://sppom.ru/articles/detail.php?ID=12348>.
128. Рогалёв Н.Д. Экономика энергетики. Учебное пособие для вузов / Н. Д. Рогалев, А. Д. Зубкова, И. А. Мастерова и др.; под редакцией Н. Д. Рогалева - М.: Издательство МЭИ, 2005. 288 с.
129. Родин А. К. Вентиляция производственных зданий. Саратов : Сарат. Гос. Техн. Ун-т, 1997. 121 с.
130. Сакс С.Е. Гидравлическое сопротивление при турбулентном движении тонкодисперсных аэрозолей. – Инж.–физ. журн., 1968, т.14, №4. С.633-638.
131. Сакс С.Е. О распределении концентрации твердых частиц в потоке. – В кн.: Движение гидро- и аэросмесей горных пород в трубах. М.: Наука, 1966. С. 34-38.
132. СанПиН 2.2.4.1294-03-2003. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Введ. 18.04.03. 4 с.
133. Селиверстов А.Н. Вентиляция заводов химической промышленности. Госстройиздат, 1934, 52 с.
134. Сепаратор туманов с изогнутыми пластинчатыми осадительными элементами: пат. 2259861 Рос. Федерация. № 2002135268/15; заявл. 25.12.02; опубл. 10.09.05, Бюл. №25.
135. Сиковский Д.Ф. Закономерности осаждения частиц из турбулентного газодисперсного потока в каналах // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 1. С. 84–95.
136. Сиковский Д.Ф. Осаждение инерционных частиц из турбулентного потока в каналах при больших числах Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика, 2011, том 18, № 2. С.245-264.
137. Сборник законодательных, нормативных и методических документов для экспертизы воздухоохраных мероприятий : сост. Р. Н. Кузнецов и др.. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 56 с.

138. Скрябина Л. Я. Атлас промышленных пылей. Ч. 2. Пыли предприятий металлургии, машиностроения и строительной промышленности. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981. 37 с.
139. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под. ред. А. А. Русанова. М. : Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
140. Старк С. Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве. М. : Металлургия, 1990. 400 с.
141. Струц, Ю. В. Очистка газов от вредных промышленных выбросов // Современ. способы очистки пром. выбросов в атмосф.: Матер, научно-техн. семинара // О-во «Знание» РСФСР. Ленингр. дом научн.-техн. пропаганды. -Л., 1991. С. 148-152.
142. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус. -М. Химия, 1981. 661 с.
143. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. 2-е изд. Казань: Изд-во «Отечество», 2009. 224 с.
144. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Степнь Р.А., Житкова Н.Ю. Очистка промышленных газов от газообразных и дисперсных примесей // Химия растительного сырья. 1998 № 3. С 21-34.
145. Сугак Е.В. Моделирование и интенсификация процессов очистки промышленных газовых выбросов в турбулентных газодисперсных потоках: Дис.... докт. техн. наук. Красноярск, 1999. 320 с.
146. СП 60.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Введ. 2013-01 -01. М.: Минрегион России, 2012. 86 с.
147. СП 56.13330.2011 Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001. Производственные здания. Введ. 2011-05-20. М. : ФГУ «ФЦС», 2010. 22 с.
148. Талиев В. Н. Аэродинамика вентиляции. М. : Стройиздат, 1979. 295 с.
149. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справ, изд. Алиев Г. М.-А. М. : Металлургия, 1986. 544 с.

150. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. - М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
151. Тищенко Н.Т. Охрана атмосферного воздуха. Расчёт содержания вредных веществ и их распределение в воздухе. М.: Химия, 1991. 362 с.
152. Тюрин Н.П. Очистка вентиляционного воздуха от аэрозолей пластификаторов: Дис ... канд. Техн. наук. Ленинград, 1982. 159 с.
153. Уайт П., Смит С. Высокоэффективная очистка воздуха, М.: Атомиздат, 1967. 312 с. /Пер. с англ. Мягкова Б. И., Лапенко В. Г.
154. Ужов В.Н., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов фильтрами. - М.: Химия, 1970. 318 с.
155. Ужов, В. Н. Борьба с пылью в промышленности. М.: Госхимиздат, 1962. 184 с.
156. Устройство для очистки газа от частиц жидкого аэрозоля: пат. 2178332 Рос. Федерация. № 2000129478/12; заявл. 24.11.00; опубл. 20.01.02, Бюл. №2.
157. Финни Д. Введение в теорию планирования эксперимента : пер. с англ.; под ред. Ю. В. Линника. М. : Наука, 1970. 288 с.
158. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М. : АН СССР, 1955. 353 с.
159. Фукс Н.А., Сутугин А.Г. Высокодисперсные аэрозоли. М.: ВИНТИ, 1969. 84 с.
160. Халецкий И. М. Вентиляция и отопление заводов черной металлургии. М. : Металлургия, 1981. 240 с.
161. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.
162. Хурин И.А., Тюрин Н.П. Очистка печных газов при плавке алюминиевого лома // Региональная архитектура и строительство. 2011. № 2. С. 149-154.
163. Чекман И.С. Сырвая А.О., Андреева С.В., Макаров В.А. Аэрозоли – дисперсные системы. Монография. Киев-Харьков, 2013. 101 с.
164. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. Пер. с англ./ Под редакцией Н.П. Бусленко. – М.: Мир, 1972. 384 с.
165. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.

166. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. М., Химия, 1980. 286 с.
167. Юдашкин М. Я. Оборудование установок очистки газов и вентиляции. Киев : Вища. шк., 1991. 187 с.
168. Alexander L.G., Cjldren C.L. Droplet transfer from suspending air to duct walls // *Ind. fnd Eng. Chem.*, 1951, 43, № 6. P. 1325-1331.
169. Alfthan C. von. The transverse motion of a particle in a turbulent boundary layer. – *Acta polytechn. Scand. Appl. Phys. Ser.*, 1978, №121. 22p.
170. Brandt O., Freund H., Heidemann E. Zuz Theorie der arustischen Koagulation. – *Kolloid-Z.*, 1936, 77, №1. P. 103-115.
171. Derevich I.V. Statistical modelling of mass transfer in turbulent two-phase dispersed flows. 1. Model development // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. 2000. Vol. 43, No. 19. P. 3709–3723.
172. Derevich I.V. Statistical modelling of mass transfer in turbulent two-phase dispersed flows. 2. Calculation results // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. 2000. Vol. 43, No. 19. P. 3725–3734.
173. Forney L. J., Spielman L.A. Deposition of coarse aerosols from turbulent flow.- *J.aerosol Sci.*, 1974, 5, № 3. P. 257-271.
174. Friedlander S.K., Johnstone H.F. Deposition of suspended particles from turbulent gas streams.- *Ind. And Eng.Chem.* 1957. 49, №7. P. 1154-1156.
175. Fukagata K., Zahrai S., Bark F.H. Force balance in a turbulent particulate channel flow // *Inter. J. Multiphase Flow*. 1998. Vol. 24, No. 6. P. 867–887.
176. Guha A. Transport and deposition of particles in turbulent and laminar flows // *Ann. Rev. Fluid Mechanics*. 2008. Vol. 40. P. 311–341.
177. Iwamoto K. Database of Fully Developed Channel Flow // *THTLab Inter. Report ILR-0201*. Department of Mechanical Engng, University of Tokyo, June 2002. P. 17–22.
178. Laufer J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. *NACA TR 1147*, 1954. Washington, DC, USA. P. 1—18.

179. Lin C.S., Moulton B.W., Putnam G.L. Mass transfer between solid walls and fluid stream. – *Ind. And Eng. Chem.*, 1953, 45, №3, P. 636-640.
180. Lundgren T.S. Asymptotic analysis of the constant pressure turbulent boundary layer // *Phys. Fluids*. 2007. Vol. 19, No. 5. P. 1–7.
181. Liu B.Y.H., Agarwal J.K. Experimental observation of aerosol deposition in turbulent flow // *J. Aerosol Sci.* 1974. Vol. 5, No. 2. P. 145–155.
182. Marchioli C., Giusti M., Salvetti M.V., Soldati A. Direct numerical simulation of particle wall transfer and deposition in upward turbulent pipe flow // *Inter. J. Multiphase Flow*. 2003. Vol. 29, No. 6. P. 1017–1038.
183. Marchioli C., Picciotto M. , Soldati A. Influence of gravity and lift on particle velocity statistics and transfer rates in turbulent vertical channel flow // *Inter. J. Multiphase Flow*. 2007. Vol. 33, No.3. P. 227–251.
184. McCoy D.D., Hangarthy T.J. Rate of deposition of droplets in annular two phase flow // *Intern. J. Multiphase Flow*. 1977. Vol. 3, №4. - P.319-331.
185. Nerisson P., Ricciardi L., Simonin O., Fazileabasse J. Modelling aerosol transport and deposition in a ventilated room // 6th Inter. Conf. Multiphase Flow, ICMF 2007. Leipzig, Germany, 2007. P. 3-5.
186. Popovich A.T. Statistical analysis of fluid fluctuations in the viscous layers near a solid wall // *Ind. and Eng. Chem. Fundam*, 1969. 8, №4, P. 609-614.
187. Puring S.M., Vatzov D.N., Tyurin N.P. Parameter choice optimization of ventilating air cleaning equipment while designing and constructing industrial buildings // *Procedia Engineering*. 2016. T. 153. P. 563-568.
188. Rouson D.W.I., Eaton J.K. Direct numerical simulation of particles interacting with a turbulent channel flow // *Proc. 7th Workshop on Two-Phase Flow Predictions*. Erlangen, Germany, 1994. P. 47.
189. Sehmel G.A. Aerosol deposition from turbulent airstreams in vertical conduits. – *Pasif. Northwest Lab.,BNWL-578,Richland, Washington,1968*.
190. Shin M., Lee J.W. Memory effect in the Eulerian particle deposition in a fully developed turbulent channel flow // *J. Aerosol Sci.* 2001. Vol. 32. P. 675–693.

191. Shin M., Kim D.S., Lee J.W. Deposition of inertia-dominated particles inside a turbulent boundary layer // *Inter. J. Multiphase Flow*. 2003. Vol. 29. P. 893–926.
192. Sippola M.R., Nazaroff W.W. Particle deposition from turbulent flow: review of published research and its applicability to ventilation ducts in commercial buildings // Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51432, June 2002. P. 139-150.
193. Soldati A., Marchioli S. Physics and modelling of turbulent particle deposition and entrainment: Review of a systematic study // *Inter. J. Multiphase Flow*. 2009. Vol. 35, No. 9. P. 827–839.
194. Ström L. Transmission in efficiency of aerosol sampling // *Sines. – Atmos. Environ.* – 1972. Vol. 6, №2. - P.133-142.
195. Wang Q., Squires K.D. Large eddy simulation of particle-laden turbulent channel flow // *Phys. Fluids*. 1996. Vol. 8, No. 5. P. 1207–1223.
196. Wells A.C., Chamberlain A.C. Transport of small particles to vertical surfaces // *Brit. J. Appl. Phys.* 1967. Vol. 18, No. 12. P. 1793–1799.
197. Yoshioka N., Kanaoka C., Emi H. On The deposition of aerosol particles to the horizontal pipe wall from turbulent stream. – *Kagaku kagaku*. 1972. 36. № 9. P.1010-1016.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2246340

ПЛАСТИНЧАТЫЙ СЕПАРАТОР АЭРОЗОЛЯ

Патентообладатель(ли): *Самарская государственная архитектурно-строительная академия (СамГАСА) (RU)*

Автор(ы): *Шибраев Александр Евгеньевич (RU), Тюрин Николай Павлович (RU), Ватузов Денис Николаевич (RU)*

Заявка № 2002135269

Приоритет изобретения 25 декабря 2002 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 февраля 2005 г.

Срок действия патента истекает 25 декабря 2022 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2259861

**СЕПАРАТОР ТУМАНОВ С ИЗОГНУТЫМИ
ПЛАСТИНЧАТЫМИ ОСАДИТЕЛЬНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный архитектурно-строительный университет" (СГАСУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2002135268

Приоритет изобретения 25 декабря 2002 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 сентября 2005 г.

Срок действия патента истекает 25 декабря 2022 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2327508

**КОАКСИАЛЬНЫЙ СЕПАРАТОР КАПЕЛЬНОГО
АЭРОЗОЛЯ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный архитектурно-строительный университет" (СГАСУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2007100310

Приоритет изобретения 09 января 2007 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 июня 2008 г.

Срок действия патента истекает 09 января 2027 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам




Б.П. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ПОЛИРЕМСТРОЙ

Директор Зайцев Валерий Павлович
Адрес: 443001, г. Самара, ул. Арцыбушевская, 133-1.
Телефон – факс (846)337-65-89

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Полиремстрой»  Зайцев В.П.

Дата « 27 / 09 / 2016 г.

АКТ

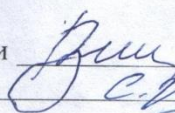
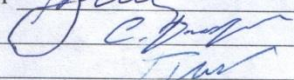
об использовании результатов
кандидатской диссертационной работы
Ватузова Дениса Николаевича

Комиссия в составе:

Председатель: Зайцев В.П.

Члены комиссии: Дежуров С.В.
Титов Г.И.

Составили настоящий акт о том, что при реконструкции местной вытяжной вентиляционной системы на ОАО комбинат «Полимерстройматериалы» в г. Отрадный Самарской области для подбора аппарата очистки от высокодисперсного масляного тумана была использована методика расчета аппаратов очистки воздуха от высокодисперсных аэрозольных частиц, разработанная в диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата наук Ватузова Д.Н. «Совершенствование очистки воздуха от капельных высокодисперсных аэрозолей в системах местной вытяжной вентиляции». Расчётный годовой экономический эффект от использования аппарата очистки (Пластинчатый сепаратор аэрозоля: пат. 2246340 Рос. Федерации/Щибраев А.Е., Тюрин Н.П., Ватузов Д.Н.) составит 223 тыс. рублей в ценах 2016 г., экономия уловленного материала (диоктилфталата) - 3,91 т/год.

Председатель комиссии  Зайцев В.П.Члены комиссии  Дежуров С.В.

Титов Г.И.

Стоимость электроэнергии, руб/год	32622,2	43496,27	54370,33	70681,43	76118,47	86992,53333	97866,6	108740,7	119614,7
--	---------	----------	----------	----------	----------	-------------	---------	----------	----------

Доходы

Экономия платы за выбросы

Концентрация ЗВ, мг/м3	200
Выброс ЗВ, г/сек	0,555555556
Выброс ЗВ, т/год	4,16
Загрязняющее вещество	диоктилфталат
Ставка, руб/т	103
Плата за выброс, руб/год	2500,952064
Экономия с коэффициентом 90%	2250,856858
92%	2300,875899
94%	2350,89494
96%	2400,913981
98%	2450,933023

Экономия из-за возврата сырья(диоктилфталат)

Стоимость, руб/т	80000
Экономия за сырье,руб(100%)	332800
с коэффициентом 90%	299520
0,92	306176
0,94	312832
0,96	319488
0,98	326144

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Оценка экономической эффективности установки аппарата очистки

Для принятия решения о внедрении на предприятии аппарата очистки целесообразно дать экономическую оценку предлагаемым решениям.

Методы оценки финансово-экономической эффективности проекта с учетом фактора времени предполагают приведение расходов и доходов, разнесенных во времени, к базовому моменту времени, в нашем случае, к дате начала реализации проекта.

Расчет коэффициентов приведения производится на основании ставки или нормы дисконта (E). В качестве приближенного значения ставки дисконтирования могут быть использованы существующие усредненные процентные ставки по долгосрочным ставкам рефинансирования, устанавливаемые ЦБ РФ.

Приведение величин затрат и их результатов осуществляется путем умножения их на коэффициент дисконтирования (α_t), определяемый для постоянной нормы дисконта E по формуле :

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^t} \quad (\text{Г.1})$$

где t – время от момента получения результата (произведения затрат) до момента сравнения, измеряемое в годах.

Оценка показателей экономической эффективности проекта будет производиться на основании базисных цен на продукцию и потребляемые ресурсы, сложившихся на 2016 год.

Анализ производился для установки производительностью 10000 м³/час с эффективностью очистки 94% при начальной концентрации диоктилфталата 200 мг/м³.

Расходы будут складываться из капитальных вложений, включающих стоимость материалов, оборудования и монтажа аппарата очистки и

эксплуатационных издержек, включающих затраты на техобслуживание аппарата и оплату электроэнергии (см. Приложение В).

Доходы от реализации проекта включают себя экономию платы за выбросы загрязняющего вещества (диоктилфталат) и экономию стоимости сырья за счет его возврата в производственный процесс (см. Приложение В).

Оценка экономической эффективности инвестиционного проекта производится с использованием следующих показателей:

- чистый дисконтированный доход, ЧДД (NPV);
- коэффициент рентабельности (доходности) инвестиций КР (BCR);
- срок окупаемости, $T_{ок}$ (PBP);

1. Чистый дисконтированный доход (NPV) определяется как сумма текущих эффектов за весь расчетный период, приведенная к начальному шагу, или как превышение интегральных результатов над интегральными затратами и определяется по формуле:

$$\text{ЧДД}(NPV) = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \times \alpha_t \quad (\text{Г.2})$$

Временной период расчета принимается исходя из сроков реализации проекта, включая время создания предприятия (производства), его эксплуатации и ликвидации. В нашем случае T принят равным среднему сроку эксплуатации вентилятора – 12 лет. Норма дисконта составляет 12 %.

2. Коэффициент рентабельности (BCR) представляет собой отношение сумм приведенных доходов к величине приведенных затрат :

$$\text{КР}(BCR) = \frac{\sum_{t=0}^T R_t \times \alpha_t}{\sum_{t=0}^T Z_t \times \alpha_t} \quad (\text{Г.3})$$

4. Срок окупаемости $T_{ок}$ (PBP) - минимальный временной интервал от начала осуществления проекта до момента времени, за пределами которого интегральный эффект становится неотрицательным.

Результаты расчетов приведены в таблице Г.1.

Анализ проведенных расчетов показал, проект является достаточно инвестиционно привлекательный. Срок окупаемости проекта составляет менее 1 года; ЧДД= 1483595 рублей; КР=3,3.

