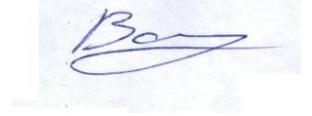


На правах рукописи



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»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза - 2017 г.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Пуринг Светлана Михайловна

Официальные оппоненты: – **Гримитлин Александр Михайлович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-
строительный университет», профессор
кафедры теплогазоснабжения и
вентиляции

– **Чичиров Константин Олегович**
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный университет
архитектуры и строительства», доцент
кафедры теплогазоснабжения и
вентиляции

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова»,
г. Белгород

Защита состоится 25 декабря 2017 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета Д. 212.184.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, 1 корпус, конференц-зал.

С авторефератом и диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» и на сайте <http://dissovet.pguas.ru>.

Автореферат разослан « _____ » 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



М.В. Бикунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди множества аспектов, определяющих состояние окружающей среды, особое место занимают проблемы охраны атмосферного воздуха. 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 стройиндустрии 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 растут требования к обеспечению чистоты производственных помещений, особое значение приобретает создание и совершенствование аппаратов очистки вентиляционного воздуха от высокодисперсных аэрозольных частиц с размерами от 0,1 до 1 мкм, оказывающих наиболее неблагоприятное воздействие на организм человека.

Малые размеры и масса таких частиц исключают или значительно ограничивают применение традиционных методов очистки, не учитывающих влияние диффузионных процессов и адгезии в проточной части установок для сепарации примесей. 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 строительные материалы для придания пластичности, таких как диоктилфталат, дибутилфталат и других согласно ГОСТ 8728-88).

Таким образом, актуальна задача проектирования высокоэффективных аппаратов очистки вентиляционных выбросов от капельных аэрозолей субмикронных размеров, имеющих невысокое аэродинамическое 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 и осаждения высокодисперсных 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 адгезионно-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 эффективных устройств по очистке вентиляционных выбросов от высокодисперсных капельных аэрозолей.

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

- анализ, моделирование и определение основных закономерностей движения и сепарации высокодисперсных 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 адгезионно-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 $0,1 \text{ мкм} \leq d_{\text{ч}} \leq 1 \text{ мкм}$ 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 18 печатных работах, в том числе 5 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статье в журнале Scopus и 3 патентах 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, которые выносятся на защиту, сведения об апробации работы.

В первой главе произведен анализ состояния вопроса очистки воздуха от высокодисперсных аэрозолей. Выполнена оценка влияния производственных процессов на состояние атмосферы. 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. Определены достоинства рассмотренных методов и аппаратов очистки вентиляционных выбросов от жидких аэрозольных частиц высокой дисперсности и указаны их недостатки.

Во второй главе рассмотрены существующие представления об аэродинамических процессах и принципах улавливания жидких аэрозолей, изложены основы теории турбулентной диффузии и миграции частиц, отраженные в работах Хинце И.О., Медникова Е.П., Фукса Н.А., Чена С.М., Брандта О., Фортье А., Флетчера Р.Д., являющиеся теоретической базой для конструирования устройств по очистке воздуха от высокодисперсных капельных аэрозолей с использованием тонких трубок и щелевых каналов.

Основным показателем интенсивности осаждения частиц в установившемся турбулентном потоке ($Re_D \geq 2300$ для трубок и $Re_D \geq 1200$ для каналов) 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:

$$Pj_w dx = PV_t c_x dx \quad (1)$$

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

Согласно исследованиям различных авторов (Медникова Е.П., Фридлиндера С.К. и Джонстоуна Х.Ф., Форни Л.Ж. и Шпильмана Л.А., Земеля Д., Ешиоки Н., Оуэна П.Р., Заостровского Ф.П. и Шабалина К.Н.) $V_t = f(u_m)$ причем, увеличение скорости потока u_m ведет за собой увеличение скорости осаждения V_t .

Данный факт можно объяснить тем, что увеличение скорости u_m способствует дополнительной турбулизации потока, что, в свою очередь, повышает величину коэффициента турбулентной диффузии, обуславливающего интенсификацию процесса транспорта высокодисперсных частиц к поверхности раздела «стенка аппарата – поток газа». Далее, за счёт диффузии в вязком подслое и сил адгезии происходит осаждение частиц на стенку аппарата.

Эмпирические формулы различных исследователей для скорости турбулентного осаждения частиц могут быть представлены в общем виде:

$$V_t = a + bu_m^n \quad (2)$$

$$V_{t+} = A \left(\frac{\tau_+}{1 + \omega_E \tau} \right)^2 \quad (3)$$

где a, b, n, A - коэффициенты, определяемые опытным путем, τ - время релаксации, с; $\omega_E = u_* / l_E \cong u_* / 0,1R$ - частота пульсаций, с⁻¹; l_E - масштаб пульсаций, равный $0,1R$; R - радиус трубы.; $\tau_+ = \mu^2 / \nu$ - безразмерный комплекс, характеризующий отношение инерционных и вязкостных сил, $V_{t+} = V_t / u_*$ - безразмерная скорость осаждения, $u_* = u_m \sqrt{\lambda/8}$ - динамическая скорость, м/с; ρ_p - плотность частиц, г/м³; d - размер частицы, м; λ - коэффициент сопротивления трения; ν - кинематический коэффициент вязкости, м²/с; μ - динамический коэффициент вязкости дисперсионной среды, кг/(м·с).

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 (1):

$$-Fu_m dc_x = PV_t c_x dx \quad (4)$$

После преобразований при условии, что при $x=0$, $c_x=c_n$ (c_n - начальная концентрация частиц при входе в трубу), получаем следующее уравнение:

$$\ln \frac{c_\kappa}{c_n} = -\frac{P}{Fu_m} \int_0^L V_t dx \quad (5)$$

На участке труб и каналов с установившимся турбулентным потоком, скорость оседания частиц не зависит от продольной координаты и уравнение (5) принимает вид:

$$\frac{c_\kappa}{c_n} = e^{-\frac{PV_t L}{Fu_m}} \quad (6)$$

Учитывая, что $F/P = R$, где R - гидравлический радиус, а $4R=D$, где D - диаметр трубы, м (в каналах - эквивалентный диаметр, $D_э$), уравнение (6) принимает вид:

$$\frac{c_\kappa}{c_n} = e^{-\frac{4LV_t}{Du_m}} \quad (7)$$

Соответственно, эффективность осаждения частиц η будет равна:

$$\eta = 1 - \frac{c_\kappa}{c_n} = 1 - e^{-\frac{4LV_t}{Du_m}} \quad (8)$$

Анализируя формулу (8) можно сделать вывод, что на осаждение частиц аэрозоля в трубках и щелевых каналах влияют геометрические размеры осадительного элемента (L, D) и режим движения турбулентного потока ($u_m, V_t=f(u_m)$).

Для определения данных параметров необходимо выполнение экспериментальных исследований.

В третьей главе описаны проведенные экспериментальные исследования и выполнена обработка и систематизация результатов.

Основными параметрами, характеризующими эффективность работы аппарата по очистке воздуха от тонкодисперсных частиц, являются эффективность очистки воздуха и потери давления в аппарате Δp , Па, которые определяются по формуле:

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{L}{D} + \xi \right) \frac{\rho}{2} u_m^2 \quad (9)$$

где: L – длина адгезионно-осадительного элемента, м, D – диаметр трубы (в случае канала – эквивалентный диаметр $D_{\text{э}}$), м, u_m – средняя скорость движения аэрозоля (м/с); ρ – плотность газовой смеси (кг/м³), λ – коэффициент сопротивления трения; ξ – потери в местных сопротивлениях.

Для определения конструктивных характеристик и оптимальных режимов работы проектируемых аппаратов, и выявления возможных расчетных аналитических зависимостей был проведен ряд экспериментов. Трубы и каналы малого диаметра $D=8\div 25$ мм, в виде пучка из 8-10 трубок, собранного в пакет, «продувались» потоком воздуха.

С использованием аэродинамического стенда (рисунок 1) проводились опыты по определению коэффициентов сопротивления трения λ и потерь давления Δp в трубах и каналах, знание величин которых необходимо для последующих исследований по сепарации аэрозолей. Достоверность проведенных исследований проверялась с помощью современных методов обработки эксперимента.

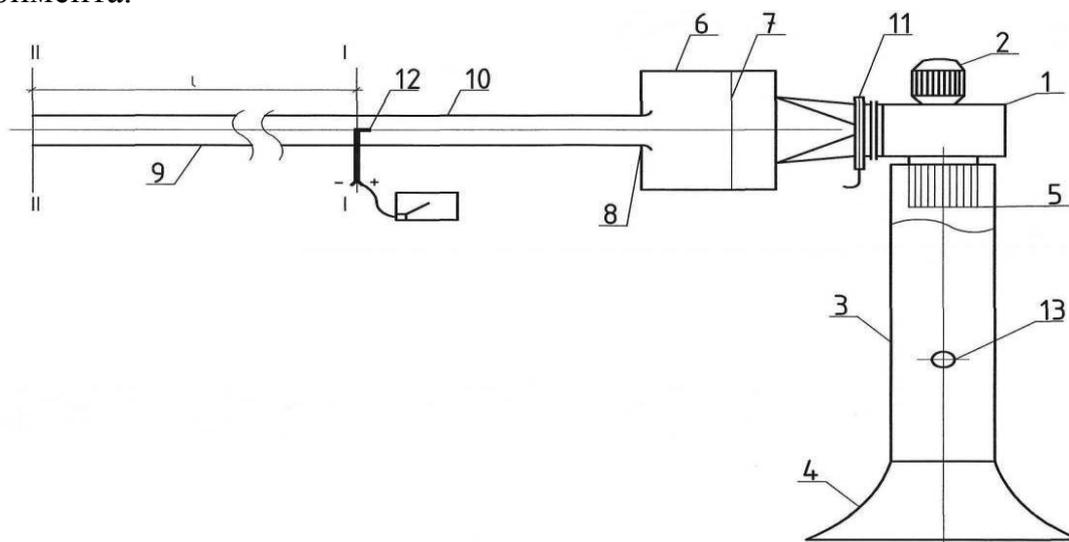


Рисунок 1 - Аэродинамический стенд для проведения опытных исследований по определению коэффициентов сопротивления трения λ и потерь давления Δp в трубах и каналах: 1 – вентилятор; 2 – электродвигатель; 3 – аэродинамическая труба; 4 – приемный коллектор; 5 – хонейкомб; 6 – камера давления; 7 – сетка;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

Теоретическое значение величины λ при турбулентном движении определялось по формуле Блазиуса, используемой для гладких труб при $2300 < Re < 10^5$

$$\lambda = 0,3164 Re^{-0,25} \quad (10)$$

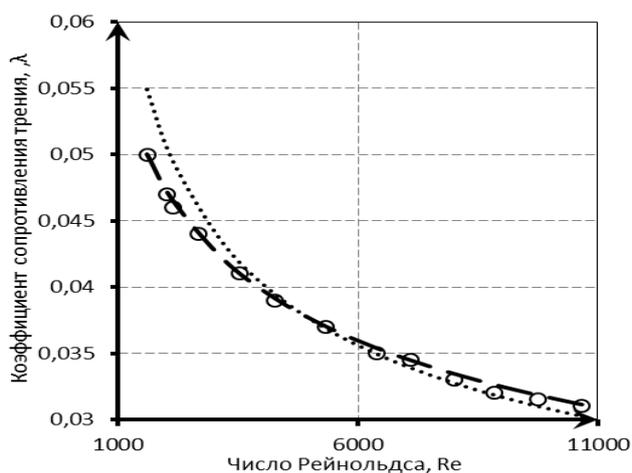
и формуле Конакова:

$$\lambda = (1,8 \lg Re - 1,5)^{-2} \quad (11)$$

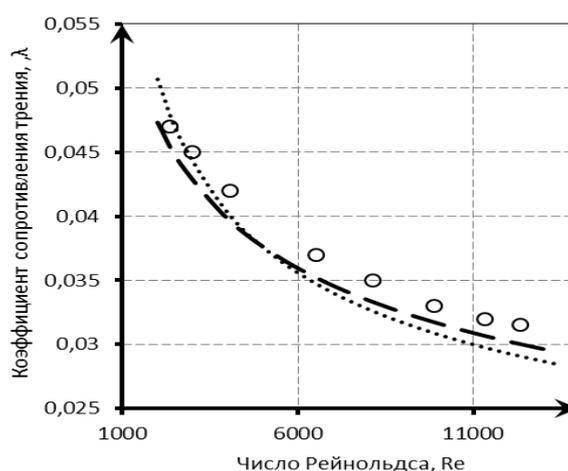
Согласно проведенному исследованию все исследуемые осадительные элементы в диапазоне $2300 < Re < 34000$ относятся к гидравлически гладким трубам (для стального канала с $D_э = 0,01$ м $2000 < Re < 16700$).

Полученные в опытах значения коэффициента сопротивления трения имеют хорошую сходимость с коэффициентами определенными расчетным путем (рисунок 2).

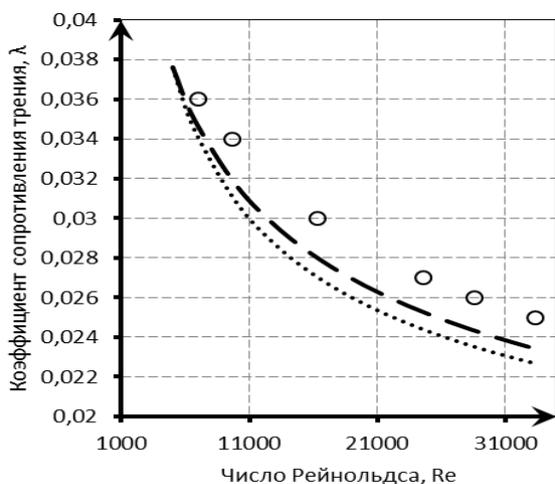
а)



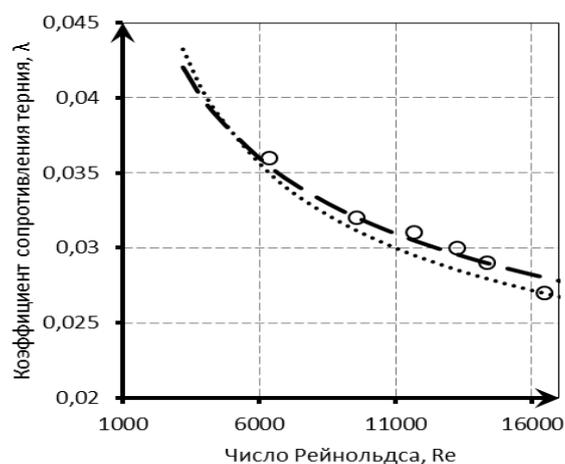
б)



в)



г)



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

Рисунок 2 - Зависимости $\lambda=f(Re)$: а) медная трубка $D=0,008$ м, б) прямоугольный стальной канал $D_э=0,01$ м, в) стальная трубка $D=0,025$ м, г) латунная трубка $D=0,016$ м

При проектировании аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей наиболее значимыми факторами являются определение конструктивных характеристик установки и поиск оптимального режима работы проектируемого аппарата. Главным звеном в аппаратах рассматриваемого типа является адгезионно - осадительный элемент, выполненный либо в виде трубки, либо в виде щелевого канала.

На опытной установке (рисунок 3) выполнялось определение геометрических характеристик адгезионно - осадительных элементов, и выявление возможных аналитических зависимостей конструируемых аппаратов очистки

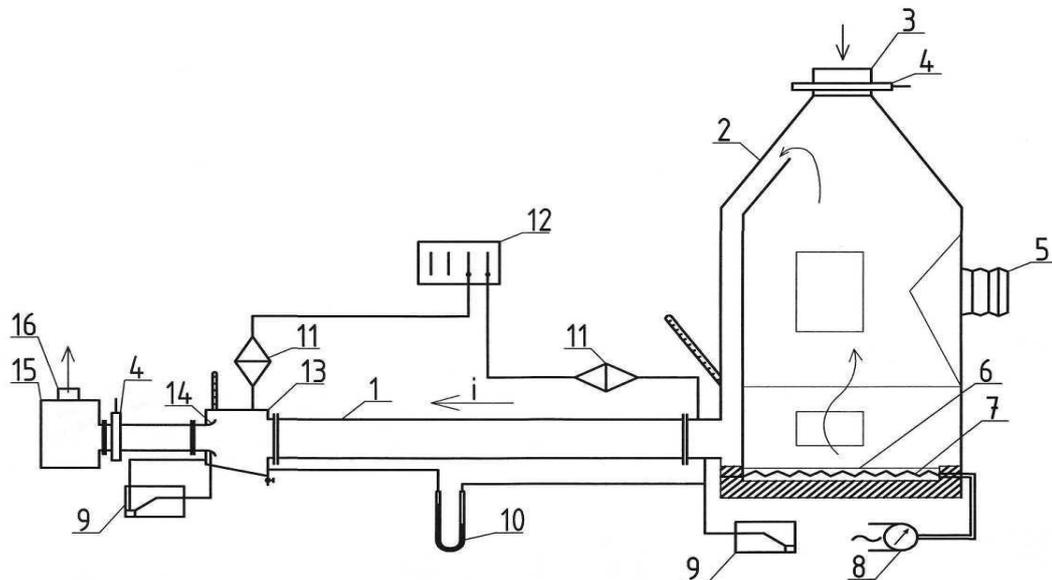


Рисунок 3 - Опытная установка для определения эффективности очистки в зависимости от геометрических параметров адгезионно-осадительного элемента и характеристик потока: 1-адгезионно-осадительный элемент; 2-вентиляционный шкаф; 3-штуцер под измерение АСО-3; 4-шибер-регулятор расхода с винтом; 5-герметизированный 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-воздуходувка; 16-патрубок удаления воздуха в атмосферу.

Для проведения исследований использовался аэрозоль диоктилфталата, функция распределения частиц которого изменяется по нормальному закону и размер более 92 % частиц составляет менее 1 мкм. Концентрация высокодисперсного аэрозоля диоктилфталата поддерживалась 100-200 мг/м³.

Значительная серия опытов была посвящена поиску оптимального значения эффективности сепарации частиц в зависимости от отношения длины трубы L к диаметру D в диапазоне чисел Рейнольдса $2300 < Re < 34000$, соответствующему турбулентному движению в гидравлически гладких трубах. Было исследовано несколько разновидностей трубок различного диаметра и длины и из разных материалов. Результаты исследований по определению эффективности осаждения частиц аэрозоля диоктилфталата в трубах при различном отношении L/D приведены на рисунке 4.

Эффективность сепарации η представлена в виде зависимостей от потерь давления Δp и от скорости потока u_m . Как видно из рисунка 4 все опытные данные хорошо аппроксимируются логарифмическими зависимостями

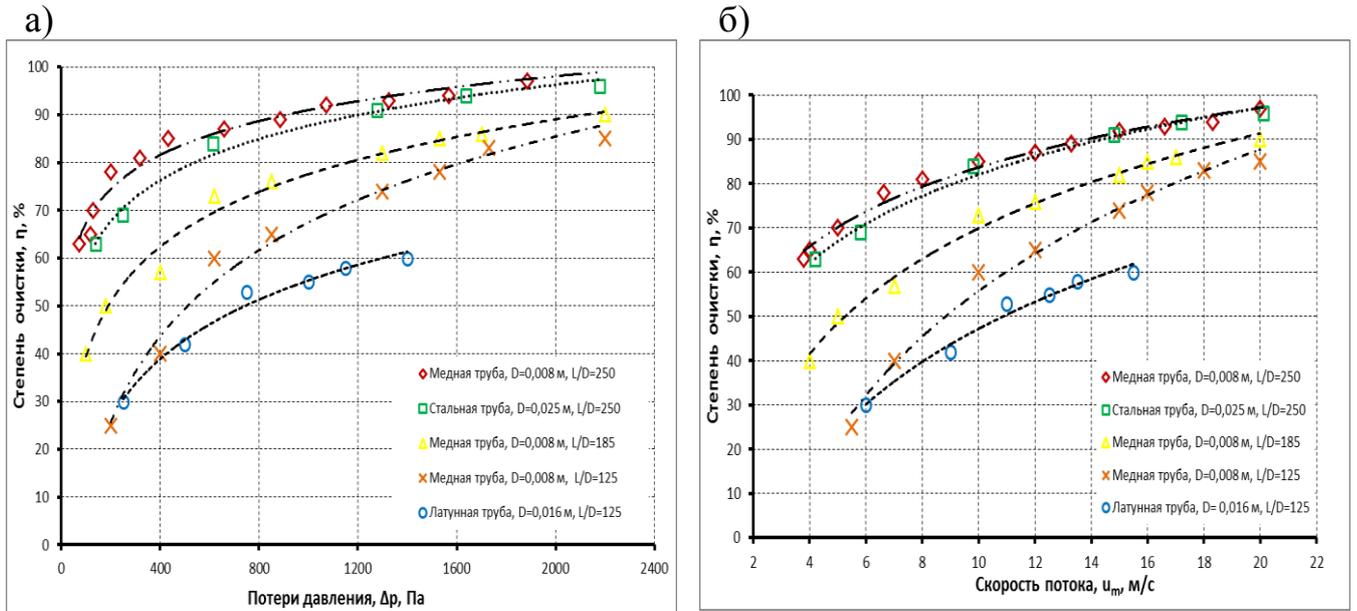


Рисунок 4 – Зависимости степени очистки для различных трубок:
а) от потерь давления в адгезионно-осадительном элементе, б) от скорости потока

Анализ графиков на рисунке 4 показал увеличение коэффициента эффективности осаждения при увеличении значения L/D . Также рост коэффициента эффективности осаждения наблюдается с ростом скорости потока и потерь давления.

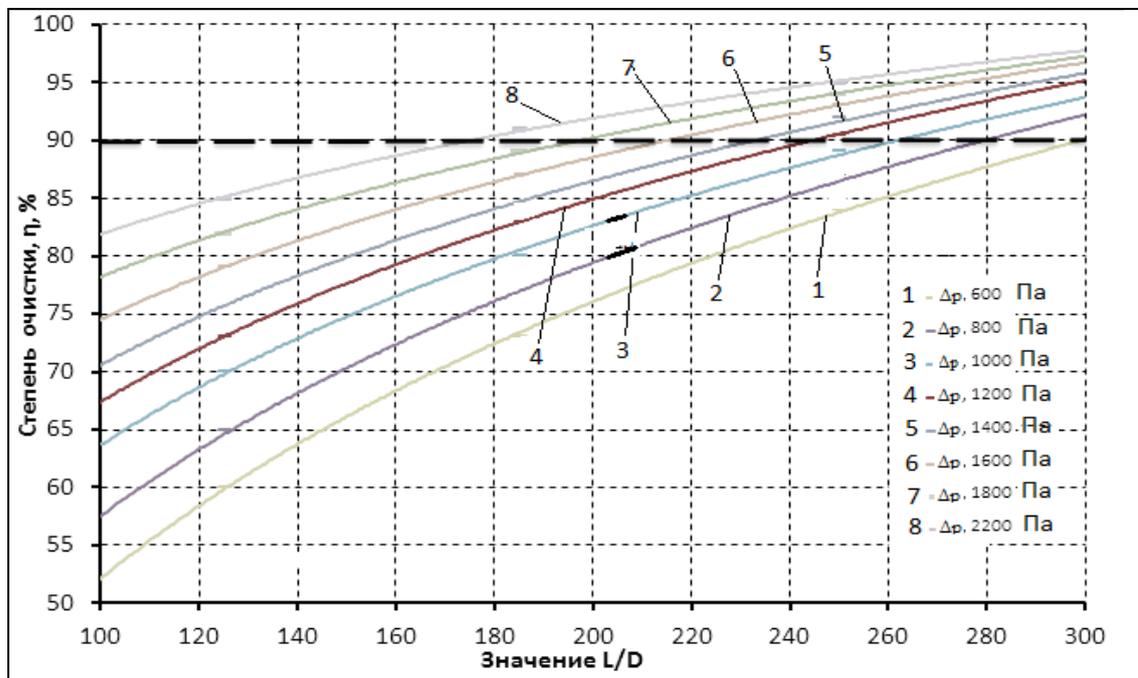


Рисунок 5 – Зависимость степени сепарации от величины L/D

Представив результаты проведенных исследований в другой системе координат в виде зависимостей $\eta=f(L/D)$ при фиксированном Δp (рисунок 5), можно увидеть, что добиться заданной величины эффективности очистки возможно комбинацией пар значений (L/D ; Δp). Наибольший интерес

представляют значения в диапазоне $\eta \geq 90\%$. Очевидно, что при одинаковой величине эффективности увеличение значения L/D ведет к уменьшению величины Δp . Задачей является нахождение оптимального сочетания значений L/D и Δp .

Для уменьшения количества опытов и поиска однозначного ответа об оптимальных размерах адгезионно-осадительного элемента и оптимальном значении Δp для получения максимального эффекта целесообразно решить задачу многокритериальной оптимизации.

Выбор оптимального варианта выполняется с использованием обобщенной функции желательности Харрингтона $d(x)$. Введение шкалы желательности позволяет свести исходную многокритериальную задачу принятия решения с разноразмерными критериями к 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, определяемый по формуле:

$$\begin{aligned} f(d_1, d_2, \dots, d_n) &= \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} \rightarrow \max & (12) \\ 0,368 \leq d_i &\leq 0,692, \quad i = 1, n \\ d_i &= d(z_i) = \exp(-\exp(-z_i)) \\ z_i &= z_i(x) = (x_i - x_{i\min}) / (x_{i\max} - x_{i\min}) \end{aligned}$$

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:

Обобщенный критерий оптимальности определялся с использованием следующих параметров: эффективность очистки (η) (диапазон изменения критерия находится в промежутке $[0,90; 0,98]$; геометрические размеры осадительного элемента (L/D) (диапазон изменения $[175; 300]$; потери давления (Δp) (диапазон изменения $[800; 2200]$).

Значения обобщенного критерия оптимальности приведены на рисунке 6.

Проведенный многокритериальный анализ позволил выявить оптимальные геометрические характеристики осадительных элементов и соответствующих им потерь давления. Согласно выполненным расчетам лучший результат наблюдается при значении $L/D = 250$ и величине Δp в диапазоне $[1200 \text{ Па}; 1600 \text{ Па}]$.

Дальнейшие опыты проводились для адгезионно-осадительных элементов с геометрическими параметрами $L/D = 250$. На рисунке 7 показаны обобщенные результаты исследований по определению эффективности осаждения частиц аэрозоля диоктилфталата в трубах и каналах, при соотношении $L/D = 250$.

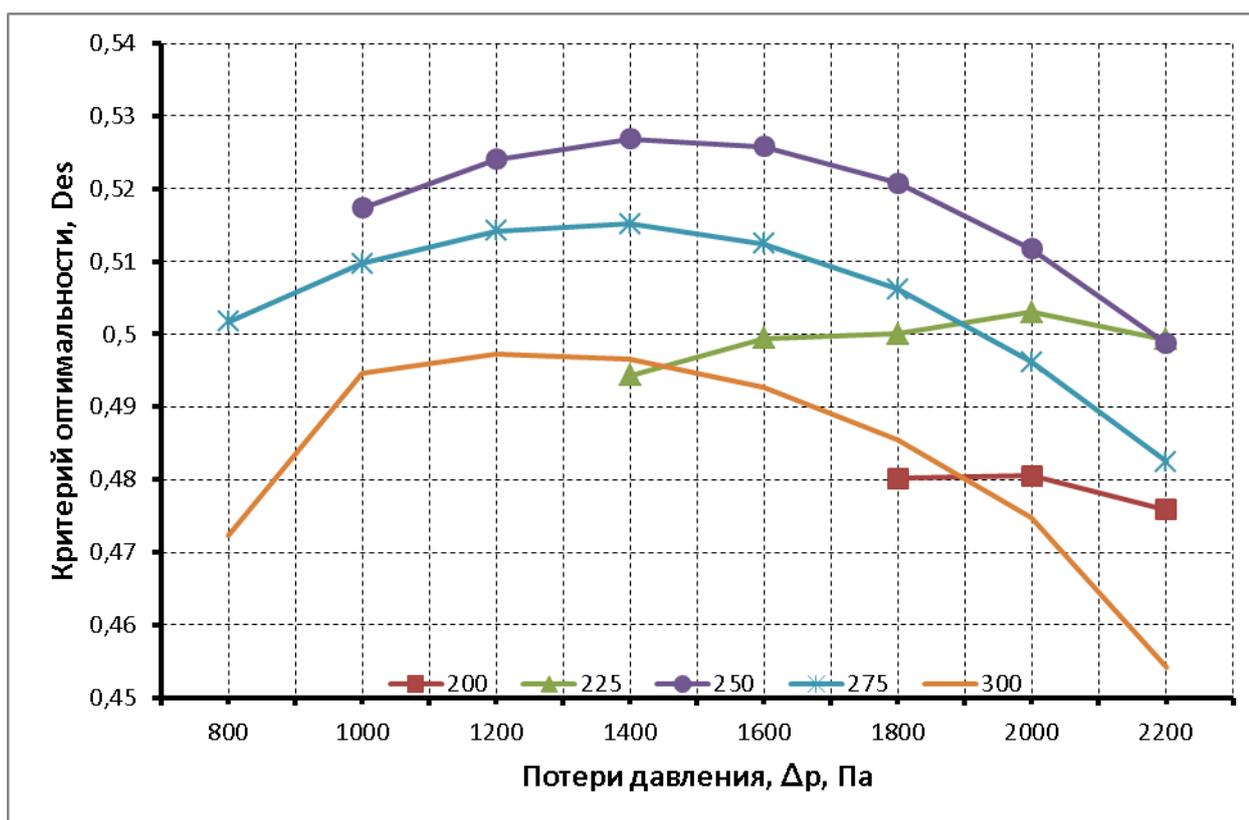


Рисунок 6 – Значения обобщенного критерия оптимальности для различных значений L/D

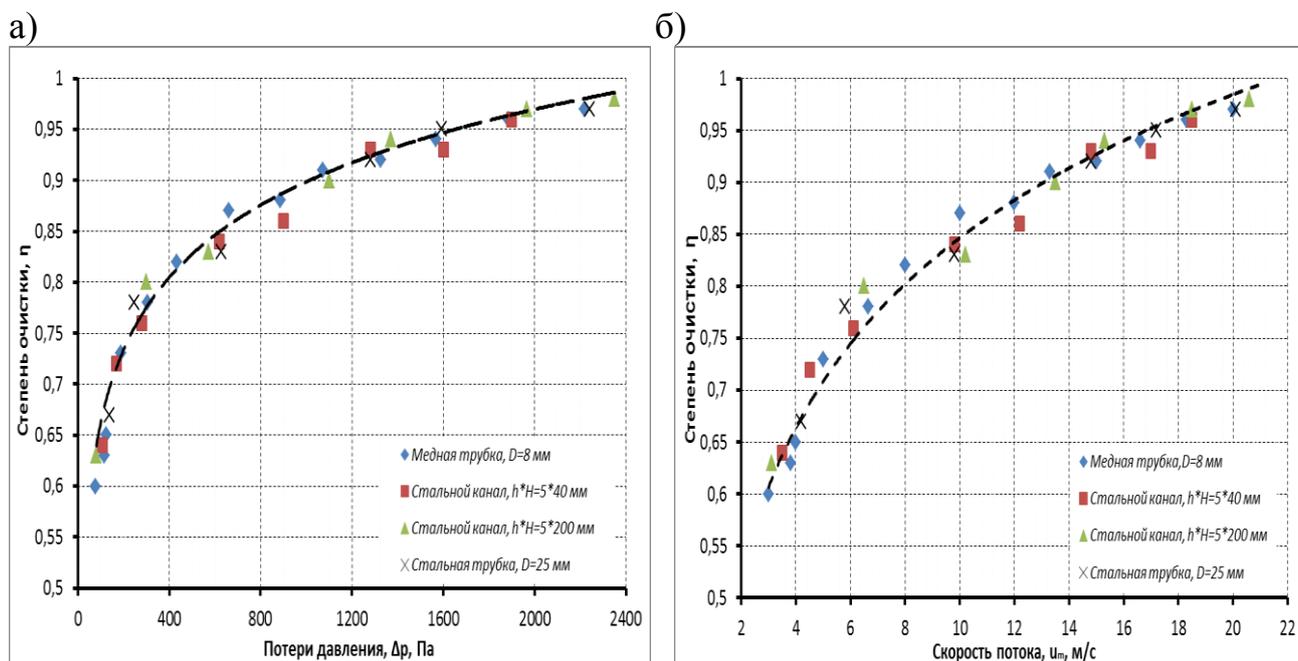


Рисунок 7 – Зависимости эффективности очистки при $L/D=250$:

а) от потерь давления в адгезионно-осадительном элементе, б) от скорости потока

Отмечено, что при геометрических параметрах адгезионно-осадительного элемента, удовлетворяющих соотношению $L/D=250$, на эффективность очистки

форма осадительного элемента и материал, из которого он изготовлен, не оказывают влияния.

Для прогнозной оценки эффективности очистки аппарата с адгезионно-осадительным элементом с параметрами $L/D=250$ в диапазоне чисел Рейнольдса $2300 \leq Re_D \leq 34000$ предложены следующие зависимости: $\eta = f(\Delta p)$ и $\eta = f(u_m)$

$$\eta = 0,107 \times \ln(\Delta p) + 0,153 \quad (13)$$

Зависимость $\eta = f(\Delta p)$ может быть трансформирована в $\eta = f(u_m)$

$$\eta = 0,189 \times \ln(u_m) + 0,412 \quad (14)$$

Опытные данные имеют хорошую сходимость с предложенными зависимостями, что характеризуется коэффициентами детерминации $R^2=0,9835$ и $0,9815$ соответственно. Как видно из рисунка 7, при значении величины Δp в диапазоне [1200 Па; 1600 Па] и соответствующей скорости u_m в диапазоне [14 м/с; 17 м/с] ожидаемая эффективность сепарации находится в диапазоне [92%;95%].

Поскольку эффективность осаждения определяется скоростью осаждения, целесообразно определить функцию $V_t = f(u_m)$. Значения $V_t = f(u_m)$ в соответствии с опытными данными приведены на рисунке 8 и аппроксимируются зависимостью вида:

$$V_t = 0,0004 u_m^{1,64} \quad (15)$$

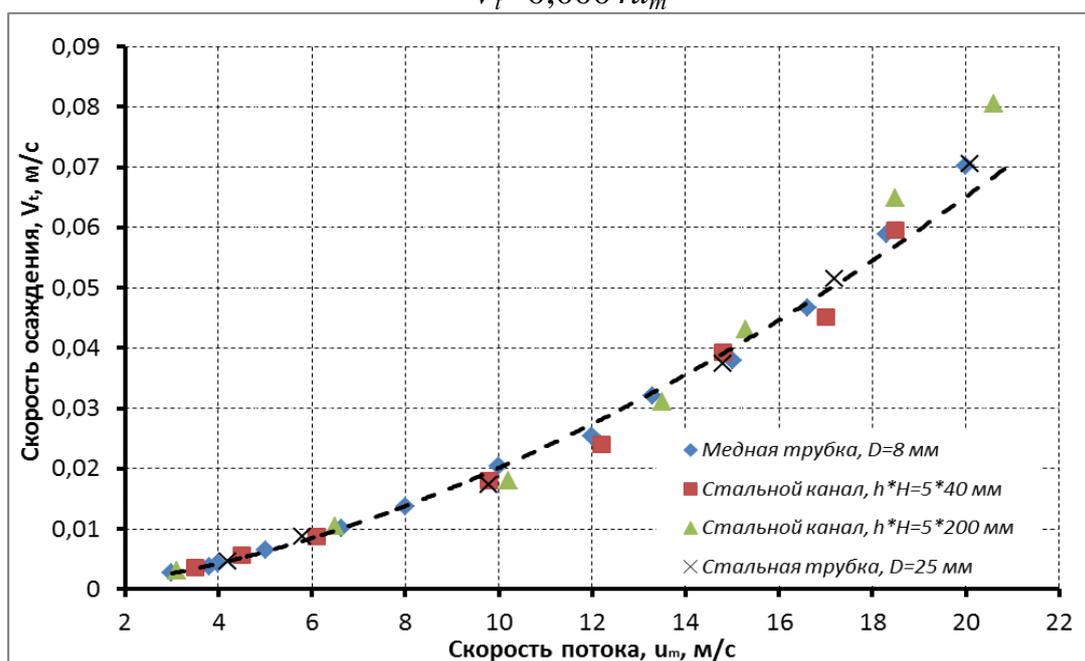


Рисунок 8 - Зависимость $V_t = f(u_m)$ при $L/D=250$

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 $\alpha=0,95$.

Таким образом, проведенные исследования позволили определить наиболее значимые геометрические параметры аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей, выявить характерные аналитические зависимости и определить оптимальный режим работы аппаратов.

В четвертой главе представлена практическая реализация результатов исследований.

Проведенные теоретические и опытные исследования позволили сконструировать коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля (рисунок 9), пластинчатый сепаратор аэрозоля (рисунок 10), и сепаратор туманов с изогнутыми пластинчатыми осадительными элементами (рисунок 11). 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 является соотношение $L/D_p=250$. Расстояние между трубками и пластинами составляет от 4 до 6 мм, обеспечивая эффективное осаждение частиц субмикронных размеров.

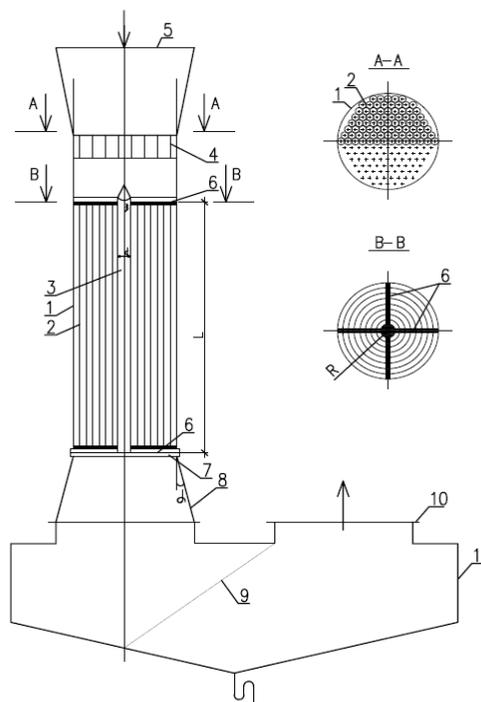


Рисунок 9 – Коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля: 1-сварной корпус, 2-адгезионно-осадительный элемент, 3-внутренний стержень, 4-стабилизирующее устройство, 5-конфузор для подвода очищаемого аэрозоля, 6-«гребенка», 7-опорная крестовина, 8-фланец диффузора, 9-стабилизирующая сетка, 10-патрубок отвода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

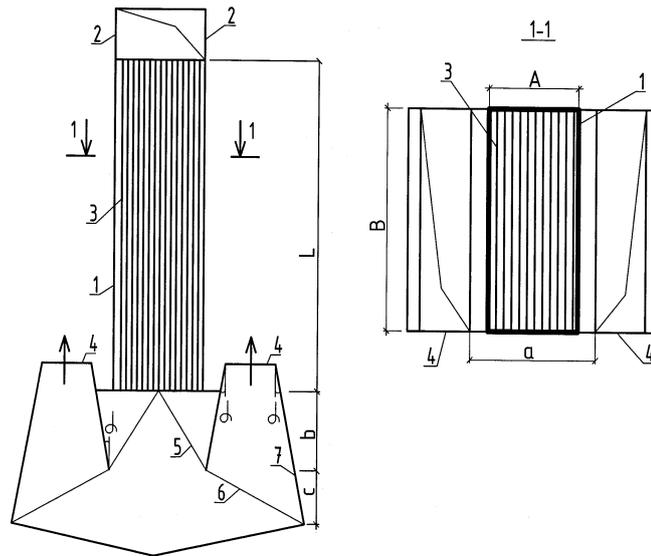


Рисунок 10 - Пластинчатый сепаратор аэрозоля: 1-корпус сепаратора; 2-воздуховод равномерной раздачи; 3-плоские пластины; 4-стабилизирующие конфузорные патрубки; 5-сетки-укрупнители капель; 6-сетка; 7-бункер

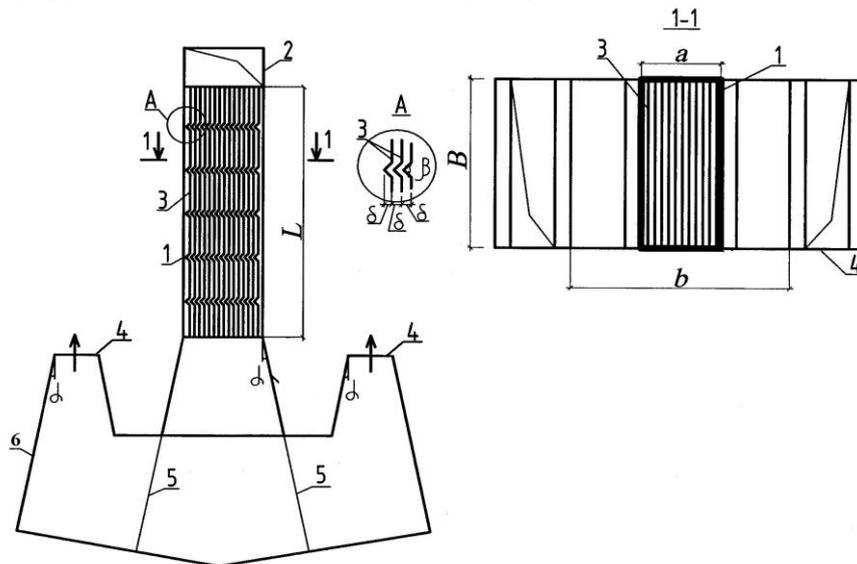


Рисунок 11 - Сепаратор туманов с изогнутыми пластинчатыми адгезионно-осадительными элементами: 1-корпус сепаратора; 2-воздуховод равномерной раздачи; 3- изогнутые пластины; 4-стабилизирующие конфузорные патрубки; 5-сетки-укрупнители капель; 6- бункер

Для повышения эффективности работы вентиляционной системы целесообразно в ее составе предусматривать установку разработанных аэролеуловителей, поэтому была разработана инженерная методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей.

Методика 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. Задаем требуемую степень очистки воздуха, η .

4. С использованием рисунка 7 или зависимостей (13) и (14) определяем скорость потока аэрозоля в очистном аппарате u_m , м/с, и потери давления Δp , Па.

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

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

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

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

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.

Разработаны схемы подсоединения аппарата очистки в вентиляционную систему цеха. В первом варианте размещения пылеуловителя очищенный вентиляционный воздух выбрасывается непосредственно в атмосферу, во втором варианте очищенный воздух, используется в системе рекуперации, после которой удаляется на улицу. Использование той или иной схемы подсоединения аппарата определяется, в первую очередь, необходимостью повышения энергосбережения. Целесообразность использования в схеме рекуператора обосновывается технико-экономическим сравнением вариантов. 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.

Для оценки экономичности применения аппарата очистки от капельного аэрозоля рассчитан годовой экономический эффект. При установке аппарата с плоскими пластинчатыми элементами очистки, эффективность очистки которого составляет 94%, потери давления - 1300 Па в вентиляционной системе производительностью 10000 м³/час для очистки от аэрозоля диоктилфталата с начальной концентрацией 200 мг/м³ годовой экономический эффект при внедрении на ОАО комбинат «Полимерстройматериалы» в г. Отрадный Самарской области составляет 222902 рублей, экономия уловленного материала 3910 кг/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературных источников обоснована актуальность создания высокоэффективных механических аппаратов очистки от капельных аэрозолей с $0,1 \text{ мкм} \leq d_q \leq 1 \text{ мкм}$, 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 (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 $0,1 \text{ мкм} \leq d_q \leq 1 \text{ мкм}$.

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. Годовой экономический эффект от

использования аппарата очистки на ОАО комбинат «Полимерстройматериалы» в г. Отрадный Самарской области при производительности системы вентиляции 10000 м³/час составляет 223 тыс. рублей в ценах 2016 г., экономия уловленного материала (диоктилфталата) 3,91 т/год.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в БД Scopus:

1. Puring, S.M. Parameter choice optimization of ventilating air cleaning equipment while designing and constructing industrial buildings/ S.M. Puring, D.N. Vatzov, N.P. Tyurin // Procedia Engineering. – 2016. –Т. 153. – С. 563-568.

Работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях:

2. Ватузов, Д.Н. Теоретические предпосылки создания аппаратов очистки воздуха в трубках и щелевых каналах от высокодисперсного капельного аэрозоля [Текст] / Д.Н. Ватузов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2016. – № 4 (25). – С. 40-43.

3. Ватузов, Д.Н. Методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей [Текст] / Д.Н. Ватузов, С.М. Пуриг // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2016. – № 2 (23). – С. 14-18.

4. Пуриг, С.М. Экспериментальные исследования по определению конструктивных особенностей аппаратов по очистке воздуха от субмикронных частиц [Текст] / С.М. Пуриг, Д.Н. Ватузов // Научное обозрение. – 2014. – № 4. – С. 90-93.

5. Пуриг, С.М. К вопросу о конструировании аппаратов для очистки воздуха [Текст] / С.М. Пуриг, Д.Н. Ватузов // Научное обозрение. – 2014. – № 4. – С. 94-97.

6. Ватузов, Д.Н., Совершенствование устройств очистки вентиляционных выбросов загрязняющих веществ при производстве изделий из пластмасс [Текст] / Д.Н. Ватузов, С.М. Пуриг, И.А. Хурин // Экология и промышленность России. – 2013. – № 8. – С. 22-26.

Патенты:

7. Пластинчатый сепаратор аэрозоля [Текст]: пат. 2246340 Российская Федерация, МПК В01D 45/04. / Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П., Щибраев А.Е.; заявитель и патентообладатель Самарский гос. Архитектурно-строительный университет. – № 2002135269/15; заявл. 25.12.02; опубл. 20.02.05, Бюл. №5. – 4 с.

8. Сепаратор туманов с изогнутыми пластинчатыми осадительными элементами [Текст]: -пат. 2259861 Рос. Федерация. МПК В01D 45/04. / Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П., Щибраев А.Е.; заявитель и патентообладатель Самарский гос. Архитектурно-строительный университет. – № 2002135268/15; заявл. 25.12.02; опубл. 10.09.05, Бюл. №25.

9. Коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля [Текст]: пат. 2327508 Российская Федерация, МПК В01D 45/04. / Ватузов Д.Н., Тюрин Н.П., Щибраев А.Е., Тюрин Д.Н., Тарасова Е.В.; заявитель и патентообладатель Самарский гос. Архитектурно-строительный университет. – № 2007100310/15; заявл. 09.01.07; опубл. 27.06.08, Бюл. №18. – 4 с.

Отраслевые издания и материалы конференций:

10. Пуринг, С.М. Экспериментальные исследования для определения параметров конструктивных элементов установок по очистке воздуха от тонкодисперсных частиц [Текст] / С.М. Пуринг, Д.Н. Ватузов // В сборнике: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии сборник статей. Самарский государственный архитектурно-строительный университет; под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, А.К. Стрелкова. – Самара, 2016. – С. 323-326.
11. Пуринг, С.М. Экспериментальные исследования – основа проектирования установок по очистке воздуха от тонкодисперсных частиц [Текст] / С.М. Пуринг, Д.Н. Ватузов // Международный научно-исследовательский журнал = Research Journal of International Studies. -2014. – № 1 (20). – Ч. 1. – С. 40-43.
12. Пуринг, С.М. Очистка воздуха от мелкодисперсных капельных аэрозолей [Текст] / С.М. Пуринг, Д.Н. Ватузов // Сантехника, отопление, кондиционирование. - 2014. - № 1 (145). - С. 109-111.
13. Ватузов, Д.Н. Особенности проектирования аппаратов для очистки воздуха от капельных аэрозолей [Текст] / Д.Н. Ватузов, С.М. Пуринг, Н.П. Тюрин // 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.
14. Пуринг, С.М. Очистка воздуха от капельных аэрозолей [Текст] / С.М. Пуринг, Д.Н. Ватузов // Сборник докладов V Международной научно-технической конференции МГСУ, 20-22 ноября, 2013 г. – С. 212-217.
15. Ватузов, Д.Н. Методика расчета устройств очистки вентиляционных выбросов от капельного аэрозоля [Текст] / Д.Н. Ватузов, Н.П. Тюрин // 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.
16. Ватузов, Д.Н. Совершенствование устройств очистки вентиляционных выбросов от капельного аэрозоля [Текст] / Д.Н. Ватузов, Н.П. Тюрин // 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.
17. Ватузов, Д.Н. Особенности осаждения частиц аэрозоля в аппаратах для улавливания капельного аэрозоля [Текст] / Д.Н. Ватузов, Н.П. Тюрин // 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.
18. Ватузов, Д.Н. Особенности конструирования аппаратов для улавливания капельного аэрозоля [Текст] / Д.Н. Ватузов, Н.П. Тюрин // 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.

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»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать .2017. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Печать оперативная.

Усл. печ. л. 1,27. Уч.-изд. л. 0,98. Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Архитектурно-строительный институт