

На правах рукописи



**АГАРКОВ АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ  
ЗАПЫЛЕННОГО ВОЗДУХА ПЫЛЕОСАДИТЕЛЕМ  
ИНЕРЦИОННОГО ТИПА С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) на кафедре механизации строительства.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Шарапов Рашид Ризаевич**

**Официальные оппоненты:** **Потапов Валентин Яковлевич**  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры горной механики  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный  
горный университет»

**Ангелюк Илья Павлович**  
кандидат технических наук,  
старший преподаватель кафедры теплогазо-  
снабжения и вентиляции ФГАОУ ВО «Крым-  
ский федеральный университет им. В.И. Вер-  
надского»

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Уральский федеральный универ-  
ситет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится 03 июня 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета [www.ivgpu.com](http://www.ivgpu.com)

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д. т. н, доцент



Л.А. Опарина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В современном мире загрязнение воздуха от промышленного производства является проблемой для экологии всего мира. А с учетом накопившихся загрязнений за предыдущие годы это уже может перерасти в катастрофу.

В связи с решениями Киотского протокола и решениями о карбоновом пылевом следе весьма актуальна стоит проблема экологии во всем мире.

Эту проблему активно взялись решать не только на международном уровне, вводя ужесточения по экологии производства, но и сами предприятия, а также многие ученые, работающие в этой сфере. Для уменьшения выбросов в атмосферу вредных веществ на производственных предприятиях разрабатываются новые, либо модернизируются комплексы по улавливанию пыли.

Одним из таких аппаратов может являться пылеосадитель инерционного типа, используемый в различных отраслях промышленности. Существующие пылеосадители имеют статическую конструкцию и процесс пылеочистки регулируется только расходом воздуха. Важной задачей является разработка пылеосадителя инерционного типа способного за счет управления конструктивно-технологическими параметрами аппарата повышать эффективность очистки запыленного воздуха.

Таким образом, разработка конструкции пылеосадителя инерционного типа, позволяющая управлять процессом вне сепараторного разделения продуктов измельчения, является актуальной задачей диссертационного исследования и имеет важную практическую значимость.

**Степень разработанности темы.** Теоретической основой для проведения исследования стали работы Ю.В. Красовицкого, И.Е. Идельчика, Н.М. Самохвалова, И.Н. Логачева, К.И. Логачева, Л.В. Чекалова, С.Ю. Кабанова, Ю.Г. Овсянникова, В.Г. Шапталы и др. Информационной базой стали книги, монографии, научные труды, статьи в сборниках научных трудов и научно-технических конференций по исследуемой проблеме.

В приведенных ранее исследованиях изучены различные варианты конструкций пылеочистного оборудования, в том числе инерционного типа, исследованы их конструктивно-технологические параметры, предложены и обоснованы теоретические и методологические аспекты их расчета и проектирования. Исследований рассматриваемого в данной работе пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами ранее не проводилось.

**Цель работы** – разработка конструкции пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами, обеспечивающего повышение эффективности очистки запыленного воздуха.

**Объектом исследования** являлся лабораторный пылеосадитель инерционного типа с регулируемыми параметрами.

**Предмет исследования** – закономерности процесса осаждения запыленного воздуха в пылеосадителе инерционного типа с регулируемыми параметрами.

**Научная гипотеза.** Эффективность работы пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами может быть повышена за счет управления процессом осаждения грубодисперсных частиц.

**Задачи исследования:**

1. Разработать конструкцию пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами, обеспечивающего повышение эффективности очистки запыленного воздуха.

2. Разработать математическую модель пылеосадителя инерционного типа, позволяющую исследовать влияние изменения параметров его работы на эффективность очистки запыленного воздуха.

3. Исследовать влияние конструктивно-технологических параметров пылеосадителя инерционного типа на его эффективность очистки запыленного воздуха.

4. Аналитически доказать, что предлагаемая конструкция пылеосадителя инерционного типа позволяет повысить эффективность очистки запыленного воздуха и качество готового продукта.

5. Исследовать многофакторное воздействие параметров пылеосадителя инерционного типа на его выходные характеристики.

6. Разработать рекомендации для реализации результатов работы в промышленных условиях.

**Научная новизна работы представлена** в решении задачи об определении скорости и давления потока воздуха в пылеосадителе в одномерной, плоской и трехмерной постановке с учетом сложной геометрической формы исследуемого объекта; получении математической модели движения твердых частиц в турбулентном потоке воздуха, учитывающую взаимодействие частиц с отражающими лопатками; получении аналитического решения задачи об осаждении частицы в пылеосадителе инерционного типа, учитывающее абсолютно упругий удар частицы о лопатку; предложенных и экспериментально подтвержденных аналитических зависимостях эффективности и гидравлического сопротивления от факторов, характеризующих процесс пылеочистки в пылеосадителе инерционного типа с регулируемыми параметрами; получении уравнений регрессии, позволяющих определить конструктивно-технологические параметры работы пылеосадителя инерционного типа; в создании патентно-чистых конструкций пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами, новизна которых подтверждена патентом на изобретение и полезную модель РФ.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в разработке математических моделей, описывающих процесс очистки запыленного воздуха в пылеосадителе инерционного типа с регулируемыми параметрами; создании конструкции пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами, обеспечивающей повышение эффективности очистки запыленного воздуха выше 90 %; разработке инженерной методики и соответствующего программного обеспечения расчета разработанного пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами.

Практические результаты работы защищены патентами. Полученные результаты исследований используются в учебном процессе при чтении лекций, выполнения курсовых проектов, работ и в дипломном проектировании НИУ МГСУ, а также приняты для внедрения в промышленных условиях на пылеочистном оборудовании компании Danterm Filtration GmbH сушильного барабана стационарного асфальтового завода компании BENNINGHOVEN MVA-3000 в качестве аппарата первой стадии очистки запыленного воздуха.

**Методы исследования.** Общая концепция исследований построена на комплексе теоретических и экспериментальных методов, включающих математическое и компьютерное моделирование с целью подтверждения разработанной конструкции пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами, оценку сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также методы математической статистики.

***Положения, выносимые на защиту:***

1. Решение задачи об определении скорости и давления потока воздуха в пылеосадителе инерционного типа в одномерной, плоской и трехмерной постановке с учетом сложной геометрической формы исследуемого объекта.

2. Математическая модель движения твердых частиц в турбулентном потоке воздуха с учетом взаимодействия частиц с отражающими лопатками.

3. Аналитическое решение задачи об осаждении частицы в пылеосадителе инерционного типа.

4. Аналитические зависимости эффективности и гидравлического сопротивления от факторов, характеризующих процесс пылеочистки в пылеосадителе инерционного типа с регулируемыми параметрами.

5. Уравнения регрессии, позволяющие определить конструктивно-технологические параметры работы пылеосадителя инерционного типа.

6. Патентно-чистая конструкция пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами, предназначенного для очистки от пыли запыленного воздуха.

***Степень достоверности полученных результатов.*** Достоверность исследований обеспечивается применением современных математических методов исследований; достоверной аргументированностью принятых допущений; экспериментальных исследований; сравнением теоретических результатов, полученных на основе имитационного моделирования, с результатами экспериментальных данных; удовлетворимой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

***Апробация работы.*** Основные положения диссертации и практические результаты обсуждались и получили одобрение на: Международной научно-практической конференции «Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений» (Белгород, 2013 г.), Научно-практической конференции «Фундаментальные исследования в естественнонаучной сфере и социально-экономическое развитие Белгородской области» (Белгород, 2013 г.), XVIII Московской международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые маши-

ны и робототехнические комплексы» (Москва, 2014 г.), Международной научно-практической конференции, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс» (Старый Оскол, 2014 г.), Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные вопросы науки и образования» (Тамбов, 2015 г.), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2015» (Казань, 2015 г.), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2016» (Москва, 2016 г.), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2018» (Москва, 2018 г.), VI International Scientific Conference INTEGRATION, PARTNERSHIP AND INNOVATION IN CONSTRUCTION SCIENCE AND EDUCATION (Москва, 2018 г.), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2021» (Москва, 2021 г.), заседаниях кафедры механизации строительства НИУ МГСУ.

***Соответствие диссертации паспорту научной специальности.***

Диссертация соответствует пункту 1 «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности», пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций», пункту 5 «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса» паспорта специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы» (строительство).

***Публикации.*** По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе в аннотированных ВАК РФ изданиях – 8, в изданиях из списка SCOPUS и Web of Science – 5.

***Личный вклад соискателя.*** Весь объем экспериментов был проведен непосредственно автором. Все разделы диссертационной работы выполнены лично автором. Выводы по результатам работы сформулированы самостоятельно.

***Структура и объем работы.*** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, библиографического списка (129 наименований) и приложений, которые включают результаты технического совещания ООО «Трансстроймеханизация». Общий объем диссертации составляет 170 страниц, содержащих 140 страниц основного текста, включающего 66 рисунков и 4 таблицы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость и сформулированы положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** приведен анализ техники и технологии разделения тонкодисперсных порошков, результаты которого позволили сформулировать цель и определить задачи исследований.

Предложена конструкция пылеосадителя инерционного типа (рисунок 1) с регулируемыми параметрами, который состоит из корпуса 1, например, прямоугольного сечения. В верхней части корпуса расположены патрубок подвода 2 исходного материала и патрубок вывода 3 тонкого материала. С противоположной стороны корпуса в нижней его части расположен патрубок вывода 4 грубой фракции. В средней части корпуса относительно его вертикальной оси установлена система регулируемых жалюзийных элементов 5. Жалюзийные элементы закреплены, например, на осях, валах, которые установлены на боковых стенках корпуса. Элементы кинематически соединены между собой, например, тягой, для одновременного вращения вокруг своих осей и горизонтального перемещения. Для этого в корпусе выполнены проточки. Жалюзийные элементы могут поворачиваться относительно своих осей от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  и перемещаться поперек корпуса от 0 мм до  $a$ .

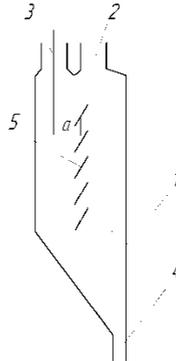


Рисунок 1 – Пылеосадитель инерционного типа.

Вращение обеспечивается тем, что на одной из осей установлен привод и оси между собой связаны кинематически с возможностью их одновременного вращения. Также предусмотрено одновременное перемещение жалюзийных элементов поперек корпуса от 0 мм до  $a$ . Варьируя величинами параметров  $\alpha$  и  $a$  можно в широких пределах изменять дисперсность выходящего из пылеосадителя продукта.

**Во второй главе представлены** теоретические исследования процесса пылеулавливания в пылеосадителе инерционного типа с регулируемыми параметрами.

#### ***Одномерное уравнение динамики потока воздуха***

Для расчета разработанного нами пылеосадителя введем систему координат: ось  $O_z$  направим вертикально вниз, а ось  $O_x$  – влево.

Будем рассматривать поток частиц в выделенной области (рисунок 2) с площадью сечения  $S_1$  и  $S_2$ . В результате перетекания воздуха из области 1 в

область 2 скорость нисходящего воздуха ( $u$ ) и скорость восходящего потока ( $\vartheta$ ) изменяются вдоль оси  $z$ .

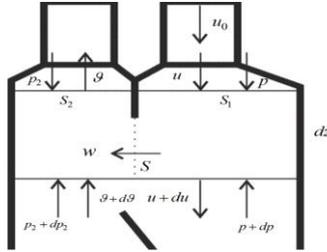


Рисунок 2 – Расчетная схема.

Для выделенного объема  $V$  запишем закон сохранения количества движения:

$$\int_S \rho \bar{u} u_n dS = \int_V \bar{f} dV + \int_S \bar{p}_n dS, \quad (1)$$

Пренебрегая силами сопротивления стенок канала, в проекцию на ось  $O_z$  и малыми величинами выше первого порядка, воспользовавшись законом сохранения массы, уравнение скорости движения нисходящего потока воздуха имеет вид:

$$u = \frac{S}{S_1} \sqrt{2 \frac{|\Delta p|}{\rho}} z + u_0. \quad (2)$$

Уравнение скорости движения восходящего потока воздуха:

$$\vartheta = \frac{S}{S_2} \sqrt{2 \frac{|\Delta p|}{\rho}} z + \vartheta_0. \quad (3)$$

Таким образом, получено решение задачи о нахождении скорости восходящего и нисходящего потока воздуха в различных сечениях пылесадителя при отсутствии скольжения фаз в одномерной постановке.

### ***Двумерные уравнения динамики потока воздуха в пылесадителе***

Движение вязкой несжимаемой жидкости описывается уравнениями Навье - Стокса совместно с уравнением неразрывности:

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0,$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{V}, \quad (4)$$

В проекции на оси декартовой системы координат система (4) запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} &= F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \nu \Delta V_1, \\ \frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial x_3} &= F_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \nu \Delta V_2, \\ \frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial x_3} &= F_3 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_3} + \nu \Delta V_3, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = 0,$$

Поскольку мы рассматриваем движение запыленного воздуха и этот воздух является невязкой средой, то уравнения движения в отсутствии массовых сил сведутся к

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}, \\ \frac{\partial V_k}{\partial x_k} &= 0, \quad i, k = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (6)$$

Компоненты вектора скорости в декартовых координатах будут

$$V_z = V \cos(\theta + \beta), \quad V_x = V \sin(\theta + \beta), \quad (7)$$

При циркуляционном обтекании пластины комплексная скорость

$$\frac{d\chi(z)}{dz} = V_\infty \left\{ \cos \theta_\infty - i \sin \theta_\infty \sqrt{\frac{z-l}{z+l}} \right\}, \quad (8)$$

Переходя в глобальную систему координат  $xOz$ , получим скорость потока после обтекания лопатки

$$V_z = V'_x \cos \theta_\infty, \quad V_x = V'_y \sin \theta_\infty. \quad (9)$$

В данном разделе построено решение задачи о нахождении поля скоростей потока воздуха в пылеосадителе в плоской постановке, что дало возможность учесть изменение скорости движения при обтекании лопаток потоком воздуха.

### ***Пространственное движение воздуха в пылеосадителе***

Моделирование пространственного движения воздуха в пылеосадителе производится на основании уравнений (4) или (5). Поскольку движение турбулентное, то для нахождения Рейнольдсовых напряжений используется  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_j} - \varepsilon, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (10)$$

Система уравнений движения замыкается уравнением состояния, начальными и граничными условиями.

$$p = p(\rho, T)$$

$$\begin{aligned} \{p, \bar{V}\}(\bar{x}, t) &= \{p, \bar{V}\}(\bar{x}, 0), \quad \bar{x} \in \Omega, \\ \{p, \bar{V}\}(\bar{x}, t) &= \{p, \bar{V}\}(\bar{x}, t), \quad \bar{x} \in \Gamma, \quad \forall t \end{aligned} \quad (11)$$

Численное решение уравнений (5), (10) с учетом условий (11) получено при помощи метода конечных объемов. Результаты расчетов скорости и давления в пылеосадителе представлены на рисунках 3-5.



Рисунок 3 – Поле давлений в пылесадителе в начальный момент времени

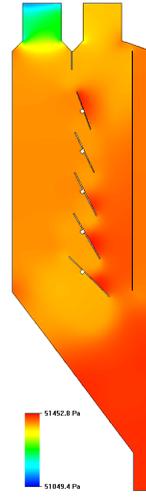


Рисунок 4 – Поле давлений установившегося процесса в пылесадителе

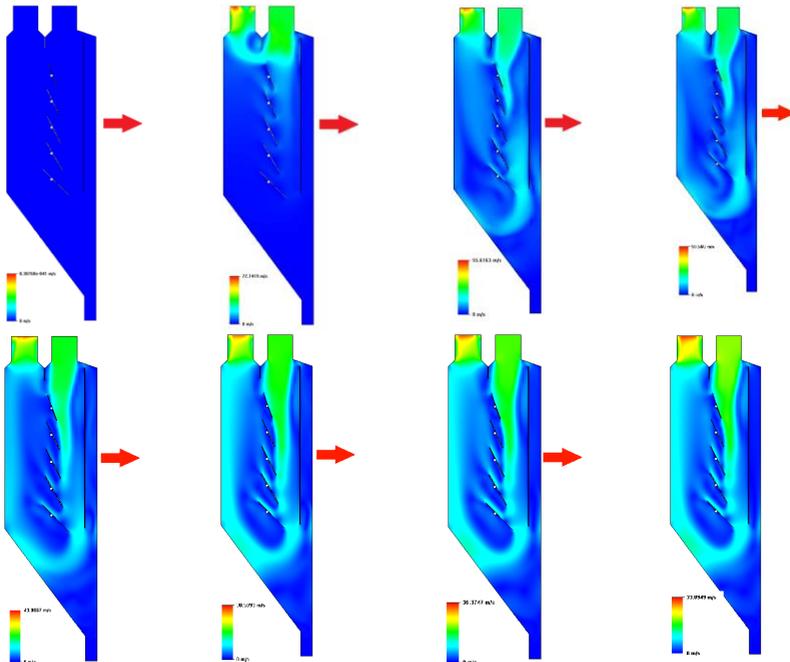


Рисунок 5 – Динамика развития поля скоростей в пылесадителе в различные моменты времени

Численное моделирование трехмерного течения воздуха в пылеосадителе позволило получить картину течения и основные характеристики течения (скорость и давление) от момента подачи воздуха в пылеосадитель до момента установления течения.

### ***Уравнение движения взвешенной в потоке воздуха частицы в пылеосадителе***

Гравитационное осаждение (седиментация) в пылеосадителе происходит в результате вертикального оседания частиц под действием силы тяжести. Скорость частицы при вертикальном движении в пылеосадителе возрастает благодаря массовым силам, действующим на частицу.

Если скорость потока является функцией двух переменных  $U=f(z,x)$ , перейдя от производных по времени к производным по координатам, получим

$$v_z \frac{dv_z}{dz} = -C_X S \frac{\rho |U_z - v_z| (U_z - v_z)}{2m} + g \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right), \quad v_x \frac{dv_x}{dx} = -C_X S \frac{\rho |U_x - v_x| (U_x - v_x)}{2m}. \quad (12)$$

Таким образом, получена полная система уравнений движения взвешенной частицы в потоке воздуха. Получено решение задачи о нахождении скорости вертикального осаждения частицы при движении в пылеосадителе.

### ***Гидравлическое сопротивление пылеосадителя***

На входе, представляющем собой диффузор с переходом круга на прямоугольник гидравлическое сопротивление определяется следующим выражением:

$$\Delta p_{вх} = \zeta \frac{\rho v_0^2}{2} = (\zeta_{ГР} + \zeta_{расш}) \frac{\rho v_0^2}{2}.$$

Для выхода, который является конфузуром, гидравлическое сопротивление равно:

$$\Delta p_{вых} = \zeta \frac{\rho v_0^2}{2} = (\zeta_{ГР} + \zeta_M) \frac{\rho v_0^2}{2}.$$

Гидравлическое сопротивление плоского поворота потока на  $180^\circ$  равно:

$$\Delta p_{\Pi} = \zeta_{\Pi} \frac{\rho v_0^2}{2},$$

При обтекании решетки лопаток гидравлическое сопротивление будет равно:

$$\Delta p_{Л} = \zeta_{Л} \frac{\rho v_0^2}{2} = \sigma_1 \sigma_2,$$

Потери давления можно посчитать следующим образом:

$$\Delta p = p - p_2 + \frac{\rho (u^2 - g^2)}{2}.$$

Полное гидравлическое сопротивление:

$$\Delta p_{пол} = \Delta p_{вх} + \Delta p_{вых} + \Delta p_{\Pi} + \Delta p_{Л} + \Delta p.$$

График изменения гидравлического сопротивления в зависимости от скорости входного потока показан на рисунке 6.

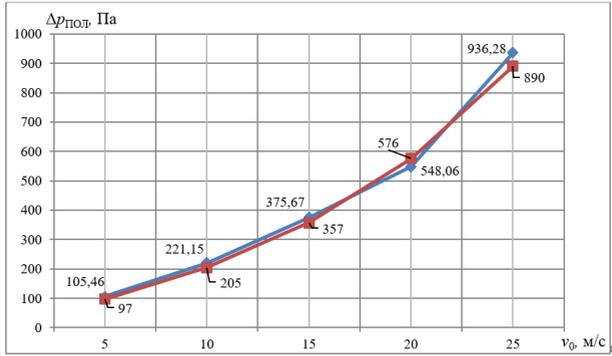


Рисунок 6 – Изменение гидравлического сопротивления в зависимости от скорости входного потока: синяя линия – теоретические (расчетные) значения; красная линия – экспериментальные значения

Таким образом, гидравлическое сопротивление пылесадителя инерционного типа зависит, в основном, от скорости потока на входе и диаметра частиц. С увеличением скорости растет гидравлическое сопротивление. Обратный эффект с увеличением размера частицы – чем больше частица, тем меньше гидравлическое сопротивление пылесадителя.

#### **Эффективность осаждения частиц**

Скорость витания частиц с учетом отражения частицы от лопатки:

$$v_B = \frac{(\rho_p - \rho)d^2}{18\mu\beta \frac{S_p}{V_p} \cos(\pi - 2\gamma)} g$$

Параметры очистки  $x_1$  и  $x_2$  (параметры функции парциального распределения  $\Phi(x)$ ):

$$x_1 = \frac{H + h - L \frac{v_B}{v}}{\sqrt{2D_i - \frac{l}{v}}}, \quad x_2 = \frac{H - h - L \frac{v_B}{v}}{\sqrt{2D_i - \frac{l}{v}}},$$

Отношение концентрации частиц данного размера в расчетной точке выходного сечения камеры к их концентрации во входном сечении  $N_i$ :

$$N_i = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1,$$

Усредним значение  $N$  по сечению, вычисляя его как среднее арифметическое по высоте сечения:

$$N_{cp} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{k}.$$

Средний парциальный коэффициент осаждения частиц рассматриваемого размера:

$$\epsilon_{п.ср} = 100 - N_{cp}.$$

Полный коэффициент очистки как сумму произведений долей частиц соответствующих фракций на их фракционные коэффициенты очистки

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_n \frac{N}{100} \Delta d.$$

График изменения эффективности улавливания в зависимости от размера частиц показан на рисунке 7.

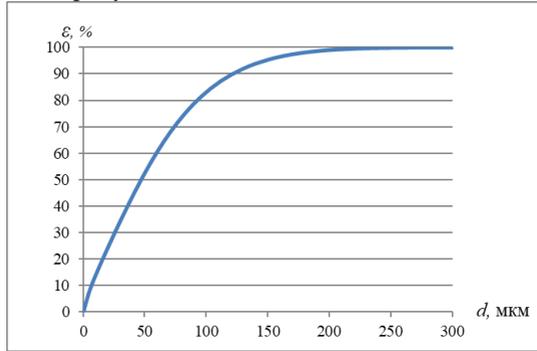


Рисунок 7 – Изменение эффективности улавливания в зависимости от диаметра частиц

Из данного графика видно, что эффективность улавливания возрастает при увеличении диаметра частиц. Так для частиц  $d=100$  мкм эффективность составляет  $\varepsilon \approx 85\%$ , а для частиц  $d=200$  мкм эффективность равна  $\varepsilon \approx 98\%$ .

**В третьей главе** представлены план, программа и методики экспериментальных исследований и описана экспериментальная установка.

Определены основные факторы, влияющие на гидравлическое сопротивление и эффективность пылеулавливания пылеосадителя инерционного типа и установлены уровни их варьирования.

В качестве основного плана эксперимента выбирается центральный композиционный ротатбельный план (ЦКРП 2<sup>4</sup>) полного факторного эксперимента (ПФЭ). В таблице 1 представлены основные факторы и уровни их варьирования.

Таблица 1 – Исследуемые факторы и уровни варьирования ПФЭ ЦКРП 2<sup>4</sup>

Факторы	Кодовое обозначение	Интервал варьирования	$X = -2$ (звездный уровень)	$X = -1$ (нижний уровень)	$X = 0$ (средний уровень)	$X = +1$ (верхний уровень)	$X = +2$ (звездный уровень)
Объем аспирационного воздуха $V$ , м <sup>3</sup> /ч	$X_1$	100	200	300	400	500	600
Ширина камеры рабочей зоны $a$ , м	$X_2$	0,02	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4
Концентрация запыленного воздуха $\beta$ , кг/м <sup>3</sup>	$X_3$	0,05	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Угол наклона лопаток $\alpha$ , град.	$X_4$	5	30	35	40	45	50

В качестве функции отклика, характеризующий процесс улавливания грубодисперсной пыли в пылеосадителе инерционного типа приняты:

- гидравлическое сопротивление пылеосадителя инерционного типа, Па;
- эффективность улавливания грубодисперсной пыли, %.

На рисунке 8 представлена фотография экспериментальной установки, которая является базовой при проведении всех экспериментов, и поисковых работ, предусмотренных планом экспериментов.

Установка работает под разрежением, создаваемым центробежным вентилятором 6 в конце установки. В качестве генератора пыли применен центробежный воздушный сепаратор без вращения крыльчатки.

Объем аспирационного воздуха, проходящего через пылеосадитель, определялся нормализованной диафрагмой 4, по показаниям дифференциального жидкостного манометра 5.

Изменение объема аспирационного воздуха, подаваемого вентилятором в пылеосадитель инерционного типа, в процессе эксперимента осуществлялся изменением частоты вращения электродвигателя этого самого вентилятора, которая регулировалась путем изменения частоты тока питающей сети при помощи частотного преобразователя.



Рисунок 8 – Фотография установки пылеосадителя инерционного типа: 1 – пылеосадитель инерционного типа; 2 – осадительные циклоны; 3 – зернистый фильтр; 4 – расходомерное устройство; 5 – жидкостный дифференциальный манометр; 6 – сепарационный вентилятор; 7 – установка жидкостных дифференциальных манометров

Грубомолотый материал подается в центробежный воздушный сепаратор, где перемешивается с аспирационным воздухом. Исходный материал выходит из сепаратора по газоходу в пылеосадитель инерционного типа 1. Здесь происходит разделение находящейся в воздухе смеси на фракции. Уловленная пыль выводится из системы, а неуловленная пыль направляется по газоходу в осадительные циклоны 2. Аспирационный воздух из осад-

тельных циклонов направляется в комбинированный зернистый фильтр 3, в котором осуществляется окончательная очистка от пыли. Изменение гидравлического сопротивления при изменении конструктивных параметров пылеосадителя (ширина камеры рабочей зоны, угол наклона лопаток и т.д.) контролировалось по показаниям дифференциального жидкостного манометра 7. Эффективность пылеулавливания определялась соотношением массы уловленных частиц пыли к массе пыли в запыленном воздухе.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований, получены уравнения регрессий и сделан их анализ; осуществлен выбор рациональных конструкторско-технологических параметров пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами.

В ходе проведения экспериментальных исследований и обработки результатов влияния исследуемых факторов на эффективность улавливания грубодисперсной пыли пылеосадителя инерционного типа получено уравнение регрессии в кодированном виде, %

$$\varepsilon = 76,2 + 14,3 X_1 - 8,9 X_1^2 - 2,9 X_2 + 1,9 X_2^2 - 5,8 X_3 + 1,4 X_3^2 + 9,1 X_4 - 2,4 X_4^2 + 1,3 X_1 X_2 + 2,4 X_1 X_3 + 1,2 X_3 X_4. \quad (11)$$

Уравнение регрессии, выражающее гидравлическое сопротивление пылеосадителя инерционного типа, в кодированном виде имеет вид, Па:

$$\Delta p = 409,2 + 92,1 X_1 + 23 X_1^2 + 24,3 X_2 + 8,3 X_2^2 + 73,4 X_3 + 15,4 X_3^2 + 0,5 X_4 - 0,5 X_4^2 - 12,1 X_1 X_2 + 14,3 X_1 X_3 - 19,5 X_2 X_3. \quad (12)$$

Исследованиями установлено, что максимальная эффективность пылеулавливания 97,7% в пылеосадителе инерционного типа с регулируемыми параметрами наблюдается при следующих конструкторско-технологических параметрах: объеме  $V$  аспирационного воздуха 400 м<sup>3</sup>/ч, ширине  $a$  камеры рабочей зоны 0,36 м, концентрации  $\beta$  запыленного воздуха 0,2 кг/м<sup>3</sup> и угле  $\alpha$  наклона лопаток 45°.

Исследованиями установлено, что снижение гидравлического сопротивления в пылеосадителе инерционного типа с регулируемыми параметрами обеспечивается при следующих конструкторско-технологические параметрах:  $V = 200$  м<sup>3</sup>/ч,  $a = 0,36$  м,  $\beta = 0,25$  кг/м<sup>3</sup>,  $\alpha = 40^\circ$ .

Проведенные исследования подтвердили достоверность аналитических выражений, позволяющих определить рациональные конструкторско-технологические параметры пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами, обеспечивающего минимальные значения гидравлического сопротивления и большую эффективность улавливания грубодисперсной пыли.

**В заключении** приведены итоги исследования и рекомендации:

1. На основании анализа направлений развития техники и технологии очистки запыленного воздуха на уровне изобретения предложена конструкция пылеосадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами. Показано, что этот аппарат при очистке грубодисперсной пыли может быть конкурентоспособен с другими типами пылеосадителей.

2. На основании разработанных методик расчета пылесадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами получены аналитические выражения, позволяющие определить:

- скорость и давление потока в пылесадителе инерционного типа с регулируемыми параметрами с учетом геометрической формы исследуемого объекта;

- траекторию движения твердых частиц в турбулентном потоке воздуха при взаимодействии их с отражающими лопатками;

- эффективность предлагаемого пылесадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами в зависимости от конструктивных и технологических параметров.

3. Установлено, что эффективность пылесадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами при улавливании грубодисперсной цементной пыли составляет от 85% до 98%, а его гидравлическое сопротивление варьируется от 230 Па до 950 Па.

4. В качестве основного плана эксперимента выбран центральный композиционный ротатбельный план (ЦКРП 24), определены исследуемые факторы и уровни их варьирования. Для проведения экспериментальных исследований создана экспериментальная установка пылесадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами, учитывающая все условия полного факторного эксперимента.

5. Экспериментально исследовано влияние варьируемых параметров на процесс очистки крупнозернистой пыли и на гидравлическое сопротивление пылесадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами. Получены уравнения регрессии для при работе пылесадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами в режиме очистки запыленного воздуха.

6. По результатам полученных патентов и результатам проведенных исследований разработана конструкторская документация на промышленный образец пылесадителя инерционного типа с регулируемыми параметрами. Предложение по внедрению было рассмотрено на техническом совещании ООО «Траснстроймеханизация» Управление производственных баз и заводов. На основании проведенных исследований пылесадитель инерционного типа с регулируемыми параметрами был рекомендован к использованию в промышленных условиях на пылеочистном оборудовании компании Danterm Filtration GmbH сушильного барабана стационарного асфальтового завода компании BENNINGHOVEN MBA-3000 в качестве аппарата первой стадии очистки запыленного воздуха.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.** Результаты диссертационного исследования рекомендуются к использованию, как в промышленности строительных материалов, так и других отраслях при решении задач повышения эффективности улавливания грубодисперсной пыли, в частности, при производстве строительных материалов, и в дальнейшем продолжить работу по разработке аппаратов, обладающих повышенной эффективностью процесса очистки тонкодисперсных порошков с различными физическими свойствами.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ*

1. Прокопенко, В.С. Оптимизация работы оборудования для получения тонкодисперсных порошков / В.С. Прокопенко, Р.Р. Шарапов, **А.М. Агарков**, Р.Р. –мл. Шарапов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – №1. – С. 80-83.
2. Шарапов, Р.Р. Моделирование процесса разделения тонкодисперсных материалов в динамических сепараторах / Р.Р. Шарапов, В.С. Прокопенко, **А.М. Агарков** // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – №2. – С. 84-89.
3. Шарапов, Р.Р. Уравнение движения взвешенной в потоке воздуха частицы в концентраторе / Р.Р. Шарапов, И.П. Бойчук, **А.М. Агарков**, В.С. Прокопенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 5. – С. 175-178.
4. **Агарков, А.М.** Гидравлическое сопротивление концентратора / А.М. Агарков, Р.Р. Шарапов, И.П. Бойчук, В.С. Прокопенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 6. – С. 160-163.
5. **Агарков, А.М.** Анализ гидравлического сопротивления концентратора / А.М. Агарков, Р.Р. Шарапов, В.С. Прокопенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 3. – С. 87-90.
6. **Агарков, А.М.** Совершенствование конструкций пылеочистного оборудования / А.М. Агарков, Р.Р. Шарапов, Е.В. Харламов // Системные технологии. – 2018. – № 4 (29). – С. 96-100.
7. **Агарков, А.М.** Трёхмерное моделирование газодинамических процессов в инерционном концентраторе / А.М. Агарков, Р.Р. Шарапов // Строительные и дорожные машины. – 2020. – № 9. – С. 46-49.
8. **Агарков, А.М.** К вопросу о скорости движения воздуха и давлении в инерционном концентраторе / А.М. Агарков, Р.Р. Шарапов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 1. – С. 101-109.

### *Статьи в изданиях, включенных в международную базу данных SCOPUS и Web of Science*

9. Sharapov R.R., Shrubchenko I.V., **Agarkov A.M.** Determination of the optimal parameters of the equipment to obtain fine powders // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. T. 10. № 12. С. 31341–31348.
10. Sharapov R.R., **Agarkov A.M.** Matrix Modeling of Technological Systems Grinding with Closed Circuit Ball Mill // World Applied Sciences Journal. 2013. T. 24. №10. С. 1399–1403.
11. Sharapov R.R., Ovsyannikov Yu.G., Boychuk I.P., **Agarkov A.M.**, Prokopenko V.S. Research of aerodynamics of recirculation systems with forced aspi-

rated air // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 21. С. 42707-42713.

12. Sharapov R., Kapyrin P., Lozovaya S., Yadykina V., **Agarkov A.** Research dedusting efficiency of the inertial hub with adjustable parameters // MATEC Web of Conferences 5. Сер. "5th International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2016" 2016. Том. 86. С. 03007. DOI: 10.1051/mateconf/20168603007

13. Sharapov R., **Agarkov A.** Determination of the aerodynamic characteristics of a concentrator with adjustable parameters // VI International Scientific Conference Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education (IPICSE-2018). 2018. Том. 251. С. 03014. DOI: 10.1051/mateconf/201825103014.

*Публикации в сборниках научных трудов и материалов конференций*

14. **Агарков А.М.** Разработка конструктивной схемы противочлнчного пылеконцентратора // В сборнике: Молодежь и научно-технический прогресс. Сборник докладов VII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х томах, Издательство: Общество с ограниченной ответственностью "Ассистент плюс" (Старый Оскол). 2014. С. 14-16.

15. **Агарков А.М.** Совершенствование аспирационных систем // Теоретические и прикладные вопросы науки и образования: сб. научн. трудов Междунар. науч.–практ. конф., (Тамбов 31 янв. 2015 г.), Тамбов: Изд-во ООО «Консалтинговая компания Юком», 2015. Ч.5. С. 14–15.

16. **Агарков А.М.** Двумерные уравнения динамики потока воздуха в концентраторе // «Интерстроймех–2015» материалы международной научно-технической конференции. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. г. Казань, 2015. С. 7–11.

17. **Агарков А.М.** Направления совершенствования конструкций циклонных аппаратов // Эпоха науки. 2015. № 4. С. 89.

18. Шаратов Р. Р., Бойчук И.П., **Агарков А.М.**, Прокопенко В.С. Удар частицы о лопатку в концентраторе // Подъемно-транспортные и строительные системы: наука и инновации: межвузовский сборник научных трудов / Южно-Российский государственные политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик. 2015. –С. 90-92.

19. **Агарков А.М.**, Шаратов Р.Р. Влияние ширины камеры рабочей зоны инерционного концентратора на гидравлическое сопротивление // Механизация строительства. 2016. Т. 77. № 9. С. 19-21.

20. Шаратов Р.Р., **Агарков А.М.**, Прокопенко В.С. Исследование эффективности пылеулавливания в инерционном концентраторе с регулируемыми параметрами // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2016 (International building technics-2016). Материалы Международной научно-технической конференции. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 2016. С. 62-68.

21. Шарапов Р.Р., **Агарков А.М.**, Прокопенко В.С. Исследование удара частицы о лопатку в инерционном концентраторе // В сборнике: ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2016 (International building technics-2016). Материалы Международной научно-технической конференции. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. 2016. С. 57-61.

22. Шарапов Р.Р., Харламов Е.В., **Агарков А.М.** Влияния объема аспирируемого воздуха инерционного концентратора на эффективность пылеулавливания // Механизация строительства. 2017. Т. 78. № 11. С. 26-29.

23. **Агарков А.М.**, Харламов Е.В. Разработка аспирационного оборудования для производства дорожно-строительных материалов // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства Материалы Международной научно-технической конференции. Ответственный редактор Ш.М. Мерданов. 2018. С. 22-26.

24. **Агарков А.М.** Анализ конструкций обеспыливания воздуха // В сборнике: Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. 2019. С. 265-269.