

На правах рукописи



РЕДВАН АВАДХ МОХАММЕД МОХАММЕД

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛЕВОГО ФАКТОРА И РАЗРАБОТКА МЕР
ПО СНИЖЕНИЮ ПЫЛЕВЫДЕЛЕНИЙ PM_{10} И $PM_{2,5}$
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
(НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ЙЕМЕН)**

05.23.19 Экологическая безопасность строительства и городского
хозяйства

.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Волгоград – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Азаров Валерий Николаевич

Официальные оппоненты: **Аверкова Ольга Александровна,**
Доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
ФГБОУ ВО "Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова".
Кисленко Тамара Александровна
кандидат технических наук, начальник Волж-
ского территориального отдела федеральной
службы по экологическому, технологическому
и атомному надзору Ростехнадзора.

Ведущая организация: Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал)
ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федераль-
ный университет» в г. Пятигорск.

Защита диссертации состоится «12» 04 2018 г. в 10-00 на заседании диссертационного совета Д 212.02 .0 при ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400074, г. Волгоград, ул.Академическая, 1, (ауд. Б-203).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

Автореферат разослан

« 09 » 02 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Жукова Наталия Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Пылевой фактор в производстве цемента наиболее значительный среди всех факторов, воздействующих на работников отрасли. Этот вывод характерен и для предприятий Республики Йемен. Пыль цементного клинкера, глины, гипса в выбросах предприятий попадает не только в атмосферу и окружающую среду, но и в рабочую зону, и на территорию предприятий. Одним из главных средств коллективной защиты работников служат системы обеспыливания. Для подбора узлов обеспыливания, пылеулавливающего оборудования и других элементов систем обеспыливания важно определить исходные данные для их расчета, и в первую очередь к ним относятся дисперсный состав пыли, аэродинамические характеристики.

Одной из причин неэффективной работы систем обеспыливания является поступление на тканевые фильтры потоков с большой концентрацией пыли, что приводит с одной стороны к снижению требуемых объемов воздуха удаляемых от технологического оборудования, с другой стороны, это может привести к срыву рукавов и повышению пылевыведений в рабочую зону и загрязнению атмосферы вблизи и на территории предприятий. Поэтому актуальным является использование в этих случаях на первой ступени улавливания – пылеуловителей на встречных закрученных потоках (ВЗП).

Одной из проблем для предприятий стройиндустрии является загрязнение окружающей среды мелкодисперсной пылью. Поэтому важно оценить долю частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в пылевом загрязнении, и оценить выполнение нормативов для мелкодисперсной пыли в воздухе рабочих зон и окружающей среде.

Таким образом, актуальным является исследование, направленное на изучение характеристик пыли, выделяющейся от технологического оборудования производства цемента, в том числе PM_{10} и $PM_{2,5}$, а также совершенствование систем обеспыливания и пылеочистки с использованием аппаратов ВЗП для снижения выбросов пыли в окружающую среду и в рабочую зону.

Работа выполнялась в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВПО Волгоградского государственного технического университета.

Степень разработанности темы исследования диссертационного исследования. Вопросы исследования пылевого фактора на предприятиях промышленности и повышения эффективности работы систем обеспыливания занимались и занимаются многие ученые-Н.А. Фукс, М.П. Калинушкин, Е.И. Богуславский, В.Н. Азаров, Н.В. Мензелинцева, В.В. Нейдин, Е.А. Штокман, Д.В. Коптев, В.И. Беспалов, К.И. Логачев, О.А. Аверкова, Al-Neaimi Y.I., Maslehuddin M., Al-Amoudi O.S., Rahman M.K., Saleh A.O и другие.

Однако на сегодняшний день остается актуальной проблема загрязнения воздуха окружающей среды и рабочих зон предприятий мелкодисперсной пылью PM_{10} и $PM_{2,5}$. Важной задачей обеспечения эффективной работы систем обеспыливания является подбор пылеулавливающих аппаратов с учетом дисперсного состава и физико-химических свойств пыли.

Цель исследования состоит в повышении экологической безопасности, которая направлена на снижение негативного воздействия пыли предприятий по производству цемента на окружающую среду посредством повышения эффективности работы систем обеспыливания.

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

- оценка запыленности воздуха рабочих зон и прилегающих территорий предприятий по производству цемента как вредного пылевого фактора;
- анализ систем обеспыливания, применяемых на предприятиях по производству цемента ;
- оценка воздействия пылевого фактора, в том числе PM_{10} и $PM_{2,5}$ на здоровье работников цементных заводов ;
- проведение сравнительного анализа состава компонентов сырьевых смесей для производства цемента в Республике Йемен и России, а также исследование физико-химических свойств цементной пыли;
- сопоставление анализа дисперсного состава пыли, поступающей в атмосферу вблизи территории предприятий по производству цемента в Республике Йемен и России;
- определение вероятности проскока твердых частиц в аппаратах ВЗП;
- разработка системы обеспыливания с аппаратом на встречных закрученных потоках и рукавным фильтром и определение ее эффективности;
- разработка практических рекомендаций по снижению пылевыделений в воздух рабочих зон и в выбросах цементных заводов Республики Йемен.

Основная идея работы заключалась в комплексном подходе по снижению негативного воздействия пылевого фактора, в том числе мелкодисперсной пыли PM_{10} и $PM_{2,5}$ на предприятиях по производству цемента в Республике Йемен, а также в повышении эффективности работы систем обеспыливания предприятий, посредством использования двухступенчатых систем очистки с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром.

Научная новизна работы:

- получение экспериментальных данных доли PM_{10} , $PM_{2,5}$ для пыли, выделяющейся в атмосферу и в воздух рабочей зоны на различных этапах производства цемента в Республике Йемен;
- разработка экспериментальной установки на базе аппарата ВЗП и рукавного фильтра для оценки величины выбросов пыли в атмосферу;

- установлены регрессионные зависимости для величины выбросов пыли цемента в атмосферу и рабочую зону,
- разработка математической модели для расчета вероятности проскока в атмосферу мелкодисперсных долей пыли цемента PM_{10} и $PM_{2,5}$ при использовании установки очистки аппарата ВЗП и рукавного фильтра;
- сопоставление анализа компонентного и дисперсного составов цементной пыли, поступающей в воздух рабочих зон и окружающую среду на цементном заводе Республики Йемен и России.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- определены зависимости определяющие вероятность проскока твердых частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в аппаратах ВЗП учетом основных конструктивных параметров аппарата, режима его работы, скоростей потока на входе в зоны ввода потоков, и состава поступающего фракционного потока;
- найдены зависимости, позволяющие определить эффективность работы установки с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром в зависимости от расхода и скорости воздуха в воздуховоде, концентрации пыли и соотношений воздуха подаваемого на ввод.
- определены значений PM_{10} и $PM_{2,5}$ в выбросах в атмосферу и в рабочую зону на заводах Республики Йемен;
- разработаны практические рекомендации по снижению выбросов предприятия по производству цемента и поступлению пыли в атмосферу;
- разработана установка улавливания с использованием аппарата ВЗП и рукавного фильтра для снижения выбросов пыли цемента в атмосферу;
- разработана и испытана учебная экспериментальная установка пылеулавливания на кафедре БЖД СиГХИАиС ВолгГТУ и внедрение ее в учебный процесс для подготовки магистров и аспирантов.

Реализация результатов работы:

- получены экспериментальные данные по содержанию доли PM_{10} и $PM_{2,5}$ в дисперсном составе пыли в воздухе рабочих зон и на территории предприятий по производству цемента Республики Йемен;
- уточнены сведения по компонентному и дисперсному составу пыли цемента в Республики Йемен;
- разработана математическая модель для описания вероятности проскока пыли цемента с размерами твердых частиц менее 10 и 2,5 мкм в экспериментальной установке на базе аппарата ВЗП и рукавного фильтра;
- разработана экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли цемента с использованием аппарата ВЗП и рукавного фильтра, на которую получен патент (Пат. RU 2015140195/05(061736));

- разработаны практические рекомендации по снижению выбросов предприятий по производству цемента и поступлению пыли в атмосферу для заводов Республики Йемен.

Методология и методы диссертационного исследования включали аналитическое обобщение известных научных результатов, теоретические, натурные и лабораторные исследования, математическую обработку экспериментальных данных методами математической статистики и анализа.

Положения, выносимые на защиту:

- экспериментальные данные по дисперсному составу пыли, поступающей в воздух рабочих зон и атмосферу прилегающих территорий предприятий по производству цемента в Республике Йемен;

- полученные математические зависимости, позволяющие определить вероятность проскока твердых частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в аппаратах ВЗП с учетом основных конструктивных параметров аппарата, режима его работы, скоростей потока на входе в зоны ввода потоков и дисперсного состава поступающего фракционного потока;

- зависимости, позволяющие определить эффективность работы установки с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром в зависимости от расхода и скорости воздуха в воздуховоде, концентрации пыли и соотношений воздуха подаваемого на ввод.

Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций соответствует современным требованиям; обоснована применением классических положений теоретического анализа; экспериментальным и численным моделированием изучаемых процессов; планированием и выбором методик проведения для экспериментов; подтверждена сходимостью полученных результатов экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных условиях.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение на: XII Международной научно-практической конференции «Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии», Пенза, 2013; конференции молодых инженеров-экологов «Проблемы охраны производственной и окружающей среды» (г. Волгоград, 2014 г.); ежегодных научно-технических конференциях ФГБОУ ВПО Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета, (г. Волгоград, 2010-2017 г.); XIX международной научно-практической конференции «Технические науки-от теории к практике» г. Уфа, 2013; всероссийской научно-практической конференции, г. Уфа, 2014.

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 17 работах (вклад соискателя – 47,54 печатных листа), в том числе: 1 статья в издании, индексируемом в базе «Web of science», 5 статей в изданиях,

индексируемых в базе «Scopus», 4 статьи, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК России, 1 патент РФ на полезную модель.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем работы составляет 123 страниц, в том числе: 120 страниц – основной текст, содержащий 15 таблиц на 14 страницах, 50 рисунков на 41 странице; список литературы из 103 наименований на 13 страницах; 3 приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи и основная идея работы, ее научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации и практическом внедрении результатов проведенных исследований.

Первая глава посвящена анализу технологического процесса производства цемента как источника загрязнения атмосферы Республики Йемен, который выявил, что на различных этапах производства в воздух рабочих зон и на территорию предприятий выделяется большое количество пылевых выбросов, причем содержание мелкодисперсной фракции менее 10 мкм в них составляет от 10 до 75%. Анализ систем обеспыливания предприятий цементной отрасли Республики Йемен показал, что широкое применение на предприятиях получили рукавные фильтры. Опыт их применения обозначил сложности, с которыми встречаются в процессе эксплуатации рукавов, это, например, их обрыв ввиду высокой запыленности потоков, истирание тканей в местах крепления и др. Использование в условиях Йемена традиционных для цементной отрасли России таких высокоэффективных пылеулавливающих аппаратов, как электрофильтры, ограничено ввиду их высокой энергоемкости. Анализ ряда работ авторов показал эффективность использования двухступенчатых систем очистки, в частности, установку перед рукавными фильтрами инерционных аппаратов на встречных закрученных потоках (ВЗП).

Вторая глава посвящена исследованию физико-химических свойств цементной пыли и дисперсного состава пыли, поступающей в воздух рабочих зон и атмосферу, а также оценке эффективности улавливания аппаратом ВЗП РМ₁₀ и РМ_{2,5}.

Проведен анализ среднестатистических составов сырья, используемого для производства портландцемента в России и Йемене. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 Состав сырья используемый для производства портландцемента

| Материал | Потери при прокаливании,% | Содержание, % | | | | | |
|---------------|------------------------------|---------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| | | CaO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ |
| Россия | | | | | | | |
| известняк | 40,88 | 51,8 | 0,76 | 4,82 | 0,53 | 0,34 | - |
| песчанник | 13,85 | 15,86 | 0,76 | 62,29 | 3,05 | 1,45 | 0,09 |
| железная руда | 3,0 | 0,2 | 0,2 | 7,8 | 4,5 | 84,0 | - |
| Йемен | | | | | | | |
| известняк | 42,57 | 54,31 | 0,06 | 0,81 | 0,15 | 0,12 | 0,27 |
| песчанник | 2,14 | 0,92 | 0,85 | 92,01 | 1,17 | 0,93 | 0,44 |
| железная руда | 1,74 | 1,84 | 0,09 | 0,73 | 1,49 | 95,78 | 0,95 |

Анализ позволил установить, что состав сырья, используемый для производства цемента в Республике Йемен, отличается от российского по процентному содержанию, в том числе и по таким компонентам, как SiO₂, SiO₃, поэтому важно определить дисперсный состав пыли.

В качестве объекта исследования дисперсного состава пыли цемента, содержащейся в выбросах в атмосферу и в воздухе рабочей зоны, были отобраны пробы осевшей пыли на цементном заводе «Амран» в республике Йемен в городе Амран. Пробы были взяты на различных участках производства: на участках транспортировки извести, фторида калия, гипса, грунта, участке подготовки смеси и участке упаковки готовой продукции. План расположения точек проб приведен на (рисунке 1)

По полученным данным построены интегральные кривые распределения массы частиц пыли по диаметрам (рисунок 2,3).

Анализ полученного распределения показал, что содержание частицы PM₁₀ на участке упаковки цемента (рисунок 2) составляет 100 % от общей массы пыли, из них на частицы PM_{2,5} приходится 3%. При транспортировке извести (рисунок 3) доля частиц PM₁₀ и PM_{2,5} будет составлять соответственно 90 и 3 % от общей массы пыли.

(а)



(б)



Рисунок (1а-б)-Добыча и транспортировка сырья в республике Йемен г.Амран

(в)

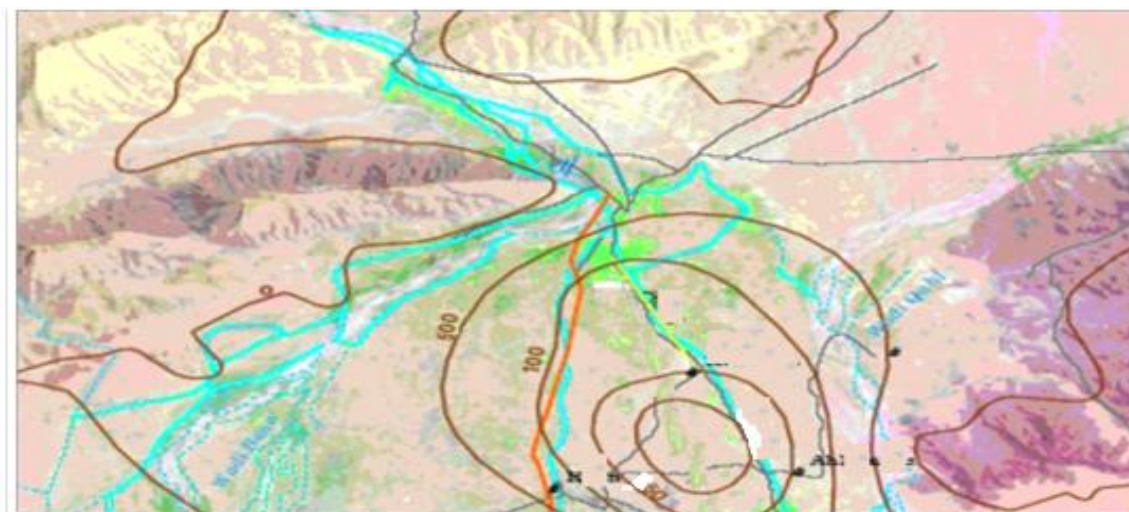


Рисунок (1-в). План цементного завода в республике Йемен г. Амран с обозначением мест отбора проб пыли .

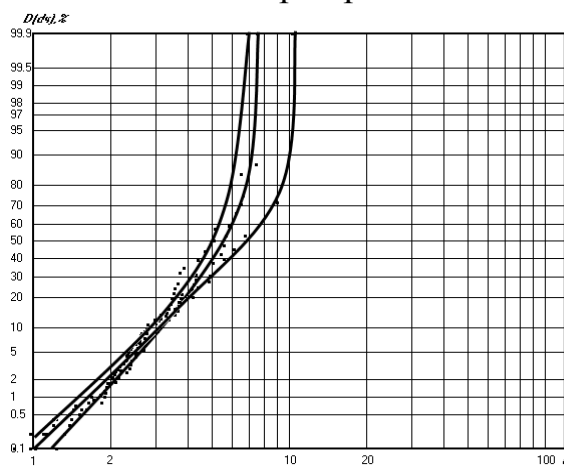


Рисунок 2. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, поступающей в рабочую зону при упаковке цемента

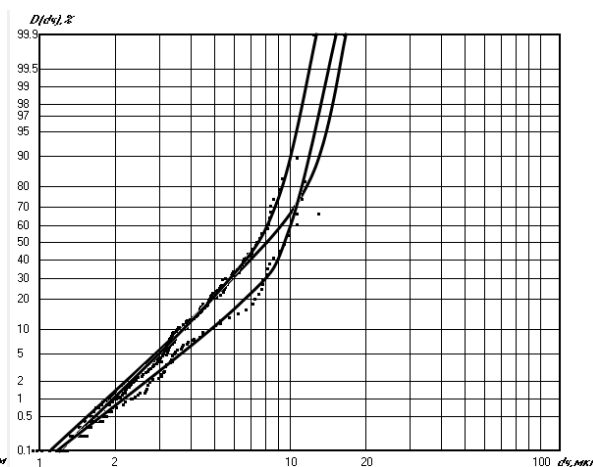


Рисунок 3. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, поступающей в рабочую зону при транспортировке .

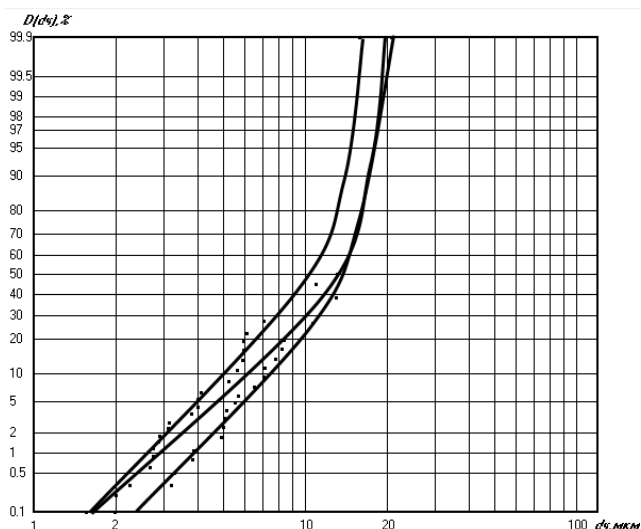


Рисунок 4. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной на территории цементного завода (Йемен).

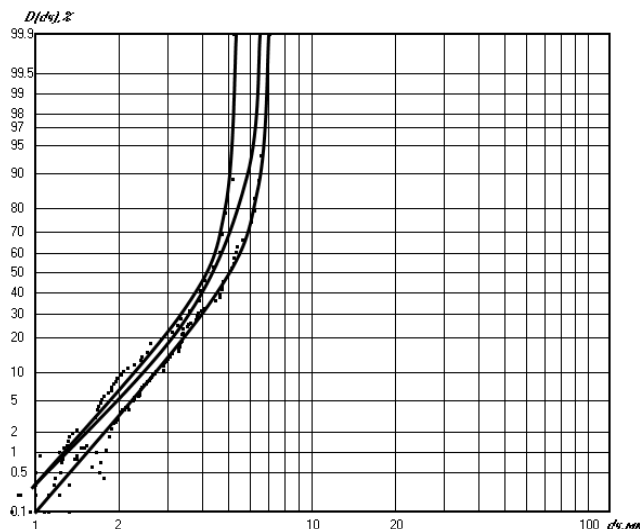


Рисунок 5. Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли, отобранной в жилом посёлке расположенном на расстоянии 500 м от цементного завода (Йемен).

Результаты исследований дисперсного состава пыли, содержащейся в воздухе на территории предприятия и в поселке на удалении 500 м от него показали, что диапазон изменения крупности частиц пыли на территории предприятия составляет 1,5 - 20 мкм, $d_{50}=10$ мкм, в поселке диапазон изменения крупности частиц пыли составляет 1 - 7 мкм, $d_{50}=4,5$ мкм. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в атмосфере на территории предприятия и вблизи него преобладает мелкодисперсная пыль, которая может разноситься на значительные расстояния от источника выбросов пыли.

При помощи воздушного седиментометра были определены аэродинамические характеристики цементной пыли. Эксперимент подтвердил, что с течением времени крупность пылевых частиц уменьшается. Например, исследования показали, что медианный диаметр d_{50} пыли выделяющейся в атмосферу в процессе помола цемента составил: для частиц со скоростью оседания до 0,4 м/с - 36 мкм; от 0,4 до 0,2 м/с - 30 мкм; от 0,1 до 0,2 м/с - 23 мкм; от 0,067 до 0,1 м/с - 15 мкм; от 0,05 до 0,067 м/с - 4 мкм; от 0,04 до 0,05 м/с - 2 мкм.

Произведена адаптация расчетной математической модели для описания вероятности проскока пыли цемента PM_{10} и $PM_{2,5}$ в атмосферу при использовании установки для очистки воздуха от пыли с аппаратом ВЗП.

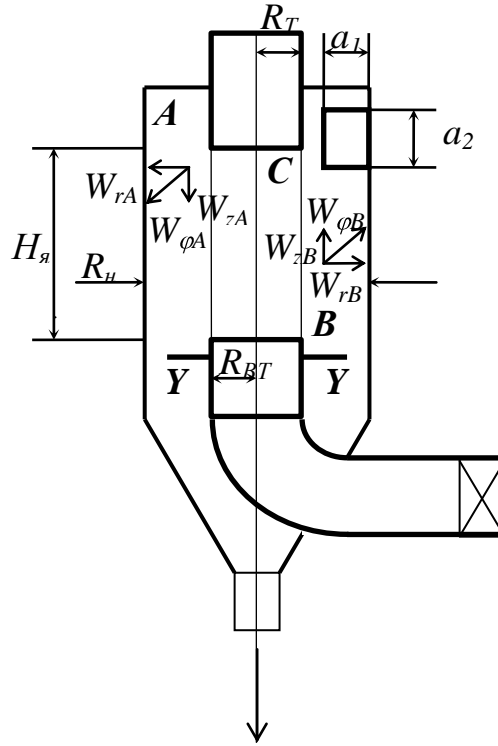


Рисунок 6. Схема по определению фракционной эффективности аппарата ВЗП.

Вероятность данного сложного процесса зависит от вероятностей P_A , P_B , и составит:

$$P_c = \frac{P_A \cdot m_{exA} + P_B \cdot m_{exB}}{m_{exA} + m_{exB}} \quad (1)$$

где P_A и P_B – вероятности улавливания частицы соответственно в верхнем и нижнем входах;

m_{exA} , m_{exB} – масса частицы соответственно в верхнем и нижнем входах.

Вероятность события P_A и P_B может быть описана уравнением вероятности массопереноса в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = W_t \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{W_\phi}{r} \frac{\partial P}{\partial \phi} + 0,5b_r \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} \quad (2)$$

Решение уравнения (2) для событий P_A по схеме предложенной, профессором Е.И. Богуславским и профессором В.Н. Азаровым, можно привести к виду для зоны А (в верхней части ВЗП):

$$P_1 = erf(Y), \quad erf(Y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Y e^{-t^2} dt, \quad Y = \sqrt{\frac{R^2}{2\mu^2 b(\tau - \tau_0)}}, \quad (3)$$

$$P_2 = \left(-ce^{-\lambda r_H} \left(-W_r/V_r \right) \right),$$

При решении уравнения (2) было использовано преобразование $d\varphi = \frac{W_\varphi}{r \cdot V_r}$.

Таким образом, фракционная эффективность пылеулавливания для частиц диаметром d , поступающих в аппарат в точке с координатой $r = r_H$, будет определяться формулой (4).

$$P = \left(-ce^{-\lambda r_H} \left(-W_r/V_r \right) \right) \cdot \text{erf}(Y). \quad (4)$$

Вероятность массопереноса по входному патрубку зоны A равна

$$P_A = \frac{1}{R_H - R_T} \int_{R_T}^{R_H} P dr_H \quad (5)$$

$$P_A = \left(1 - c \cdot \frac{e^{-\lambda E_A R_T} - e^{-\lambda E_A R_H}}{\lambda \cdot E_A (R_H - R_T)} \right) \cdot \text{erf}(Y), \quad (6)$$

где: R_H, R_T — радиусы цилиндрической части корпуса и выхлопной трубы;

$$E_A = 1 - W_r/V_r.$$

Константу интегрирования c определим из физически обоснованного условия, что $P_A = 0$ при $W_r = V_r$.

Тогда $E_A = 0$ и для определения значения c получим уравнение:

$$1 = c \cdot \frac{e^{-\lambda E_A R_T} - e^{-\lambda E_A R_H}}{\lambda E_A (R_H - R_T)}.$$

Вычислим предел по правилу Лопиталя:

$$\lim_{E_A \rightarrow 0} \frac{e^{-\lambda E_A R_T} - e^{-\lambda E_A R_H}}{\lambda E_A (R_H - R_T)} = \lim_{E_A \rightarrow 0} \frac{-\lambda R_T e^{-\lambda E_A R_T} + \lambda R_H e^{-\lambda E_A R_H}}{\lambda (R_H - R_T)} = \frac{-\lambda R_T + \lambda R_H}{\lambda (R_H - R_T)} = 1$$

Следовательно, константа интегрирования $c = 1$.

Окончательно для зоны A получаем уточненную формулу для вероятности массопереноса:

$$P_A = \left(1 - \frac{e^{-\lambda E_A R_T} - e^{-\lambda E_A R_H}}{\lambda \cdot E_A (R_H - R_T)} \right) \cdot T, \quad (7)$$

где:

$$\lambda = -\frac{1}{R_H} \ln \left(1 - \frac{1}{2 \operatorname{erf}(Y)} \right), \quad T = 1 - \left(a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \right) e^{-Y_A^2} \text{ — это приближенное значение интеграла, } \operatorname{erf}(Y_A) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{Y_A} e^{-t^2} dt, \text{ и } t = \frac{1}{1 + \alpha \cdot Y};$$

Таким образом, сравнивая теоретические и экспериментальные значения P_A , можем определить опытный коэффициент k . Например, для крупных частиц

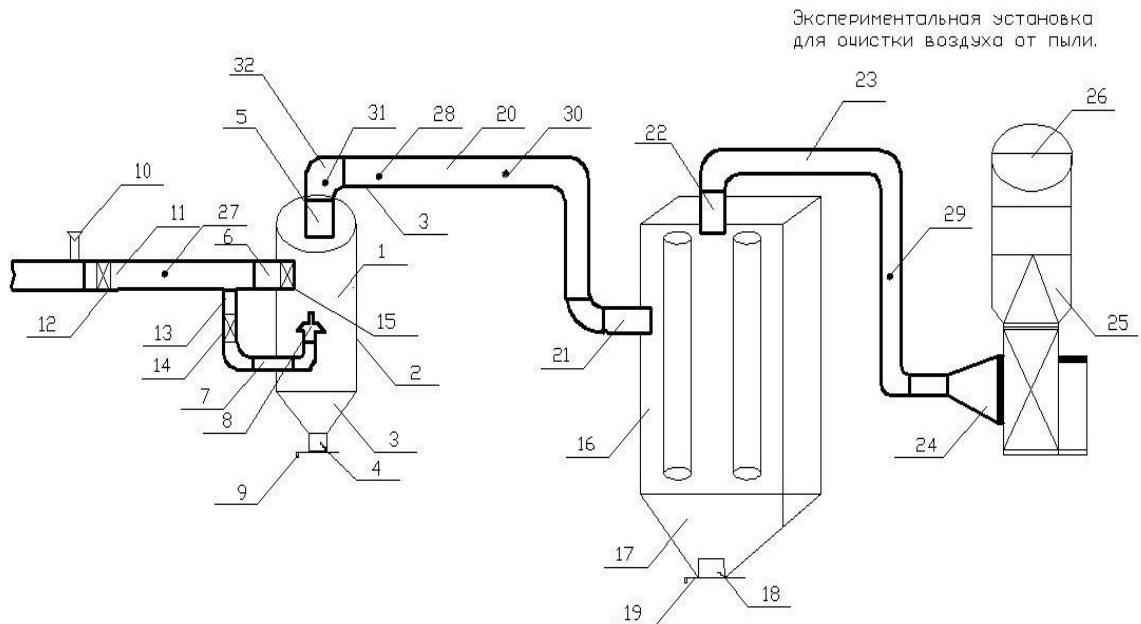
$$d_q = 20 \text{ мкм}, E_A = 0,9, \lambda = 20, k = 5, P_A = 0,937.$$

и для мелких частиц

$$d_q = 10 \text{ мкм}, E_A = 0,5, \lambda = 20, k = 5, P_A = 0,854.$$

Для зоны В вероятность массопереноса из патрубка В на корпус и в бункер аппарат определяется аналогично.

В третьей главе для экспериментальных исследований эффективности улавливания системы обеспыливания была разработана лабораторная установка с аппаратом ВЗП (рисунок 7). При использовании математической модели в виде полинома второго порядка был реализован полный факторный эксперимент типа 3^n .



(a)



(б)

Рисунок 7 – Экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли: Схема лабораторная (а) и фотоустановка (б), 1 – вихревой инерционный пылеуловитель со встречными закрученными потоками; 2 – цилиндрический корпус из органического стекла; 3 – конический бункер для приема уловленной пыли с осевым патрубком; 4 – выводы уловленной пыли с осевым патрубком; 5 – вывод чистого воздуха; 6 – верхний входной патрубок; 7 – нижний входной патрубок для подачи в пылеуловитель 1 пылевоздушной смеси; 8 – коническая отбойная шайба; 9 – первый выдвижной шибер; 10 – питатель для загрузки пыли; 11 – первый трубопровод; 12 – первая поворотная заслонка; 13 – второй трубопровод; 14 – вторая поворотная заслонка; 15 – улиточный завихритель; 16 – рукавный фильтр; 17 – конический бункер для приема уловленной пыли; 18 – патрубок уловленной пыли; 19 – второй выдвижной шибер; 20 – третий трубопровод; 21 – входной патрубок рукавного фильтра 16; 22 – выходной патрубок рукавного фильтра 16; 23 – четвертый трубопровод; 24 – всасывающий патрубок вентилятора 25; 25 – вентилятор; 26 – выходной патрубок вентилятора 25; 27 – шибер на первом трубопроводе для подключения контрольно измерительного прибора; 28 – штуцер на третьем трубопроводе для подключения первого контрольно измерительного прибора; 29 – штуцер на четвертом трубопроводе для подключения второго контрольно измерительного прибора; 30 – штуцер на третьем трубопроводе для подключения второго контрольно измерительного прибора; 31 – штуцер на третьем трубопроводе для подключения третьего контрольно измерительного прибора; 32 – сменный отвод.

В качестве варьируемых факторов были выбраны: L – общий расход газа в системе, $\text{м}^3/\text{час}$; K_H – доля расхода газа, подаваемого в аппарат через нижний ввод; C – относительная концентрация пыли в очищаемом потоке воздуха, равная концентрации пыли на входе в аппарат, отнесенной к $1 \text{ г}/\text{м}^3$. Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в табл. 2.

Таблица 2- Уровни и интервалы варьирования факторов

| Факторы | Интервалы варьирования | Уровни факторов | | |
|--|------------------------|-----------------|---------------|---------------|
| | | Нижний -1 | Основной 0 | Верхний +1 |
| X_1 – L- общий расход газа в системе $\text{м}^3/\text{час}$ | 60 | 120 | 180 | 240 |
| X_2 – K_H доля расхода газа, подаваемого в аппарат через нижний ввод | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 |
| X_3 – C- относительная концентрация поступающей пыли на очистку, отнесенная к $1 \text{ г}/\text{м}^3$ | 8 | 2 | 10 | 18 |

Результаты эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП для режима $L=2D$ представлены на рисунках 8 – 10 – 11.

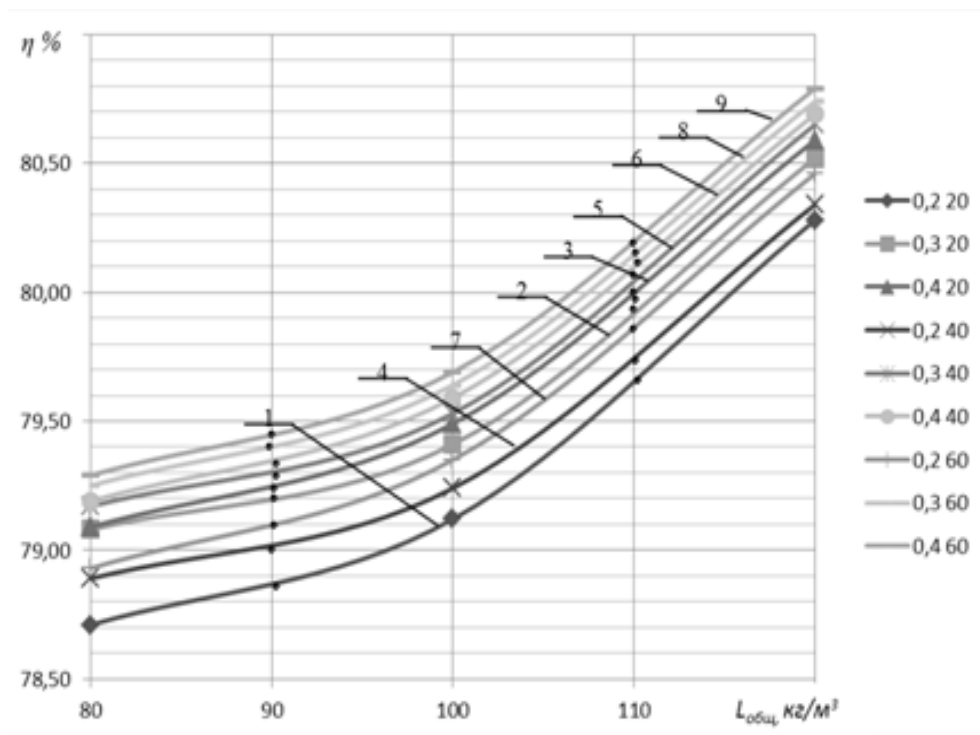


Рисунок 8 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода $L=300\text{мм}$ при:

$$\bar{C} = 20: 1 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,2; 2 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,3; 3 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,4;$$

$$\bar{C} = 40: 4 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,2; 5 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,3; 6 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,4;$$

$$\bar{C} = 60: 7 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,2; 8 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,3; 9 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,4;$$

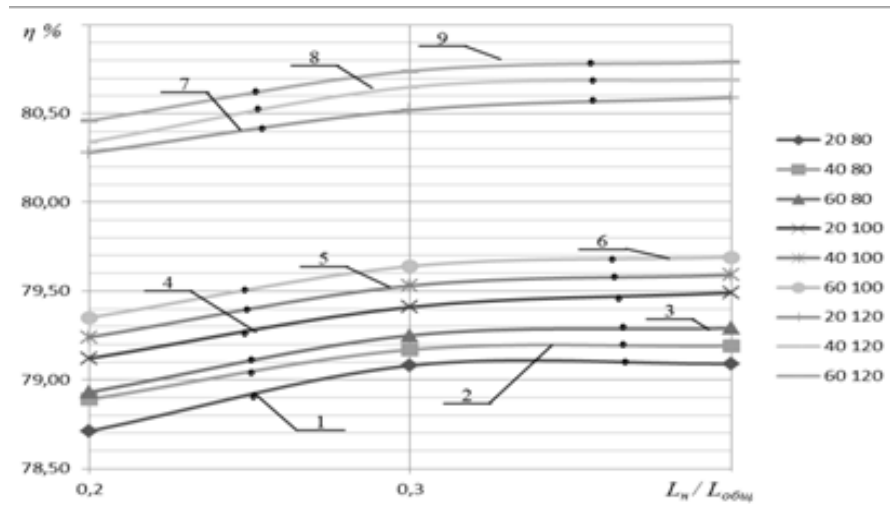


Рисунок 9 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода $L=300\text{мм}$ при:

$$L_{\text{общ}} = 80: 1 - \bar{C} = 20; 2 - \bar{C} = 40; 3 - \bar{C} = 60;$$

$$L_{\text{общ}} = 100: 4 - \bar{C} = 20; 5 - \bar{C} = 40; 6 - \bar{C} = 60;$$

$$L_{\text{общ}} = 120: 7 - \bar{C} = 20; 8 - \bar{C} = 40; 9 - \bar{C} = 60;$$

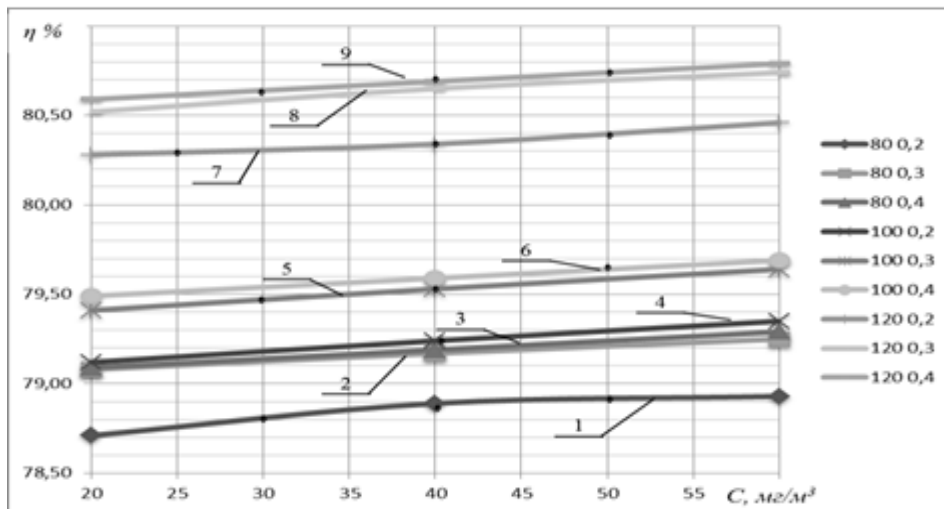


Рисунок 10 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода $L=300$ при:

$$L_{\text{общ}} = 80: 1 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,2; 2 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,3; 3 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,4;$$

$$L_{\text{общ}} = 100: 4 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,2; 5 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,3; 6 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,4;$$

$$L_{\text{общ}} = 120: 7 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,2; 8 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,3; 9 - L_n / L_{\text{общ}} = 0,4;$$

Уравнения регрессии будут иметь вид:

$$Y = 90.74 + 0.0374X_1 + 1.72X_2 + 0.00514X_3$$

$$Y = 90.74 - 5 \cdot L_{\text{общ}} + 14,2 \cdot L_n / L_{\text{общ}} - 2 \cdot \bar{C}$$

Воспроизводимость опытов проводилось по критерию Кохрена, значимость коэффициентов уравнений регрессии определялась по критерию Стьюдента, адекватность математической модели по критерию Фишера.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что оптимальным значением параметра длины нижнего патрубка является $l=2 \cdot d$, вследствие того, что низкое аэродинамическое сопротивление нижнего патрубка позволяет вторичному потоку входить в сепарационную камеру с оптимальными характеристиками закрутки. Определено, что при значении параметра длины нижнего патрубка $l=2 \cdot d$ оптимальное аэродинамическое сопротивление достигается в диапазоне значений $L_n/L_{общ} = 0,29 - 0,39$. Эффективность улавливания цементной пыли по данным эксперимента достигает 81%.

Экспериментально установлено, что использование в системах обеспылевания пылеуловителя ВЗП позволило уменьшить проскок пыли в установке на 20%.

В четвертой главе приведена схема разработанной экспериментальной установки (рисунок 7), которая защищена патентом (Пат. RU 2015140195/05(061736). Также проведено экспериментальное исследование 3х видов фильтровальных тканей получаем следующее уравнение регрессии:

$$\text{Для ткани Бельтинга : } \eta_{\text{бельтинг}} = 99,853 - 1,288 \overline{X_1} - 0,005 \overline{X_2} + 0,333 \overline{X_1^2} + 8,33 \cdot 10^{-5} \overline{X_2^2}$$

$$\text{Для ткани ФЛ-4 : } \eta_{\text{ФЛ-4}} = 99,164 - 0,854 \overline{X_1} + 0,0095 \overline{X_2} + 0,2 \overline{X_1^2} + 2,17 \cdot 10^{-12} \overline{X_2^2}$$

$$\text{Для ткани AERTES : } \eta_{\text{AERTES}} = 98,898 - 1,323 \overline{X_1} + 0,0139 \overline{X_2} + 0,1 \overline{X_1^2} - 4,167 \cdot 10^{-5} \overline{X_2^2}$$

Дисперсии аппроксимаций данных полиномом второй степени составляют: соответственно $R^2=0.977$, $R^2=0.975$, $R^2=0.9700$, что свидетельствует о высокой степени точности.

Результаты эксперимента показали, что максимальная эффективность улавливания мелкодисперсной пыли отмечается для ткани ФЛ-4, которая достигается при скорости фильтрации 0,5 м/мин. Разработаны рекомендации по совершенствованию системы обеспыливания технологического оборудования линии по производству цемента, например такие как: полная герметизация технологического оборудования с целью предотвращения подсосов воздуха, регулирование расходов воздуха удаляемого аспирационными установками, с целью снижения нагрузки по пыли на рукавные фильтры, в качестве предварительной ступени очистки использовать в системах обеспыливания аппараты на встречных закрученных потоках, для повышения устойчивости систем с вихревыми пылеуловителями использовать предварительное разделение потоков, для этого применять закручиватель вторичного потока и др. Определен эколого-экономический эффект от внедрения установки очистки воздуха от пыли с ап-

паратом ВЗП и рукавным фильтром, который составил 174,5 млн реал/год, что составило 384,835 руб./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано решение актуальной задачи обеспечения экологической безопасности на основе исследования пылевого фактора и совершенствования систем обеспыливания для снижения пылевых выделений PM_{10} и $PM_{2,5}$ на предприятиях по производству цемента.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы по работе:

1. Предприятия по производству цемента являются наиболее мощными источниками поступления загрязняющих веществ в рабочую зону и атмосферу. На этапах помола, обжига, транспортировки, загрузки, упаковки цемента в воздух выделяется большое количество пылевых выбросов. Содержание мелкодисперсной фракции пылевых выделений PM_{10} и $PM_{2,5}$ на разных этапах производства цемента составляет от 10 до 75%.

2. Анализ систем обеспыливания предприятий по производству цемента показал, что в условиях Республики Йемен перспективно использование инерционных аппаратов на встречных закрученных потоках для повышения эффективности работы системы и снижения нагрузки по пыли на рукавные фильтры.

3. Проведен анализ дисперсного состава пыли, выделяемой на различных этапах производства цемента, который показал, что в основном, в воздух рабочих зон предприятия и окружающую среду поступает мелкодисперсная пыль с размерами фракций менее 10 мкм.

4. На основании реализации вероятностно-стохастического подхода проведена оценка эффективности коэффициента проскока в аппаратах ВЗП. Получена регрессионная расчетная зависимость.

5. Разработана экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли цемента с использованием аппарата ВЗП и рукавного фильтра, на которую получен патент (Пат. RU 2015140195/05(061736)).

6. Сравнение результатов испытаний разработанной автором установки (патент РФ RU 2015140195/05(061736) и системы из одного фильтра показывает, что установка аппарата ВЗП стабилизирует работу фильтра при всех исследуемых тканях. Эффективности улавливания повышается и при высоких скоростях фильтраций до требуемых норм. Это приводит к снижению выбросов в атмосферу при повышенных расходах очищаемого газа.

7. Разработны рекомендации по совершенствованию системобеспыливания технологического оборудования предприятий по производству цемента в Республике Йемен.

8. Эколого-экономический эффект от внедрения установки очистки воздуха от пыли с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром, составил 384,835 руб./год.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$l_{отн}$ – относительная длина нижнего горизонтального патрубка a – конструктивный параметр ширины сечения тангенциального ввода; α – угол наклона патрубка тангенциального закручивателя; μ – коэффициент динамической вязкости; b – коэффициент диффузии пылевых частиц; $(\tau - \tau_0)$ – время нахождения частицы в аппарате λ – параметр разделения переменных; r_H – координата точки частицы, поступающей в аппарат; W_r, V_r – радиальные скорости частиц и газа; c – константа интегрирования, ΔP – аэродинамическое сопротивление, Па; ω – средняя по кромке выходного сечения нижнего ввода тангенциальная скорость, рад/с; η_{ci} – процент сепарирующихся частиц; D – диаметр пылеуловителя, мм; v – условная скорость в среднем сечении сепарационной камеры, м/с; K_H – соотношение расходов воздуха, подаваемого через нижний ввод аппарата и общего; K_c – соотношение концентрации пыли в потоках нижнего и верхнего ввода; δ – размер частиц, мкм; η_i – фракционная эффективность улавливания. $\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – численные коэффициенты, K – опытный коэффициент, ε – бесконечно малая относительно $K (R_H - R_T)$, R_H, R_T – радиусы аппарата и выхлопного патрубка.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе

«Web of science»:

1. **Редван, А. М.** Modelling of dust dispersion of emissions from expanded clay manufacturing in the atmosphere [Text] / Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, А. М. Редван [и др.] // Applied Mechanics and Materials. The 2nd International Conference Material, 2017. - Vol. 875. - P. 179-182.

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе «Scopus»:

2. **Редван, А. М.** Application of Swirling Flows in Aspiration Systems = Применение закрученных потоков в системах аспирации [Text] / В. Н. Азаров,

Д. П. Боровков, А. М. Редван // International Review of Mechanical Engineering (IREME). - 2014. - Vol. 8, № 4. - С. 750-753.

3. Experimental Study of Secondary Swirling Flow Influence on Flows Structure at Separation Chamber Inlet of Dust Collector with Counter Swirling Flows = Экспериментальные исследования влияния вторичного закрученного потока на структуру потоков на входе в сепарационную камеру пылеуловителя на встречных закрученных потоках [Text] / **А. М. Редван** [идр.] // International Review of Mechanical Engineering (IREME). - 2014. - Vol. 8, № 5. - С. 851-856.

4. Main Trends of Dust Conditions Normalizing at Cement Manufacturing Plants = Основные тенденции для пыли условия нормирования на цементных заводах-изготовителей [Text] / **А. М. Редван** [идр.] // International Review of Civil Engineering (IRECE). - 2015. - Vol. 6, № 6. - С. 145-150.

5. Efficiency of standards compliance for PM₁₀ and PM_{2,5} = Эффективность соблюдения стандартов для PM₁₀ и PM_{2,5} [Text] / **А. М. Редван** [и др.] // International Review of Civil Engineering (IRECE). - 2016. - Vol. 7, № 6. - С. 192-195.

6. Enhancing ecological safety in the process of construction and repair works applying dry building binder mixes = Повышение экологической безопасности в процессе строительства и ремонтных работ с применением сухих вяжущих строительных смесей [Text] / **А. М. Редван** [и др.] // International Review of Civil Engineering (IRECE). - 2016. - Vol. 7, № 6. - С. 164-167.

Работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях:

7. **Редван, А. М.** Оценка пророска пыли при обеспыливании выбросов в устройстве мокрой очистки в системах аспирации производства цемента [Текст] / А.М. Редван, С. А. Кошкарев, Л. Я. Соломахина // Инженерный вестник Дона. - 2014. - № 3. - Библиогр.: 20 назв. - Режим доступа: <http://www.ivdon.ru>.

8. **Редван, А. М.** Дисперсионный анализ пыли выбросов в системах аспирации производства цемента с использованием усовершенствованной экспериментальной установки [Текст] / А.М. Редван, С. А. Кошкарев, Л. Я. Соломахина // Инженерный вестник Дона. - 2014. - № 3. - Библиогр.: 20 назв. - Режим доступа: <http://www.ivdon.ru>.

9. Расчет вентиляционных выбросов цементных заводов [Текст] / **А. М. Редван** [идр.] // Вестн. Волгоград. гос. архитектур.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архитектура. - 2015. - № 40. - С. 4-17. - Библиогр.: с. 15 (16 назв.). - Рез. на англ. яз.: с. 15-17.

10. Анализ пылевого фактора вредного воздействия при производстве цемента [Текст] / **А. М. Редван** [и др.] // Вестн. Волгоград. гос. архитектур.-

строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архитектура. - 2017. - № 50. - С.310-320. - Библиогр.: с. 15 (16 назв.). - Рез. на англ. яз.: с. 15-17.

Патенты

11. Пат. RU 2015140195/05(061736); Российская Федерация. Экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли [Текст] / **А. М. Редван**[и др.]; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВПО ВолгГАСУ. - №2015140195; заявл. 21.09.2015; опубл. 13.01.2016; Бюл. № 10.

Отраслевые издания и материалы конференций

12. Исследования дисперсного состава пыли, выделяющегося при производстве цемента / **А. М. Редван** // Современная наука: теоретический и практический взгляд : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., (29-30 окт. 2013 г., г. Уфа). - Уфа : Изд-во РИЦ БашГУ, 2013. - Ч. 2. - С. 140-143.

13. Экспериментальное исследование процесса пылеулавливания пыли в аппарате с внешним тангенциальным закручивателем нижнего ввода / **А. М. Редван** // Роль технических наук в развитии общества : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 30 июня 2014 г. - Уфа : Изд-во Аэтерна, 2014. - С. 45-52.

14. Исследования дисперсного состава пыли, выделяющейся при производстве цемента / **А. М. Редван** // Проблемы охраны производственной и окружающей среды : сб. материалов и науч. тр. молодых инженеров-экологов. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2013. - Вып. 5. - С. 83-86.

15. **Редван, А. М.** Система обеспыливания линии производства цемента сухим способом / А. М. Редван, Н. В. Мензелинцева // Инженерно-экологические проблемы строительного комплекса региона : материалы Междунар. науч.-техн. конф., 3-4 июля 2014 г., г. Волгоград. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2014. - С. 159-161. - Библиогр.: с. 161.

16. **Редван, А. М.** Экспериментальное исследование эффективности улавливания пыли установки с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром / А. М. Редван // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : материалы II Всерос. науч.-техн. конф. молодых исследователей (с междунар. участием), Волгоград, 20-25 апр. 2015 г. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2015. - С. 131-134.

17. **Редван, А. М.** Организационно-технологические аспекты ресурсосбережения при строительстве объектов в республике Йемен / Ю. В. Гущина, А. М. Редван // Эффективные технологии и модели ресурсосбережения, энергосбережения и природопользования в ЖКХ и строительстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 26 мая 2014 г., Волгоград : в 2 ч. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2014. - Ч. II. - С. 19-23.

РЕДВАН АВАДХ МОХАММЕД МОХАММЕД

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛЕВОГО ФАКТОРА И РАЗРАБОТКА МИР
ПО СНИЖЕНИЮ ПЫЛЕВЫДЕЛЕНИЙ PM_{10} И $PM_{2,5}$
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
(НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ЙЕМЕН)**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и
городского хозяйства

Подписано в печать 05.02.2018 г. Заказ № 53 . Тираж 100 экз. Печ. л. 1,0.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Институт архитектуры и строительства
Волгоградский государственный технический университет
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1
Отдел оперативной полиграфии.