

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

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

Диссертация на соискание учёной  
степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Азаров Валерий Николаевич

Волгоград, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ технологического процесса производства цемента как источника загрязнения рабочей зоны и окружающей среды в условиях Республики Йемен.....	11
1.2 Исследование воздействия цементной пыли на организм человека предприятий по производству цемента.....	14
1.3 Анализ существующих систем обеспыливания предприятий по производству цемента.....	16
1.4 Опыт использования аппаратов ВЗП в системах обеспыливания .....	25
1.5 Теоретическое исследование коэффициента эффективности пылеулавливания аппаратов ВЗП.....	29
1.6 Выбор направления исследования.....	33
1.7 Выводы по первой главе.....	34
 ГЛАВА 2 СБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	 36
2.1 Совершенствование расчетной модели представления интегральной функции распределения массы частиц по диаметрам пыли в системах обеспыливания .....	36
2.2 Исследование дисперсного состава пыли в производстве цемента	38
2.3 Анализ аэродинамических характеристик цементной пыли, поступающей в воздушную среду .....	43
2.4 Исследование основных физико-химических свойств цементной	

пыли.....	46
2.5 Оценка эффективности локализирующих устройств в системах обеспыливания методами Богуславского-Азарова и Посохина .....	49
2.6 Оценка вероятности проскока доли частиц $PM_{10}$ и $PM_{2,5}$ в аппаратах ВЗП .....	53
2.7 Выводы по второй главе.....	58
 ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЦЕМЕНТА.....	60
3.1 Экспериментальные исследования осаждения частиц цементной пыли выбросов цементных заводов.....	60
3.2 Экспериментальные исследования пылеулавливающей установки	64
3.2.1 Описание экспериментальной установки.....	65
3.2.2 План проведения и методика эксперимента.....	68
3.2.3 Результаты экспериментальных измерений.....	71
3.2.4 Обработка полученных данных.....	74
3.3 Анализ результатов исследований.....	84
3.4 Выводы по третьей главе .....	86
 ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	87
4.1 Совершенствование системы обеспыливания технологического оборудования предприятия по производству цемента.....	87
4.2 Схема разработанной экспериментальной установки.....	90
4.3 Экспериментальные исследования эффективности улавливания рукавных фильтров.....	93
4.4 Совершенствование конструкций аппаратов ВЗП.....	98
4.5 Разработка рекомендаций по совершенствованию системы обеспыливания технологического оборудования линии по производству цемента.....	99

4.6	Эколого-экономический эффект применения разработанной системы очистки воздуха от пыли.....	100
4.7	Выводы по четвертой главе.....	105
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	121

## ВВЕДЕНИЕ

**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 относится 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** диссертационного исследования. Вопросами исследования пылевого фактора на предприятиях цементной 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,Al-Neaimi Y.I,MaslehuddinM., Al-AmoudiO.S., RahmanM.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 работы** состоит вповышении 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 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.

#### **Практическое значение работы:**

- 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 БЖДСиГХ ИАиС ВОЛГТУ 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.

### **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 конференция «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, индексируемой в «web of science», 5 статьях, индексируемой в «Scopus», 4 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендуемых ВАК России, 1 патент РФ на полезную модель.

**Объём 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.

## **ГЛАВА 1 СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ**

По данным CPCB (CentralPollutionControlBoard) [99,100,101,102,103]. цементная промышленность входит в число 17 наиболее вредных для окружающей среды производств. Мировое производство цемента с каждым годом увеличивается, а соответственно растет и количество выбросов вредных веществ. Среди веществ, содержащихся в выбросах предприятий по производству цемента можно выделить: пыль цемента, извести, газообразные выбросы CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, диоксины и др. Наиболее опасным вредным веществом, содержащимся в выбросах цементных заводов, является пыль цемента, образующаяся при обжиге сырьевой смеси сухим способом, т.к. содержание мелкодисперсной фракции менее 10 мкм на разных этапах производства цемента составляет от 10 до 75%.Особенно остро стоит проблема загрязнения атмосферы твердыми частицами в странах, расположенных в пустынных и полупустынных зонах, так например, в цементной промышленности Йемена при производстве 1 т цемента образуется 0,14 т пыли[21,76].

### **1.1. Анализ технологического процесса производства цемента как источника загрязнения рабочей зоны и окружающей среды в условиях Республики Йемен**

Одним из наиболее востребованных на рынке строительных материалов является цемент. Цементное производство считается одним из наиболее влиятельных факторов для развития экономической деятельности государства и становления промышленности строительных материалов. Во всем мире

ежегодно увеличивается его потребление и производство. Анализ литературных источников [19-91, 54] позволил сделать вывод о том, что при производстве цемента, в рабочие зоны предприятий и окружающую среду выделяется значительное количество пыли. Производственный процесс изготовления цемента в Республике Йемен на различных этапах производства схож с производством цемента в России. Современным, с точки зрения экономии энергетических ресурсов, является производство цемента по сухому способу, но в тоже время на различных этапах производства в воздух рабочих зон предприятия и в атмосферу поступает большее количество твердых частиц. В Республике Йемен цемент производится только по сухому способу.

При этом способе производства цемента выбор схемы зависит от состава сырья и его физико - химических свойств. Сырье добывают в карьере, расположенном недалеко от производства. Затем самосвалами доставляется до линии, транспортирующей сырье на предприятие (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Добыча и транспортировка сырья в Республике Йемен г. Амран

На рисунке 1.2 представлена технологическая схема изготовления цемента по сухим способом [21,53,101,102,103].

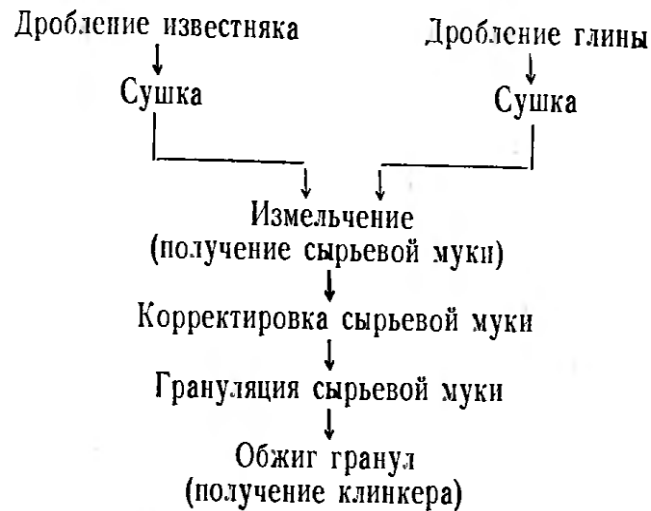


Рисунок 1.2 –Технология изготовления цемента сухим способом

Производство цементного клинкера включает следующие виды операций. После дробления сырье высушивают до влажности примерно 1%, после чего измельчают до состояния сырьевой муки. Помол и сушку сырьевой смеси производят в сепараторных мельницах. Такой способ производства является наиболее эффективным и используется на большинстве предприятий, работающих по сухому способу.

Сырьевую смесь с определенным составом компонентов получают посредством добавления компонентов сырья в мельницу, с последующим регулированием состава исходной шихты в специализированных силосах, куда дополнительно подается сырьевая мука с определенным содержанием карбоната кальция.

Затем сырьевая смесь поступает в циклонные теплообменники и последовательно проходя через ступени циклонов попадает во вращающуюся печь, где происходит процесс обжига сырьевой смеси и получение цементного клинкера. Затем клинкер поступает в клинкерный холодильник, где после остывания перенаправляется на склад.

Иногда цементный клинкер после остывания в холодильнике поступает сразу в цементные мельницы, которые располагаются в цехе помола.

Предварительно клинкер измельчают совместно с гипсом и другими добавками, необходимыми для получения портландцемента с заданными свойствами. Из цеха помола цемент системой пневмотранспорта подается на склад в цементные силосы. Откуда производится отгрузка цемента либо в фасованном виде - бумажные мешки по 50 кг, либо навалом в специальные автоцистерны, либо в железнодорожные вагоны.

Литературный обзор показал [21, 53, 94,99], что при производстве цемента наибольший вклад в загрязнение воздуха рабочих зон предприятия и окружающей среды вносят следующие источники: печи, размольные, сушильные, и дробильные установки, упаковочные машины цемента, места погрузки цемента в железнодорожные вагоны и автотранспорт.

Следует также отметить, что повышенные значения запыленности воздуха на предприятиях по производству цемента, приводят к потерям сырья и готового продукта, а также негативно влияют на здоровье работников отрасли и окружающую среду.

## **1.2. Исследование воздействия цементной пыли на организм человека предприятий по производству цемента**

Ежегодные медицинские профосмотры работников цементной промышленности показали, что они входят в группу высокого риска по заболеваниям дыхательных путей. На производстве работники вдыхают цементную пыль в большом количестве и продолжительно по времени. Пыль может длительное время задерживаться в дыхательных органах [85-4]. Если не эффективно работают системы аспирации и обеспыливания, то последствия могут быть весьма серьезными: со временем, слизистая оболочка потеряет способность задерживать пыли, и пыль начинает попадать прямо в легкие, где вызывает необратимые изменения в легочных тканях.

Частицы диаметром от 3 до 10 мкм могут распространяться по всему трахеобронхиальному дереву. Частицы диаметром от 0,1 до 3 мкм в основном оседают в альвеолах, а частицы менее 0,1 мкм остаются в потоке воздуха и выдыхаются.

Проводимые в последние десятилетия исследования показали, что цементная пыль при попадании в дыхательные пути может вызывать изменения легочной ткани, что в последствии приводит к необратимым функциональным изменениям легких. Пневмокониоз, возникающий в результате длительного воздействия цементной пыли, провоцируется диоксидом кремния. Также у рабочих цементной промышленности встречается хронический бронхит. Научные исследования, в том числе и проводимые ВОЗ, подтверждают связь между запыленностью воздуха мелкодисперсными частицами и отклонениями в состоянии здоровья людей, включая хронические заболевания верхних дыхательных путей, одышку, болевой синдром во время дыхания и даже случаи преждевременной смерти [43, 8].

Производители портландцемента стремятся к наиболее тонкому помолу и к большей однородности смеси. В связи с этим возникает опасность поступления в рабочие зоны и окружающую среду частиц пыли с размерами менее 10 мкм, наиболее опасных для здоровья человека. Известно [89], что пыль вдыхаемая человеком задерживается на слизистой оболочке носа, и верхних дыхательных путей, и только незначительная часть (примерно 10%) достигает бронхиол и альвеол, где подвергается фагоцитозу. Откуда пылинки могут проникать в лимфатическую систему легких, и задерживаясь там, могут являться причиной развития патологических процессов.

Пыль диаметром меньше 10 мкм может достигать трахеобронхиальные областей дыхательного тракта. Частицы пыли размером 2-3 мкм и меньше могут достигнуть альвеол в периферии легкого, поэтому они рассматриваются как вдыхаемая пыль. В зависимости от физико-химических свойств компонентов смеси отмечены случаи возникновения у работников цементной

промышленности пневмокониоза или силикоза. Также встречаются такие заболевания как астма, разновидности бронхитов, сращения тканей плевры, воспалительные процессы хронического характера, а также возникновение полипов в слизистой носа. Кроме того, отмечаются случаи выявления язвы желудка и двенадцатиперстной кишки, возникновение которых, вероятнее всего, обусловлено специфическим воздействием цементной пыли на слизистую желудочно–кишечного тракта [89]. Для того, чтобы избежать неприятных последствий на производстве, медики в первую очередь, рекомендуют сотрудникам использовать средства индивидуальной защиты – респираторы. Регулярные медосмотры помогут предотвратить, вовремя диагностировать и вылечить возникающие проблемы со здоровьем.

### **1.3 Анализ существующих систем обеспыливания предприятий по производству цемента**

Производственный технологический процесс на предприятиях цементной отрасли сопровождается значительным поступлением пыли в атмосферу (от 10 до 20 м<sup>3</sup> запыленных газов на 1 кг получаемого цемента). По существующим нормативам ПДК в воздухе производственных помещений не должна превышать 2—6 мг/м<sup>3</sup> (2 мг/м<sup>3</sup> — при содержании в пыли более 10% свободного кремнезема, 4 мг/м<sup>3</sup> — при содержании его менее 10% и 6 мг/м<sup>3</sup> — при полном отсутствии кремнезема) [11].

Исследования показывают [96], что при производстве цемента сухим способом величина запыленных газов, удаляемых из современных печей, сократилось на 25-45 %, но при этом температура их достигает 350-400 °С, а непосредственно масса дисперсной пыли на 1 тонну цементного клинкера составляет 50-120 кг.



По данным [96], количество клинкерных частиц в сухом горячем воздухе, (с температурой 150-290°C) выходящем из клинкерного холодильника составляет на каждую тонну клинкера 7-10 кг.

В России для снижения концентрации газов отходящих от печей работающих по мокрому способу производства применяют в основном электрофильтры различного типа. Обычно электрофильтры устанавливают снаружи здания между пылесадительной камерой печи и дымовой трубой (рисунок 1.3).

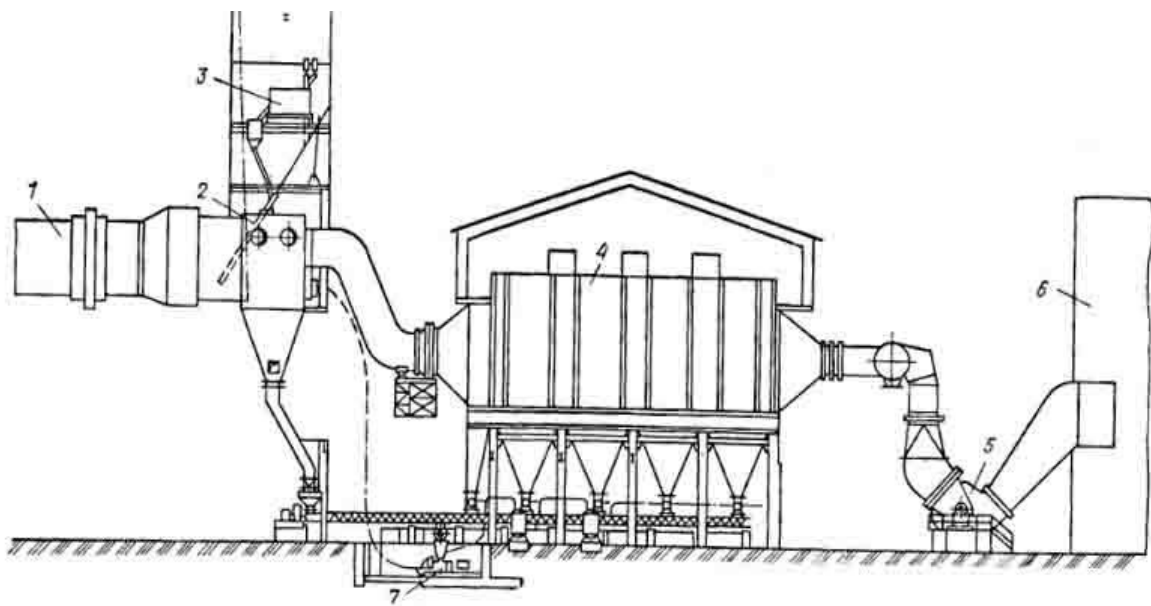


Рисунок. 1.3 - Схема очистки отходящих газов вращающейся печи электрофильтром [17]: 1 – печь; 2 – пылесадительная камера; 3 – шламопитатель; 4 – электрофильтр; 5 – дымосос; 6 – дымовая труба; 7 – пневмовинтовой насос.

Пыль цемента, является готовым продуктом, поэтому уловленная электрофильтром пыль, при помощи пневмовинтового насоса, по трубопроводу возвращается в печь. Если температура уходящих газов превышает допустимую для электрофильтров, то либо совершенствуют цепную завесу печи, либо применяют высокотемпературные электрофильтры, которые допускают эксплуатацию при температуре газов до 400 °С. Условиями для выбора электрофильтра являются – 1) скорость газов в нем не

должна превышать 1,2 м/с; 2) время пребывания запыленных газов в активной зоне электрофильтра должно быть не менее 8 с.

При отклонении работы оборудования от оптимального режима можно прогнозировать увеличение объема запыленных газов (до 20 %). Эффективность работы подобной системы при концентрации запыленных газов при входе в электрофильтр 10 – 20 г/м<sup>3</sup> составляет 98-99 %, что дает значение проскока пыли в пределах 0,10 – 0,5 г/м<sup>3</sup>. Такая степень эффективности очистки может быть недостаточной, т.к. не учитывается, что надежность, и коэффициент использования электрофильтров ниже по сравнению с вращающимися печами и колосниковыми холодильниками, что и приводит к снижению эффективности пылеулавливания.

Поэтому рекомендуется для обеспыливания газов использовать двухступенчатые системы очистки, где на первой ступени очистки устанавливать инерционные пылеуловители, например, циклоны с эффективностью улавливания крупной пыли (свыше 20 мкм) до 80 %, а в качестве второй ступени – новые, современные электрофильтры, которые допускают работу при температуре газов до 330 °С.

Вращающиеся печи сухого способа производства могут быть короткими и длинными с запечными теплоутилизаторами и без таковых. В качестве запечных теплоутилизаторов могут быть использованы многоступенчатые циклонные теплообменники, винтовые теплоутилизаторы, концентраторы шлама, конвейерные концентраторы [44]. Наиболее эффективными являются короткие вращающиеся печи с запечными утилизаторами тепла как правило, уходящие газы таких печей обеспыливают в двухступенчатых пылеулавливающих установках. На первой ступени очистки используют - циклоны, а на второй электрофильтры, или рукавные фильтры с рукавами из гидрофобизированной и графитизированной стеклоткани.

Мелкодисперсная пыль имеет такое удельное электрическое сопротивление, при котором эффективность работы электрофильтров составляет 75-80 %, что требует дополнительного увлажнения газов на выходе

из циклонов и перед подачей их в электрофильтры. Обычно для этой цели применяют специальные скрубберы – стабилизаторы, в которых используют на входе специализированноегазораспределительное оборудование и ряд форсунок, которые распыляютжидкостьгазовоздушном потоке под давлением 2-3 МПа. Такие установки для увлажнения и охлаждения печных газов нашли применение как в России, так и за ее пределами (рисунок 1.4).

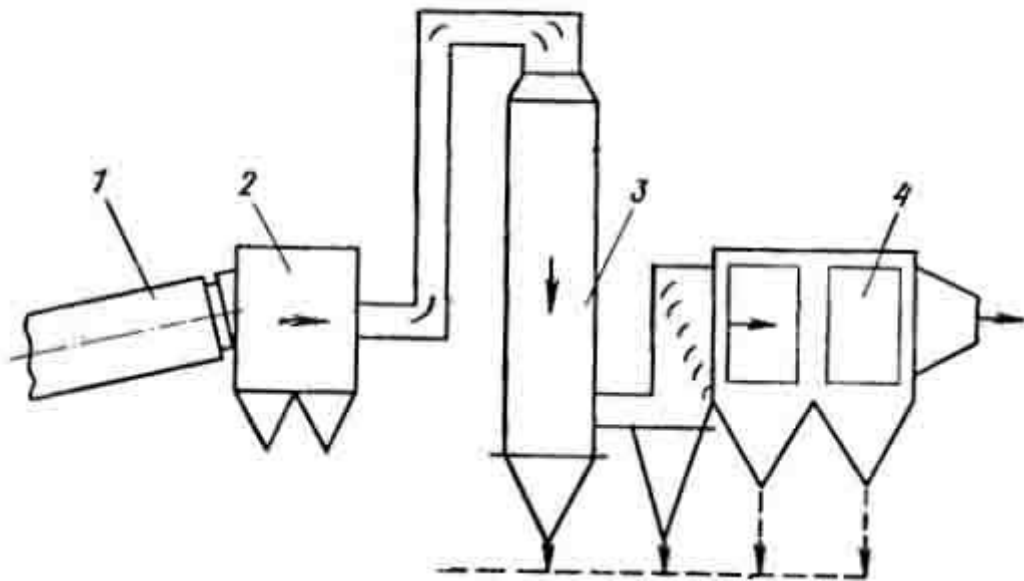


Рисунок1.4 –Запечная система обеспыливания линии производства цемента сухим способом: 1 – печь; 2 – циклоны; 3 – скруббер-стабилизатор; 4 – электрофильтр

На некоторых предприятиях цементной промышленности применяют кстановки испарительного охлаждения отходящих газов в газоходах вертикального типа перед входом в электрофильтр (рисунок1.5) [17].

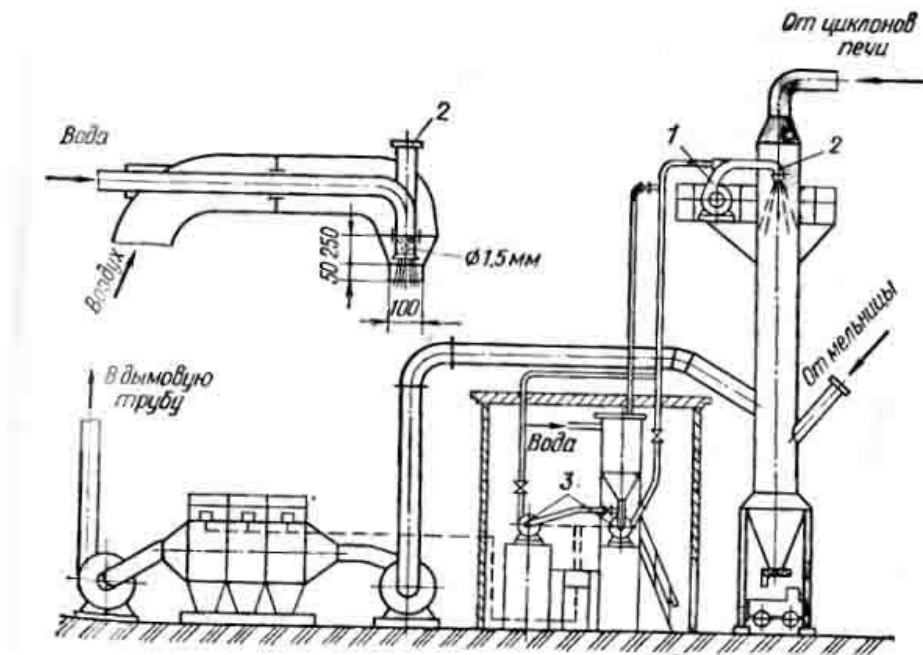


Рисунок. 1.5 - Схема испарительного охлаждения пылегазового потока от вращающейся печи:

1 – насос; 2 – форсунка; 3 – насосы.

Изменение влажности и снижение температуры газов, отходящих от вращающихся печей работающих по сухому способу производства, а также от клинкерных холодильников, как правило, производят в сушильно-дробильном или в сушильно-помольном оборудовании (рисунок 1.6) [17], используя теплоту уходящих газов для сушки влажных компонентов сырьевой смеси. Если влагосодержание и степень нагретости газов не соответствуют требуемым значениям, то газы сначала увлажняют кондиционером перед подачей их в сырьевую мельницу (рисунок 1.7) [17].

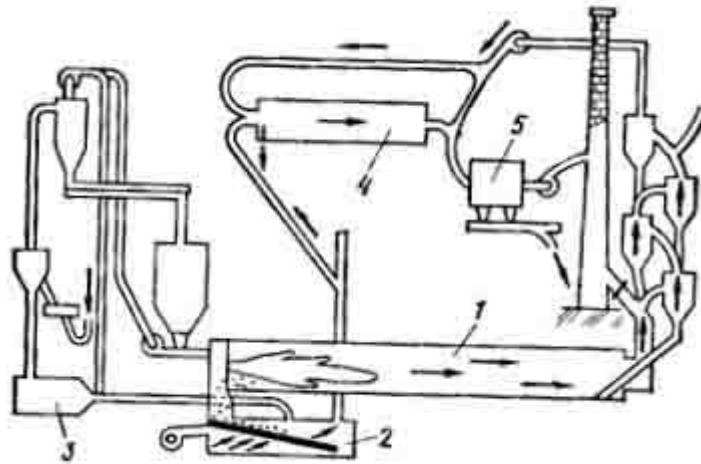


Рисунок 1.6 - Система обеспыливания технологического оборудования производства цемента сухим способом (стрелками показано направление движения потока газов): 1 – печь; 2 – колосниковый холодильник; 3 – угольная мельница; 4 – сырьевая мельница; 7 – электрофильтр.

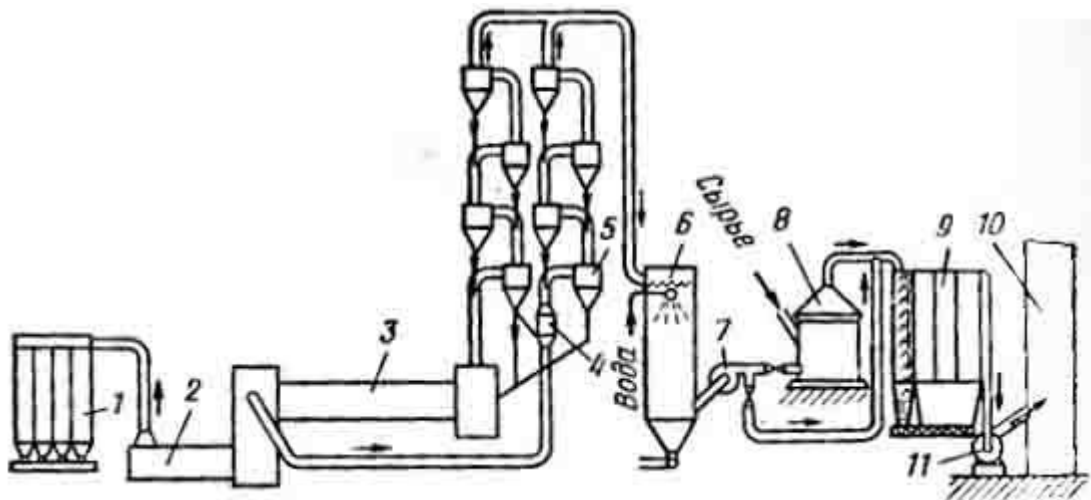


Рисунок 1.7 – Система обеспыливания вращающейся печи, клинкерного холодильника, сырьевой мельницы:

1 – рукавный фильтр; 2 – клинкерный холодильник; 3 – вращающаяся печь; 4 – декарбонизатор; 5 – циклонные теплообменники; 6 – кондиционер; 7 – дымосос печи; 8 – сырьевая мельница (валковая); 9 – электрофильтр; 10 – дымовая труба; 11 – вентилятор мельницы.

Подобную систему обеспыливания уходящих газов используют на мощных печах для получения клинкера сухим способом с производительностью более 3000 т/сут, и на тех, которые работают на одной линии с сырьевыми сушильно-помольными установками.

Установка для улавливания пыли представляет собой: электрофильтр со встроенными жалюзьями или прямоточно-циклонными элементами, на которых осаждается 80 % поступающей пыли. Распыливание воды при охлаждении отходящих газов осуществляют специальными форсунками при давлении 0,5-1 МПа. Скорость очищаемых газов в зоне электрофильтра должна находиться в пределах 0,8-1 м/с. При охлаждении и увлажнении уходящих газов эффективность обеспыливания в электрофильтрах может достигать 99 %.

Обеспыливание газов уходящих от колосниковых холодильников клинкера происходит с использованием в качестве пылеулавливающих аппаратов зернистых или рукавных фильтров, а также электрофильтров. Для повышения работы электрофильтров, а также для снижения удельного электрического сопротивления пыли применяют метод увлажнения газов (рисунок 1.8) [17].

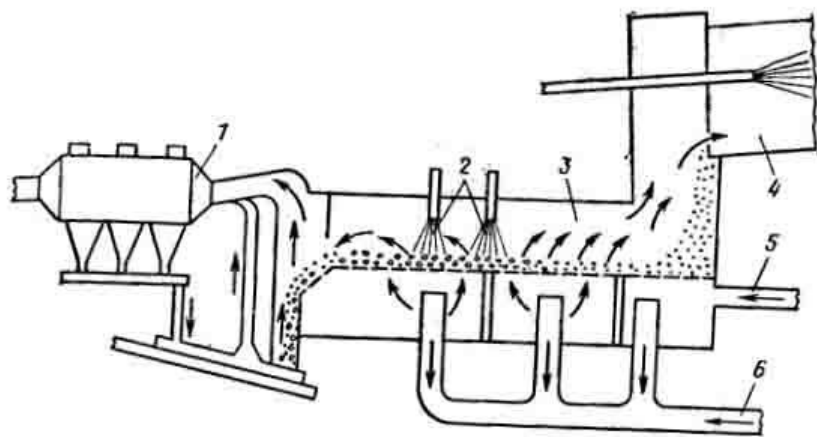


Рисунок. 1.8 - Схема изменения влажности воздуха отходящего от клинкерного холодильника печи перед входом в электрофильтр:

- 1 – электрофильтр; 2 – подача воды; 3 – холодильник; 4 – печь;  
5 – острое дутье; 6 – общее дутье.

В такой схеме увлажнения используют центробежные механические форсунки с винтовыми завихрителями, которые оборудованы специальной защитой из металла, предохраняющей от контакта с горячим потоком воздуха, куда подается воздух от вентилятора острого или общего дутья. Диаметр выходных отверстий форсунок около 6 мм.

Данная установка оснащена автоматикой, в частности, поступление воды в холодильник прекращается при остановке печи или холодильника, либо при снижении температуры воздуха, отходящего из холодильника, ниже определенного значения.

Высокая запыленность воздуха (до  $500 \text{ г/м}^3$ ), и повышенное значение УЭС и относительно низкое влагосодержание пылегазового потока создают определенные трудности при использовании электрофильтров в качестве обеспыливающего оборудования. Поэтому широкое распространение, как в России так и в Республике Йемен получили схемы с применением высокопроизводительных рукавных фильтров.

Рукавные фильтры применяют как одну из ступеней очистки в составе систем обеспыливания, так и отдельно установленное пылеочистное оборудование. Поскольку воздух, удаляемый от технологического оборудования при производстве цемента, имеет повышенную запыленность, то на рукавные фильтры могут поступать большие потоки запыленного воздуха. Это может приводить к колебаниям объемов воздуха, удаляемого от оборудования, повышенному аэродинамическому сопротивлению, а также к истиранию рукавов в местах крепления и их обрыву. Поэтому целесообразно использовать рукавные фильтры на второй ступени очистки, после очистки воздуха в пылеуловителях инерционного типа. На рисунке 8 представлена схема двухступенчатой очистки аспирационного воздуха мельниц с применением рукавного фильтра [98].

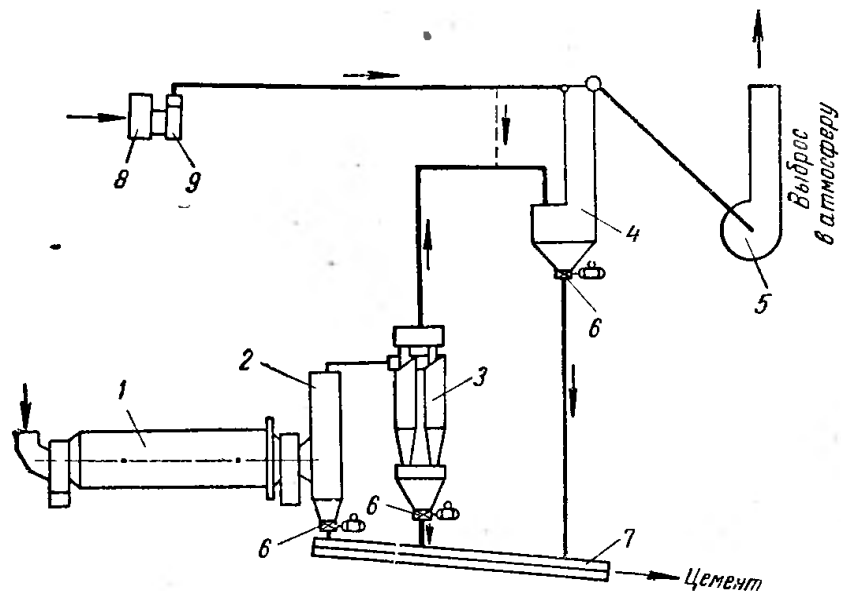


Рисунок 1.9 - Схема двухступенчатой очистки аспирационного воздуха с применением рукавного фильтра: 1- цементная мельница, 2- аспирационная коробка шахтного типа, 3-батарея циклонов, 4- рукавный фильтр, 5- вентилятор, 6- шлюзовый затвор, 7-шнек, 8- калорифер, 9- вентилятор обратной обдувки газов.

В цементной промышленности республики Йемен наиболее распространенным оборудованием при обеспыливании газов являются рукавные фильтры, при эксплуатации которых приходится сталкиваться с некоторыми сложностями. Связаны они, в основном с проскоком пыли на начальном этапе фильтрования, забиванием пор ткани и как следствие, повышенном аэродинамическом сопротивлении. Кроме этого, отмечаются нестационарные выбросы пыли в рабочие зоны предприятия, в момент срывов рукавов, которые иногда происходят в периоды их регенерации. Случается это вследствие истирания ткани в местах крепления рукавов к металлическому каркасу.

Анализ существующих систем обеспыливания предприятий цементной промышленности показал, что наиболее распространенным оборудованием, применяемым для улавливания цементной пыли на предприятиях отрасли в России являются электрофильтры. Поскольку этот способ



обеспыливания является достаточно энергозатратным и дорогостоящим, это делает невозможным использование его на предприятиях в республике Йемен. Поэтому представляется интересным провести анализ более экономичных и не менее эффективных аппаратов и систем для обеспыливания воздуха, например аппаратов инерционного типа.

#### **1.4. Опыт использования аппаратов ВЗП в системах обеспыливания**

Среди большого разнообразия установок инерционного типа в последние годы все более широкое применение для очистки пылевых выбросов промышленных предприятий находят аппараты на встречных-закрученных потоках (ВЗП) [7,23,24, 83,84]. Большое разнообразие конструкций этих пылеуловителей обусловило широкое применение их в инженерно-экологических системах на предприятиях различных отраслей промышленности. Разработкой и совершенствованием аппаратов на встречных-закрученных потоках занимались многие ученые и исследователи. Среди которых можно отметить: Сажина Б.С., Латкина А.С., Богуславского Е.И., Азарова В.Н., Гудима Л.С., Кутепова А.М., Лукачевского Б.П., Чувпило Е.А., Кошкарева С.А., Боровкова Д.П., Сергину Н.М., Луканина Д. и других. [12,13,14,15,25,33,34,61,65,67,74,75,76]. Этими учеными были разработаны разнообразные конструкции аппаратов на встречных-закрученных потоках, и исследованы механизмы пылеулавливания.

Работа аппаратов ВЗП заключается в следующем. Аппарат ВЗП состоит из корпуса цилиндрической формы, который включает в себя два входа для встречных пыле-воздушных потоков (верхний и нижний) и сборник пыли как правило цилиндрической формы [7].

Запыленный воздух вводится в аппарат сразу по двум вводам: первый поток по патрубку расположенному в нижней части установки, который содержит завихритель, а другой поток – по патрубку, в верхней части

пылеуловителя, где расположен выход очищенного воздуха [7]. Воздух содержащий частицы пыли подкручивается завихрителем, и центробежные силы действующие на частички пыли отбрасывают их к стенкам аппарата, где они попадают в зону где вращается вторичный поток. Взаимодействие потоков газа приводит к увеличению центробежных сил, действующие на частицы пыли, которая эффективно отбрасывается и, достигая стенки цилиндрического корпуса, направляется в нижнюю часть аппарата (пылесборник) под отбойную шайбу. Очищенный воздух отводится через патрубок, расположенный вверху аппарата. Внутри аппарата ВЗП потоки вращаются в одном направлении [7].

Степень очистки запыленного воздуха в пылеотделителях ВЗП зависит от величины центробежной силы, которая отбрасывает твердые частицы пыли из потока газа, поэтому многие конструкторы при разработке аппаратов ВЗП большое внимание уделяют конструктивным особенностям оформления мест ввода первичных и вторичных потоков запыленного воздуха, а также разработке конструктивных элементов, которые позволяют увеличить закрученность потоков.

Анализ литературных источников [7,69,29,88] показал большое разнообразие конструкций аппаратов ВЗП, используемых в системах обеспыливания, аспирации и пневмоуборки предприятий различных отраслей промышленности. Так авторами [68], например разработана конструкция аспирационной установки которая включает местные аспирационные отсосы, пылеулавливающее устройство, вентилятор, аппарат мокрой очистки и дымовую трубу (рисунок 9). Пылеулавливающее устройство выполнено в виде двух вихревых инерционных пылеуловителей, к входам которых подключены местные аспирационные отсосы от технологического оборудования. Верхние выходы пылеуловителей объединены, а нижние выходы подключены к пылевому бункеру.

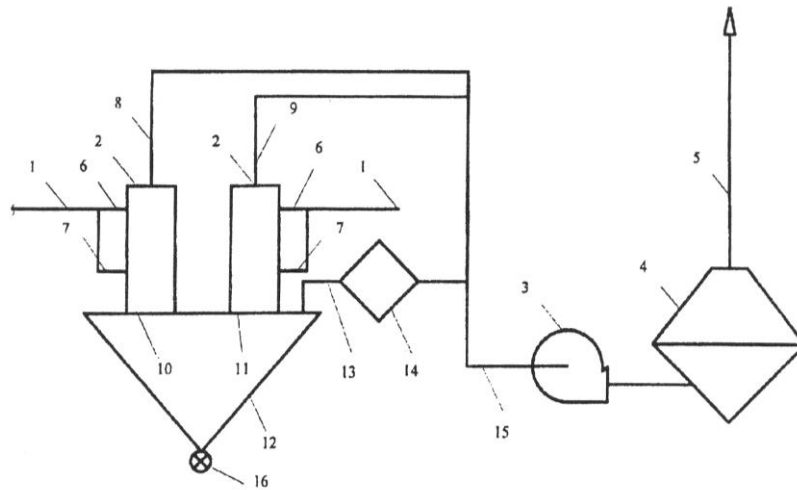


Рисунок. 1.10 - Аспирационная установка конструкции Азарова В.Н. и др.

Конструкция позволяет значительно повысить степень очистки запыленного воздуха за счет многоступенчатой очистки в двух вихревых пылеуловителях и в аппарате мокрой очистки, кроме этого воздух из бункера пылеуловителей очищается в рукавном фильтре. Это повышает эффективность работы аспирационной установки. Для улучшения условий оседания частиц и предотвращения уноса уловленной пыли в бункере создается разрежение путем организации байпасной линии из зоны аэродинамического застоя бункера к всасывающему отверстию вентилятора. Это значительно повышает эффективность очистки.

Авторами Азаровым В.Н. и Черевиченко Е.О. разработан двухступенчатый вихревой пылеуловитель [69], предназначенный для улавливания пылевидных выбросов, характеризуемых большой слеживаемостью пыли.

Аппараты ВЗП реагируют на изменения соотношений расходов воздуха которые подаются на оба входы в аппарат, поэтому требуются поддержание оптимального значения этих параметров (рисунок 1.11).

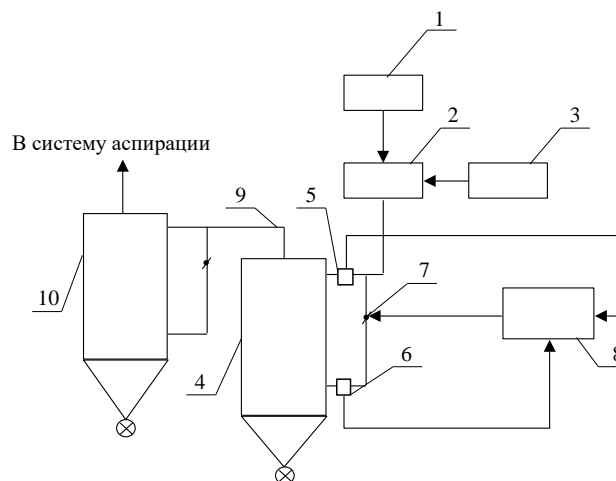


Рисунок 1.11 - Двухступенчатый пылеуловитель конструкции Азарова  
В.Н., Черевиченко Е.О.

Для поддержания оптимального значения расходов воздуха, подаваемого на нижний и верхний ввод пылеуловителя первой ступени, в данной конструкции подача пылевоздушной смеси осуществляется с помощью сжатого воздуха. Расход воздуха на верхний и нижний вводы регулируется системой управления с интеллектуальным фази модулем, выходом которой является перемещение регулирующего устройства. Это обеспечивает устойчивую работу пылеуловителя и повышает эффективность очистки.

Обзор литературных источников показал, что системы обеспыливания с аппаратами ВЗП обладают рядом преимуществ, по сравнению с системами с использованием других инерционных пылеуловителей [28,29,22]. Так в аппаратах ВЗП более четко организована закрутка запыленного потока газа, посредством ввода вторичного закрученного потока. Кроме того, вихревые пылеуловители эффективны при улавливании пыли с размерами частиц менее 20 мкм [22].

Кроме того, проводя сравнительную оценку параметров работы аппаратов ВЗП и, например, циклонов, отмечается, что при одинаковой эффективности очистки у аппаратов ВЗП отмечается ряд преимуществ. Так, вихревые пылеуловители очищают в два раза больше расхода воздуха при меньших

затратах энергии, и конструктивные размеры аппаратов ВЗП характеризуются более компактными размерами [46].

### 1.5 Теоретическое исследование коэффициента эффективности пылеулавливания аппаратов ВЗП

Основным параметром, характеризующим эффективность его работы является степень очистки  $\eta$  [27,35,39,41,42,52,59]. Этот показатель определяется отношением количества уловленной пыли к массе пылевых частиц, поступающих в аппарат с пылегазовым потоком, за определенный отрезок времени. На показатель эффективности очистки ориентируются при выборе аппаратов очистки в соответствии с требованиями к количеству твердых частиц содержащихся в воздухе после очистки.

$$\eta = \frac{M_{\text{ул}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100 = \frac{M_{\text{вх}} - M_{\text{вых}}}{M_{\text{вх}}} \cdot 100 = \frac{M_{\text{ул}}}{M_{\text{ул}} + M_{\text{вых}}} \cdot 100 = \frac{C_{\text{вх}} Q_{\text{вх}} - C_{\text{вых}} Q_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}} Q_{\text{вх}}} = 1 - \frac{Q_{\text{вых}} C_{\text{вых}}}{Q_{\text{вх}} C_{\text{вх}}}, (1.1)$$

где  $M_{\text{вх}}$ ,  $M_{\text{ул}}$ ,  $M_{\text{вых}}$  – массы частиц, которые содержатся в воздухе до их попадания в аппарат, уловленных внутри аппарата и в воздухе на выходе из аппарата;

$C_{\text{вх}}$  и  $C_{\text{вых}}$  – средняя концентрация пылевых частиц в воздухе на входе и выходе из аппарата;

$Q_{\text{вх}}$  и  $Q_{\text{вых}}$  – расход воздуха, на входе и выходе из аппарата.

Равенство количества воздуха, поступающего и удаляемого из аппарата, говорит об отсутствии подсосов воздуха, в этом случае справедливо соотношение [92,93]:

$$\eta = 1 - \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100. (1.2)$$

В случае если несколько аппаратов очистки объединены в одну установку, суммарная степень очистки составит:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n), \quad (1.3)$$

где  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  — степень очистки запыленного воздуха соответственно в первом, втором и n-ом пылеуловителе.

В случае, когда при определении степени очистки аппарата для взвешенных частиц известны фракционные эффективности улавливания пыли, можно воспользоваться формулой [93]:

$$\eta = \frac{\eta_{\delta 1} \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\delta 2} \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{\delta n} \Phi_n}{100}, \quad (1.4)$$

где  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  — количество пыли определенной фракции на входе в аппарат, %.

Фракционная эффективность очистки  $\eta_\sigma$  выражается формулой [45]:

$$\eta_\sigma = \frac{\Phi_{\text{вх}} - \Phi_{\text{вых}} (1 - \eta)}{\Phi_{\text{вх}}}, \quad (1.5)$$

где  $\Phi_{\text{вх}}, \Phi_{\text{вых}}$  — содержание определенной фракции в воздушном потоке соответственно на входе и на выходе из аппарата, %.

В ряде случаев при построении кривой фракционной эффективности пылеуловителя в вероятностно-логарифмической сетке, она принимает вид прямой линии, что говорит, о том, что она логарифмически нормально распределена и поэтому может быть записана в виде интеграла вероятности [93]:

$$\eta_\sigma = \int_{-\infty}^{\lg(d_\delta / d_{50})} \frac{1}{\lg \sigma_\eta \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\lg^2(d_\delta / d_{50})}{\lg^2 \sigma_\eta}} d \left[ \lg \frac{d_\delta}{d_{50}} \right], \quad (1.6)$$

где  $\lg(d_\delta / d_{50})$  — логарифм отношения текущего размера частиц  $d_\delta$  к медианному диаметру частиц  $d_{50}$ ;

$\lg \sigma_\delta$  — стандартное отклонение функции распределения.

В случае, если фракционный состав уловленных в аппарате частиц пыли подчиняется логарифмически-нормальному распределению, то коэффициент очистки можно найти по формуле [93]:

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dx = \Phi(x), \quad (1.7)$$

Другим показателем степени очистки газов может служить коэффициент проскока твердых частиц, который определяется отношением количества пылевых частиц на выходе из пылеуловителя к общему количеству твердых частиц в пылевом потоке. Коэффициент проскока  $\varepsilon$  можно рассчитать по формуле [93]:

$$\varepsilon = 100 - \eta. \quad (1.8)$$

Коэффициент проскока определенной фракции равен отношению концентрации частиц конкретной фракции  $\delta$  на выходе из аппарата  $C_{вых}$  к концентрации пылевых частиц этой же фракции на входе в аппарат  $C_{вх}$ :

$$K_{\sigma} = \frac{C_{вых}(\sigma)}{C_{вх}(\sigma)}. \quad (1.9)$$

Величина

$$\eta_{\sigma} = 1 - K_{\sigma} \quad (1.10)$$

называется коэффициентом фракционной эффективности улавливания.

Общий коэффициент проскока [93] равен отношению общей концентрации всех фракций после пылеуловителя и на входе в него:

$$K_{\Sigma} = \frac{C_{вых\Sigma}}{C_{вх\Sigma}}, \quad (1.11)$$

а общий коэффициент пылеулавливания [45]

$$\eta_{\Sigma} = 1 - K_{\Sigma}. \quad (1.12)$$

Проскок пыли может быть определен интегралом, когда известна дифференциальная функция распределения частиц по размерам:

$$K_{\Sigma} = \int_0^{\infty} K_{\sigma} g(\sigma) d\sigma, \quad (1.13)$$

а эффективность пылеулавливания:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - K_{\Sigma} = 1 - \int_0^{\infty} K_{\sigma} g(\sigma) d\sigma. \quad (1.14)$$

Авторами [87] было составлено уравнение для расчёта эффективности улавливания пыли аппаратом ВЗП :

$$d_{\eta} = (3 / 2\pi S) \cdot \sqrt{(\mu / \rho_{\text{ч}}) \cdot \tau \cdot \ln [1 / (1 - \eta)] [1 + (Q_2 / Q_1)]}, \quad (1.15)$$

где  $d_{\eta}$  – минимальный размер частиц, улавливаемых с заданной степенью эффективности  $\eta$  улавливания;

$S = 4$  – оптимальное число оборотов смешанного потока газа в аппарате;

$\mu$  – динамическая вязкость газа;

$\rho_{\text{ч}}$  – плотность материала частиц;

$Q_2, Q_1$  – соответственно расходы вторичного и первичного потоков газа;

$\tau = \pi R_0^2 H / (Q_1 + 0,5 Q_2)$  – время пребывания смешанного потока газа;

$H$  – высота аппарата ВЗП.

Фракционный состав пыли, выделяемой на предприятиях строительной индустрии в ряде случаев имеет нормально-логарифмическое распределение с параметрами  $\delta_{50}$  и  $\sigma$ . Известна [87] зависимость для описания эффективности улавливания пылевых частиц:

$$x_{1,2} = \frac{\lg \delta_{50} - \lg \delta_{1,2,\eta=50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_{1,2,\eta}}} . \quad (1.16)$$

Для определения эффективности улавливания пыли в аппарате ВЗП нужно знать фракционный состав пылевоздушной смеси, а также параметры  $\sigma_{1,2,\eta}$  и  $\delta_{1,2,\eta=50}$  фракционной эффективности аппарата, которые определяются конструктивными особенностями аппарата и режимом его работы. Экспериментальные исследования показали, что у пылеуловителей ВЗП



параметр  $\sigma_{1,2}$ ,  $\eta = 1,471$ . Параметр  $\delta_{1,2}$ ,  $\eta=50$  изменяется в зависимости от скорости при проходе через аппарат, величины расхода, конструктивных размеров аппарата, а также плотности пылевых частиц и вязкости потока.

Коэффициенты фракционного улавливания с учетом логарифмически-нормального распределения эффективности улавливания фракций пылевого потока, поступающего с обоими потоками, определяются с применением табулированного [88,86] интеграла вероятности:

$$\eta_{\Phi i} = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \left[ (1-k) \int_{-\infty}^{x_1} e^{-t^2/2} dt + k \int_{-\infty}^{x_2} e^{-t^2/2} dt \right], \quad (1.17)$$

где  $x_{1,2} = (\lg \delta_i - \lg \delta_{1,2,\eta=50}) / \lg \sigma_{1,2,\eta}$ ;

$\delta_i$  — размер улавливаемых частиц данной фракции;

$\sigma_{1,2,\eta}$  — параметр кривых фракционной эффективности.

## 1.6. Выбор направления исследования

Цементное производство считается одним из наиболее крупных источников загрязнения атмосферы твердыми частицами. Пыль образуется на всех этапах производства цемента. Особенно остро стоит проблема загрязнения атмосферы твердыми частицами в странах, расположенных в пустынных и полупустынных зонах. Например, в цементной промышленности Йемена при производстве 1 т цемента образуется 0,14 т пыли. Обусловлено это недостаточно эффективной работой систем обеспыливания.

В системах обеспыливания предприятий цементной промышленности Йемена используют традиционные аппараты очистки для этой отрасли - это рукавные фильтры. Однако, при эксплуатации их, на производстве часто сталкиваются с проблемами истирания тканей в местах крепления рукавов и их обрывах. что несомненно увеличивает поступление неорганизованных выбросов пыли цемента в рабочие зоны предприятия и атмосферу. Также одной из причин превышения ПДК на предприятиях Йемена является то, что пылеулавливающее оборудование выбирается в основном без учета

особенностей распространения цементной пыли, ее физико-химических свойств и дисперсного состава.

Использование на предприятиях по производству цемента в республике Йемен систем обеспыливания с использованием высокоэффективных средств очистки, как, например, электрофильтры, ограничено ввиду их высокой энергоемкости.

Поэтому, актуальной является работа, направленная на совершенствование работы систем обеспыливания предприятий по производству цемента республики Йемен, с использованием эффективных, в том числе и по мелкодисперсной пыли, пылеулавливающих установок на базе аппаратов ВЗП.

## **1.7 Выводы по первой главе**

1. Анализ литературных источников показал, что цементное производство является наиболее мощным источником 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 менее 10 мкм на разных этапах производства цемента составляет от 10 до 75%.

2. Длительное пребывание людей в местах с повышенным содержанием пыли цемента в воздухе рабочей зоны и атмосферы может вызывать обострение хронических заболеваний, и являться причиной возникновения профессиональных заболеваний, таких как пневмокониоз.

3. В системах обеспыливания предприятий цементной промышленности Йемена используют рукавные фильтры. При эксплуатации их, на производстве часто сталкиваются с проблемами истирания тканей в местах крепления рукавов и их обрывами, что увеличивает поступление неорганизованных выбросов пыли цемента в рабочие зоны предприятия и атмосферу.

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

## ГЛАВА 2 СБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### 2.1. Совершенствование расчетной модели представления интегральной функции распределения массы частиц по диаметрам пыли в системах обеспыливания

При проведении работ по исследованию экологической безопасности работы системобеспыливания, важно знать функцию фракционного проскока. В реальных условиях дисперсный состав пыли, отобранный в рабочих зонах предприятий, как правило, является полидисперсным, поэтому для определения коэффициента проскока можно воспользоваться следующей формулой:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{f_{\text{вх}}(\delta)}{f_{\text{вых}}(\delta)} \quad (2.1)$$

где  $\varepsilon_0$  - общий проскок пыли, %,  $f_{\text{вх}}(\delta)$   $f_{\text{вых}}(\delta)$  - дифференциальные функции распределения массы частиц размером ( $\delta$ ) для пыли на входе и выходе из пылеуловителя.

Сложностью практического применения формулы 1 является, то что в числителе и знаменателе находятся функции, являющиеся производными от интегральных функций распределения частиц по диаметрам  $D_{\text{вх}}(\delta)$ ,  $D_{\text{вых}}(\delta)$ :

$$\frac{d}{d\delta} D_{\text{вх}}(\delta) = f_{\text{вх}}(\delta); \frac{d}{d\delta} D_{\text{вых}}(\delta) = f_{\text{вых}}(\delta), \quad (2.2)$$

Для пылеуловителей типа ВЗП функция проскока убывающая по мере увеличения параметра  $\delta$ , так как эффективность пылеулавливания с изменением размера частиц увеличивается.

Следовательно из формулы (2.1)

$\frac{d}{d\delta} D_{\text{вх}}(\delta) / \frac{d}{d\delta} D_{\text{вх}}(\delta)$  - это убывающая функция, поэтому ее производная имеет отрицательное значение. Поэтому, графическое представление функции прохода массы частиц пыли в координатах (х,у) будет представлять возрастающую выпуклую вверх кривую[16-17].

Из уравнения (2.1) следует, что для определения фракционной эффективности пылеуловителя инерционного типа следует продифференцировать функции прохода для пыли в выбросах после систем обеспыливания, т.е. продифференцировать экспериментальную кривую[16-17]. Средний интегральный проскока фракции запишем в виде:

$$\varepsilon^* = \frac{1}{d_u - d_{u \min}} \int_{d_{u \min}}^{d_u} \varepsilon(d_u) dd_u \quad (2.3)$$

После интегрирования уравнения (2.2) тогда, когда функция прохода на входе в систему очистки описывается прямой линией, уравнение примет вид:

$$\varepsilon^*(x) = \varepsilon_0 \cdot \frac{y_{\text{вх}}(x) - y_{\text{вх}}(x_{\min})}{K_{\text{вх}}(x - x_{\min})} \quad (2.4)$$

В результате имеем, что на основании экспериментальных данных функции  $\varepsilon^*$  (дч) можно найти эффективность улавливания инерционного пылеуловителя:

$$\eta(d_u) = 1 - \varepsilon(d_u) = 1 - \frac{d}{dx} [(x - x_{\min}) \varepsilon^*] \quad (2.5)$$

Результаты Расчета оценки фракционной эффективности аппарата ВЗП усовершенствованным методом по результатам экспериментов и измерений автора графически представлен на (рисунок.2.1).

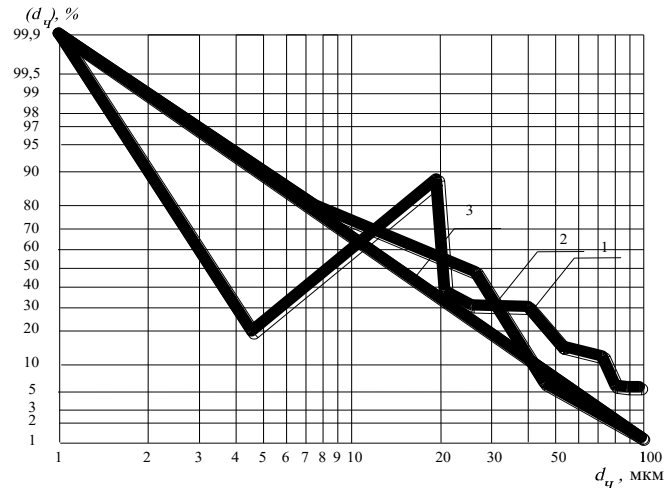


Рисунок 2.1 - Кривые фракционной эффективности аппарата ВЗП: 1 - построенной без аппроксимации, 2 –построенной методом геометрического дифференцирования, 3- кривая, построенной по методу сглаживания.

## 2.2. Исследование дисперсного состава пыли в производстве цемента

Производство цемента, также как и производство других строительных материалов, сопровождается значительными выделениями пыли в воздух рабочей зоны и в окружающую природную среду. Как правило, пыль является полифракционной. При этом частицы пыли размером менее 10 мкм особенно вредны и составляют от 20-75% от общей массы твердых частиц, выделяемых на различных этапах производства.  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  это - частицы вдыхаемого размера, которые в первую очередь оседают в трахеобронхиальной зоне дыхания, и, следовательно, могут являться потенциальной причиной заболевания легких.

Для объективной оценки воздействия мелкодисперсной пыли на здоровье человека требуется знать процентное содержание частиц малых размеров. Поэтому нормирование концентраций пылевых частиц размером менее 10мкм и размером менее 2,5мкм (соответственно  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ ) считается во

всем мире наиболее актуальным ввиду их различного действия на организм человека и длительность их нахождения во взвешенном состоянии [8].

В качестве объекта для исследования содержания в воздухе рабочей зоны строительных производств пылевых частиц размером менее 10 мкм ( $PM_{10}$ ) и размером менее 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ) были отобраны пробы осевшей пыли на цементном заводе «Амран» в республике Йемен в городе Амран. Исследования дисперсного состава пыли, выделяющейся в производстве цемента, проводились по методике микроскопического анализа дисперсного состава с помощью компьютерной программы «SPOTEXPLORER» [51,53].

Пробы были взяты на различных участках производства: на участках транспортировки извести, фторида калия, гипса, грунта, участке подготовки смеси и участке упаковки готовой продукции. По полученным данным построены интегральные кривые распределения массы частиц пыли по диаметрам (рисунок 2.2-2.7).

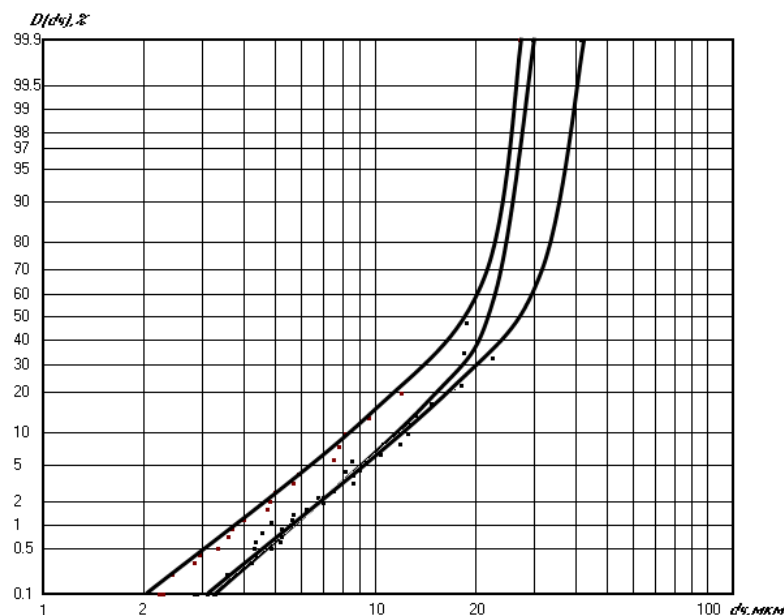


Рисунок. 2.2 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметра для пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны при транспортировке гипса.

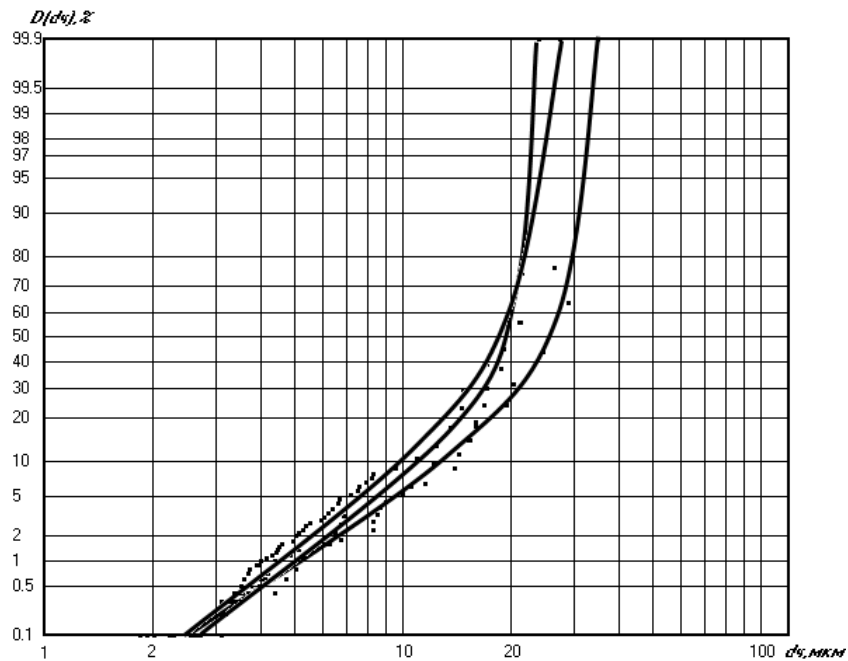


Рисунок. 2.3 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны при транспортировке грунта

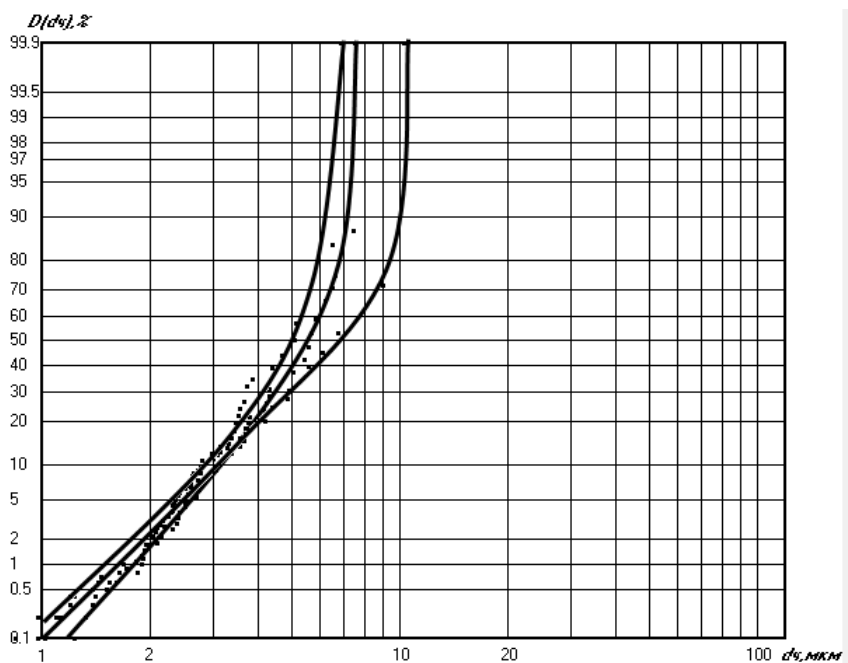


Рисунок 2.4 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны при упаковке цемента



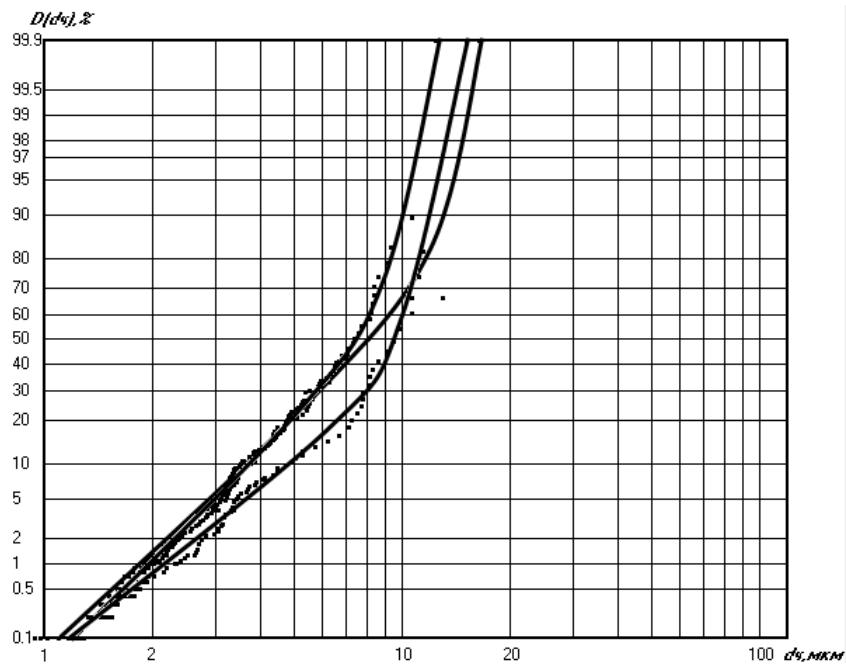


Рисунок 2.5 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны при транспортировке извести

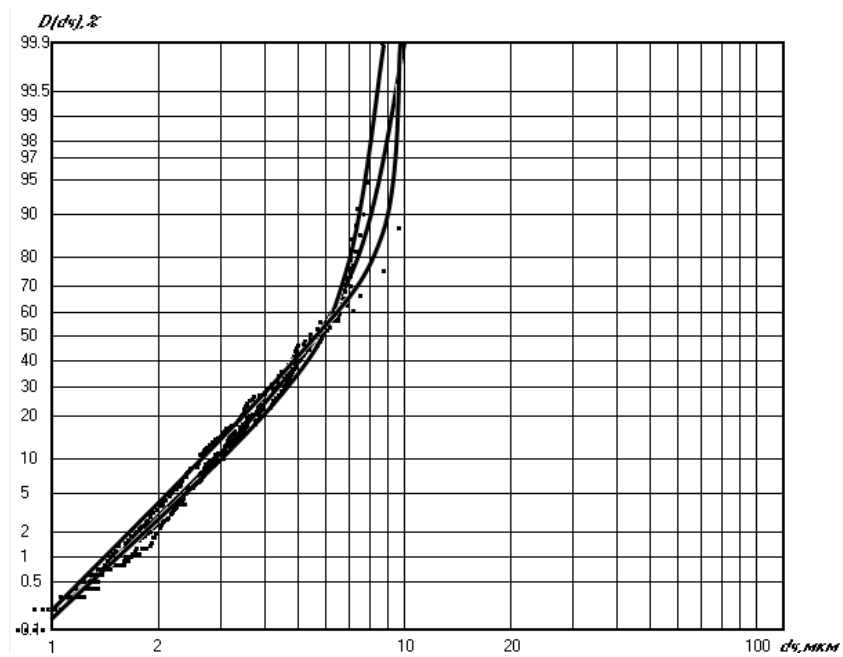


Рисунок 2.6 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны при транспортировке фторида калия

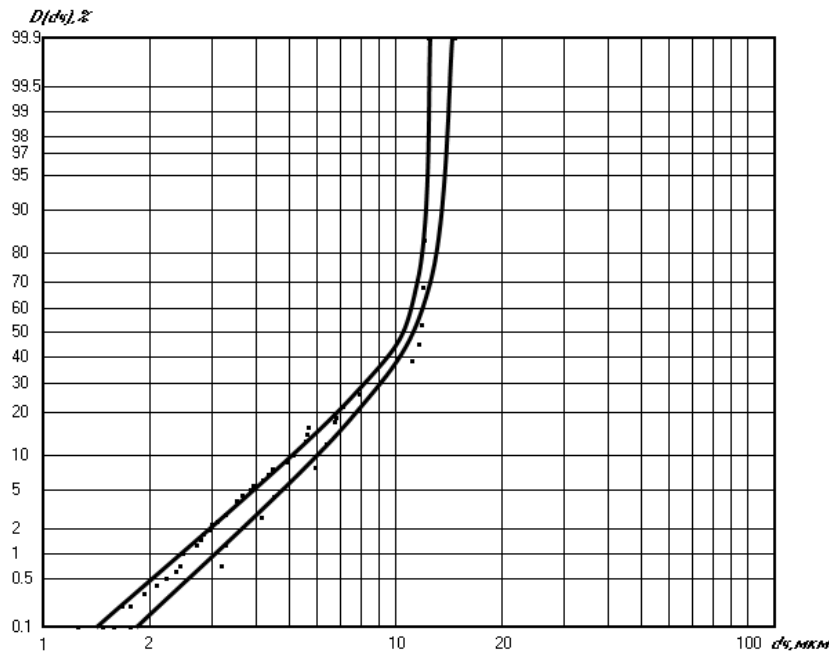


Рисунок 2.7 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам для пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны при подготовке смеси

При транспортировке гипса (рисунок 2.2) содержание частиц пыли с размером  $PM_{10}$  составляет 16 % по массе,  $PM_{2,5}$  – 0,3 % по массе. При транспортировке грунта (рисунок. 2.3)  $PM_{10}$  составляют 10 %,  $PM_{2,5}$  – 0,1 % от общей массы пыли. Содержание  $PM_{10}$  на участке упаковки цемента (рисунок. 2.4) – 100 % от общей массы пыли, из них на частицы  $PM_{2,5}$  приходится 3%. При транспортировке извести (рисунок. 2.5) доля частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  будет составлять соответственно 90 и 3 % от общей массы пыли. При транспортировке фторида калия (рисунок. 2.6)  $PM_{10}$  составляют 100 %,  $PM_{2,5}$  – 7 % от общей массы пыли. Содержание  $PM_{10}$  при подготовке смеси (рисунок. 2.7) – 45 % от общей массы пыли, из них на частицы  $PM_{2,5}$  приходится 1 %. Как показал анализ полученных данных, на некоторых участках производства (упаковка цемента (рисунок. 2.4), транспортировка фторида калия (рисунок. 2.6) практически вся выделяющаяся в воздух рабочей зоны пыль состоит из частиц, диаметром менее 10 мкм (рисунок 2.4, рисунок 2.6) [86].

Поскольку концентрация пыли в воздухе внутри цехов колебалась в пределах 3-7 мг/м<sup>3</sup>, а вблизи цехов в пределах 0,3-4 мг/м<sup>3</sup>, то значения

концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  для взвешенных частиц в некоторых случаях примерно в 2-5 раз были выше значений ПДК для  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  (ГН 2.1.6.1338-03) [17,18], что свидетельствует о значительно большей вредности мелких фракций пыли в данном производстве. Как правило, такие же зависимости ПДК сохраняются и для рабочей зоны.

Следовательно, можно сделать вывод о целесообразности определения концентрации взвешенных частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ , а не только массовой концентрации взвешенных веществ, для оценки состояния пылевой обстановки в воздухе и на территории завода. Кроме того, данные исследования подтверждают необходимость установления норматива предельно допустимых концентраций взвешенных частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  для воздуха рабочей зоны и окружающей среды и для Республики Йемен.

### **2.3. Анализ аэродинамических характеристик цементной пыли, поступающей в воздушную среду**

Одной из важнейших характеристик при выборе эффективного пылеуловителя и оценке степени воздействия на здоровье работников цементной промышленности является скорость витания пыли.

Одним из методов определения фракционного состава и скорости оседания пыли является метод сидиментометрии. При пофракционном оседании пыли анализируемая проба материала, как правило, диспергируется в верхней части столба дисперсионной среды [51-58]. В первоначальный период проведения замеров скорости оседания выпадает пыль наиболее крупных фракций, которые, проходя за время  $\tau$  высоту столба  $H$ , осаждаются на дне сидиметра. По скорости осаждения частиц  $\omega = H/\tau$  определяют диаметр наиболее мелких, осевших к моменту  $\tau$  частиц, а по массовому количеству осадка определяют процент частиц, имеющих диаметр меньше  $\delta$ .

Авторами [51-58] для определения дисперсного состава пыли методом седиментометрии в воздушной среде предложено использование прибора, называемого воздушный седиментометр (рисунок.2.8).

Пыль с различной скоростью оседает на липкой ленте (прозрачный скотч), зафиксированной на ленточном транспортере. Транспортер ритмично передвигается на величину равную диаметру цилиндра за одинаковые промежутки времени.

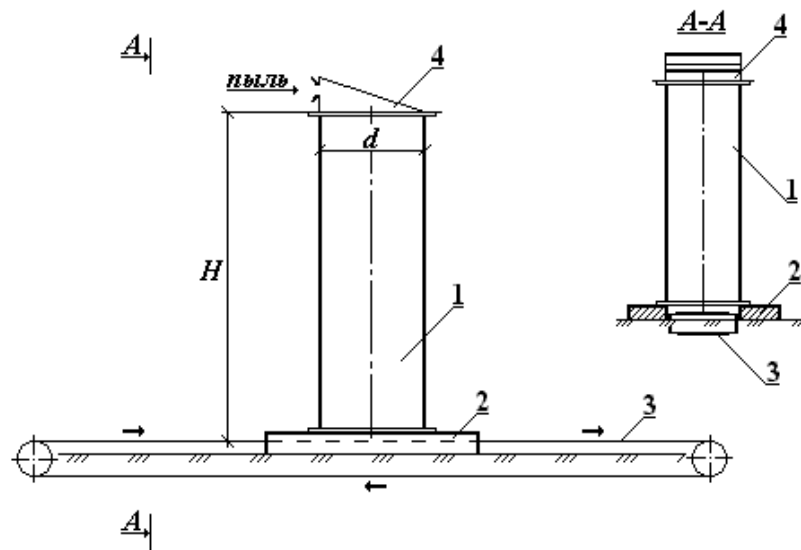


Рисунок 2.8 - Экспериментальная установка [58]: 1 – Цилиндрседиментометра; 2 – подставка; 3 – транспортер с зафиксированным скотчем; 4 – распылительное устройство

Скорость витания цементной пыли определялась следующим образом. Для исследований была взята цементная пыль, выделяющаяся от мельниц в цехе помола. Перед выполнением эксперимента готовились навески проб пыли по 50мг, которые укладывались на чистый лист бумаги и равномерно распределялись по нему.

Распыливающее устройство резким потоком воздуха направляло пылевые частицы в седиментационный цилиндр, где они оседали в неподвижном воздухе. Через равные промежутки времени липкая лента, расположенная на транспортере перемещалась на величину диаметра цилиндра, а частицы пыли с различной скоростью, под действием сил тяжести оседали на ней.

После проведения эксперимента был изучен дисперсный состав пыли методом микроскопии [9], в основу которого положен способ фотографирования частиц пыли увеличенных под микроскопом в (200 – 2000) раз. Результаты анализа дисперсного состава пыли можно представить в виде интегральных кривых массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке на рисунок.2.9. Эксперимент подтвердил, что с течением времени крупность пылевых частиц уменьшается. Так частицы пыли  $d_{50}$ , выбивающиеся в процессе помола цемента составили: 3 сек. – 36 мкм; спустя 6 сек. – 30 мкм; спустя 12 сек. – 23 мкм; спустя 18 сек – 15 мкм; спустя 21 сек – 4 мкм; спустя 30 сек – 2 мкм.

По результатам проведенного дисперсного анализа построены зависимости скорости оседания от эквивалентного диаметра частицы в логарифмической сетке.

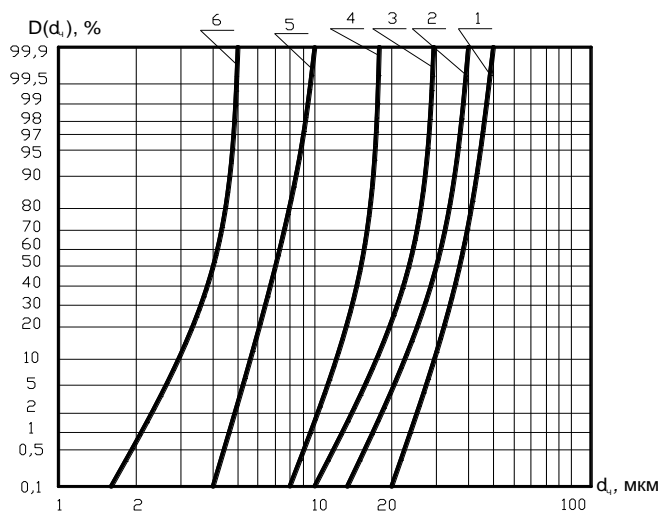


Рисунок 2.9 - Интегральные кривые массы частиц пыли, выделяющейся в воздух рабочей зоны цеха помола цемента, по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке: 1 – для пылеоседания спустя 3 сек; 2 – спустя 6 сек; 3 – спустя 12 сек; 4 – спустя 18 сек; 5 – спустя 21 сек; 6 – спустя 30 сек.

Полученные значения скоростей витания приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Аэродинамические характеристики пыли

Время,с	Медианный диаметр, мкм	Скорость витания, полученная экспериментальным способом, м/с
2	34	Более 0,73
5	29	0,3-0,73
10	22	0,15-0,3
15	14	0,097-0,15
20	5	0,072-0,097
25	3	0,056-0,072

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили зависимость скорости оседания пыли от медианного диаметра частицы. Они подтвердили вывод о том, что наибольшее количество частиц пыли и по числу, и по массе, т.е. наиболее крупные, выпадают на начальном этапе эксперимента. Кроме того, частицы пыли с диаметром менее 10 мкм могут находиться длительное время во взвешенном состоянии.

#### **2.4. Исследование основных физико-химических свойств цементной пыли**

Оценивать пылевой фактор на предприятиях цементной промышленности следует по степени воздействия на здоровье работников предприятий и население, проживающее на прилегающих территориях. Степень влияния запыленного воздуха на работоспособность, самочувствие и здоровье людей, можно только с учетом состава, дисперсности и физико-химических свойств пыли. Эти параметры необходимо учитывать и при выборе пылеочистного оборудования систем аспирации и обеспыливания.

В таблице 2.2 представлены результаты среднестатистических анализов состава сырья используемого для производства портландцемента в России и Йемене [73,100,102].

Таблица 2.2 - Состав сырья используемый для производства портландцемента

Материал	Потери при прокаливании, %	Содержание, %					
		CaO	MgO	SiO2	Al2O3	Fe2O3	SO3
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 показал, что состав сырья используемый для производства цемента в Республике Йемен, отличается по процентному содержанию, в том числе и по такому компоненту как SiO<sub>2</sub>, поэтому важно уточнить и физико-химические свойства пыли.

Пыли предприятий по производству цемента по своим физико-химическим свойствам разделяются на следующие группы [20]:

1. Пыли, получаемые в процессе дробления и транспортировки сырья; имеют размеры частиц крупнее 5 мкм (около 70 %), а температура и влажность равны параметрам окружающей среды.

2. Пыль выделяющаяся от сушильных барабанов, обладает повышенным влагосодержанием и определенным диапазоном изменения концентрации пыли (15-70 г/м<sup>3</sup>).

3. Пыль выбиваемая от сырьевых мельниц; содержит высокую концентрацию (до  $500 \text{ г/м}^3$ ) и значительное количество частиц пыли имеют размер  $5 \text{ мкм}$  (до 65 %)

4. Пыль от вращающихся печей производства цемента мокрым способом характеризуется высоким влагосодержанием и температурой, которая колеблется в диапазоне от  $170$  до  $380^\circ\text{C}$ .

5. Пыль от вращающихся печей, работающих по сухому способу производства; отличается дисперсным составом с частицами пыли размером менее  $5 \text{ мкм}$  (до 75 %) , высоким УДС и невысоким влагосодержанием .

6. Пыли вращающихся печей с запечными теплоутилизаторами (от конвейерных калцинаторов) отличаются малым влагосодержанием и содержанием частицы пыли размером более  $5 \text{ мкм}$  (80 % частиц).

7. Пыль отходящая от холодильников клинкера; отличается малым содержанием влаги, и большим диапазоном изменения температуры ( $90$ - $290^\circ\text{C}$ ) содержание частиц размером свыше  $5 \text{ мкм}$  (80 %).

8. Пыли от мельниц помола; отличается высокой концентрацией (до  $960 \text{ г/м}^3$ ), и изменяющимся влагосодержанием.

Для определения седиментационного диаметра пылевых частиц и при проектировании конструктивных элементов систем обеспыливания необходимо знать сведения о плотности пыли.

С целью проведения сравнительного анализа показателей физико-химических свойств пыли цемента в Республике Йемен были проведены исследования состава и свойств пыли цемента, которые определялась согласно методикам изложенным в [58].

Свойства определялись на пыли, отобранной на заводе Амран Республика Йемен в производственной лаборатории (рисунок.2.10.) по методикам [58,62].





Рисунок 2.10 - Лаборатория определения физико-химических свойств цементной пыли завода «Амран» г.Амран.

Результаты исследования физико-химических свойств пыли приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Физико-химические свойства цементной пыли.

Свойство пыли, единицы измерения	Величина
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,610 -2,840
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	1,430-1,080
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,704 - 0,817
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	2670-3140
Статический угол естественного откоса, град	53- 57
Динамический угол естественного откоса, град	41-46
Разрывная плотность слоя, Па	410-490

## 2.5 Оценка эффективности локализирующих устройств в системах обеспыливания методами Богуславского-Азарова и Посохина

Для определения особенностей распространения пыли в воздухе рабочих зон и на территории предприятия, а также для разработки эффективных

систем очистки, необходимо знать количество пыли, выделяющейся на различных этапах производства от технологического оборудования.

Методика по определению суммарной величины пылевыведений в цех была предложена профессорами Е.И. Богуславским и В.Н. Азаровым [36]  $M$ , г/ч:

$$M = M_1 + M_2 + M_3, \quad (2.6)$$

Где  $M_1$  - масса пыли, удаляемая системами вентиляции и аспирации, г/с;

$M_2$  - пыль, уносимая сквозными проемами помещения, г/с;

$M_3$  - масса пыли, осаждаемая на пол технологических площадках цеха, г/с.

Первые слагаемые формулы (2.6) определяются по известной методике, а масса пыли, осаждаемая на пол технологических площадках цеха, определяется путем проведения замеров интенсивности пылеоседания.

Для этого на пол производственного помещения на расстоянии 1,5-2 м от источника пыления по окружности через угол  $\pi/4$  расставляются тарелочки-ловушки, на которых осаждается пыль [36].

Согласно этой методики можно достаточно точно определить количество пыли, поступающей в воздух помещения от технологического оборудования, при величине плотности пыли, оседающей на поверхности пола и технологическом оборудовании, в пределах  $(0,1 - 100)$  г/(м<sup>2</sup>·ч) [10].

Пыль после оседания на тарелочки взвешивается, а затем определяется интенсивность пылеоседания  $G_0$  по формуле [10,58]:

$$G_o = \frac{G}{F\tau}, \quad (2.7)$$

Где  $G$  - количество пыли, осевшей на тарелочке, кг;

$F$  - площадь тарелочки, м<sup>2</sup>;

$\tau$  - время нахождения тарелочки в зоне пылеоседания, ч.

По величине полученных при расчете значений выявляются максимальные и минимальные значения плотности пылеоседания -  $G_{\min}$  и  $G_{\max}$ . По этим значениям  $G_{\min}$  и  $G_{\max}$  ведут линию, которая является средней для зоны

пылеоседания от определенного источника пылевыведения. Затем эту зону от фиксированного источника делят на два сектора с углом раскрытия  $\pi/4$ , то есть получают по два сектора с минимальным и максимальным оседанием пыли [10]. После этого проводят основные замеры, по которым и определяется плотность пылеоседания. При проведении экспериментальных исследований было в цехе помола нами установлено, что пребывание тарелочек ловушек в цехе более продолжительное время чем 4 часа не оказывает существенного влияния на результаты замеров.

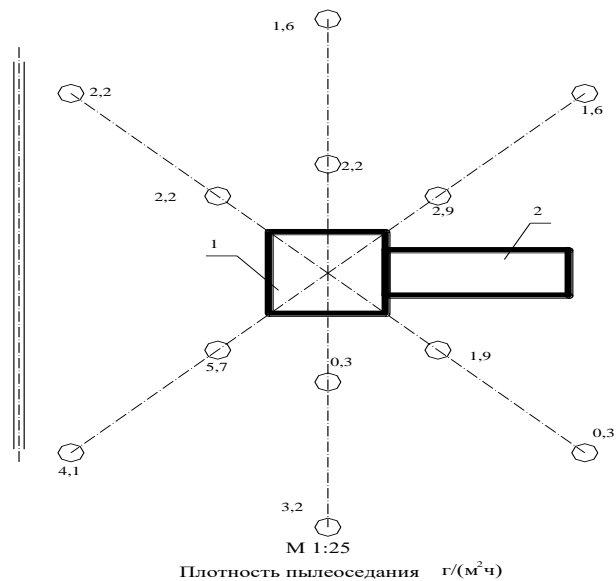


Рисунок.2.11 - План расстановки тарелочек-ловушек в цехе помола  
у источника выделения пыли: 1-узел загрузки шаровых мельниц; 2-мельница

Результаты экспериментальных замеров плотности пылеоседания на расстоянии от источника пылевыведения представлен на рисунок (2.12).

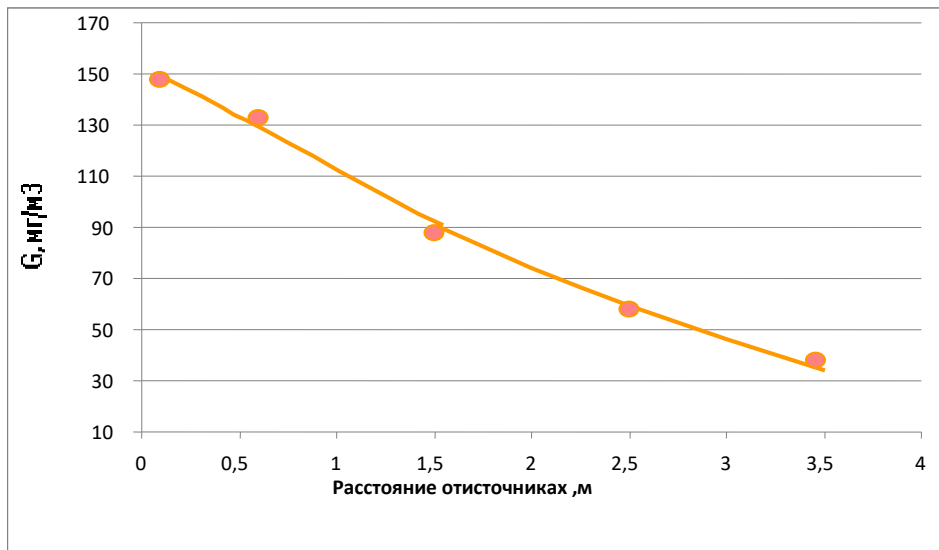


Рисунок. 2.12 -Распределение плотности пылеоседания  $G_0$  на расстоянии  $X$  от источника

Распределение плотности пылеоседания  $G_0$  на удалении  $X$  от технологического оборудования можно описать уравнением:

$$G = 168,8e^{-0,365x} \quad (2.9)$$

Анализ функции распределения плотности вероятности попадания цементной пыли (рисунок. 2.13) в воздух рабочей зоны и атмосферу показал превышение концентрации цементной пыли над уровнем ПДК.

С целью приведения параметров воздуха рабочих зон к требуемым, были проведены замеры концентраций пыли при различных расходах воздуха удаляемого от оборудования, система обеспыливания и таким образом находились расходы газа, при которых параметры запыленности воздуха не выше нормируемых. Такой метод определения расходов воздуха, удаляемого от оборудования, основан на экспериментальном подходе, и рекомендован В. Н. Посохиным [72]. Измерения концентрации пыли в воздушной среде производились по стандартным методикам с использованием стандартного оборудования [61]. Исследования проводились в рабочей зоне оператора шаровых мельниц цеха помола клинкера.

Результаты исследования показали, что нормируемые параметры концентрации пыли в воздухе рабочей зоны оператора шаровых мельниц цеха помола были достигнуты при расходе воздуха удаляемого от мест загрузки клинкера в мельницы равного 5700 м<sup>3</sup>/ч (рисунок. 2.13).

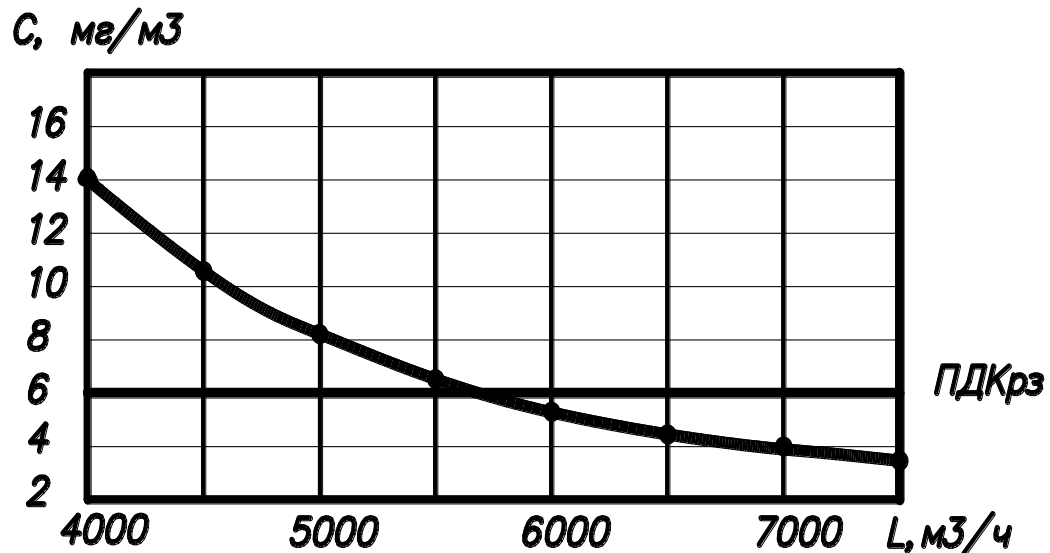


Рисунок. 2.13- Изменение концентрации пыли в воздухе рабочей зоны в зависимости от объемов воздуха, удаляемого местными отсосами от мест загрузки клинкера в мельницы.

## 2.6 Оценка вероятности проскока доли частиц $PM_{10}$ и $PM_{2,5}$ в аппаратах ВЗП

Методы расчета эффективности пылеулавливания ВЗП похожи с расчетом циклонных аппаратов [1]. Считаем, что общая эффективность может быть представлена логарифмически-вероятностной функцией, параметры которой соответствуют конкретному типу и режиму работы аппарата. Понятно, что подобный принцип возможно реализовать с позиции вероятностно-статистического подхода также, как в работах [2,15]. Теория случайных процессов к явлениям протекающих в аэрозолях, была успешно применена

Фуксом [96]. Позже [2,3,5,11,12,15,13,14,15] был разработан вероятностно-статистический подход для решения задач обеспыливания. Профессор Е.И. Богуславский полагая, что в полифракционных потоках проявляются детерминированно-стохастические закономерности, процесс массопереноса в рассматриваемом объеме рассматривается как процесс вероятностный.

Для аппаратов со встречными закрученными потоками необходима другая, не как у циклона постановка задачи, более обоснованная с позиций вероятностно-стохастического подхода. Пусть С-событие состоит в том, что частице из точки о попадет в бункер или упадет вниз. Для решения воспользуемся понятием о вероятности процесса обеспыливания в аппарате ВЗП [12,13]. Вероятность такого сложного процесса пылеулавливания зависит от вероятностей  $P_A$  и  $P_B$ , она может быть определена по формуле:

$$P_c = \frac{P_A \cdot m_{\text{exA}} + P_B \cdot m_{\text{exB}}}{m_{\text{exA}} + m_{\text{exB}}} \quad (2.10)$$

Опишем вероятность событий  $P_A$  и  $P_B$  уравнением вероятности массопереноса в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = W_r \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + 0,5b_r \frac{\partial^2 P}{\partial r^2}. \quad (2.11)$$

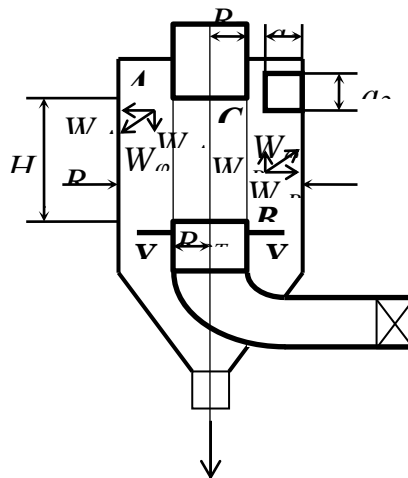


Рисунок. 2.14. Схема по определению фракционной эффективности аппарата ВЗП без отсоса

Схема решения уравнения (2.11) известна из работ [14-16]. Отсюда имеем:

$$\frac{\partial P_1}{\partial \tau} = 0,5b_r \cdot \frac{\partial^2 P_1}{\partial r^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \tau} = W_r \frac{\partial P_2}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \cdot \frac{\partial P_2}{\partial \varphi} \quad (2.13)$$

Решения уравнений (2.12-2.13) были найдены Богуславским Е.И. в виде

$$P_1 = \operatorname{erf}(Y), \quad \operatorname{erf}(Y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Y e^{-t^2} dt, \quad Y = \sqrt{\frac{R^2}{2\mu^2 b(\tau - \tau_0)}}, \quad (2.14)$$

где:

$R$  — радиус аппарата;

$\mu$  — коэффициент динамической вязкости;

$b$  — коэффициент диффузии пылевых частиц;

$(\tau - \tau_0)$  — время нахождения частицы в аппарате.

$$P_2 = \left(1 - ce^{-\lambda r_H (1 - W_r/V_r)}\right),$$

где:

$\lambda$  — параметр разделения переменных;

$r_H$  — координата точки частицы, поступающей в аппарат;

$W_r, V_r$  — радиальные скорости частиц и газа;

$c$  — константа интегрирования.

При решении уравнения (2.13) 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 (2.15).

$$P = \left(1 - ce^{-\lambda r_H (1 - W_r/V_r)}\right) \cdot \operatorname{erf}(Y). \quad (2.15)$$

Вероятность массопереноса по входному патрубку зоны  $A$  равна

$$P_A = \frac{1}{R_H - R_T} \int_{R_T}^{R_H} P dr_H \quad (2.16)$$

или [14-16]

$$P_A = \left( 1 - c \cdot \frac{e^{-\lambda E_A R_T} - e^{-\lambda E_A R_H}}{\lambda \cdot E_A (R_H - R_T)} \right) \cdot \operatorname{erf}(Y), \quad (2.17)$$

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 вероятность массопереноса:

$$P_A = \left( 1 - \frac{e^{-\lambda E_A R_T} - e^{-\lambda E_A R_H}}{\lambda \cdot E_A (R_H - R_T)} \right) \cdot \operatorname{erf}(Y). \quad (2.18)$$

Определим параметр разделения переменных  $\lambda$  из граничных условий  $W_r = 0$  при  $P_A = 0,5$ .

Имеем:

$$0,5 = \left( 1 - e^{-\lambda r_H} \right) \operatorname{erf}(Y), \quad \frac{1}{2 \operatorname{erf}(Y)} = 1 - e^{-\lambda r_H} \text{ или } e^{-\lambda r_H} = 1 - \frac{1}{2 \operatorname{erf}(Y)}.$$

После логарифмирования получаем выражение для определения  $\lambda$

$$\lambda = -\frac{1}{R_H} \ln \left( 1 - \frac{1}{2 \operatorname{erf}(Y)} \right), \quad (2.19)$$



где

$$\operatorname{erf}(Y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Y e^{-t^2} dt, \quad Y = \sqrt{\frac{R^2}{2\mu^2 b(\tau - \tau_0)}} = k \cdot R = k \cdot (R_H - R_T),$$

$k$  — опытный коэффициент.

Отметим что формула (2.19) выполняется при всех  $\operatorname{erf}(Y) > 0,5$ , поэтому значение  $k > 1$ .

Проанализировав уравнения (2.18) и (2.19), делаем вывод, что вероятность массопереноса не зависит от  $R$ , а зависит только от  $R_H$ . Поэтому решение уравнения можно записать в виде:

$$P_A = \left( 1 - \frac{e^{-\lambda E_A R_T} - e^{-\lambda E_A R_H}}{\lambda \cdot E_A (R_H - R_T)} \right) \cdot T, \quad (2.20)$$

где:

$T = 1 - (a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) \cdot e^{-Y_A^2}$  — это приближенное значение интеграла

$$\operatorname{erf}(Y_A) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{Y_A} e^{-t^2} dt, \quad \text{и} \quad t = \frac{1}{1 + \alpha \cdot Y_A};$$

$R_H$ ,  $R_A$ ,  $R_B$  — это соответственно радиусы цилиндрической части корпуса, выхлопной трубы и трубопровода для подачи вторичного потока из зоны В. Коэффициент диффузии потока  $b$  можно считать для зон А и В одинаковыми. Время процесса массопереноса соответственно для зон А и В будет отличаться, т.к. частицы, выходящие из зон А и В, проходят различные расстояния и с различными скоростями.

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

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

и для мелких частиц

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

Вероятность переноса массы для зоны В определяется аналогично.

Полученные формулы позволяют рассчитать фракционную эффективность ВЗП с учетом основных конструктивных параметров аппарата, режима его

работы, массы частиц, поступающих в зоны А и В, скоростей потока на входе в зоны А и В.

## 2.7 Выводы по второй главе

1. Предложена усовершенствованная расчетная модель представления интегральной функции распределения массы частиц по диаметрам пыли в системах обеспыливания при определении эффективности улавливания инерционного пылеуловителя с учетом функции прохода, определяемая по формуле:

$$\eta(d_q) = 1 - \varepsilon(d_q) = 1 - \frac{d}{dx} \left[ (x - x_{\min}) \varepsilon^* \right]$$

2. Проведен анализ дисперсного состава пыли при транспортировке гипса, который показал, что содержание частиц пыли с размером  $PM_{10}$  составляет 16 % по массе,  $PM_{2,5}$  – 0,3 % по массе. При транспортировке грунта  $PM_{10}$  составляют 10 %,  $PM_{2,5}$  – 0,1 % от общей массы пыли. Содержание  $PM_{10}$  на участке упаковки цемента – 100 % от общей массы пыли, из них на частицы  $PM_{2,5}$  приходится 3%. При транспортировке извести доля частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  будет составлять соответственно 90 и 3 % от общей массы пыли. При транспортировке фторида калия  $PM_{10}$  составляют 100 %,  $PM_{2,5}$  – 7 % от общей массы пыли. Содержание  $PM_{10}$  при подготовке смеси – 45 % от общей массы пыли, из них на частицы  $PM_{2,5}$  приходится 1 %.

3. Проведен сравнительный анализ состава сырьевой смеси, определены основные физико-химические свойства цементной пыли завода Амран г.Амран, который показал, что при определенной разнице в сырьевом составе физико-химические свойства пыли цемента в Республике Йемен схожи с цемента производства России. Так определено что:

Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,610 -2,840
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>	1,430-1,080
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,704 - 0,817
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	2670-3140
Статический угол естественного откоса, град	53- 57
Динамический угол естественного откоса, град	41-46
Разрывная плотность слоя, Па	

4. Проведены теоретические и экспериментальные исследования аэродинамических характеристик пыли цемента которые показали, что хотя по составу пыль цемента, привезенная из республики Йемен, несколько отличается от российской, по аэродинамическим характеристикам все же близка с ней.

5. Проведена оценка эффективности локализирующих устройств в системах обеспыливания методами Богуславского-Азарова и Посохина. Построены функции плотности распределения вероятности поступления цементной пыли в воздух рабочей и на территорию предприятия (рисунок. 2.13, 2.14), которые показал превышение концентрации цементной пыли над уровнем ПДК.

6. Проведены замеры расходов воздуха, удаляемого от оборудования, с целью приведения этих показателей к параметрам, при которых запыленность воздуха равна нормируемой. Исследования показали, что в рабочей зоне оператора шаровых мельниц расход воздуха удаляемого от мест загрузки клинкера в шаровые мельницы должен быть не менее 5700 м<sup>3</sup>/ч.

7. Проведена оценка эффективности коэффициента проскока в аппаратах ВЗП. Получена расчетная зависимость.

8. Проведена оценка превышения нормативов по содержанию ПДК в воздухе рабочих зон и на территории предприятий.

### **ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЦЕМЕНТА**

#### **3.1. Экспериментальные исследования осаждения частиц цементной пыли выбросов цементных заводов**

В мировой практике по рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в ряде стран осуществлен подход по нормированию содержания в воздушной среде частиц пыли с размерами не более 2,5 мкм (или) 10 мкм. В России в июне 2010 года введены в действие гигиенические нормативы ГН 2.1.6.2604-10 [50], которые устанавливают предельно-допустимую концентрацию (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест в  $\text{мг/м}^3$  для взвешенных веществ частиц размером менее 10 мкм ( $\text{PM}_{10}$ ) и для частиц размером менее 2,5 мкм ( $\text{PM}_{2,5}$ ).

В качестве объекта для исследования содержания в воздухе строительных производств пылевых частиц размером менее 10 мкм ( $\text{PM}_{10}$ ) и размером менее 2,5 мкм ( $\text{PM}_{2,5}$ ) были отобраны пробы осевшей пыли на территориях цементного завода «Амран» в республике Йемен, и в прилегающей жилой зоне в городе Амран [79].

Пробы были взяты на различных участках производства и на границе СЗЗ, фотографии пыли увеличенной под микроскопом приведены на рисунке 3.1. и 3.2. по полученным данным построены интегральные кривые распределения массы частиц пыли по диаметрам (рисунок.3.3, 3.6).



Рисунок. 3.1 - Снимок частиц цементной пыли, отобранной из рабочей зоны оператора цеха помола



Рисунок. 3.2 - Снимок частиц цементной пыли, отобранной после аппарата ВЗП

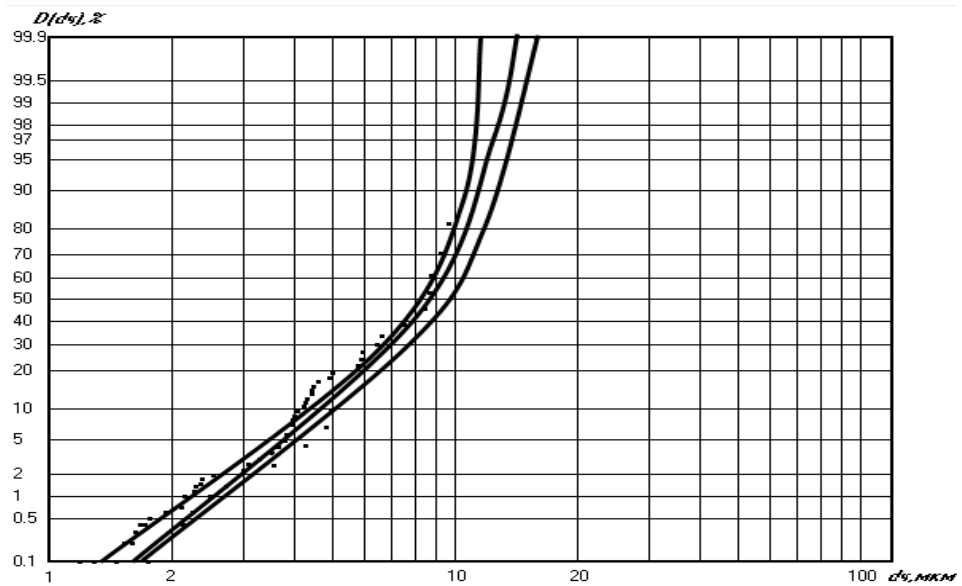


Рисунок.3.3 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли отобранной на границе цементного завода (Йемен).

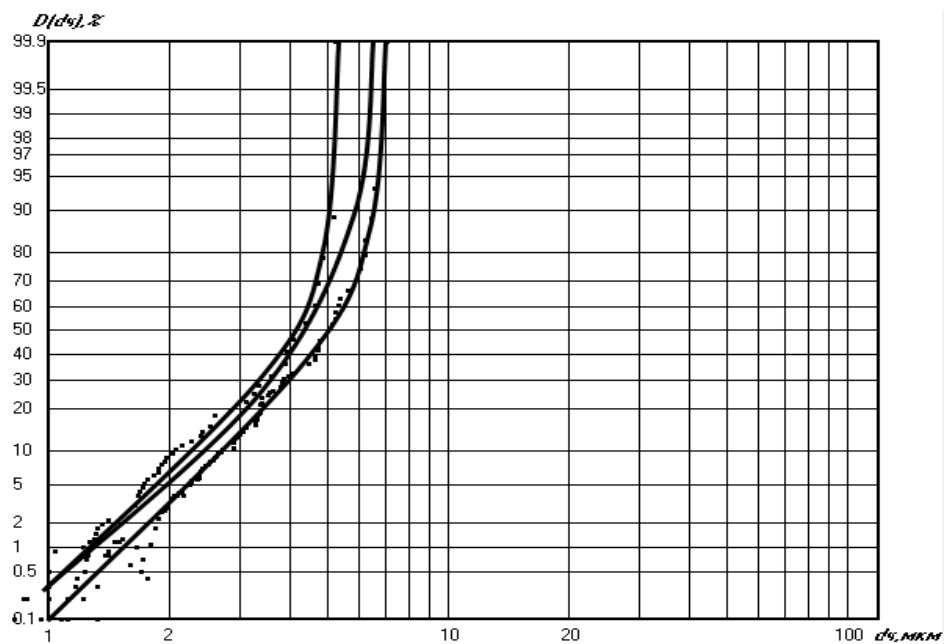


Рисунок.3.4 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли отобранной в жилом посёлке расположенном на расстоянии 500м от цементного завода (Йемен).

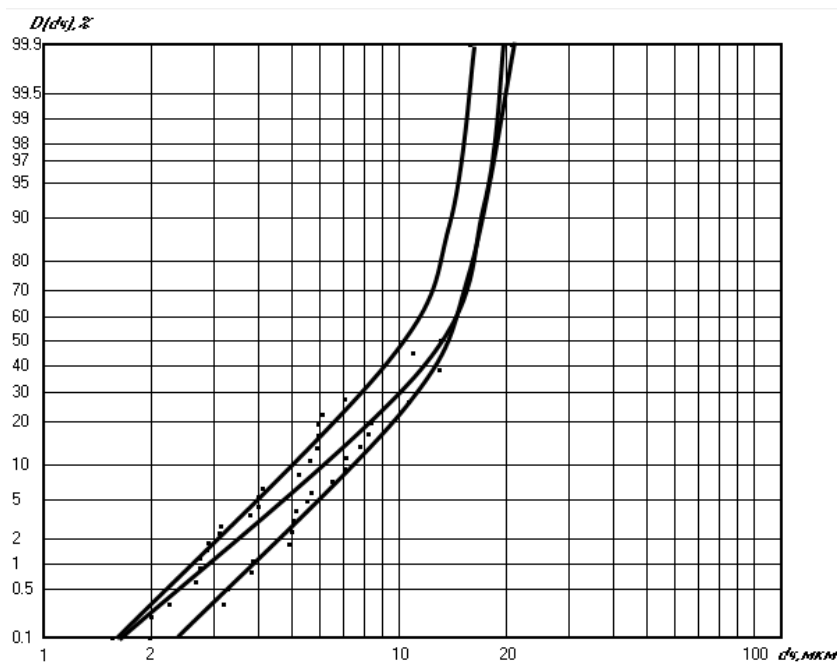


Рисунок 3.5 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для пыли отобранной на территории цементного завода (Йемен)

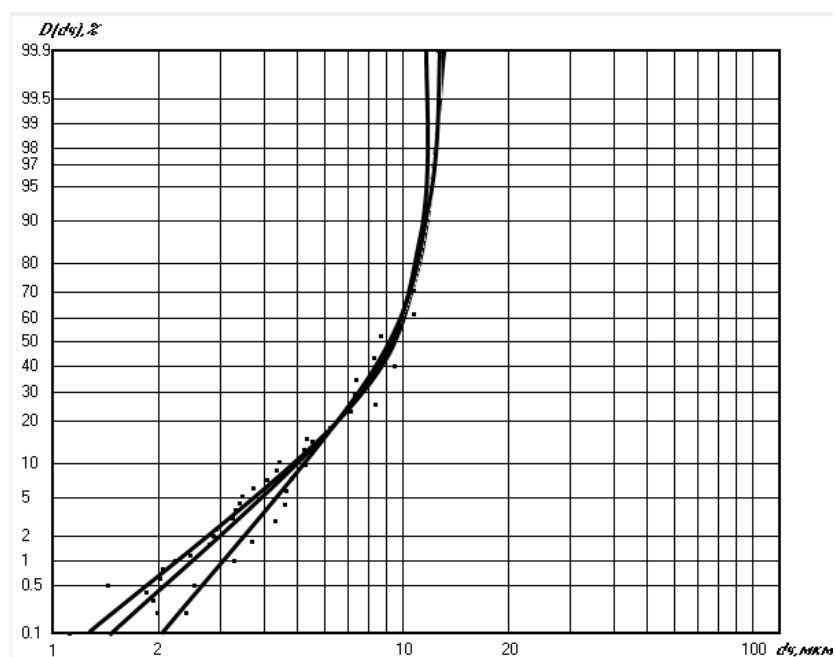


Рисунок 3.6 - Интегральные кривые распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке для цементной пыли отобранной в цехе помола на цементном заводе (Йемен)

При транспортировке цементной пыли (рисунок.3.3.) содержание частиц пыли с размером  $PM_{10}$  составляет от 51-80% по массе,  $PM_{2,5}$  от 0,7 - 1,5% по массе, (рисунок 3.4.)  $PM_{10}$  составляют 100 %,  $PM_{2,5}$  от 7– 16 % от общей массы пыли. Содержание  $PM_{10}$  на участке упаковки цемента (рисунок.3.5.) –  $PM_{10}$  составляют 21 - 50% от общей массы пыли, из них на частицы  $PM_{2,5}$  приходится от 0,2 – 1 % , (рисунок 3.6.) доля частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  будет составлять 64% и 0,4 – 1,8% от общей массы пыли соответственно.

Как видно из результатов проведенного анализа пыли значительную часть проб составляют частицы, размером менее 10 мкм.

Значения предельно допустимых концентраций для взвешенных частиц примерно в два раза выше значений ПДК для  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ [50], что свидетельствует о значительно большей вредности мелких фракций пыли. Как правило, такие же зависимости ПДК сохраняются и для рабочей зоны.

Следовательно, можно сделать вывод о и необходимости установления норматива предельно допустимых концентраций взвешенных частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  для воздуха жилых и рабочих зон. А также о целесообразности продолжении проведения исследований направленных на снижение поступления мелкодисперсной пыли в атмосферу.

### **3.2. Экспериментальные исследования пылеулавливающей установки**

Ранее отмечалось, что основным обеспыливающим оборудованием, используемым на цементных заводах республики Йемен, являются рукавные фильтры. Опыт применения этого обеспыливающего оборудования [56,65,74,75,94,95,97] показывает, что имеются определенные сложности в процессе его эксплуатации, такие как повышенное аэродинамическое сопротивление, сложности связанные с подбором рукавов, их регенерацией, и



др. Для снижения нагрузки по пыли на рукавные фильтры, предлагается перед подачей воздуха на очистку в рукавный фильтр производить предварительную очистку газа в аппарате ВЗП. Для этого была разработана экспериментальная установка с аппаратов ВЗП и рукавным фильтром.

### 3.2.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования по определению эффективности вихревого инерционного пылеуловителя со встречными закрученными потоками с рукавным фильтром проводились на экспериментальной установке очистки воздуха от пыли, представленной на рисунок 3.7. [61,62]

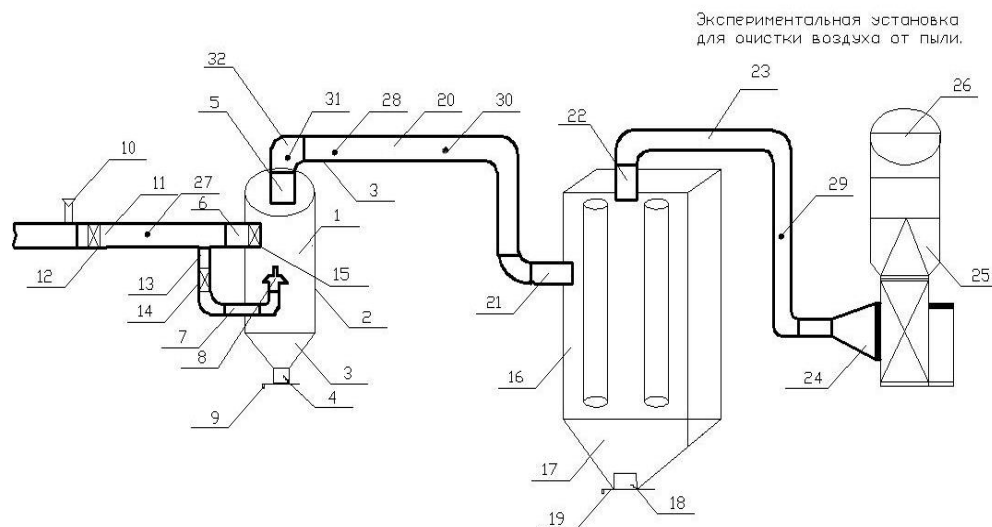


Рисунок.3.7. Схема экспериментальной установки для очистки воздуха от пыли: 1 – вихревой инерционный пылеуловитель со встречными закрученными потоками; 2 – цилиндрический корпус из органического стекла; 3 – конический бункер для приема уловленной пыли с осевым патрубком; 4 – выводы уловленной пыли с осевым патрубком; 5 – вывод чистого воздуха; 6 – верхний входной патрубок; 7 – нижний входной патрубок

для подачи в пылеуловитель 1 пылевоздушной смеси; 8 – коническую отбойную шайбу, которая установлен на выходном конце нижнего входного патрубка 7; 9 – первый выдвижной шибер, который установлен на патрубке 4 вывода уловленной пыли из бункера 3; 10,33 – питатели 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 первой трубопроводе 11 для подключение контрольно измерительного прибора; 28 – штуцер на третьем трубопроводе 20 для подключение первого контрольно измерительного прибора; 29 – штуцер на четвертом трубопроводе 23 для подключение второго контрольно измерительного прибора; 30 – штуцер на третьем трубопроводе для подключение второго контрольно измерительного прибора; 31 – штуцер на третьем трубопроводе для подключение третьего контрольно измерительного прибора; 32 – сменный отвод.

Установка позволяет проводить исследования с использованием аппарата ВЗП и всего оборудования (рисунок 3,7). Кроме того, в случае снятия сменного отвода 32 и исключения из схемы аппарата ВЗП возможна оценка эффективности только одного рукавного фильтра .

Фото экспериментальной установки представлено на рисунок. 3.8



Рисунок.3.8 - Экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли.

Установка содержит вихревой инерционный пылеуловитель со встречными закрученными потоками с цилиндрическим корпусом и коническим бункером для приема уловленной пыли и с патрубком вывода ее из бункера, с осевым патрубком вывода чистого воздуха, с верхним входным патрубком и с нижним входным патрубком для подачи в пылеуловитель пылевоздушной смеси, при этом на входном конце нижнего входного патрубка установлена коническая отбойная шайба, питатель для загрузки пыли соединен с первым трубопроводом, который своим выходом подключен к верхнему входному патрубку пылеуловителя, и соединен с вторым трубопроводом, внутри которого установлена первая повторная заслонка, при этом второй трубопровод своим выходом подключен к нижнему входному патрубку для подачи в пылеуловитель пылевоздушной смеси, кроме этого установка содержит последовательные соединенные осевой патрубок пылеуловителя, третий трубопровод, фильтр и вентилятор с входными и выходными патрубками, установка также содержит штуцеры для подключения контрольно-измерительных приборов[49,64,81,82].

### 3.2.2 План проведения и методика эксперимента

При проведении исследований методами планирования эксперимента по определению эффективности пылеулавливания в вихревом инерционном аппарате со встречными закрученными потоками в качестве варьируемых факторов были выбраны:

- V- относительная скорость потока в поперечном сечении аппарата, равная отношению расхода газа, поступающего на очистку, к площади поперечного сечения аппарата и отнесенная к 1 м/с;
- $K_H$ - 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 г/м<sup>3</sup>.

Эффективность пылеулавливания определялась на основании сопоставления масс пыли, поступающей и выходящей, которые определялись на основании отбора проб и измерений, проводимых в замерных сечениях воздуховодов.

В ходе эксперимента для замеров запыленности воздуха, использовался комплект пылезаборного оборудования, который разработан и изготовлен НИИОГАЗ[30]. Для того чтобы обеспечить идентичность отбора проб, этот процесс осуществлялся одновременно во всех замерных сечениях.

Величины давлений, в воздуховодах определялись при помощи микроманометров ММН-250 и трубок Прандтля, термоэлектро анемометром TESTO-425 определялись: общий расход воздуха в установке; соотношение расходов пылевоздушной смеси в верхних и нижних вводах пылеулавливающего аппарата; расход воздуха, отсасываемого из бункера пылеуловителя.

Концентрация пыли на входе в систему задавалась, прежде всего, временем загрузки, которое фиксировалось при помощи секундомера и расчетной массой исходной загрузки, определяемой по формуле [31]:

$$G_0 = \frac{c_0 \cdot L}{60} \tau, \quad (3.1)$$

Где  $G_0$  – масса навески пыли, г;

$c_0$  – начальная концентрация на входе в систему, г/м<sup>3</sup>;

$L$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/с;

$\tau$  – время загрузки, мин.

При использовании математической модели в виде полинома второго порядка были использованы планы на трех уровнях типа  $3^n$  [30,45,47,48] (где  $n = 3$  – число факторов), при этом были реализованы все возможные неповторяющиеся комбинации уровней исследуемых факторов (полный факторный эксперимент).

При переходе от матрицы планирования к рабочей матрицы эксперимента использовалось следующее преобразование:

$$x_i = \frac{\bar{x}_i - \bar{x}_{i0}}{\Delta I_i}, \quad (3.2)$$

Где  $x_i$  – кодированное значение фактора;

$\bar{x}_i$  – натуральное значение фактора;

$\bar{x}_{i0}$  – натуральное значение основного уровня;

Таблица3. 1 - Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
		Основной 0	Верхний +1	Нижний -1
x1 – L- общий расход газа в системе м <sup>3</sup> /час	60	180	240	120
x2 - K <sub>H</sub> доля расхода газа, подаваемого в аппарат через нижний ввод	0,1	0,3	0,4	0,2
x3 – C- относительная концентрация поступающей пыли на очистку, отнесенная к 1 г/м <sup>3</sup>	8	10	18	2

Таблица 3.2 - Матрица планирования экспериментальных исследований

№ опыта	Факторы			
	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>
1	+1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	0
3	+1	-1	-1	+1
4	+1	-1	0	-1
5	+1	-1	0	0
6	+1	-1	0	+1
7	+1	-1	+1	-1
8	+1	-1	+1	0
9	+1	-1	+1	+1
10	+1	0	-1	-1
11	+1	0	-1	0
12	+1	0	-1	+1
13	+1	0	0	-1
14	+1	0	0	0
15	+1	0	0	+1
16	+1	0	+1	-1
17	+1	0	+1	0
18	+1	0	+1	+1
19	+1	+1	-1	-1
20	+1	+1	-1	0
21	+1	+1	-1	+1
22	+1	+1	0	-1
23	+1	+1	0	0
24	+1	+1	0	+1
25	+1	+1	+1	-1
26	+1	+1	+1	0
27	+1	+1	+1	+1

Для минимизации влияния на результат неуправляемых факторов была осуществлена рандомизация хода выполнения опытов. В ходе разработки эксперимента для проверки воспроизводимости и для проведения статистических оценок результатов эксперимента плана, планировалось проведение трех параллельных серий опытов.

### 3.2.3. Результаты экспериментальных измерений

Таблица 3.3 – Результаты экспериментальных исследований улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП-150

Режим	Общий расход газа в системе м3/час	Доля расхода газа, подаваемого в аппарат через нижний ввод	Относительная концентрация поступающей пыли на очистку, г/м <sup>3</sup>	Эффективность улавливания, η, %
L=1D	200	0,2	89,69	75,72
			89,87	75,74
			89,90	75,78
		0,3	90,07	75,66
			90,16	75,64
			90,24	75,68
		0,4	90,08	75,54
			90,17	75,55
			90,25	75,51
	350	0,2	90,16	75,84
			90,23	75,85
			90,33	75,94
		0,3	90,42	75,73
			90,55	75,76
			90,66	75,75
		0,4	90,42	75,52
			90,55	75,66
			90,60	75,60
	500	0,2	91,25	76,08
			91,33	76,05
			91,44	76,08
		0,3	91,55	75,89
			91,66	75,85
			91,73	75,86
		0,4	91,53	75,63
			91,65	75,67
			91,77	75,68

Таблица 3.4 – Результаты экспериментальных исследований улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП

Режим	Общий расход газа в системе м3/час	Доля расхода газа, подаваемого в аппарат через нижний ввод	Относительная концентрация поступающей пыли на очистку, г/м <sup>3</sup>	Эффективность улавливания, η, %
L=2D	200	0,2	89,75	78,74
			89,85	78,85
			89,92	78,92
		0,3	90,05	79,05
			90,16	79,16
			90,27	79,27
		0,4	90,01	79,01
			90,12	79,12
			90,28	79,28
	350	0,2	90,19	79,19
			90,25	79,25
			90,34	79,34
		0,3	90,44	79,44
			90,51	79,51
			90,63	79,63
		0,4	90,45	79,45
			90,55	79,55
			90,65	79,65
	500	0,2	91,25	80,25
			91,39	80,39
			91,42	80,42
		0,3	91,55	80,55
			91,69	80,69
			91,77	80,77
		0,4	91,51	80,51
			91,61	80,61
			91,75	80,75



Таблица 3.5 – Результаты экспериментальных исследований улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП

Режим	Общий расход газа в системе м3/час	Доля расхода газа, подаваемого в аппарат через нижний ввод	Относительная концентрация поступающей пыли на очистку, г/м <sup>3</sup>	Эффективность улавливания, η, %
L=3D	200	0,2	89,75	73,15
			89,86	73,36
			89,93	73,54
		0,3	90,04	73,74
			90,14	73,94
			90,27	74,17
		0,4	90,08	74,27
			90,18	74,48
			90,25	74,65
	350	0,2	90,11	74,91
			90,27	75,17
			90,38	75,38
		0,3	90,46	75,53
			90,54	75,74
			90,68	75,95
		0,4	90,44	76,07
			90,51	76,25
			90,65	76,46
	500	0,2	91,25	77,42
			91,33	77,65
			91,44	77,85
		0,3	91,54	78,08
			91,69	78,25
			91,72	78,42
		0,4	91,55	78,60
			91,61	78,75
			91,73	78,92

### 3.2.4. Обработка полученных данных

Результаты эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП для режима  $L=1D$  представлены на рисунке 3.9 – 3.11.

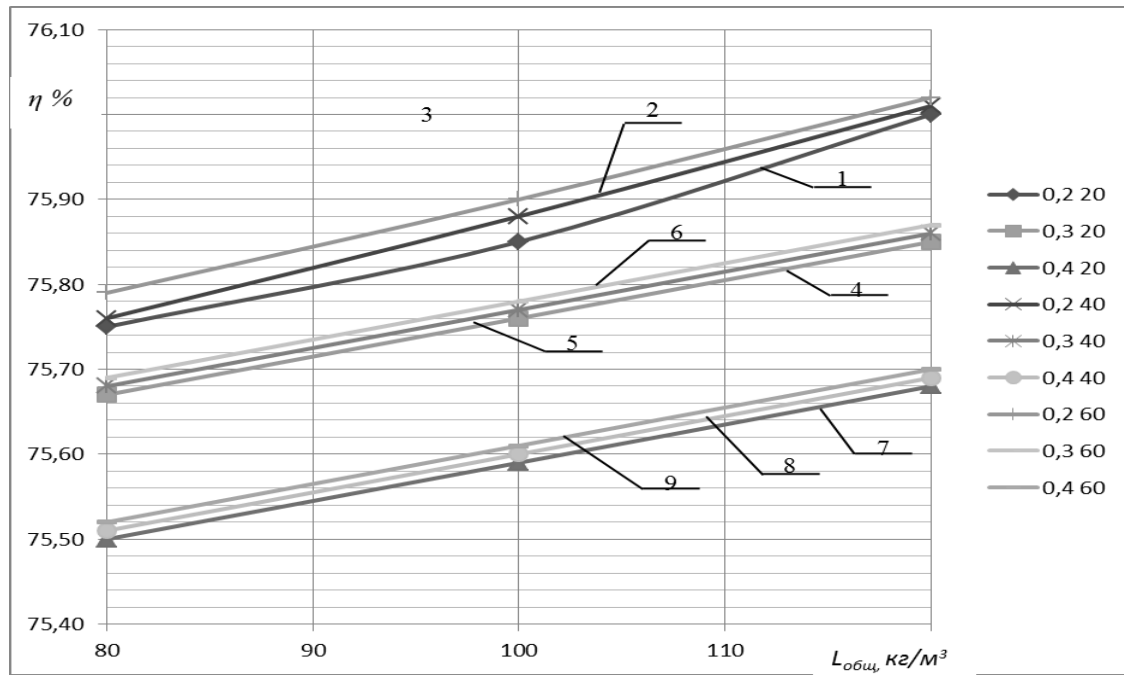


Рисунок 3.9 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода

$L=150$ мм при:

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

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

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

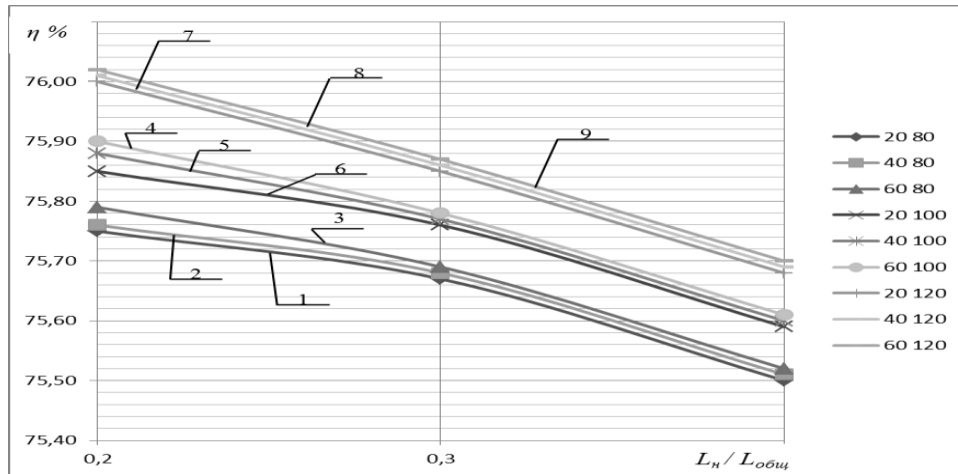


Рисунок 3.10 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $L=150$  мм при:

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

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

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

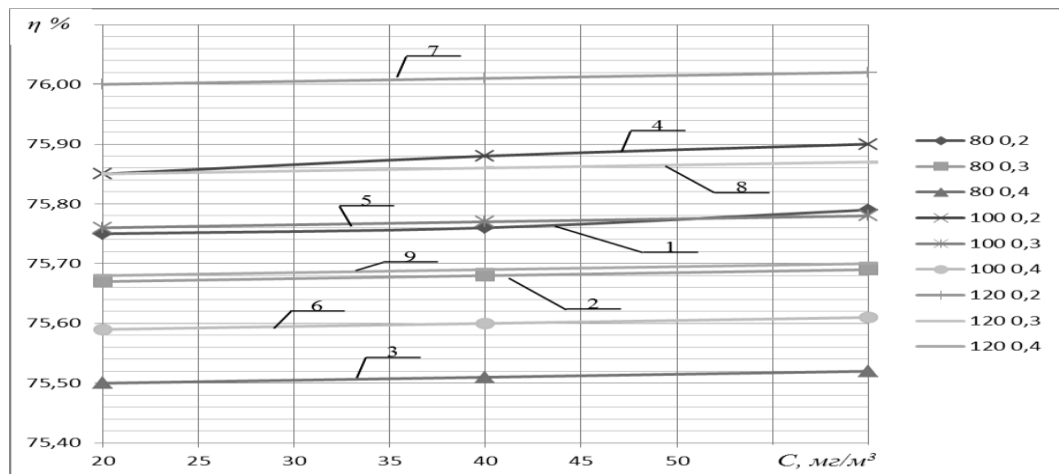


Рисунок 3.11 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $L=150$  при:

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

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

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

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$Y = 90.75 + 0.00503X_1 - 1.42X_2 + 0.000639X_3$$

$$Y = 90.75 - 5 \cdot L_{\text{общ}} - 17,2 \cdot L_n / L_{\text{общ}} - 2 \cdot \bar{C}$$

Результаты эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП для режима  $L=2D$  представлены на рисунке 3.12 – 3.15.

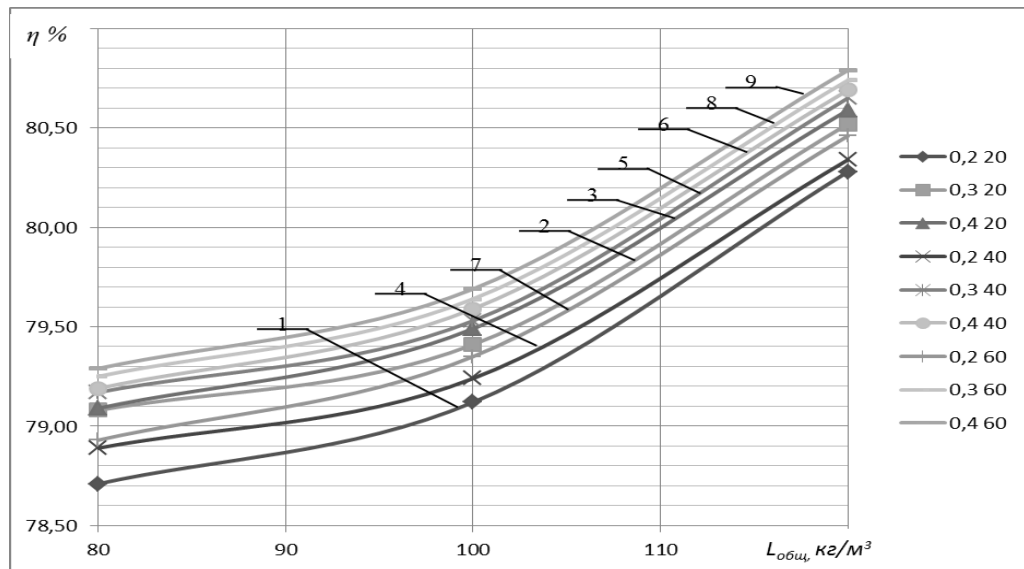


Рисунок 3.12 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода

$L=300\text{мм}$  при:

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

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

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

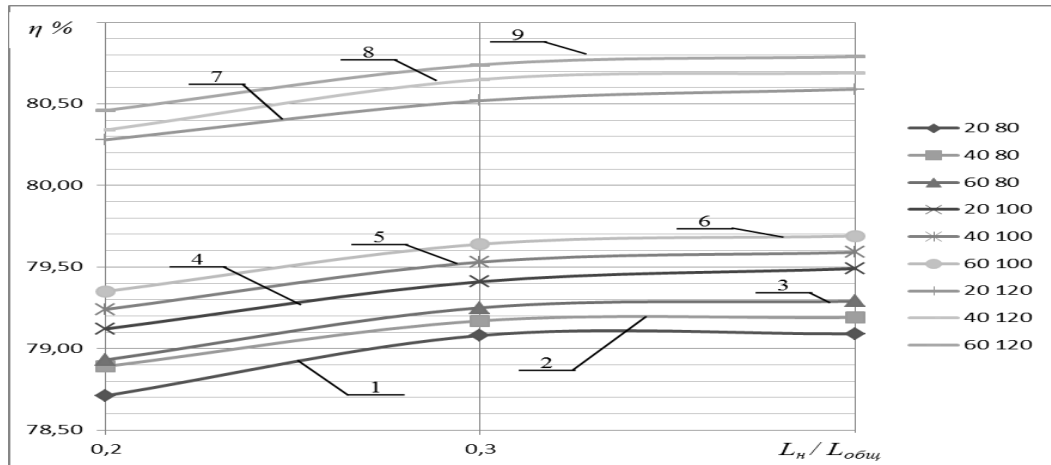


Рисунок 3.14 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $L=300\text{мм}$  при:

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

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

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

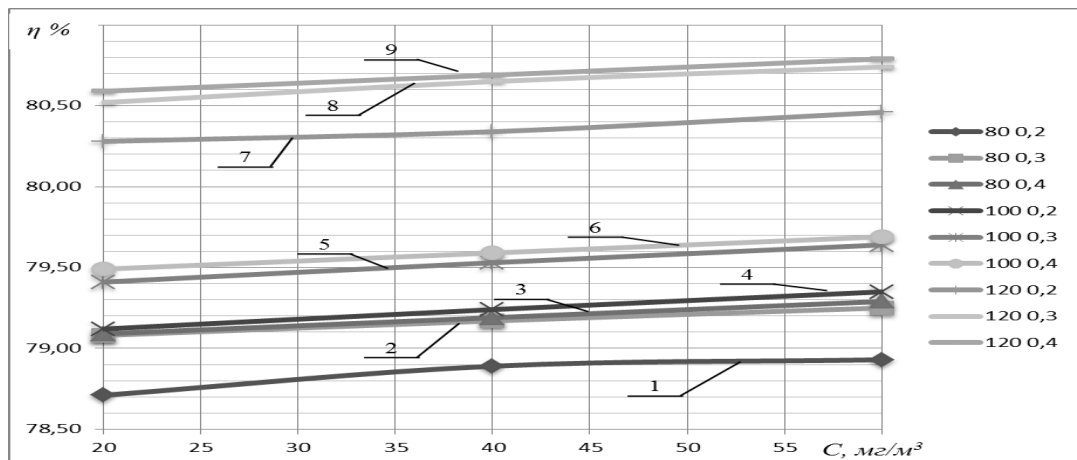


Рисунок 3.15 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $L=300$  при:

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

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

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

Уравнение регрессии будет иметь вид:

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

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

Результаты эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП для режима  $L=3D$  представлены на рисунок 3.16 – 3.17

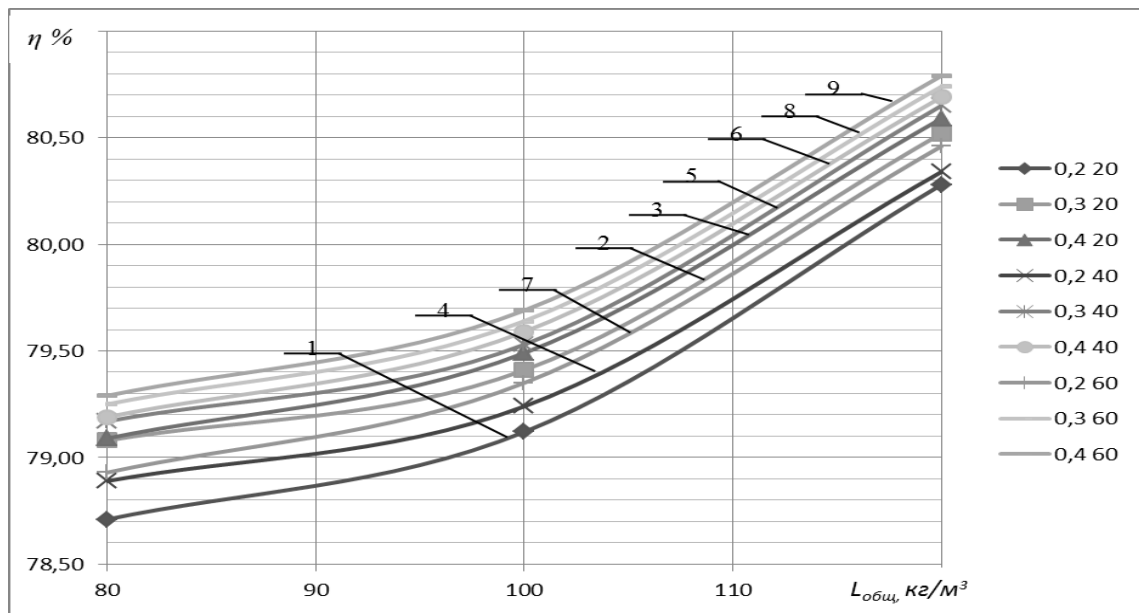


Рисунок 3.16 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода

$L=450\text{мм}$  при:

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

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

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

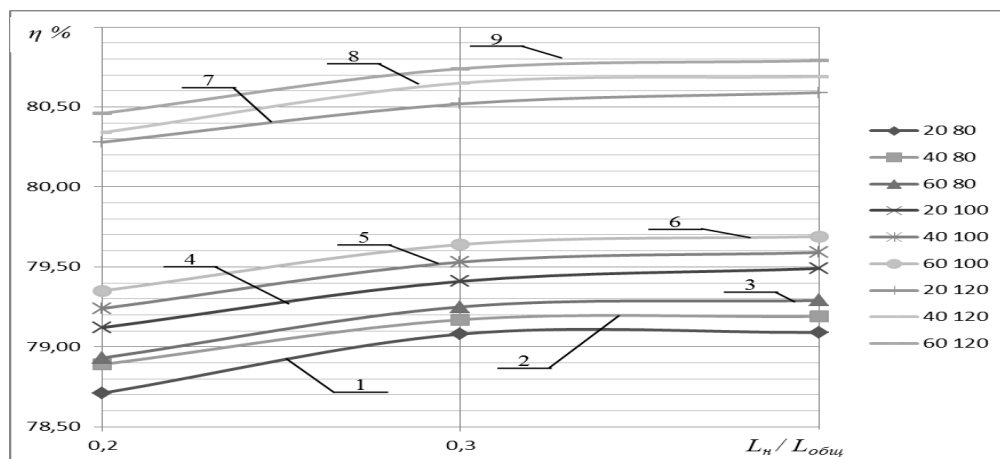


Рисунок 3.17 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $L=450\text{мм}$  при:

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

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

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

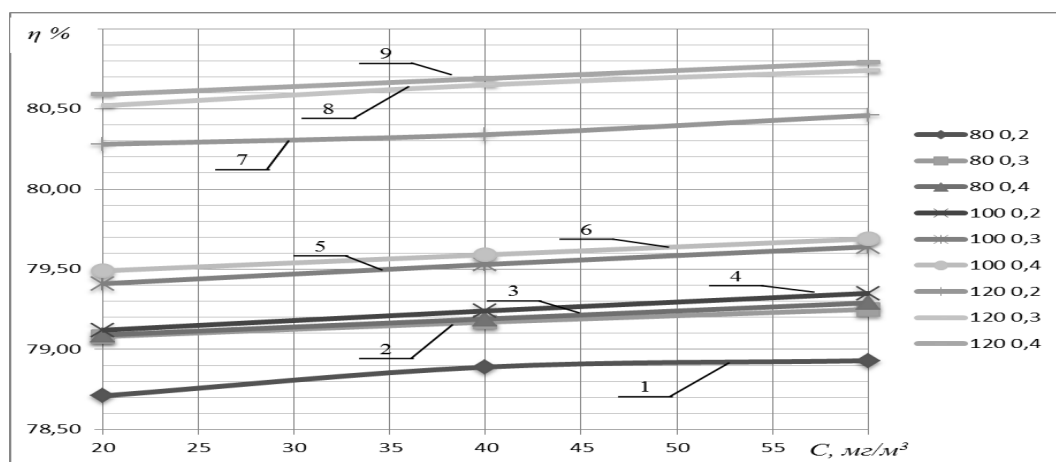


Рисунок 3.18 - Экспериментальные зависимости эффективности улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $L=450$  при:

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

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

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

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$Y = 77.17 + 0.11X_1 + 5.27X_2 + 0.0101X_3$$

$$Y = 77.17 - 4,995 \cdot L_{\text{общ}} + 49,7 \cdot L_n / L_{\text{общ}} - 1,999 \cdot \bar{C}$$

Полученные результаты аэродинамического сопротивления аппарата ВЗП для трех режимов представлены на рисунке (3.19 – 3.24.)

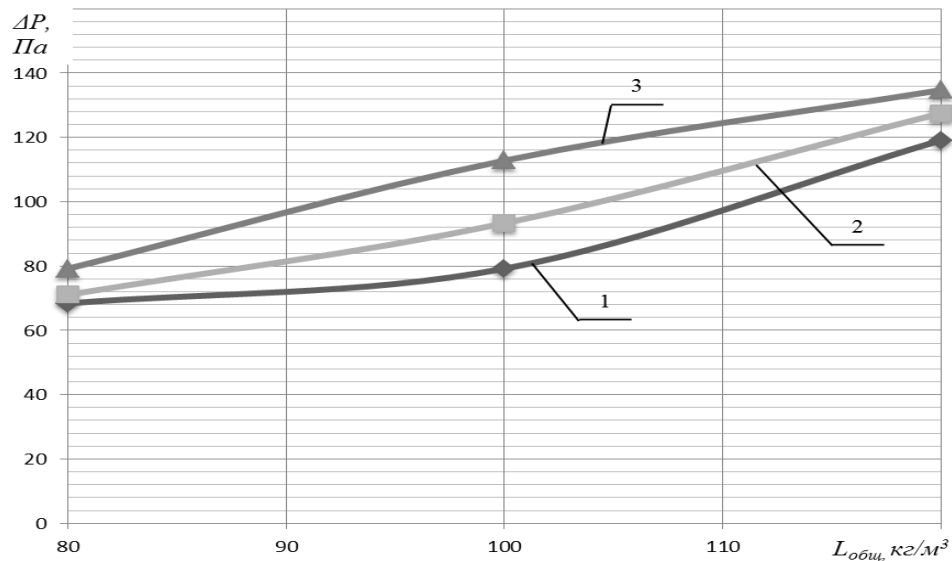


Рисунок 3.19 - Экспериментальные зависимости аэродинамического сопротивления аппарата ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $l=1 \cdot D$  :

1 –  $L_n / L_{\text{общ}} = 0,2$ ; 2 –  $L_n / L_{\text{общ}} = 0,3$ ; 3 –  $L_n / L_{\text{общ}} = 0,4$ .

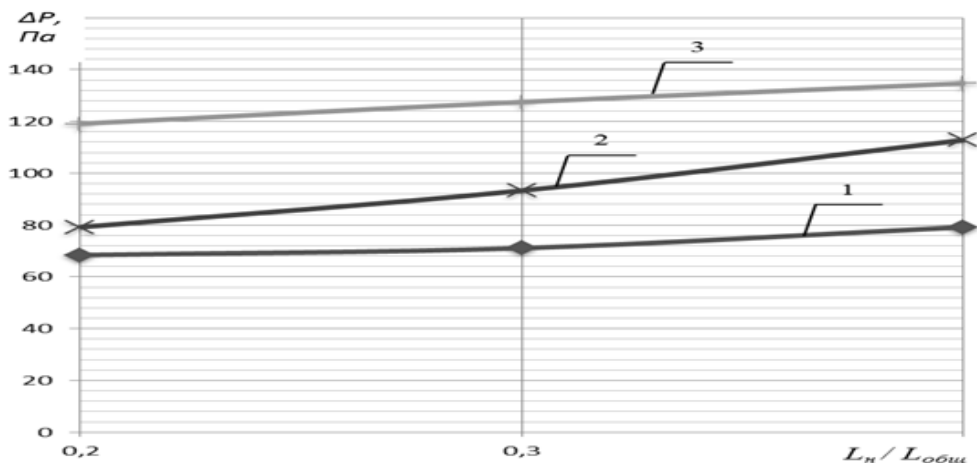


Рисунок 3.20 - Экспериментальные зависимости аэродинамического сопротивления аппарата ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $l=1 \cdot D$  :

$L_{\text{общ}} = 80$ ; 2 –  $L_{\text{общ}} = 100$ ; 3 –  $L_{\text{общ}} = 120$ .



Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$Y = -67.13 - 0X_3 + 1.35X_1 + 100X_2$$

$$Y = -67.13 - 4,932 \cdot L_{общ} + 997 \cdot L_n / L_{общ}$$

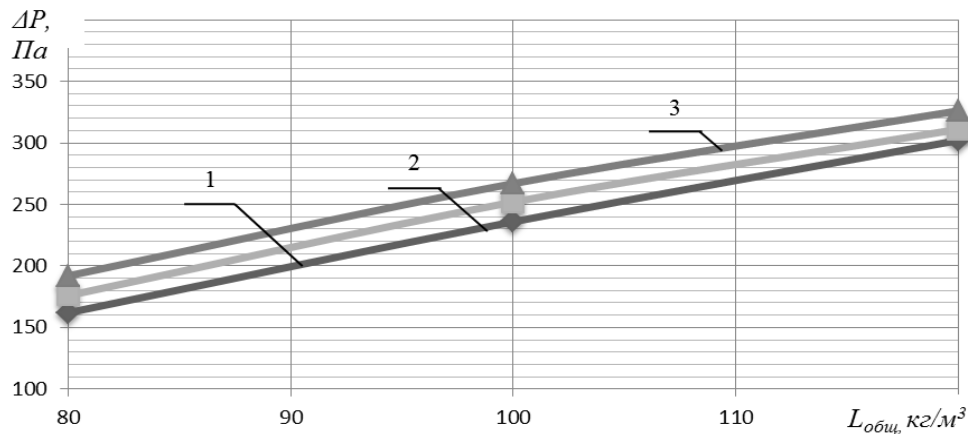


Рисунок 3.21 - Экспериментальные зависимости аэродинамического сопротивления аппарата ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $l=2 \cdot D : 1$

–  $L_n / L_{общ} = 0,2$ ; 2 –  $L_n / L_{общ} = 0,3$ ; 3 –  $L_n / L_{общ} = 0,4$ .

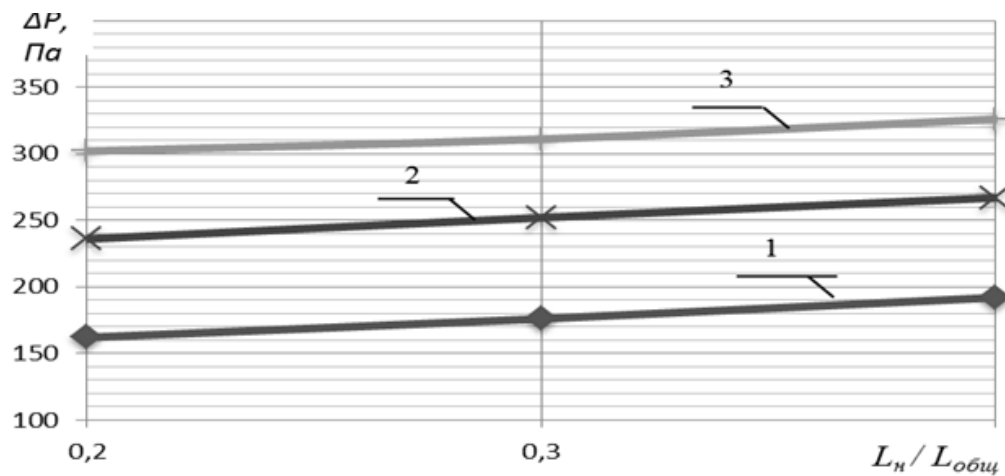


Рисунок 3.22 - Экспериментальные зависимости аэродинамического сопротивления аппарата ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $l=2 \cdot D : 1$

–  $L_{общ} = 80$ ; 2 –  $L_{общ} = 100$ ; 3 –  $L_{общ} = 120$ .

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$Y = -136.22 - 0X_3 + 3.41X_1 + 141.67X_2$$

$$Y = -136.22 - 4,829 \cdot L_{общ} + 1414 \cdot L_n / L_{общ}$$

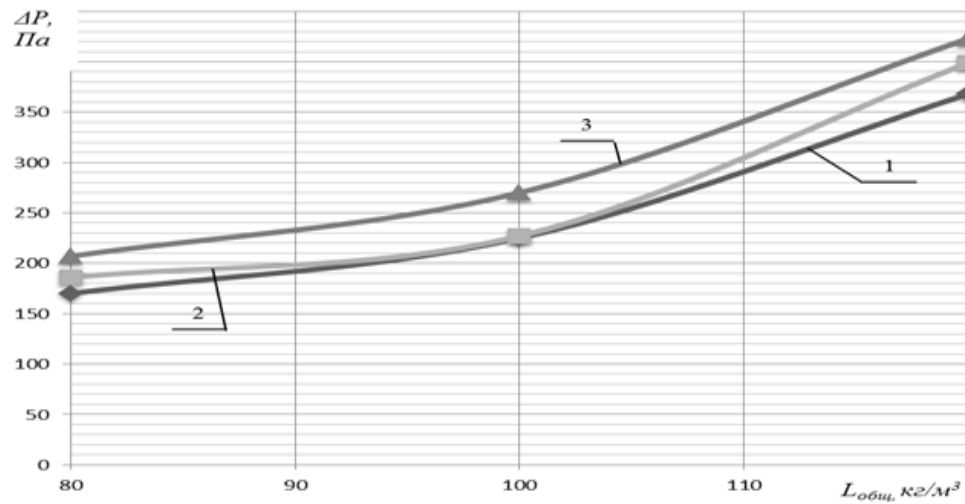


Рисунок 3.23 - Экспериментальные зависимости аэродинамического сопротивления аппарата ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $l=3 \cdot D$  :

1 –  $L_n / L_{общ} = 0,2$ ; 2 –  $L_n / L_{общ} = 0,3$ ; 3 –  $L_n / L_{общ} = 0,4$ .

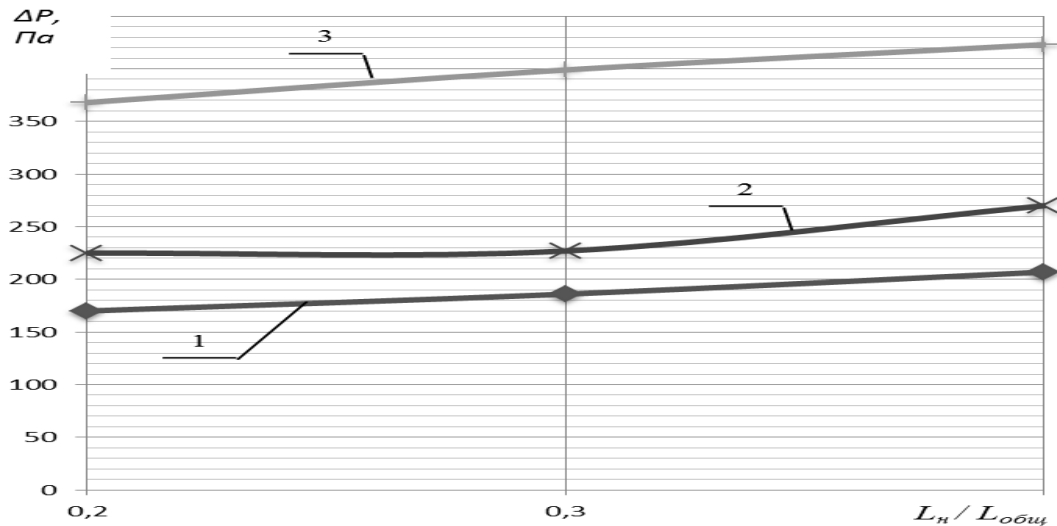


Рисунок 3.24 - Экспериментальные зависимости аэродинамического сопротивления аппарата ВЗП 150 с длиной патрубка нижнего ввода  $l=3 \cdot D$  :

1 –  $L_{общ} = 80$ ; 2 –  $L_{общ} = 100$ ; 3 –  $L_{общ} = 120$ .

Уравнение регрессии будет иметь вид:

$$Y = -316 - 0X_3 + 5.22X_1 + 228.33X_2$$

$$Y = -316 - 4739 \cdot L_{общ} + 2280 \cdot L_n / L_{общ}$$

Таблица 3.6. – Матрица результатов экспериментальных исследований по определению эффективности пылеулавливания

№	Факторы			Эффективность "η, %"	"η" <sub>расч</sub> %
	x1	x2	x3	"η" <sub>1</sub>	
1	-1	-1	-1	77,5	98,03
2	-1	-1	0	78,7	65,22
3	-1	-1	1	80,2	97,64
4	-1	0	-1	77,8	68,8
5	-1	0	0	88,0	36,81
6	-1	0	1	91,0	70,02
7	-1	1	-1	83,1	68,6
8	-1	1	0	92,1	70,36
9	-1	1	1	93,5	80,8
10	0	-1	-1	80,2	63,77
11	0	-1	0	81,6	30,14
12	0	-1	1	82,3	61,75
13	0	-1	-1	82,3	32,87
14	0	0	0	89,1	63,5
15	0	0	1	97,2	79,9
16	0	0	-1	79,2	48,3
17	0	1	0	89,2	77,7
18	0	1	1	81,6	71,5
19	1	1	-1	79,1	58,5
20	1	1	0	82,6	74,4
21	1	-1	1	88,6	78,2
22	1	-1	-1	81,0	30,14
23	1	-1	0	81,4	34,98
24	1	0	1	95,9	90,5
25	1	0	-1	82,4	77,1
26	1	0	0	87,1	80,8
27	1	1	1	92,5	97,9

Оценка воспроизводимости экспериментальных исследований, приведенных в таблица 3.6, выполнена на основании сопоставления расчетного и табличного критериев Кохрена, на уровне доверительной вероятности  $p=0,05$  результаты экспериментальных исследований воспроизводимы [30]. В результате аппроксимации экспериментальных данных полиномами второй степени с учетом значимости вычисленных коэффициентов, уравнение регрессии запишем в виде:

$$\begin{aligned} \eta = & 0,9138 \left( \frac{L-180}{60} \right) + 0,83 \left( \frac{K_H - 0,3}{0,1} \right) - 0,25 \left( \frac{C-10}{8} \right) - 1,7 \left( \frac{L-180}{60} \right) \left( \frac{K_H - 0,3}{0,1} \right) \\ & + 0,58 \left( \frac{K_H - 0,3}{0,1} \right) \left( \frac{C-10}{8} \right) + 0,816 \left( \frac{L-180}{60} \right) \left( \frac{C-10}{8} \right) + 35,899 \left( \frac{L-180}{60} \right) L \\ & + 30,97 \left( \frac{K_H - 0,3}{0,1} \right)^2 + 32,621 \left( \frac{C-10}{8} \right)^2 \end{aligned}$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определялась по критерию Стьюдента. Адекватность уравнений регрессии проверялась сопоставлением расчетного и табличного (при заданных  $q$  и числе степеней свободы) значений критерия Фишера  $F$ , представляющего собой отношение дисперсии адекватности к ошибке опыта. Выполнение во всех случаях условий  $F_p < F_m$  свидетельствует об адекватности полученной модели [30,63].

### 3.3. Анализ результатов исследований

1. Экспериментально установлено, 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;

2. Выявлено, что, не смотря на минимальные значения аэродинамического сопротивления режима  $l=1 \cdot D$ , во вторичном потоке закрутки не наблюдается, что вызывает нарушение аэродинамического режима работы аппарата ВЗП;

3. Выявлено, что при длине нижнего горизонтального патрубка, равной трем диаметрам ВЗП ( $l=3 \cdot D$ ), аэродинамическое сопротивление установки является максимальным, наблюдается затухание крутки на входе в сепарационную камеру.

4. Экспериментально подтверждены зависимости эффективности улавливания аппарата ВЗП от интенсивности крутки на входе в аппарат.

5. Выявлено, что для режимов  $l=2 \cdot D$  и  $l=3 \cdot D$  оптимальное аэродинамическое сопротивление достигается в диапазоне значений  $L_n/L_{общ} = 0,29 - 0,39$ , а при режиме  $l=1 \cdot D$ , оптимальное значение сопротивления отмечается при работе аппарата ВЗП с соотношением  $L_n/L_{общ} = 0,2$ .

6. Экспериментально установлено, что цементная пыль, плотностью  $2240 \text{ кг/м}^3$  и медианным диаметром частиц  $12 \text{ мкм}$ , существенного влияния на аэродинамические характеристики аппарата ВЗП-150 не оказывает.

7. Вследствие различного аэродинамического сопротивления, длина патрубка от закручивателя до сепарационной камеры влияет на затухание закрученного потока, изменение его шага витка, что в итоге в значительной степени определяет интенсивность закрутки вторичного потока на входе в сепарационную камеру. Параметры вторичного закрученного потока на входе в сепарационную камеру в значительной мере определяют эффективность улавливания и аэродинамический режим аппарата ВЗП.

8. Анализ результатов исследования показал, что изменение длины патрубка вторичного пылегазового потока на аэродинамическое сопротивление аппарата ВЗП не оказывает значительного влияния, и, в то же время, имеет большое значение для эффективности улавливания установки в целом.

9. Эффективность улавливания цементной пыли по данным эксперимента достигает 81%.

### 3.4. Выводы по третьей главе

1. Проведены экспериментальные исследования осаждения частиц цементной пыли в выбросах цементных заводов. Результаты исследований показали, что при транспортировке цементной пыли содержание частиц пыли с размером  $PM_{10}$  составляет 51-80% по массе,  $PM_{2,5}$  0,7 - 1,5% по массе,  $PM_{10}$  составляют 100 %,  $PM_{2,5}$  7– 16 % от общей массы пыли. Содержание  $PM_{10}$  на участке упаковки цемента–  $PM_{10}$  составляют 21 - 50% от общей массы пыли, из них на частицы  $PM_{2,5}$  приходится от 0,2 – 1 %, доля частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$  будет составлять 64% и 0,4 – 1,8% от общей массы пыли соответственно. На основании чего можно сделать вывод о том, что в воздухе рабочих зон предприятия и на прилегающих территориях распространяется пыль с размерами частиц менее 10 мкм.

2. Разработана установка очистки воздуха от пыли, которая содержит аппарат ВЗП и рукавный фильтр.

3. Проведены экспериментальные исследования эффективности лабораторной установки, в ходе эксперимента установлено, что оптимальным значением параметра длины нижнего патрубка является  $l=2 \cdot D$ .

4. Определено, что при значении параметра длины нижнего патрубка  $l=2 \cdot D$  оптимальное аэродинамическое сопротивление достигается в диапазоне значений  $L_n/L_{общ} = 0,29 - 0,39$ .

5. Эффективность улавливания цементной пыли аппаратом ВЗП по данным эксперимента достигает 81%.

## **ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **4.1. Совершенствование системы обеспыливания технологического оборудования предприятия по производству цемента**

С целью совершенствования систем обеспыливания предприятий по производству цемента была разработана и предложена экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли [83].

Установка относится к технике очистки воздуха от пыли и может использоваться в проектных лабораториях при исследовании процессов пылеулавливания. Установка содержит вихревой инерционный пылеуловитель со встречными закрученными потоками с цилиндрическим корпусом и коническим бункером для приема уловленной пыли и с патрубком вывода ее из бункера, с осевым патрубком вывода чистого воздуха, с верхним входным патрубком и с нижним входным патрубком для подачи в пылеуловитель пылевоздушной смеси, при этом на входном конце нижнего входного патрубка установлена коническая отбойная шайба, питатель для загрузки пыли соединен с первым трубопроводом, который своим выходом подключен к верхнему входному патрубку пылеуловителя, и соединен с вторым трубопроводом, внутри которого установлена первая повторная заслонка, при этом второй трубопровод своим выходом подключен к нижнему входному патрубку для подачи в пылеуловитель пылевоздушной смеси, кроме этого установка содержит последовательно соединенные осевой патрубок пылеуловителя, третий трубопровод, фильтр и вентилятор с входными и выходными патрубками, установка также содержит штуцеры для подключения контрольно-измерительных приборов.

Установка отличается особенностью разрабатываемой установки заключается в том, что цилиндрический корпус пылеуловителя выполнен из

органического стекла, верхний и нижний входные патрубки корпуса пылеуловителя выполнены тангенциальными, внутри верхнего входного тангенциального патрубка установлен улиточный завихритель, на патрубке выводы уловленной пыли из бункера установлен первый выдвижной шибер, внутри первого трубопровода установлена вторая повторная заслонка, фильтр выполнен в виде рукавного фильтра с коническим бункером и патрубком выводы уловленной пыли, на котором установлен второй выдвижной шибер, установка при этом содержит последовательно соединенные осевой патрубок пылеуловителя, сменный отвод, третий трубопровод, входной патрубок рукавного фильтра, рукавный фильтр, его выходной осевой патрубок, четвертый трубопровод, всасывающий патрубок вентилятора, сам вентилятор с выходным патрубком. Кроме этого штуцеры для контрольно-измерительных приборов установлены на первом, третьем, и четвертом трубопроводах.

Это позволяет расширить возможности проведения экспериментов для исследования влияния различных параметров на совершенствование работы вихревого пылеуловителя и рукавного фильтра.

Сущность экспериментальной установки поясняется чертежом, где на рисунок 4.1 показана экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли, общий вид.

Экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли [64,81,82], содержащая вихревой инерционный пылеуловитель со встречными закрученными потоками с цилиндрическим корпусом и коническим бункером для приема уловленной пыли и с патрубком вывода её из бункера, с осевым патрубком вывода чистого воздуха, с верхним входным патрубком и с нижним входным патрубком для подачи в пылеуловитель пылевоздушной смеси, при этом на выходном конце нижнего входного патрубка установлена коническая отбойная шайба, питатель для загрузки пыли соединен с первым трубопроводом, который своим выходом подключен к верхнему входному патрубку пылеуловителя, и соединен с вторым трубопроводом, внутри которого установлена первая поворотная заслонка, при этом второй

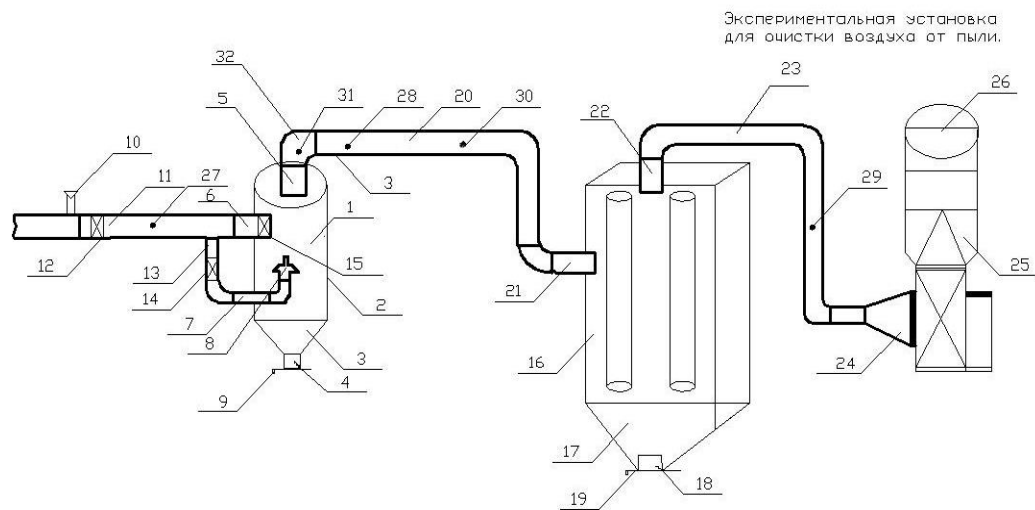


трубопровод своим выходом подключен к нижнему входному патрубку для подачи в пылеуловитель пылевоздушной смеси, кроме этого установка содержит последовательно соединенные осевой патрубок пылеуловителя, третий трубопровод, фильтр и вентилятор с входными и выходными патрубками, установка также содержит штуцеры для подключения контрольно-измерительных приборов, при этом цилиндрический корпус пылеуловителя выполнен из органического стекла, верхний и нижний входные патрубки корпуса пылеуловителя выполнены тангенциальными, внутри верхнего входного тангенциального патрубка установлен улиточный завихритель, на патрубке вывода уловленной пыли из бункера установлен первый выдвижной шибер, внутри первого трубопровода установлена вторая поворотная заслонка, фильтр выполнен в виде рукавного фильтра с коническим бункером и патрубком вывода уловленной пыли, на котором установлен второй выдвижной шибер, установка при этом содержит последовательно соединенные осевой патрубок пылеуловителя, третий трубопровод, входной патрубок рукавного фильтра, рукавный фильтр, его выходной осевой патрубок, четвертый трубопровод, всасывающий патрубок вентилятора и сам вентилятор с выходным патрубком, кроме этого штуцеры для контрольно-измерительных приборов установлены на первом, третьем и четвертом трубопроводах.

Это позволяет расширить возможности проведение экспериментов без загрязнения окружающей среды для оценки эффективности работы пылеуловителя при малых размерах частиц пыли, когда эффективность аппарата мала, а проскок пыли – большой. Кроме того, возможно исследование совместной работы пылеуловителя и рукавного фильтра.

## 4.2. Схема разработанной экспериментальной установки

Сущность разработанной экспериментальной установки поясняется чертежом, приведенным на рисунок. 4.1.



выдвижной шибер 9.

Питатель 10 для загрузки пыли соединен с первым трубопроводом 11, внутри которого установлена первая поворотная заслонка 12, который соединен с верхним входным тангенциальным патрубком 6 и со вторым трубопроводом 13, внутри которого установлена вторая поворотная заслонка 14, при этом второй трубопровод 13 своим выходом соединен с нижним входным патрубком 7 для подачи в 1 пылевоздушной смеси.

Верхний входной тангенциальный патрубок 6 снабжен улиточным завихрителем 15.

Установка содержит рукавный фильтр 16 с коническим бункером 17 для приема уловленной пыли, на котором установлен патрубок 18 вывода уловленной пыли и бункера 17. На патрубке 18 установлен второй выдвижной шибер 19.

Установка при этом содержит последовательно соединенные осевой патрубок 5 пылеуловителя 1, сменный отвод 32, третий трубопровод 20 длиной не менее 30 диаметров, входной патрубок 21 рукавного фильтра 16, его выходной патрубок 22, четвертый трубопровод 23 на конце которого установлен всасывающий патрубок 24 вентилятора 25, при этом выходной патрубок 26 вентилятора 25 соединен с атмосферой.

На первом трубопроводе 11, на третьем трубопроводе 20 и на четвертом трубопроводе 23 установлены штуцеры 27, 28, 29, 30, 31 соответственно для подключения контрольно-измерительных приборов.

Экспериментальная установка работает следующим образом.

Под действием работы вентилятора 25 воздух из атмосферы поступает в первый трубопровод 11, в котором он смешивается с пылью, подаваемой в расчетном количестве через питатель 10. Далее пылевоздушная смесь, расход которой регулируется первой поворотной заслонкой 12, поступает по трубопроводу 11 в верхний входной патрубок 6 и нижний входной 7 патрубок через второй трубопровод 13 и вторую поворотную заслонку 14, регулирующую подачу пылевоздушной смеси в нижнюю часть корпуса 2

пылеуловителя 1, а также через отбойную шайбу 8.

Оба потока пылевоздушной смеси закручиваются в одном направлении при прохождении через тангенциальных патрубков 7 и 6. Этому способствует также закручивание потока в улиточном завихрителе 15.

Потоки пылевоздушной смеси направляются навстречу друг другу и под действием центробежных и инерционных сил пыль отделяется от воздуха и направляется в нижнюю часть пылеуловителя 1 в бункер 3. Через патрубок 4 бункера 3 пыль периодически выгружается при использовании первого выдвижного шибер 9.

Поворотные заслонки 12 и 14 осуществляют достижение расчетного количества подаваемой на очистку пылегазовой смеси.

Очищенный в вихревом пылеуловителе воздух через осевой патрубок 5, сменный отвод 23 и третий трубопровод 20 направляется через входной патрубок 21 в рукавный фильтр 16.

На первом 11 и третьем 20 трубопроводах установлены контрольно-измерительные приборы в штуцерах 27 и 28. Для оценки степени закрутки после пылеуловителя 1 на третьем трубопроводе 20 установлены приборы для измерения скорости потока и закрутки его в штуцерах 28 и 30, а также на сменном отводе 32 в штуцере 31.

Используемый в установке рукавный фильтр 16 позволяет проводить дополнительную очистку воздуха, поступающего после очистки в вихревом, инерционном пылеуловителе 1. Рукавный фильтр 16 обеспечивает очистку выбросов в атмосферу пыли неуловленной пылеуловителем 1.

В рукавном фильтре 16 пыль оседает в коническом бункере 17, откуда через патрубок 18 и второй выдвижной шибер 19 выгружается в отвал.

Очищенный в рукавном фильтре 16 воздух через выходной патрубок 22 и четвертый трубопровод 23 поступает через всасывающий патрубок 24 и выходной патрубок 26 вентилятора 25 в атмосферу.

Дополнительная оценка параметров работы установки фиксируется контрольно-измерительными приборами устанавливаемые в штуцере 29

четвертом трубопроводе 23.

Предложенная система очистки в двух стадиях позволяет оценить эффективность улавливания как каждого из пылеуловителя 1 и рукавного фильтра 16 в отдельности, так и всей системы в целом.

#### **4.3 Экспериментальные исследования эффективности улавливания рукавных фильтров**

Эффективность работы тканевого фильтра прямо зависит от используемого в нем материала. Использование фильтрующего материала требует индивидуального подхода к выбору типа ткани. Параметры выбора зависят от параметров технологического процесса: от температуры, компонентного состава воздуха, физико-химических свойств пыли. Как правило, такой подбор осуществляют по экспериментальным данным. С целью определения наиболее эффективной ткани рукавного фильтра, которая может быть использована в установке очистки воздуха от пыли, были проведены экспериментальные исследования эффективностей следующих 3-х видов фильтровальных материалов, их характеристики представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 - Паспортные характеристики исследуемых материалов

Марка материала	Бельтинг	ФЛ-4	AERTES
1	2	3	4
Термостойкость, °С, не более	150	150	150
Минимальный размер задерживаемых частиц, мкм	5	10	5
Эффективность очистки, %	98	98	98
Удельный вес, г/м <sup>2</sup>	500	402	400
Воздухопроницаемость, дм <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> с	250	150	180
Волокнистый состав материала	П/Э 100%	номэкс	мета-арамид

В ходе исследования главной задачей являлось установление зависимости эффективности улавливания цементной пыли, характерной для Йемена

фильтровальными материалами от типа фильтровальной ткани, относительной влажности и скорости фильтрации очищаемого газа. Серия предварительных экспериментов показала, что при постоянных скорости фильтрации и влажности температура не влияет на эффективность улавливания.

Все исследования проводились в двух вариантах :без аппарата ВЗП и с аппаратом ВЗП (рис 3,7).

Все измерения проводились при установившемся движении потока воздуха.

По замерам величин давлений, определяли общий расход воздуха в установке.

Скорость фильтрации определяли по формуле [6,14]

$$V_{\phi} = \frac{L}{F_{\phi}} = \frac{L}{l \cdot \pi d \cdot n \cdot 60}, \quad (4.1)$$

Где :L – расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч,

F<sub>φ</sub> – площадь фильтрации , м<sup>2</sup>,

l – длина рукава, м,

n – число рукавов,

d – диаметр рукава, м.

Для определения потерь давления ΔP, [Па] производились замеры разрежения на входе и выходе из установки. Измерения концентрации пыли в потоке воздуха проводились по стандартным методикам [61,62]. Для измерений использовались стандартное оборудование, используемое при проведении экспериментов. Оценка эффективности работы рукавного фильтра осуществлялась на основе сопоставления поступающей и выходящей массы пыли. Измерение относительной влажности проводилось по стандартной методике [55,57,66,68].

При проведении исследований эффективности установки методами планирования эксперимента [30] в качестве варьируемых факторов были выбраны:

-Типа ткани (Бельтинг, ФЛ-4, AERTES)

V<sub>φу</sub>– скорость фильтрации, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>мин;(изменялась от 0,5 до 2,5 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>мин)

$\varphi_y$  – относительная влажность очищаемого воздуха, %.(изменялась от 55% до 95%).

Для каждого из трех видов ткани был реализован факторный эксперимент [26,35,85,92,90] порядка типа  $3^2$  (где 2 – число факторов), матрица планирования которого приведена в таблице 3.2., при этом определяющие факторы были приведены к виду:

$$x_1 = \frac{\bar{V}_{\varphi_y} - \bar{V}_{\varphi_{y_0}}}{\Delta \bar{V}_{\varphi_y}}; \quad (4.2)$$

$$x_2 = \frac{\bar{\varphi}_y - \bar{\varphi}_{y_0}}{\Delta \bar{\varphi}_y} \quad (4.3)$$

Где  $\bar{V}_{\varphi_{y_0}}; \bar{\varphi}_{y_0}$  — без размерные значения факторов в центре плана;

$\Delta \bar{V}_{\varphi_y}; \Delta \bar{\varphi}_y$  — без размерные интервалы изменений значения факторов.

Уровни и интервалы варьирования определяющих факторов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Уровни и интервалы варьирования определяющих факторов

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
		Основной 0	Верхний +1	Нижний - 1
1	2	3	4	5
$\bar{V}_\phi$ – скорость фильтрации, отнесенная к 1 м/мин;	1,00	1,5	2,5	0,5
$\bar{\varphi}$ – относительная влажность очищаемого воздуха, отнесенная к 1 %.	20	75	95	55

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить данные, приведенные в таблица 4.3.

Таблица 4.3 - Результаты экспериментальных исследований улавливания цементной пыли фильтровальным материалом с ВЗП и без ВЗП.

Материал рукавов	Скорость фильтрации, $V_{\phi}$ , м/мин	Относительная влажность газа, $\phi$ %	Эффективность улавливания, $\eta$ , % без ВЗП	Эффективность улавливания, $\eta$ , % с ВЗП
1	2	3	4	5
Бельтинг	0,5	55	99,2	99,4
		75	99,3	99,5
		95	97,6	99,7
	1,5	55	97,1	98,8
		75	98,4	99,1
		95	98,5	99,4
	2,5	55	94,1	99,1
		75	94,5	99,3
		95	94,9	99,6
ФЛ-4	0,5	55	99,2	99,4
		75	99,4	99,6
		95	99,7	99,8
	1,5	55	97,8	99,0
		75	98,9	99,4
		95	99,1	99,6
	2,5	55	94,7	99,2
		75	94,9	99,4
		95	95,1	99,8
AERTES	0,5	55	99,1	99,1
		75	99,3	99,4
		95	99,6	99,7
	1,5	55	95,7	98,7
		75	95,6	99,0
		95	95,3	99,3
	2,5	55	93,7	98,2
		75	94,3	98,9
		95	94,7	99,5

Для оценки воспроизводимости экспериментальных исследований, выполнено сопоставление расчетного и табличного критериев Кохрена, на уровне доверительной вероятности  $p = 0,05$  результаты экспериментальных исследований воспроизводимы. В качестве функции отклика определялась



эффективность улавливания установки. В результате аппроксимации экспериментальных данных полиномами второй степени с учетом значимости вычисленных коэффициентов, на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  принятом для технических экспериментов, уравнение регрессии ищем в виде:

$$\text{Для ткани Бельтинга : } \eta = 99,853 - 1,288 \overline{X_1} - 0,005 \overline{X_2} + 0,333 \overline{X_1^2} + 8,33 \cdot 10^{-5} \overline{X_2^2} \quad (4. 3a)$$

$$\text{Для ткани ФЛ-4 : } \eta = 99,164 - 0,854 \overline{X_1} + 0,0095 \overline{X_2} + 0,2 \overline{X_1^2} + 2,17 \cdot 10^{-12} \overline{X_2^2} \quad (4. 3б)$$

$$\text{Для ткани AERTES : } \eta = 98,898 - 1,323 \overline{X_1} + 0,0139 \overline{X_2} + 0,1 \overline{X_1^2} - 4,167 \cdot 10^{-5} \overline{X_2^2} \quad (4. 3в)$$

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

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определялась по критерию Стьюдента. Адекватность уравнений регрессии проверялась сопоставлением расчетного и табличного (при заданных  $q$  и числе степеней свободы) значений критерия Фишера  $F$ , представляющего собой отношение дисперсии адекватности к ошибке опыта. Выполнение во всех случаях условий  $F_p < F_m$  свидетельствует об адекватности полученной модели [37,38,40,80].

Результаты эксперимента показали, что максимальная эффективность улавливания отмечается для ткани ФЛ-4, которая достигается при скорости фильтрации 0,5 м/мин, и при этом отмечается пониженное аэродинамическое сопротивление ткани, и малый расход очищаемого газа. Таким образом, сравнения результатов испытаний установки (патент РФ RU 2015140195/05(061736) и 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.

#### 4.4. Совершенствование конструкций аппаратов ВЗП

Качество очистки газа в аппарате зависит от величины центробежной силы, выбрасывающей частицы пыли из потока, поэтому многие авторы, разрабатывающие вихревые пылеуловители, большое внимание уделяют конструктивному оформлению узла ввода вторичного потока газопылевой смеси, разработке внутренних устройств, позволяющих увеличить закрученность потоков [70,71].

При участии автора разработан ряд и предложена по совершенствованию аппарата, [78,79,80,81]. важной особенностью которых является то, что степень очистки зависит от соотношения расходов первичного и вторичного потоков и от концентрации твердой фазы в пылегазовом потоке. Например, в аппаратах ПВВЗП и ВИП оптимальная эффективность достигается при отношении расхода потока, подаваемого на нижний вход аппарата к общему потоку, поступающему на очистку, в пределах от 0,23 до 0,27. Это требует очень точного регулирования аппаратов и постоянного контроля за их работой. Для повышения устойчивости систем с вихревыми пылеуловителями предложено использовать предварительное разделение потоков [19]. Одним из важных конструктивных решений является то, что для повышения надежности работы аппарата ВЗП (рисунок 4.2) закручиватель вторичного потока может выноситься за пределы корпуса [32,33,34].

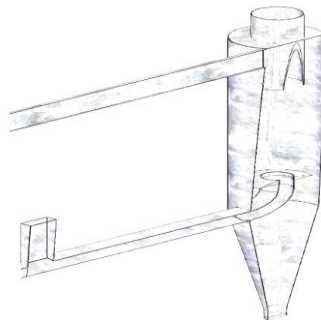


Рисунок 4.2 - Пылеуловитель ВЗП конструкции Азарова В.Н. и др. с вынесенным за пределы корпуса тангенциальным закручивателем

Однако, в связи с тем, что аппараты ВЗП, у которых тангенциальный закручиватель вынесен из корпуса [32]., требуют более точное регулирование и контроль за функционированием, на длительное поддержание режима работы существенное влияние оказывает структура потока нижнего входного патрубка.

При сохранении необходимых значений интенсивности закрутки пылегазового потока после тангенциального закручивателя и до ввода в сепарационную камеру будет обеспечен наиболее благоприятный для пылеулавливания режим функционирования аппарата ВЗП с сохранением минимальных значений потерь энергии на пылеочистку.

Проведенные исследования [70,71,77,78,80] показали, что, с увеличением длины горизонтальной части нижнего ввода угловая скорость в выходном сечении уменьшается, максимальные значения угловой скорости, при организации закрутки потока наблюдаются в пристеночной зоне.

#### **4.5. Разработка рекомендаций по совершенствованию системы обеспыливания технологического оборудования линии по производству цемента**

В качестве рекомендаций для внедрения на производстве в Республике Йемен с целью снижения содержания пыли  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  в воздухе рабочих зон и на прилегающих территориях можно предложить:

- 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 предложить использовать св системах обеспыливания аппараты на встречных закрученных потоках;

-для повышения устойчивости систем с вихревыми пылеуловителями предложено использовать предварительное разделение потоков. Использовать для этого закручиватель вторичного потока, который также может выноситься за пределы корпуса.

#### **4.6. Эколого-экономический эффект применения разработанной системы очистки воздуха от пыли**

Поскольку внедрение систем обеспыливания требует экономического обоснования, проведем сравнительную оценку базового и предлагаемого варианта очистки воздуха от пыли. Для сравнения использовались система обеспыливания с применением рукавного фильтра, и система обеспыливания с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром. Целью расчета является определение годового эколого-экономического эффекта, предотвращенного ущерба.

В качестве экологического показателя выступает предотвращенный экологический ущерб [50]

$$\Delta Y = Y_{об. баз} - Y_{об.}, \quad (4.5)$$

где  $Y_{об. баз}$  – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения окружающей среды для базового варианта, руб.;

$Y_{об.}$  – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения окружающей среды, руб.

$$Y_{об. баз} = Y_{отх. баз} + Y_{атм. баз}, \quad (4.6)$$

где  $Y_{отх. баз}$  – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения твердыми отходами для базового варианта, руб.;

$Y_{атм. баз}$  – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферы выбросами для базового варианта, руб.

$$Y_{об} = Y_{отх.} + Y_{атм.}, \quad (4.7)$$

где  $Y_{отх.}$  – предотвращенный экологический ущерб от загрязнения твердыми отходами, руб.;

$Y_{\text{атм.}}$  - предотвращенный экологический ущерб от загрязнения атмосферы выбросами, руб.

В данной системе обеспыливания уловленная пыль возвращается в производство. Поэтому ущерб от загрязнения твердыми отходами отсутствует.

$$Y_{\text{атм. баз}} = Y_{\text{уд}} \cdot \sigma_{\text{заз.возд}} \cdot f \cdot \sum A_i^{\text{возд}} \cdot A_{\text{выб баз}}, \quad (4.8)$$

где  $A_{\text{выб баз}}$  – количество поступающего в воздух вещества для базового варианта, т./год.

$$Y_{\text{атм.}} = Y_{\text{уд}} \cdot \sigma_{\text{заз.возд}} \cdot f \cdot \sum A_i^{\text{возд}} \cdot A_{\text{выб}}, \quad (4.9)$$

где  $A_{\text{выб}}$  – количество поступающего в воздух вещества, т./год.

Экономический ущерб от загрязнения атмосферы рассчитывается по формуле [90, 91]

$$Y_{\text{атм. баз}} = Y_{\text{уд}} \cdot \sigma_{\text{заз.возд}} \cdot f \cdot \sum A_i^{\text{возд}} \cdot A_{\text{выб баз}}, \quad (4.10)$$

где  $A_{\text{выб баз}}$  – количество поступающего в воздух вещества для базового варианта, т./год.

$$Y_{\text{атм.}} = Y_{\text{уд}} \cdot \sigma_{\text{заз.возд}} \cdot f \cdot \sum A_i^{\text{возд}} \cdot A_{\text{выб}}, \quad (4.11)$$

где  $A_{\text{выб}}$  – количество поступающего в воздух вещества, т./год.

Годовой эколого-экономический эффект определяется как разность приведенных затрат базового и предлагаемого вариантов. [90, 91]

$$\Theta_{\Gamma} = Z_{\text{баз}}^{\text{э}} - Z^{\text{э}} + \Pi, \quad (4.12)$$

Приведенные затраты для базового варианта:

$$Z_{\text{баз}}^{\text{э}} = Y_{\text{об.баз.}} + C_{\text{сз баз}} + E_{\text{н}} \cdot K_{\text{сз}}, \quad (4.13)$$

где  $C_{\text{сз баз}}$  - плата за размещение отходов и за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, для базового варианта, руб.

$$C_{\text{сз баз}} = C_{\text{сзотх баз}} + C_{\text{сзвыб баз}}, \quad (4.14)$$

где  $C_{\text{сзотх баз}}$  - плата за размещение отходов для базового варианта, руб.;

$C_{\text{сзвыб баз}}$  - плата за выбросы в атмосферу для базового варианта, руб.

$$C_{\text{сзотх баз}} = C_{\text{отх}} \cdot A_{\text{отх баз}}, \quad (4.15)$$

где  $C_{\text{отх}}$  – норматив платы за размещение 1т отходов, руб.,

$$C_{отх} = 497 \cdot 1,9 \cdot 1,3 = 1227,6 \text{ руб./т.},$$

где 497 – норматив платы за размещение 1 т. отходов III класса опасности, руб./т.;

1,9 – коэффициент экологической значимости для Поволжского района.

$$C_{сзвыб\ баз} = C_{выб} \cdot A_{выб\ баз}, \quad (4.16)$$

где  $C_{выб}$  – норматив платы за выброс 1т цемента, руб.,

$$C_{выб} = 21 \cdot 1,9 \cdot 1,3 = 51,87 \text{ руб./т.},$$

где 21 – норматив платы за выброс в атмосферу 1т. цемента, руб./т.;

$A_{выб\ баз}$  – количество выбросов в атмосферу для базового варианта, т./год.

Приведенные эколого-экономические затраты равны:

$$Z^9 = Z + Y = C_{сз} + E_n \cdot K_{сз} + Y_{об}, \quad (4.17)$$

где  $C_{сз}$  - плата за размещение отходов и за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, руб.:

$$C_{сз} = C_{сзотх} + C_{сзвыб}, \quad (4.18)$$

где  $C_{сзотх}$  - плата за размещение отходов, руб.;

$C_{сзвыб}$  - плата за выбросы в атмосферу, руб.

$$C_{сзотх} = C_{отх} A_{отх}, \quad (4.19)$$

$$C_{сзвыб} = C_{выб} \cdot A_{выб}, \quad (4.20)$$

где  $A_{выб}$  – количество выбросов в атмосферу, т./год.

С учетом (4.22) и (4.26) формула (4.21) принимает вид:

$$\Delta_{\Gamma} = Y_{об.баз} + E_n \cdot K_{сз} + C_{сз.баз} - (Y_{об} + C_{сз} + E_n \cdot K_{сз}) + П, \quad (4.21)$$

$$\Delta_{\Gamma} = C_{сз\ баз} - C_{сз} + \Delta Y + П,$$

где П – прибыль от реализации продукции, руб.

$$П = Ц \cdot A_{ул}, \quad (4.22)$$

где Ц – стоимость 1т цемента, руб./т.;

$A_{ул}$  – количество уловленной пыли, выделяющейся в процессе производства, т/год. Расчеты представлены в таблицах (4.4,4.5,4.6)

Таблица 4.4 Сметная стоимость основного и вспомогательного производства

Наименование оборудования	Число единиц	Прейскурантная стоимость единицы, тыс. руб.	Всего преysкур-нтная стоимость, тыс. руб.	Транспор-тно Заготовит-ельные и складские расходы, тыс. руб.	Стоимость монтажа трубопрово-дов, КИП и спец. работ, тыс. руб.	Ито-го смет-ная стоим-ость	Норм а Амортизац ии	Сумма аморти-зации
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Основное оборудование								
1.1 ВЗП	2	80	160	2	4,5	166,5	10	16,65
1.2 Рукавный фильтр	1	1600	1600	20	10	1630	10	163
ИТОГО по основному оборудованию						1796,5		179,7
2. Вспомогательное оборудование								
2.1 Вентилятор	1	50	50	0,7	3	53,7	10	5,37
2.2 Шлюзовой затвор	2	35	70	0,7	0,5	71,2	10	7,12
ИТОГО по вспомогательному оборудов.						124,9		12,49
ВСЕГО						1921,4		192,19

Таблица 4.5 - Сметная стоимость основного и вспомогательного производства для базового варианта

Наименование оборудования	Число единиц	Прейскурантная стоимость единицы, тыс. руб.	Всего преysкурaнтная стоимость, тыс. руб. гр.3-ф.2	Транспортно-заготовительные и складские расходы, тыс. руб.	Стоимость монтажа трубопроводов, КИП и спец. работ, тыс. руб.	Итого сметная стоимость	Норма Амортизации	Сумма амортизации
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Основное оборудование								
1. Рукавный фильтр	1	1000	1000	20	10	1030	10	103
ИТОГО по основному оборудованию						1030		103
2. Вспомогательное оборудование								
2.1 Вентилятор	1	50	50	0,7	3	53,7	10	5,37
2.2 шлюзовой затвор	2	35	70	0,7	0,5	71,2	10	7,12
ИТОГО по вспомогательному оборудованию						124,9		12,49
ВСЕГО						1281,4		128,14

Таблица 4.6- Эколого-экономические показатели

Относительная опасность, принесенная для человека $a_i$	10
Ущерб от загрязнения атмосферы для базового варианта $У_{атм.баз}$ , руб.	152,24
Ущерб от загрязнения атмосферы $У_{атм.}$ , руб.	101,5
Общий ущерб для базового варианта $У_{об. баз}$ , руб.	152,21
Общий ущерб $У_{об}$ , руб	101,3
Предотвращенный ущерб $\Delta У$ , руб.	54,64
Экономический эффект $Э_r$ , руб	384,835



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

#### **4.7. Выводы по четвертой главе**

1. Разработана установка (патент РФ RU 2015140195/05(061736) очистки воздуха от пыли с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром.

2. Проведены экспериментальные исследования эффективности улавливания рукавных фильтров, которые показали, что наиболее эффективными для улавливания мелкодисперсной пыли цемента являются ткани типа Бельтинг, со скоростью фильтрации 0,5 м/мин.

3. Установлено, что для повышения надежности работы аппаратов ВЗП одним из важных конструктивных решений при совершенствовании систем обеспыливания, является, использование закручивателя вторичного потока, который может выноситься и за пределы корпуса.

4. Разработаны рекомендации по совершенствованию системы обеспыливания технологического оборудования линии по производству цемента.

5. Определен эколого-экономический эффект от внедрения установки очистки воздуха от пыли с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром, который составил 384,835 руб./год.

6. Таким образом, сравнение результатов испытаний установки (патент РФ RU 2015140195/05(061736) и 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 снижению выбросов в атмосферу при повышенных расходах очищаемого газа.

## 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 установки (патент РФ RU 2015140195/05(061736) и 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. Разработаны 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев, Н. Я. Аналитико-статистические исследования кинетики некоторых физико-химических процессов: Уч. пособ. / Н. Я. Авдеев – Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов.гос. универ., 1971. – 200 с.
2. Авдеев, Н.Я. Об аналитическом методе расчета седиментометрического анализа. –/ Н.Я.Авдеев- Ростов –на -Дону: Изд-во Ростов.гос. универ., 1964. – 202 с.
3. Авдеев, Н.Я. Расчет гранулометрических характеристик полидисперсных систем. –/ Н.Я.Авдеев-Ростов- на -Дону: Изд-во Ростов.гос. универ., 1966. – 54 с.
4. Агаджанян, Н. А. Физиология человека / Н.А. Агаджанян [др.]. – Москва, Медицинская книга, НГМА -2003. -528с.
5. Азаров, В. Н. О концентрации и дисперсном составе пыли в воздухе рабочих и обслуживаемых зон предприятий стройиндустрии / В. Н. Азаров // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы II Междунар. науч. конф., 15-19 сент. 2003 г., Волгоград. – Волгоград :ВолгГАСУ, 2003. - С. 27-31.
6. Азаров, В.Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками / В.Н. Азаров[др.]Под. ред. В.Н. Азарова. – Волгоград, ООО “Ассоциация Волгоградэкотехзерно”, 1999 – (Обзор изобретений). – 48 С.:.
7. Азаров, В.Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Опыт внедрения. / В.Н. Азаров //монография; РПК «Политехник»ВолгГТУ.– Волгоград, 2003.– 133с.
8. Азаров, В.Н. Об оценке доли частиц PM10 и PM 2,5 в выбросах предприятий строительной отрасли./В.Н. Азаров [др.//] Вестник отделения строительных наук, РААСН, Москва,2012, т.2,с.6-12.
9. Азаров, В. Н. Дисперсный анализ методом микроскопии с применением ПЭВМ / В. Н. Азаров[др.] // Экологическая безопасность и

экономика городских и теплоэнергетических комплексов : междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград, 1999. – С. 76.

10. Азаров, В.Н. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов / В. Н. Азаров, Н. М. Сергина // Строительные материалы. – 2003. – №8.-С.14-15.

11. Азаров, В.Н. Анализ существующих методик расчета массы выбросов и концентрации пыли в атмосферном воздухе для источников предприятий стройиндустрии /В.Н. Азаров// Междунар. науч. конф. “Качество внутреннего воздуха и окружающей среды”. – Волгоград, 2002. – С. 1 – 7.

12. Азаров, В.Н. О знаковом методе статистического анализа фракционного состава пыли в инженерно-экологических системах/В.Н. Азаров // Науч.-практ. сем. “Безопасность, экология, энергосбережение”. – Ростов-на-Дону, 2001. – С. 48 – 50.

13. Азаров, В.Н. Об определении количества вредностей, поступающих на технологические площадки /В.Н. Азаров// Обл. науч.-практ. конф. мол. уч. и спец. – Волгоград, 1981. – С. 18 – 20.

14. Азаров, В.Н. О распространении аэрозоля в атмосфере цехов с технологическими площадками /В.Н. Азаров//Всесоюз. совещ. по проблеме охраны воздушного бассейна от выбросов предприятий хим. пром-сти и пром-сти строит.матер. – Ереван, 1986. – С. 14.

15. Азаров, В.Н. Об устойчивости аспирационных систем/В.Н.Азаров// Междунар. науч.-техн. конф. “Достижения в теории и практике теплогазоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха и охраны воздушного бассейна”. – СПб, 1997. – С. 29.

16. Азаров, В.Н. О факторах, определяющих пылевую обстановку в рабочих и обслуживаемых зонах/В.Н. Азаров//Междунар. науч. конф. “Качество внутреннего воздуха и окружающей среды”. - Волгоград, 2002.- С.87-90.

17. Азаров, В.Н. Нормирование PM10 и PM2,5 как социальных стандартов качества в районах расположения предприятий стройиндустрии

/В.Н. Азаров, И.В. Тertiшников, Н.А. Маринин // Жилищное строительство. 2012. № 3. С. 20-22.

18. Азаров, Д.В. Оценка PM10 и PM2,5 в жилищном строительстве / Д.В. Азаров, Н.А. Маринин [и др.] // Жилищное строительство. 2013. № 2. С. 30-32.

19. Алексеев, Б.В., Производство цемента/Б.В. Алексеев, Г.К. Барбашев- Учебник для сред. ПТУ – 2 – е изд., перераб. И доп. – М: Высшая школа, 1985 – 264с.

20. Алиев, Г.М.-А.- Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов/Г.М.-А. Алиев// - Издательство: Металлургия, 1986.

21. Аль Могалис Ахмед Абдольджалил Мухамед Исследование и обоснование комплекса мероприятий по экологизации цементного производства Йемена:- Автореф. дис. кандидата техн. наук.– Москва., 2000. – 16 с.

22. Артюхин, А. С. Особенности движения пылевых частиц в аппаратах со встречными закрученными потоками [Текст] / А. С. Артюхин // XI региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, 11-14 ноября 2006 г. Направление №16 «Экология, охрана среды, строительство»: Тезисы докладов / Волгогр. гос. арх.-строит. ун-т. – Волгоград, 2007. – С. 120 - 123.

23. А. с. 631180, СССР, М. Кл<sup>2</sup>. В 01 Д 45/00, В 01 С 3/06. Вихревой пылеуловитель со встречным потоком газа/ А.И. Летюк, В.М. Киселев, В.И. Пономаренко. – Заявлено 19.04.1977; Оpubл. 05.11.1978. Бюл. № 41.

24. А. с. 1611451 СССР, МКИ<sup>4</sup> В 04 С 3/02, 3/06. Вихревой пылеуловитель/ И.Н. Ильин, Д.Н. Блумберга, И.К. Вейденберг, В.Д. Кононенко, А.М. Блинков, В.Н. Азаров. – Заявлено 13.12.1988; Оpubл. 07.12.1990. Бюл. № 45.

25. А. с. 1623731 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 01 Д 50/00. Способ очистки газа от пыли/ Б.С. Сажин, А.С. Белоусов, С.И. Коротченко. – Заявлено 17.02.1988; Оpubл. 30.01.1991. Бюл. № 4.

26. А. с. 668716 СССР, М. Кл.<sup>2</sup> В 04 С 5/16. Вихревой пылеуловитель/ Р.Х. Мухутдинов, В.И. Маслов, П.И. Корнилаев. – Заявлено 17.01.1977; Оpubл. 25.06.1979. Бюл. № 23.

27. А. с. 1042813 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 04 С 9/00. Устройство для обработки дисперсных материалов во встречных закрученных потоках/ Г.И. Ефремов, Т.В. Астахова. – Заявлено 18.06.1980; Оpubл. 23.09.1983. Бюл. № 35.

28. А. с. 1813517 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 01 Д 46/02. Комбинированный центробежно-рукавный пылеотделитель/ С.И. Коротченко, Б.С. Сажин, В.А. Румянцев. – Заявлено 28.02.1991; Оpubл. 07.05.1993. Бюл. № 17.

29. А. с. 1627219 СССР, МКИ<sup>5</sup> В 04 С 3/06. Вихревой пылеуловитель/ Э.Ф. Шургальский и др. – Заявлено 03.05.1988; Оpubл. 15.02.1991. Бюл. № 6.

30. Ахназарова, С.Л., Методы оптимизации эксперимента в химической технологии/С.Л. Ахназарова, В.В.Кафаров - //Учеб. Пособие 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.: ил.

31. Бакланов, Г.М. Снижение запыленности на цементных заводах / Г.М. Бакланов [др.] – Киев: Изд-вл «БудІвельник», 1965 – 94 с.:ил.

32. Балтренас, П. Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов / П. Б. Балтренас. – М. :Стройиздат, 1990. – 180 с. :

31.Банит, Ф. Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов / Ф. Г. Банит, А. Д. Мальгин. – М. :Стройиздат, 1979. – 352 с.

32.Бобровников, Н.А. Охрана воздушной среды от пыли на предприятиях строительной индустрии./Н.А. Бобровников – М.:Стройиздат, 1981.-99с.

33. Богуславский, Е.И. Теория и расчет эффективности технических средств обеспыливания и разработка на их основе конструкций с вихревым режимом работы [Текст] /Е.И. Богуславский - : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.17.08. – Ростов – на - Дону, 1991.

34. Богуславский, Е.И. Интенсивность выделения и накопления пыли в производственном помещении / Богуславский Е.И., Азаров В.Н. // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающая среда. –

Ростов-на-Дону, РИЦ Ростовской-на-Дону гос. академ. сельхозмашиностроения, 1997.

35. Богуславский, Е.И. Математическая модель процесса улавливания в пылеуловителях со встречными закрученными потоками с отсосом из нижней зоны аппарата /Е.И. Богуславский [др.]// Междунар. науч.-практ. конф. “Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических комплексов”. – Волгоград, 1999. – С. 79 – 80.

36. Богуславский, Е.И. Вероятностно-стохастический подход для расчета эффективности массопереноса в аппаратах обеспыливания при различном направлении движения дисперсного материала /Е.И. Богуславский, Х.Д. Газгиреев// Междунар. науч.-техн. конф. “Проблемы охраны производственной и окружающей среды”. – Волгоград, 1997. – Секция П: Проблемы пыле- и газоулавливания. – С. 60 – 63.

37. Богуславский, Е.И. Оценка математического описания процессов массопереноса в газоочистных аппаратах/Е.И. Богуславский, В.Г. Диденко // Нвуч.-техн. конф. “Достижения в теории и практике теплогазоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха и охраны воздушного бассейна”. – СПб, 1997. – С. 39 – 43.

38. Богуславский, Е.И. Повышение надежности прогноза общей эффективности пылеулавливающих аппаратов /Е.И. Богуславский [др.]// Междунар. науч.-техн. конф. “Надежность машин и технологического оборудования”. – Ростов-на-Дону: Донск. гос. техн. универ., 1994. – С. 218.

39. Богуславский, Е.И. Выбор способа прогнозирования общей эффективности пылеулавливающих аппаратов систем пневмотранспорта /Е.И. Богуславский, В.А. Харченко // Междунар. науч.-техн. конф. “Проблемы охраны производственной и окружающей среды”. – Волгоград, 1997. – Секция П: Проблемы пыле- и газоулавливания. – С. 57 – 60.

40. Богуславский, Е.И. Физико-математическая модель и алгоритм расчета фракционной эффективности работы циклонных аппаратов систем



пневмотранспорта /Е.И. Богуславский, В.А. Харченко // Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону: РИЦ Ростов.гос. строит. универ., 1997. – С. 4.

41. Величковский, Б.Т. О физико-химических свойствах кремнезема, обуславливающих развитие силикоза. /Б.Т. Величковский– В кн.: Патогенез пневмокониозов. – Свердловск, 1970. – С. 213 – 218.

42. Веселова, Н.М. Эксплуатация теплотехнологического оборудования предприятий/Н.М. Веселова - Учебное пособие.ВолгГАСУ.– Волгоград, 2005.– 115с.

43. Вознесенский, В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико – экономических исследованиях. [Текст] /В.А. Вознесенский - М. Финансы и статистика, 1981. – 263 С.

44. Голованчиков, А.Б. Сравнение эффективности пылеуловителей со встречными закрученными потоками и батареи циклонов /А.Б. Голованчиков[др.]// Междунар. науч.-практ. конф “Информационные технологии в образовании, технике и медицине”. - Волгоград, 2000. - Часть 2. – С. 39-41.

45. Голикова, Т.И. Каталог планов второго порядка. /Т.И. Голикова [др.]– Ч. 1. М.: МГУ, 1976. -388 с.

46. Голикова, Т.И. Каталог планов второго порядка. /Т.И. Голикова [др.]Часть 2. М.: МГУ, 1976.-392 с.

47. Горемыкин, В.А. Расчет и выбор пылеулавливающего оборудования [Текст] / В.А. Горемыкин, С.Ю. Панов, М.К. Аль-Кудях [и др.] ВорГАСА. Воронеж. 2000.-326 с.

48. ГН 2.1.6.2604-10 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Дополнение N 8 к ГН 2.1.6.1338-03» Москва, Стандарт, 2011

49. Градус, Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии / Л. Я. Градус. – М. : Химия, 1979. – 232 с.

50. Квашнин, И.М. Очистка воздуха от пыли [Текст]: учеб.пособие / И.М. Квашнин, Ю.И. Юнкеров. – Пенза: Пенз. гос. арх.-строит. ин-т, 1995. – 111с.:

51. Колокольников, В.С. Производство цемента /В.С. Колокольников - М.: «Высшая школа», 1967, 303 с.
52. Коптев, Д.В. Безопасность труда в строительстве (Инженерные расчеты по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности»)/Д.В. Коптев - Учебное пособие. – м.: Изд-во АСВ, 2003.- 352с.
53. Коптев, Д.В. Научные разработки ВЦНИИОТ ВЦСПС по борьбе с пылью в промышленности /Д.В. Коптев // Всесоюз. науч. конф. “Очистка вентиляционных выбросов и защита воздушного бассейна от загрязнения”. – Ростов-на-Дону, 1977. – С. 12. – 15.
54. Коптев, Д.В. Научные разработки ВЦНИИОТ ВЦСПС по борьбе с пылью в промышленности /Д.В. Коптев // Всесоюз. науч. конф. “Очистка вентиляционных выбросов и защита воздушного бассейна от загрязнения”. – Ростов-на-Дону, 1977. – С. 12. – 15.
55. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. /П.А. Коузов– 3-е изд. перераб. – Л.: Химия, 1987. 264с.
56. Коузов, П.А. Методы определения физико – химических свойств промышленных пылей [Текст] / П. А. Коузов, Л. Я. Скрыбина. – Л. :Химия :Ленингр. отд – ние, 1983. – 142 с.
57. Лукин, В.Д. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности [Текст] / В.Д. Лукин, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1980. – 232 с.
58. Мартьянов, В.Н. Разработка систем пылеулавливания с использованием горизонтальных и вертикальных коллекторов-пылеуловителей/В.Н. Мартьянов - Автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.23.03. .-Защищена 28.06.2002.–Волгоград, 2002.
59. Методика определения концентрации пыли в промышленных выбросах: (эмиссия). – М. : НИИОГАЗ, 1970. – 32 с.
60. Методика проведения замеров аэродинамических характеристик [Текст] / М.: НИИОГАЗ, 1983. - 32 с.

61. Пат. 2137528 Россия, МКИ<sup>6</sup> В 01 Д 45/12, В 04 С 5/22. Двухступенчатый пылеуловитель/ В.Н. Азаров, Е.И. Богуславский, Н.М. Сергина. – Заявлено 20.08.1998; Оpubл. 20.09.1999. Бюл. № 26.

62. Пат. RU 2015140195/05(061736);Российская Федерация заявка 061736 . Экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли[Текст] / А. М. Редван [и др.]; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВПО ВолГАСУ. - №2015140195; заявл. 21.09.2015; опубл. 13.01.2016; Бюл. № 10. – 4 с.

63. Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха./А.И. Пирумов – М.: Стройиздат, 1981. – 207 с.

64. Полезная модель 17457 Россия, МКИ<sup>7</sup> В 04 С 3/06. Горизонтальный сепаратор/ В.Н. Азаров, Д.В. Азаров, Н.М. Сергина. – Заявлено 15.06.2000; Оpubл. 10.04.2001. Бюл. № 10.

65. Полезная модель 16701 Россия, МКИ<sup>7</sup> В 04 С 3/06 Горизонтальный вихревой коллектор-пылеуловитель/ В.Н. Азаров, В.Н. Мартьянов, Б.Т. Донченко, Вик.Н. Азаров, Н.М. Сергина. – Заявлено 15.06.2000; Оpubл. 10.02.2001. Бюл. № 4.

66. Полезная модель 22063 Россия, МКИ<sup>7</sup> В 01 Д 50/00, 47/00, 45/12. Аспирационная установка/ В.Н. Азаров, Е.И. Богуславский, Д.П. Боровков, Н.М. Сергина. – Заявлено 07.08.2001; Оpubл. 10.03.2002. Бюл. № 7.

67. Полезная модель 19642 Россия, МКИ<sup>7</sup> В 01 Д 45/04, В 07 В 9/00, В 03 В 9/04. Двухступенчатый пылеуловитель/ В.Н. Азаров, Е.О. Черевиченко. – Заявлено 14.03.2001; Оpubл. 20.09.2001. Бюл. № 26.

68. Полезная модель 10596 Россия, МКИ<sup>6</sup> В 01 Д 45/12, В 04 С 3/00. Разделитель–концентратор/ В.Н. Азаров, Е.И. Богуславский, Б.Т. Донченко, В.Н. Мартьянов, А.И. Никонов, Н.М. Сергина. – Заявлено 10.01.1999; Оpubл. 16.08.1999. Бюл. № 8.

69. Полезная модель 12919 Россия, МК<sup>И7</sup>, В 01 Д 45/12, 46/02. Пылеотделитель/ В.Н. Азаров, Е.В. Богач, Б.Т. Донченко, В.Н. Мартьянов, Н.М. Сергина. – Заявлено 10.08.1999; Оpubл. 10.03.2000. Бюл. № 7.

70. Посохин, В. Н. Местная вентиляция : учеб.пособие / В. Н. Посохин. – Казань : КГАСУ, 2005. – 73 с.

71. Полонский, В.М. Охрана воздушного бассейна заводов строительной индустрии /В.М. Полонский - Учебное пособие. – Самара, 2006. -200с.

72. Процессы и техника обеспыливания в цементной промышленности [Редкол.: А.М. Дмитриев (отв.ред) и др.], М.: НИИ цемент, 1984, 132 с.ил.,.Методика определения концентрации пыли в промышленных выбросах (Эмиссия). - М.: НИИОГАЗ, 1970. – 32 с.

73. Пухлий, В.А. Фильтры для очистки газов от пыли в цементной промышленности / В. А. Пухлий, А. Г. Колывай // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001. – №2.-С.77-79.

74. Редван, А. М. Main Trends of Dust Conditions Normalizingat Cement Manufacturing Plants: (Основные тенденции для пыли условия нормирования на цементных заводов-изготовителей) / А. М. Редван, Н. В. Мензелинцева, В. Н. Азаров, Н. Ю. Карапузова // International Review of Civil Engineering (IRECE). - 2015. - Vol. 6, № 6. - С. 145-150. - Библиогр.: с. 855-856 (14 назв.). - Текст англ. - ксерокопия.

75. Редван, А. М. Application of Swirling Flows in Aspiration Systems: (Применение закрученных потоков в системах аспирации) / А. М. Редван, В. Н. Азаров, Д. П. Боровков // International Review of Mechanical Engineering (IREME). - 2014. - Vol. 8, № 4. - С. 750-753. - Текст англ. - ксерокопия.

76. Редван, А. М. Experimental Study of Secondary Swirling Flow Influenceon Flows Structureat 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) / А. М. Редван, В. Н. Азаров, Д. В. Луканин, Д. П. Боровков // International Review of Mechanical Engineering (IREME). - 2014. - Vol. 8, № 5. - С. 851-856. - Библиогр.: с. 855-856 (14 назв.). - Текст англ. - ксерокопия.

77. Редван, А. М. Расчет вентиляционных выбросов цементных заводов[Текст] / А.М. Редван, Н. В. Мензелинцева, В. Н. Азаров, Н. Ю. Карапузова, Е. О. Фомина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. - 2015. - № 40. - С. 4-17. - Библиогр.: с. 15 (16 назв.). - Рез. на англ. яз.: с. 15-17.

78. 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>.

79. Редван, А. М. Экспериментальное исследование процесса пылеулавливания пыли в аппарате с внешним тангенциальным закручивателем нижнего ввода / А. М. Редван [и др.] // Роль технических наук в развитии общества : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., 30 июня 2014 г. - Уфа : Изд-во Аэтерна, 2014. - С. 45-52. - Библиогр.: с. 52 (3 назв.). - ксерокопия.

80. Редван, А. М. Экспериментальное исследование эффективности улавливания пыли установки с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром / А. М. Редван ; науч. рук. В. Н. Азаров // 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 ВолГАСУ, 2015. - С. 131-134. - Библиогр.: с. 134 (2 назв.).

81. Редван, А. М. Пат. RU 2015140195/05(061736);Российская Федерация заявка 061736 . Экспериментальная установка для очистки воздуха от пыли[Текст] / А. М. Редван [и др.]; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВПО ВолГАСУ. - №2015140195; заявл. 21.09.2015; опубл. 13.01.2016; Бюл. № 10. – 4 с.

82. Редван, А. М. Редван, А. М. Система обеспыливания линии производства цемента сухим способом [Текст] / 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 (3 назв.). - ксерокопия.

83. Редван, А. М. Экспериментальное исследование эффективности улавливания пыли установки с аппаратом ВЗП и рукавным фильтром / А. М. Редван ; науч. рук. В. Н. Азаров // 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. - Библиогр.: с. 134 (2 назв.).

84. Ревич, Б.А. Горячие точки» химического загрязнения окружающей среды и здоровье населения России / Б.А. Ревич под ред. В.М. Захарова. —М.: Акрополь, Общественная палата РФ, 2007. —192 с.

85. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / под ред. А.А. Русанова. - М.: Автомиздат, 1983.

86. Сажин, Б.С. Метод расчета эффективности улавливания пыли для аппаратов со встречными закрученными потоками [Текст] / Б.С. Сажин, Т.Ю. Векуа, В.А. Реутский // Изв. вузов / Технология текстильной промышленности. 1980, № 1.

87. Сажин, Б.С. Вихревые пылеуловители [Текст] / Б.С. Сажин, Л.И. Гудим. - М.:Химия, 1995. – 144 с.

88. Семиненко, А.С. Влияние цементной пыли на организм человека / А.С.Семиненко, Е.Н.Попов, Д.Ю.Малахов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований -2012. –№ 2, С.93-94.)

89. Сорокин, В.В. Вентиляция предприятий стройиндустрии. Учеб.пособие /В.В. Сорокин - Тольяттин. Политехн. ин-т, Куйбышев: Куйбышев. Авиац. Ин-т, 1987, 72,[2] с.

90. Стефаненко, С.И. Анализ закономерностей оседания пылевых частиц в рабочей зоне оператора карусельной машины отделения упаковки цемента./ В.Н.Азаров,Н.Ю.Карапузова, С.И.Стефаненко //Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2011: сб. науч. тр. Sworld /Одесса:Черноморье, том 5. Технические науки – С.44-47.
91. Страус, В.Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус. – М., 1981. – 616 с.
92. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. /А.С. Тимонин - Т. 1. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2003. – 917 с.
93. Ужов, В. Н. Борьба с пылью в промышленности / В. Н. Ужов. – М.:Госхимиздат, 1962.
94. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.М. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия, 1981. – 392 с.
95. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей: монография / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунов,С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков, А.Н.Сливин; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. –Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. –241 с.
96. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей. /Н.А. Фукс – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 351 с.
97. Холин, И.И.Справочникпопроизводствуцемента. /И.И. Холин - М.: Госстройиздат 1963г., 851 с.
98. Kremar W., LinnerB.,Weisweiler W., Investigations into the Behaviour of Trace Elements during Clinker Burning in a Rotary Kiln System with Grate Preheater // Zement-Kalk-Gips. №12. - 1994. - Pp. 335-340.
99. <http://cyklon-cn.ru/dedusting-gas-cement-industry.html>.
100. Dietz A, Ramroth H, Urban T, Ahrens W, Becher H (2004) Exposure to cement dust, related occupational groups and laryngeal cancer risk: Results of a population based case-control study. Int J Cancer, 108.

101. Al-Neaimi YI, Gomes J, Lloyd OL (2001) Respiratory illnesses and ventilator function among workers at a cement Factory in a rapidly developing country. *Occup Med (Lond)*, 51, 367-73.

102. Van Oss H, Padovani AC: Cement manufacture and the environment: part 1: chemistry and technology. *J Ind Ecol* 2002, 6(1): 89-105.

103. Maslehuddin, M., Al-Amoudi, O.S.B., Rahman, M.K. and Barry, M.R. 2009. Properties of cement kiln dust concrete. Center for Engineering Research, Research Institute, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia, *Construction and Building Materials*, 23: 2357-2361.



**ООО «ПТБ Волгоградгражданстрой»**

Юридический адрес: 400 087, г. Волгоград, ул. Новороссийская, 10  
Почтовый адрес: 400 074, г. Волгоград, ул. Баррикадная, 1  
p/c 40702810311000000897 Волгоградское ОСБ №8621 г.Волгоград  
БИК 041806647  
o/c 30101810100000000647  
ОГРН 1063444056356  
ИНН 3444135069/ КПП 344401001

тел./факс: (8442)26-57-00  
26-57-01  
26-57-08  
Email: [ptb2006@mail.ru](mailto:ptb2006@mail.ru)  
[www.ptbvgtstroy.ru](http://www.ptbvgtstroy.ru)

В диссертационный совет  
Д 212.026.01 при ФГБОУ ВПО  
Волгоградский государственный  
архитектурно-строительный  
университет

**СПРАВКА**

Дана Редван Авадх Мохаммед Мохаммед в том, что ООО «ПТБ Волгоградгражданстрой» при расчете проекта «Оценка воздействия на окружающую среду при строительстве объектов» для размещения следующих производств: изготовление рукавов дорновым способом; подготовка смесей; складирование сырья и готовой продукции внедрена методика оценки вероятности превышения концентрации мелкодисперсной пыли ( $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ ) в воздухе рабочих зон и на территории предприятий по производству цемента, а так же оценке эффективности пылеочистки в аппаратах ВЗП.

Начальник отдела, к.т.н.

А.В. Баев

Подпись Баева Алексея Валерьевича заверяю:  
Заместитель директора  
ООО «ПТБ Волгоградгражданстрой»



Н.Г. Бекетова

**Экотехмониторинг****ООО «Ассоциация Экотехмониторинг»**

Юридический адрес: 400 087, г. Волгоград, ул. Новороссийская, 10  
р/с 40702810311280100177 Волгоградское ОСБ №8621 г.Волгоград  
БИК 041806647 к/с 30101810100000000647

ОГРН 1023403452731  
ИНН 3444057420  
КПП 344401001  
тел./факс: (8442) 37-97-01, 37-82-15  
Email: ecomonitoring@list.ru

В диссертационный совет  
Д 212.026.01 при ФГБОУ ВПО  
Волгоградский государственный  
архитектурно-строительный  
университет

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Редван Авадх Мохаммед Мохаммед

**Место внедрения:** ООО «Ассоциация Экотехмониторинг» г. Волгоград

**Предмет внедрения:** Практические рекомендации по снижению выбросов предприятий по производству цемента и поступлению пыли в атмосферу.

**Результат внедрения:** рассмотрены на научно-техническом совете и приняты к использованию для предприятий строительной отрасли.

Генеральный директор



А.С. Лукьянсков



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 162739

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИСТКИ  
ВОЗДУХА ОТ ПЫЛИ**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной  
ответственностью "Проектно-технологическое бюро  
Волгоградгражданстрой" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*


Заявка № 2015140195

Приоритет полезной модели 21 сентября 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 06 июня 2016 г.

Срок действия патента истекает 21 сентября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Иосифов

