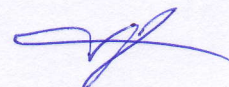


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



АБДУЛДЖАЛИЛ МОХАММЕД САИФ АЛИ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С АБРАЗИВНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

05.23.19 - Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Азаров Валерий Николаевич

Волгоград, 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.	11
1.1. Анализ конструкций пылеулавливающих аппаратов, применяемых для очистки выбросов в городскую воздушную среду от абразивной пыли.	11
1.2. Анализ опыта применения пылеуловителей со встречными закрученными потоками в системах обеспыливания выбросов в производстве строительных материалов.	20
1.3. Анализ существующих методов теоретической оценки эффективности аппаратов ВЗП.	25
1.4. Обоснование и выбор направления исследований.	33
1.5. Выводы по главе 1.	35
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВЫБРОСОВ НА ВЕЛИЧИНУ ПЫЛЕПОСТУПЛЕНИЙ В ГОРОДСКУЮ ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ.	36
2.1. Объекты и методология исследований.	36
2.2. Результаты испытаний систем обеспыливания выбросов. ..	39
2.3. Оценка фракционного состава и основных характеристик, определяющих абразивные свойства исследуемой пыли. .	46
2.4. Расчет интенсивности абразивного износа циклонов в обследованных системах обеспыливания выбросов.	50
2.5. Экспериментальные исследования изменения проскока пыли в процессе эксплуатации систем обеспыливания	

	выбросов.	52
2.6.	Выводы по главе 2.	54
ГЛАВА 3.	ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВЫБРОСОВ В ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯХ НА ВСТРЕЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ С КОНИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ.	55
3.1.	Анализ сил, обуславливающих движение твердой пылевой частицы в конической сепарационной камере пылеуловителя на встречных закрученных потоках.	55
3.2.	Методика расчета эффективности улавливания пылевых частиц пылеуловителем ВЗП с обратной конической формой сепарационной камеры.	68
3.3.	Исследование процесса улавливания пылевых частиц на расчетной модели пылеуловителя ВЗП с обратной конической сепарационной камерой.	72
3.4.	Выводы по главе 3.	77
ГЛАВА 4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ ОТ АБРАЗИВНОЙ ПЫЛИ АППАРАТА ВЗП С ОБРАТНЫМ КОНУСОМ.	79
4.1.	Экспериментальная установка и методология исследований.	79
4.2.	Анализ результатов экспериментальных исследований. ...	87
4.3.	Выводы по главе 4.	108
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.	110
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.	112
	ПРИЛОЖЕНИЯ.	127
	Приложение А.	127
	Приложение Б.	128

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы. Интенсивное развитие инфраструктуры больших городов, происходившее во второй половине XX века, привело к тому, что предприятия, специализирующиеся на выпуске строительных материалов и изделий, оказались в непосредственной близости от зон городской жилой застройки. Это определяет повышение требований к эффективности и надежности систем обеспыливания выбросов, предназначенных, как известно, для обеспечения нормируемого качества воздушной среды населенных пунктов.

Пыль, образующаяся при производстве строительных материалов, во многих случаях обладает абразивными свойствами, что приводит к ускоренному изнашиванию элементов систем пылеочистки. Опыт использования таких систем показывает, что более всего абразивному износу подвержены пылеулавливающие аппараты, а также фасонные части воздухопроводов (отводы, тройники и т.д.), по которым пылегазовая смесь транспортируется в пылеуловители. Абразивный износ пылеулавливающих аппаратов в течение эксплуатации обуславливает повышение проскока пыли в атмосферный воздух. При работе установки пылеочистки под напором повреждение стенок воздухопроводов также приводит к выбиванию транспортируемой пыли. Сверхкритическое изнашивание элементов системы обеспыливания приводит к ее отказу. Таким образом, исследования, направленные на повышение надежности систем очистки выбросов от пыли с абразивными свойствами в производстве строительных материалов, являются актуальными.

Работа выполнялась в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет».

Степень разработанности темы. Анализ проектных решений и нормативно-технических документов показал, что для очистки выбросов в атмосферный воздух от абразивной пыли в системах обеспыливания могут применяться мокрые и сухие пылеуловители. Первые из них меньше подвержены абразивному износу,

но их использование не всегда возможно по технологическим условиям. Для снижения абразивного износа сухих пылеуловителей предлагается снижать скорость пылегазовой смеси в них. Однако такое решение приводит к возрастанию проскока пыли в атмосферный воздух.

В настоящее время для улавливания пыли с абразивными свойствами применяются циклоны с обратным конусом конструкции ВЦНИИОТ и их модификации – циклоны ЦОК, РЦ, ЦМ. Вместе с тем известно, что, наряду с признанными достоинствами, циклоны во многих случаях не позволяют снизить проскок пыли, особенно мелкодисперсной, до необходимого уровня. В работе Экбы С.И. для улавливания пыли, образующейся при производстве строительных конструкций и изделий из древесины, предложена конструкция пылеуловителя со встречными закрученными потоками с сепарационной камерой, имеющей форму обратного конуса. В настоящей работе проведены исследования по оценке возможности применения такого аппарата для очистки выбросов от других видов абразивной пыли в производстве строительных материалов.

Вместе с тем, в выше названной работе автором не изучалось влияние конструктивных параметров пылеуловителя ВЗП с обратным конусом и режимов его работы на величину проскока пыли в атмосферный воздух. Поэтому в настоящей работе проведены теоретический анализ процессов пылеулавливания в аппарате ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса, а также экспериментальные исследования, по результатам которых выявлены наиболее рациональные режимно-конструктивные параметры пылеуловителя, позволяющие обеспечить наименьший проскок пыли в городскую воздушную среду.

С другой стороны, при упоминании пыли, образующейся при производстве строительных материалов, ее абразивные свойства просто констатируются как факт без указания количественного показателя, характеризующего эти свойства – коэффициента абразивности, зная который, можно прогнозировать степень абразивного износа элементов системы обеспыливания в процессе ее эксплуатации. Значения коэффициента абразивности для некоторых видов пыли

строительных материалов приведены в известном «Атласе промышленных пылей» Скрябиной Л.Я. Поэтому в настоящей работе проведены экспериментальные исследования по определению этого показателя для пыли керамзитовой, песка и древесины пальмы.

Цель и задачи работы. Целью работы является снижение пылевого загрязнения воздушного бассейна городов при производстве строительных материалов посредством повышения эффективности и надежности систем очистки выбросов от абразивной пыли.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- анализ конструкций аппаратов, применяемых для снижения выбросов пыли строительных материалов с абразивными свойствами в городскую воздушную среду;
- анализ опыта применения пылеуловителей со встречными закрученными потоками в системах пылеочистки в производстве строительных материалов;
- анализ существующих методов теоретической оценки эффективности аппаратов ВЗП;
- проведение испытаний систем очистки выбросов от пыли строительных материалов с абразивными свойствами в условиях действующих производств;
- исследование фракционного состава и основных характеристик, определяющих абразивные свойства, некоторых видов пыли строительных материалов;
- расчетная оценка степени абразивного износа элементов обследованных систем обеспыливания выбросов в городской атмосферный воздух;
- проведение натурных исследований по оценке влияния абразивного износа циклона на величину проскока пыли в городскую воздушную среду;
- анализ процессов пылеулавливания в аппарате ВЗП с обратным конусом, включающий: построение расчетной модели для оценки влияния конструктивных параметров пылеуловителя на величину проскока пыли в атмосферный воздух; проведение на основе предложенной модели вычислительного эксперимента по

определению величины проскока пыли в зависимости от режимных и конструктивных параметров исследуемого пылеуловителя;

- проведение экспериментальных исследований для оценки величины снижения пылепоступлений в атмосферный воздух города и затрат электроэнергии на проведение процессов очистки выбросов от абразивной пыли строительных материалов при использовании аппарата ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса в зависимости от режимно-конструктивных характеристик пылеуловителя.

Научная новизна:

- построена расчетная модель, характеризующая влияние конструктивных параметров аппарата ВЗП с обратным конусом на величину проскока пыли в городскую воздушную среду;

- по результатам вычислительного эксперимента установлены пределы изменения режимно-конструктивных характеристик пылеуловителя ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса, при которых обеспечивается наибольшая степень снижения поступлений пыли в атмосферный воздух города;

- экспериментально определены значения коэффициента абразивности для некоторых видов пыли, образующейся при производстве строительных материалов;

- на основе результатов экспериментальных исследований получены зависимости, характеризующие величину снижения пылепоступлений в атмосферный воздух города и затраты электроэнергии на проведение процессов очистки выбросов от абразивной пыли строительных материалов при использовании аппарата ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса в зависимости от режимно-конструктивных характеристик пылеуловителя;

- по результатам исследования фракционного состава установлена зависимость, описывающая интегральное распределение массы частиц по диаметрам для пыли, образующейся при производстве строительных материалов и изделий из древесины пальмы.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- на основе математического моделирования изучены закономерности процесса пылеулавливания в аппарате ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса;
- применительно к проблематике диссертации результативно использованы: стандартные методики инструментальной оценки концентрации пыли в атмосферном воздухе в воздуховодах, транспортирующих пылевоздушную смесь к пылеулавливающему аппарату; стандартные методики определения скорости и расхода газопылевых потоков; методика экспериментального определения коэффициента абразивности пыли; экспериментальные методики для оценки степени снижения пылевых выделений в атмосферный воздух; методика микроскопического анализа фракционного состава пыли;
- по результатам экспериментальных исследований получены зависимости, характеризующие величину снижения пылепоступлений в атмосферный воздух города и затраты электроэнергии на проведение процессов очистки выбросов от абразивной пыли строительных материалов при использовании аппарата ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса в зависимости от режимно-конструктивных характеристик пылеуловителя;
- экспериментально определены коэффициенты абразивности для некоторых видов пыли строительных материалов (керамзитовой, песка, древесины пальмы), что позволяет прогнозировать степень абразивного износа элементов систем обеспыливания при их эксплуатации;
- по результатам дисперсионного анализа установлено, что для описания пофракционного распределения массы частиц пыли, образующейся при производстве строительных конструкций и изделий из древесины пальмы, может быть использована формула Годэна-Андреева-Шумана;
- подтверждена целесообразность использования пылеуловителя ВЗП с обратным конусом для очистки выбросов от пыли строительных материалов с абразивными свойствами;

- на основе результатов вычислительного и физического экспериментов установлены пределы изменения режимно-конструктивных характеристик пылеуловителя ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса, при которых обеспечивается наибольшая степень снижения поступлений пыли в атмосферный воздух города.

Методология и методы диссертационного исследования включали в себя: аналитическое обобщение известных научных и технических результатов; математическое моделирование; планирование физического эксперимента; проведение натурных и лабораторных исследований; обработку экспериментальных данных методами математической статистики и корреляционного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

- предложенная расчетная модель, характеризующая влияние конструктивных параметров аппарата ВЗП с обратным конусом на величину проскока пыли в городскую воздушную среду;

- результаты вычислительного эксперимента по установлению пределов изменения режимно-конструктивных характеристик пылеуловителя ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса, при которых обеспечивается наибольшая степень снижения поступлений пыли в атмосферный воздух города;

- полученные на основе результатов экспериментальных исследований зависимости, характеризующие величину снижения пылепоступлений в атмосферный воздух города и затраты электроэнергии на проведение процессов очистки выбросов от абразивной пыли строительных материалов при использовании аппарата ВЗП с сепарационной камерой в виде обратного конуса в зависимости от режимно-конструктивных характеристик пылеуловителя;

- результаты экспериментального определения коэффициента абразивности некоторых видов пыли строительных материалов (керамзитовой, песка, древесины пальмы) для прогнозирования степени абразивного износа элементов систем обеспыливания в период их эксплуатации;

- положение о том, что для описания пофракционного распределения массы частиц пыли, образующейся при производстве строительных конструкций и изделий из древесины пальмы, может быть использована формула Годэна-Андреева-Шумана.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обоснована применением классических положений теоретического анализа, планированием необходимого объема экспериментов, подтверждена удовлетворяющей требуемым критериям сходимостью полученных результатов экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных и промышленных условиях, с результатами других авторов.

Основные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение на: международной научно-практической конференции «Современные парадигмы научных воззрений» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); научно-практической конференции «Проблемы охраны производственной и окружающей среды» (г. Волгоград, 2016 г.); ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Волгоград, 2013-2015 г.г.).

Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 12 работах, в том числе в 6 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях и 1 патенте.

ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ конструкций пылеулавливающих аппаратов, применяемых для очистки выбросов в городскую воздушную среду от абразивной пыли

При производстве строительных материалов образуется огромное количество пыли, которую улавливают и тем самым очищают воздух, пылеулавливающие системы. Но во многих случаях такая пыль обладает абразивными свойствами, что приводит к ускоренному изнашиванию элементов систем пылеочистки[93]. Под абразивностью пыли понимается ее способность вызывать истирание стенок конструкций и аппаратов при контакте с пылегазовым потоком [19, 57, 86, 87, 98, 108]. Эта характеристика зависит от твердости и плотности исходного материала, размеров и формы частиц, а также от скорости потока. Считается, что износ металлических элементов при взаимодействии с абразивной пылью увеличивается при возрастании диаметров пылевых частиц до 90 мкм. При последующем увеличении размеров пылинок износ уменьшается [108]. При повышении скорости очищаемого воздушного потока абразивность пыли возрастает в степенной зависимости [87]. Применительно к системам обеспыливания выбросов это свойство пыли характеризует интенсивность износа пылеулавливающих аппаратов и воздухопроводов, транспортирующих к ним пылевоздушную смесь [87]. В свою очередь, их сверхкритическое изнашивание элементов вызывает отказ системы пылеочистки [19, 93, 108].

Рассмотрим конструкции аппаратов, применяемых в системах очистки выбросов от абразивной пыли. Наиболее известной конструкцией является циклон ВЦНИИОТ (рисунок 1.1) [19, 20, 60, 76, 79, 98, 99, 103, 106, 108]. Помимо расширения конуса, характерной особенностью этого циклона является способ удаления отсепарированной пыли из корпуса в бункер. Пылегазовый поток поступает в бункер через кольцевую цель, которая образована двумя

соосными конусными поверхностями [19, 98, 108]. Обратно в корпус циклона очищенный поток возвращается через центральное отверстие внутреннего конуса [19, 98, 108].

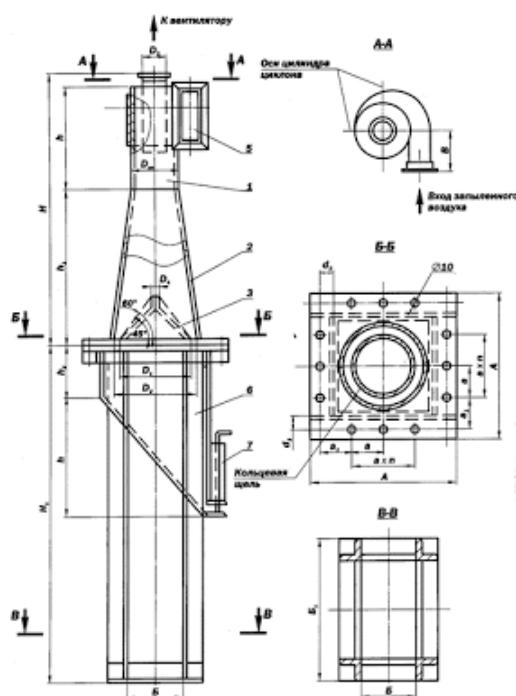


Рисунок 1.1 – Циклон ВЦНИИОТ

1 - выхлопная труба; 2 - входной патрубок; 3 - цилиндр; 4 - обратный конус; 5 - внутренний конус; 6 - бункер; 7 - шибер для выгрузки пыли

Разновидностью аналогичных конструкций являются: циклон с обратным конусом ЦОК [104], регулируемый циклон РЦ [104], циклон с обратным конусом модернизированный ЦМ [105].

На рисунке 1.2 показан циклон ЦОК, который состоит из: цилиндрической части корпуса с завихрителем в виде "улитки"; конической части корпуса, расширяющейся к низу; пылесборника [104]. Пылесборник может изготавливаться по двум вариантам: с косым дном и боковой выгрузкой; конической формы с выгрузкой снизу [104].

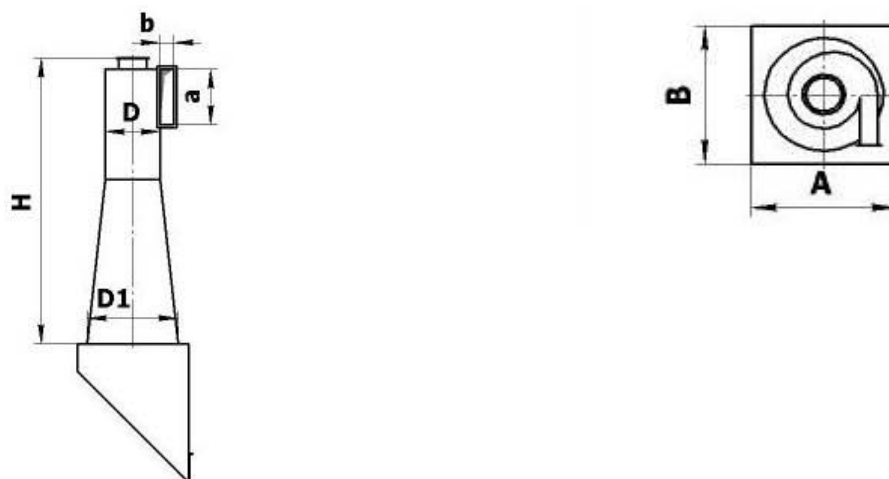


Рисунок 1.2 – Циклон с обратным конусом ЦОК

При работе циклона ЦОК следует проводить непрерывное или периодическое удаление пыли из бункера. При этом верхний уровень пыли в бункере должен быть ниже плоскости крышки бункера на 400 мм [104]. На линии выгрузки пыли из бункера должно быть установлено устройство, исключающее подсос воздуха или выбивание пыли при работе циклона под разрежением или под напором соответственно. С этой целью в первом случае устанавливается шлюзовой затвор или клапан “мигалка”, во втором – шибер, и выгрузка пыли производится периодически при отключении вентиляционной системы с интервалом по опыту ее эксплуатации [104]. Скорость движения воздуха во входном патрубке циклона ЦОК может изменяться в пределах 14-16 м/с. При этом аэродинамическое сопротивление аппарата составляет от 1250 до 1650 Па [104]. Циклоны ЦОК эффективно работают при начальной запыленности очищаемого потока не более 20 г/м³. В зависимости от свойств и фракционного состава улавливаемой пыли, а также от типоразмера аппараты проскок составляет 2-8% [104].

Регулируемый циклон РЦ (рисунок 1.3) имеет обратный конус, спирально-винтовой закручивающий аппарат и регулирующее устройство [104]. Закручивающий аппарат выполнен в виде спирализованного винта. Размещенное в нем регулирующее устройство представляет собой направляющую лопатку, расположенную на уровне нижней плоскости закручивающего аппарата между корпусом циклона и выпускным патрубком. С помощью рукоятки лопатка

устанавливается и фиксируется под заданным углом с помощью рукоятки. При такой конструкции обеспечиваются условия для коагуляции пыли в закручивающем аппарате; предотвращается вынос крупных частиц; также данная конструкция позволяет регулировать угол входа и соотношение между осевой и тангенциальными составляющими скорости потока при входе в корпус циклона в зависимости от свойств пыли и ее концентрации в очищаемом воздухе [104].

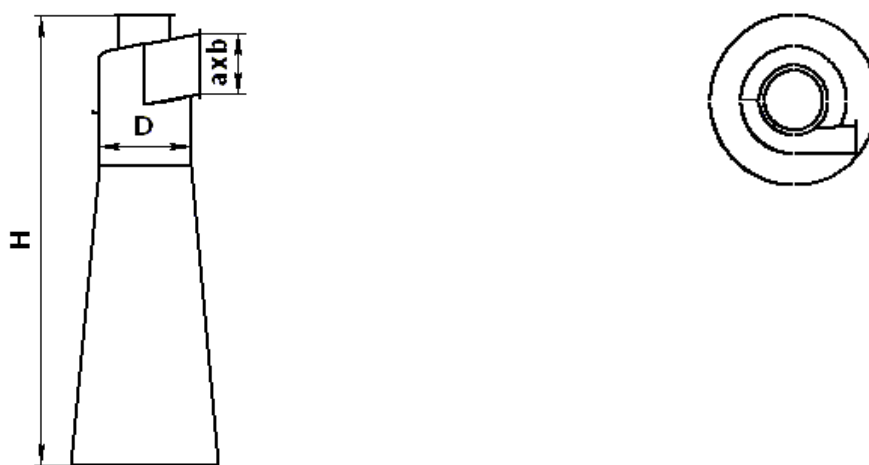


Рисунок 1.3 - Регулируемый циклон РЦ

В случае налипания пыли внутреннюю поверхность корпуса циклона можно периодически очищать с помощью направляющей лопатки. Для этого направляющую лопатку поворачивают несколько раз вверх на 135° и затем возвращают в исходное положение.

Циклон с обратным конусом модернизированный ЦМ (рисунок 1.4) разработан Московским институтом охраны труда на основе усовершенствованной конструкции циклона ЦОК. При сохранении положительных последнего значительно расширена область применения аппарата ЦМ, повышена степень очистки воздуха, увеличена надежность работы в экстремальных условиях эксплуатации [105]. Отличием между циклонами ЦМ и ЦОК является видоизмененная конструкция внутреннего отбойного конуса, который крепится к стенке цилиндрической части бункера аппарата с помощью удлиненных лапок. Благодаря этому пылевывпускное отверстие между стенкой

корпуса и основанием отбойного конуса остается свободным. Кроме того, крепление лапок к кронштейнам выполнено с небольшим люфтом. Это приводит к незначительной вибрации отбойного конуса от действия восходящего воздушного потока и, как следствие, механическому встряхиванию образующихся пробок. Подсос воздуха в бункере не сказывается на эффективности осаждения пыли, т.к. поток воздуха, проходящий через центральное отверстие в отбойном конусе, не препятствует движению пыли в бункер [105].

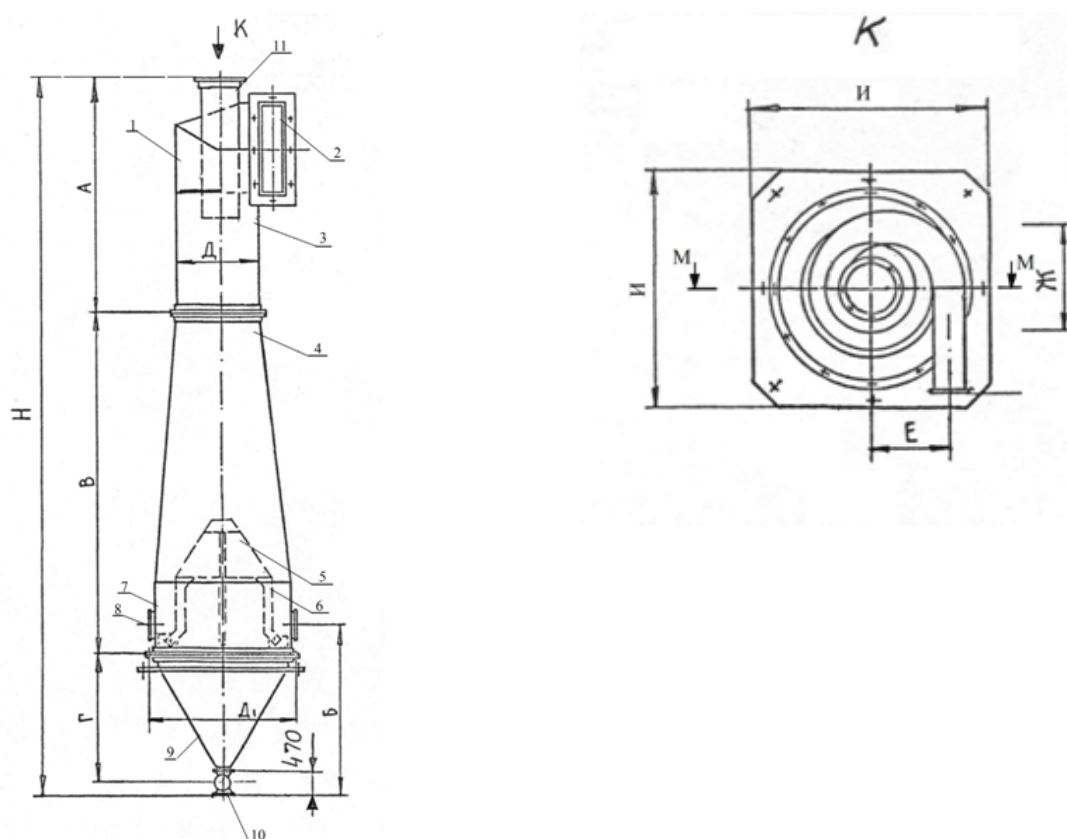


Рисунок 1.4- Циклон с обратным конусом модернизированный ЦМ

1 – входной узел; 2 – входной патрубок; 3 – цилиндрическая часть корпуса; 4 – коническая часть корпуса; 5 – отбойный конус; 6 – лопатки для крепления отбойного конуса; 7 - цилиндрическая часть бункера; 8 – люки для прочистки; 9 - коническая часть бункера; 10 – разгрузитель; 11 – выходной патрубок

Выбор способа установки циклона ЦМ (рисунок 1.5) зависит как от конструктивных требований, так и от необходимой степени очистки воздуха. Для установки с бункером и шлюзовым питателем (рисунок 1.5, б, в) характерны

низкий проскок (до 2-4%), простота монтажа и обслуживания. Установка циклона на пылесборнике (рисунок 1.5, а) рекомендуется только для тяжелой пыли с невысокой дисперсностью, т.к. конструктивно такая установка не может обеспечить высокую степень очистки воздуха от пыли [105].

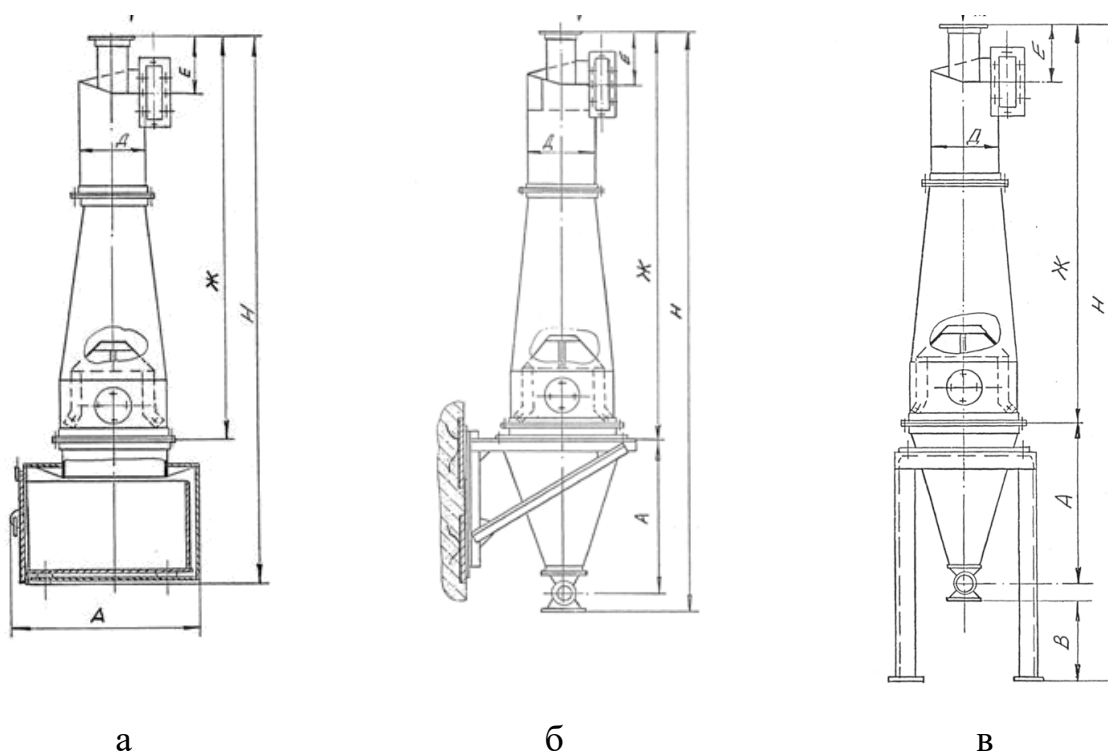


Рисунок 1.5 – Способы установки циклона ЦМ: а – на пылесборнике; б – на кронштейне; в – на полу [103]

Наряду с общеизвестными преимуществами циклонов, по сравнению с другими пылеуловителями, циклоны с обратным конусом имеют следующие достоинства: меньшая абразивная изнашиваемость конической части; снижение проскока пыли, благодаря наличию конической вставки в основании циклона.

В работе [50] для улавливания пыли, образующейся при производстве строительного керамзита, предложен аппарата со взвешенно-фильтрующим слоем (рисунок 1.6).

1- патрубок входа очищаемого пылевоздушного потока; 2 - блок-распределитель очищаемого газа; 3 – патрубок выгрузки просыпи пыли; 4 – устройство (патрубок с питателем) подачи и поддержания уровня гранул зернистого материала в ячейке; 5 - газораспределительная решетка; 6 - блок сепарационной зоны; 7 - патрубок выхода очищенного потока газа; 8 – вертикальная перегородка поддержания постоянного уровня взвешенно-фильтрующего зернистого материала в устройстве; 9, 14 – измерительный комплекс для определения концентрации; 10, 13 - измерительный комплекс для определения давления; 11 – патрубок выгрузки гранул фильтрующего слоя зернистого материала с уловленной пылью; 12 – питатель выгрузки гранул зернистого материала; 15 – дистанционно-управляемый шибер; 16 – вентилятор

По приведенным в [50] результатам экспериментальных исследований установлено, что для практического применения аппарата пылеочистки со взвешенно-фильтрующим слоем целесообразно рекомендовать:

- скорость потока в поперечном сечении аппарата в пределах 0,6-1,0 м/с;
- угол наклона газораспределительной решетки $\alpha = 16^0$.

При таких режимных параметрах величина проскока составляет $\varepsilon \approx 10-12\%$.

Однако следует отметить, что к недостаткам такого устройства относятся значительные габаритные размеры и аэродинамическое сопротивление.

Мокрые пылеуловители страдают от абразивного износа значительно меньше, чем сухие [87]. С учетом этого для производства керамзита предложена конструкция аппарата с комбинированной схемой пылеочистки, показанная на рисунке 1.7 [50, 58].

Верхняя часть этого аппарата конструктивно представляет собой прямоточный циклон. Внутри пылеуловителя устанавливаются контактные камеры с диаметром меньшим, чем диаметр аппарата. Для увеличения площади контакта очищаемого пылегазового потока с жидкостью внутренний объем контактных камер заполняется насыпной загрузкой (например, керамзитовой) до 80% по высоте [50, 58]. Сначала через тангенциальный ввод закрученный поток поступает в технологический блок и равномерно распределяется по его объему между контактными камерами. Затем поток опускается к поверхности жидкости в поддоне, где, проходя между лопатками, получает дополнительное ускорение. Газожидкостная смесь поступает в контактные камеры. После отделения капель жидкости в пластинчатом сепараторе очищенный газ отводится через выходной патрубок [50].

Таким образом, в этом пылеуловителе реализуется два механизма улавливания пыли – инерционный и захват частиц на поверхности или в объеме жидкости [50, 58].

По приведенным в [50] данным в зависимости от конструктивно-режимных параметров работы аппарата проскок пыли изменяется от 0,5% до 24,5%.

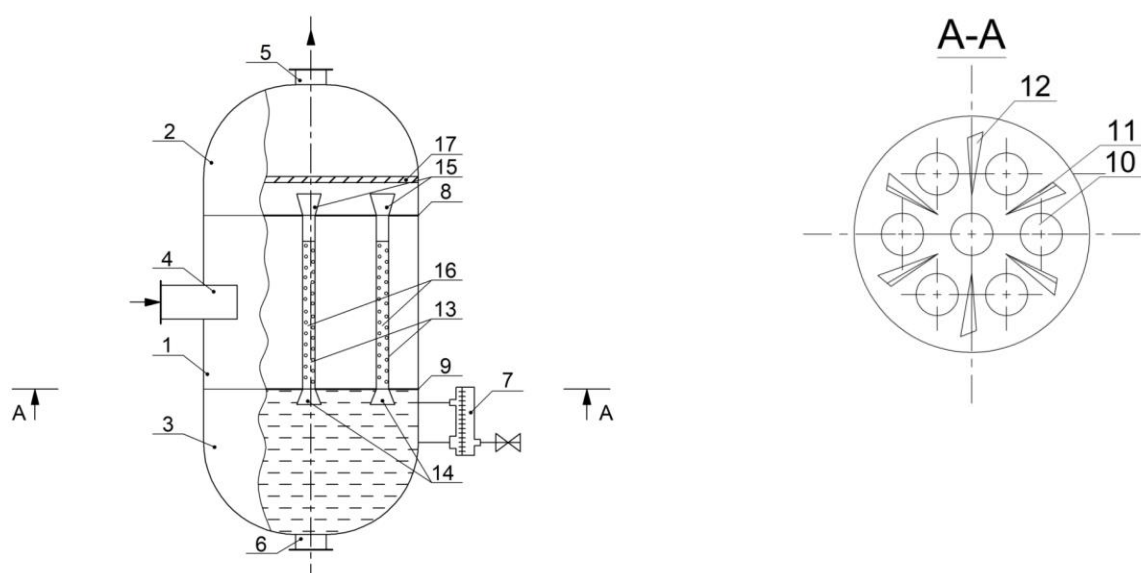


Рисунок 1.7 – Схема предложенного конструктивного решения, реализующего мокрую очистку выбросов от абразивной пыли

- 1 - корпус; 2 - сепарационный блок; 3 - поддон с жидким поглотителем;
 4 - патрубок для ввода потока очищаемого газа в технологический блок;
 5 - патрубок для вывода очищенного газа; 6 - слив отработанной жидкости;
 7 – регулятор уровня жидкости в поддоне; 8, 9 – горизонтальные перегородки;
 10 – отверстия в перегородке для подсоединения контактных камер; 11 –
 закручивающий элемент в нижней перегородке; 12 – щелевая прорезь; 13 –
 контактные камеры, 14 – конфузторы; 15 – диффузоры;
 16 – насыпная керамзитовая загрузка; 17 – пластинчатый сепаратор

Вместе с тем, применение пылеуловителей мокрой очистки требует устройства дополнительной системы водоснабжения, а также организации шламового хозяйства. Кроме того, в некоторых производствах использование мокрых пылеуловителей нецелесообразно в связи с особенностями технологических процессов.

1.2 Анализ опыта применения пылеуловителей со встречными закрученными потоками в системах обеспыливания выбросов в производстве строительных материалов

В настоящее время в производстве строительных материалов в России и за рубежом из аппаратов сухой очистки получили распространение вихревые пылеуловители со встречными закрученными потоками (ВЗП) [1, 3, 4, 7, 8, 11-13, 27, 30, 42, 44, 48, 56, 57, 62, 66, 87-93, 99, 101, 109, 111, 112]. Основное отличие аппаратов ВЗП от циклонов состоит в наличии дополнительного нижнего ввода закрученного пылегазового потока в сепарационную камеру. Широкое внедрение этих пылеуловителей обусловлено следующими, в сравнении с циклонными аппаратами, преимуществами: меньший проскок мелкодисперсной пыли; меньшая чувствительность к колебаниям объема и запыленности очищаемого газа; большая удельная производительность; регулирование процесса пылеочистки посредством регулирования соотношения расходов газа через потоки, а в некоторых случаях менее высокие затраты [1, 3, 4, 7, 8, 11-13, 27, 30, 33, 42, 44, 48, 56, 57, 62, 66, 87-93, 99, 101, 109, 111, 112].

Проведенный анализ показал, что возможны разные варианты применения пылеуловителей ВЗП в системах обеспыливания выбросов. Например, эти аппараты могут использоваться для очистки пылевоздушного потока, отсасываемого из бункера циклонов, что способствует повышению их эффективности (рисунок 1.8-1.10) [50, 109].

На рисунке 1.8 показана схема системы очистки пылевых выбросов от мельницы и гипсоварочного котла в цехе производства гипса на ОАО «Кубанский гипс-Кнауф». При производительности системы 30 тыс. м³/ч проскок пыли в атмосферу в зависимости от режима работы технологического оборудования изменяется в пределах 1,8-16% [48].

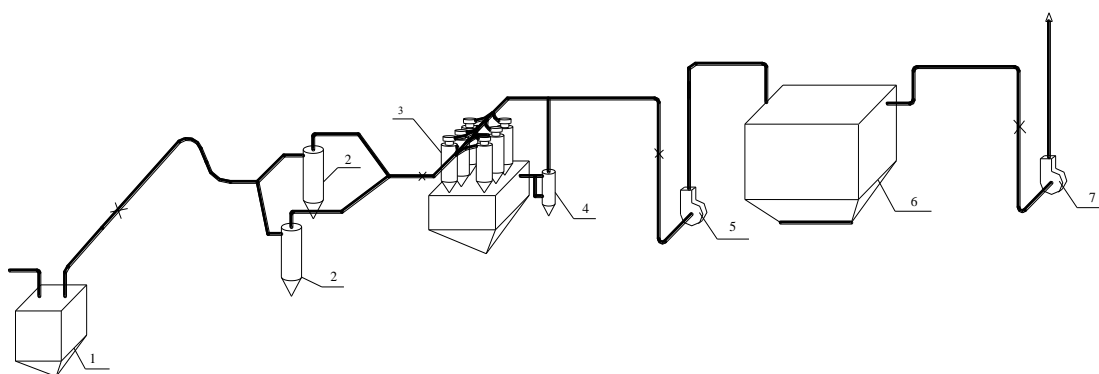


Рисунок 1.8 - Схема системы обеспыливания выбросов
в цехе производства гипса

1 – мельница; 2– циклон ЦН-800; 3 – батарейный циклон ЦН-600х6;
4 – аппарат ВЗП-400; 5 – вентилятор; 6 – электрофильтр; 7 – дымосос

На рисунке 1.9 показана схема системы местной вытяжной вентиляции от мельницы, установленная в цехе производства гипса на ОАО «Волгоградский гипс». При производительности системы 37 тыс. м³/ч пропуск пыли в атмосферу был снижен до 23-29% в зависимости от режима работы технологического оборудования [50].

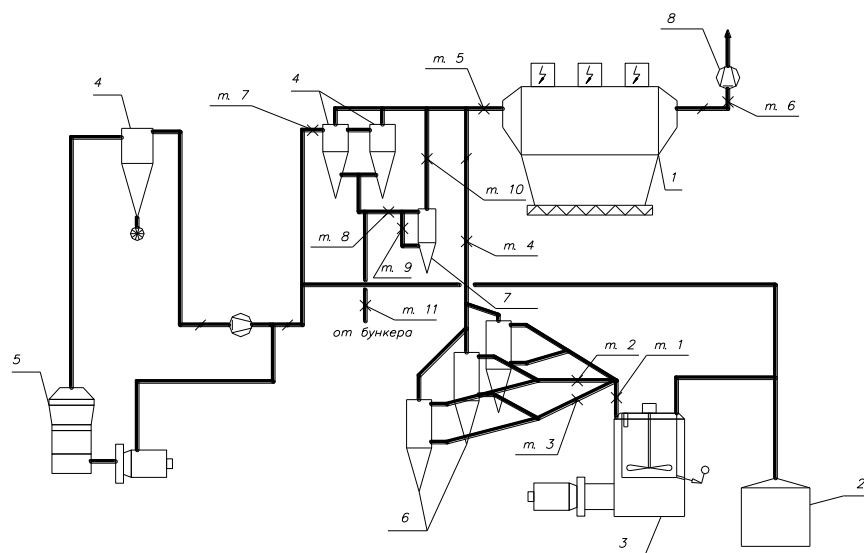


Рисунок 1.9 - Схема системы обеспыливания выбросов от мельницы и
гипсоварочного котла в производстве гипса

1 – электрофильтр; 2– охладитель; 3 – гипсоварочный котел; 4 – циклон;
5 – мельница; 6 – аппарат ВЗП-600; 7 – аппарат ВЗП-400; 8 – вентилятор

На рисунке 1.10 приведена схема системы аспирации, обслуживающей сушильный барабан в кирпичном цехе Себряковского завода асбестоцементных изделий [12, 80]. До реконструкции системы пропуск пыли составлял 45,6% (2,15 г/с или 66,96 т/год). В результате организации отсоса из бункера батарейного циклона с последующей очисткой в аппарате ВЗП-400 пропуск пыли снизился до 12,5% (0,49 г/с или 14,476 т/год) [12, 80].

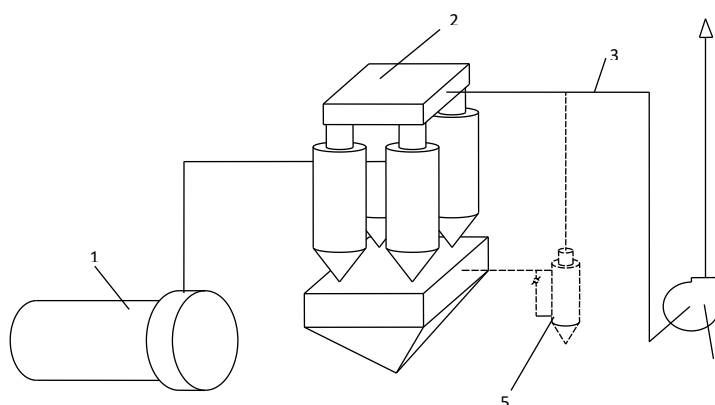


Рисунок 1.10 – Схема установки пылеочистки в системе аспирации сушильного барабана кирпичного цеха на Себряковском заводе асбестоцементных изделий

1 – сушильный барабан; 2 – батарейный циклон СЦН-40; 3 – коллектор очищенного газа; 4 – дымосос ДН-11,2А; 5 – вихревой пылеуловитель

Другой вариант – установка пылеуловителей ВЗП в сочетании с другими аппаратами, как, например, показано на рисунке 1.11-1.13 [50, 90, 109].

Система пылеочистки, схема которой представлена на рисунке 1.11, предложена для асфальтобетонных заводов [109]. На рисунке 1.12 приведен один из вариантов компоновки установки пылеочистки в системе местной вытяжной вентиляции для производства извести [90].

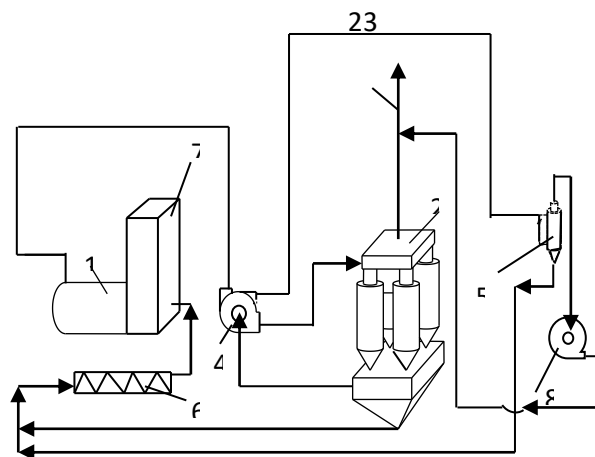


Рисунок 1.11 –Схема системы пылеочистки,
внедренной на асфальтобетонном заводе промбазы АКОТ
"Волгоградагропромдорстрой"

1 – сушильный барабан; 2 – установка батарейных циклонов 4СЦН – 40 x 1000; 3 – коллектор очищенных газов; 4 – дымосос–пылеуловитель ДП–12; 5 - пылеуловитель ВЗП – 400; 6 – шнековый транспортер; 8 – пылевой вентилятор ЦП 6 – 45

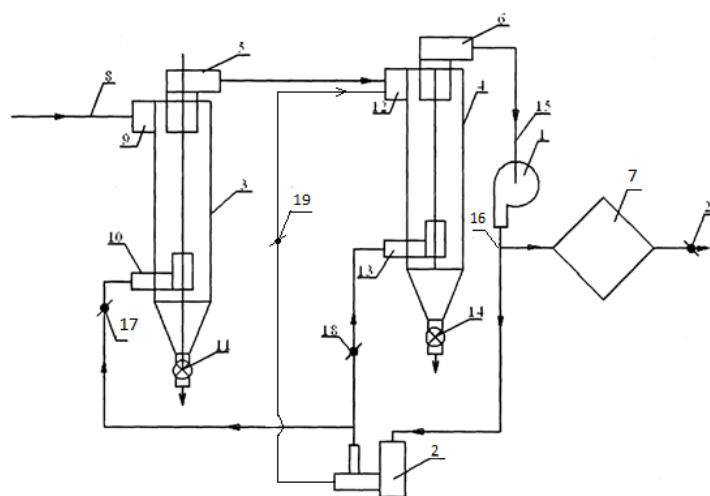


Рисунок 1.12 – Схема установки очистки пылевых выбросов для производства
извести [92]

1 – вентилятор; 2 – разделитель-концентратор; 3, 4 – пылеуловители ВЗП;
5, 6 – раскручиватели потока; 7 – тканевый пылеуловитель;
8, 15, 16 – воздуховоды; 9, 12 – верхние входы пылеуловителей;
10, 13 – нижние входы пылеуловителей; 11, 14 – шлюзовые затворы;
17-20 – регулирующие заслонки

На рисунке 1.13 приведена схема обеспыливания выбросов в атмосферу, предложенная и исследованная в работе [109] для передвижных и мобильных асфальтосмесительных установок.

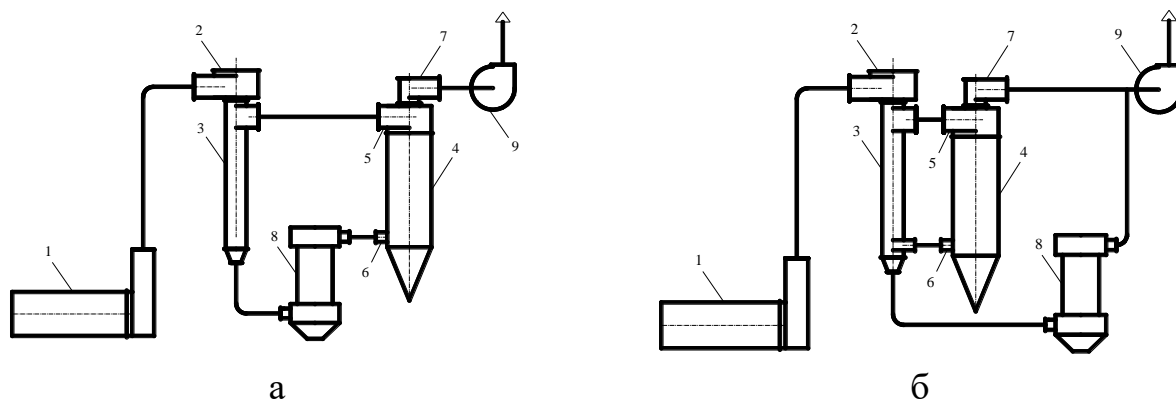


Рисунок 1.13 – Схемы компоновки системы для снижения пылевых выбросов в атмосферу для передвижных и мобильных асфальтосмесительных установок: а – с подачей газопылевого потока на нижний вход аппарата ВЗП после очистки в рукавном фильтре (первый вариант); б – с параллельной подачей газопылевого потока после центробежного пылеконцентратора в пылеуловитель ВЗП и рукавный фильтр (второй вариант).

- 1 – сушильный барабан асфальтосмесительной установки; 2 – улиточный закручивательцентробежногопылеконцентратора; 3 – цилиндрическая сепарационная камера центробежного пылеконцентратора;
4 – пылеуловитель на встречных закрученных потоках; 5 – первичный ввод пылеуловителя ВЗП; 6 – вторичный ввод пылеуловителя ВЗП;
7 – раскручиватель потока; 8 – рукавный фильтр; 9 – тягодутьевое устройство

И третий вариант использования пылеуловителей ВЗП – компоновка установок обеспыливания из этих аппаратов. Например, такие решения предложены для производства керамзита (рисунок 1.14) [50, 95] и для производства газобетона (рисунок 1.15) [114].

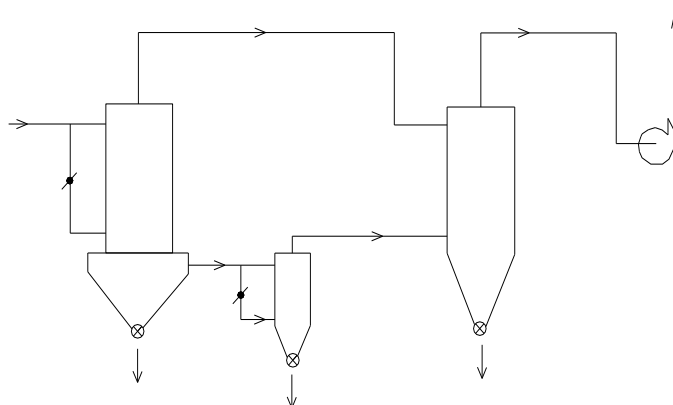


Рисунок 1.14 - Схема компоновки установки пылеочистки с вихревыми инерционными аппаратами на встречных закрученных потоках для производства керамзита [50, 95]

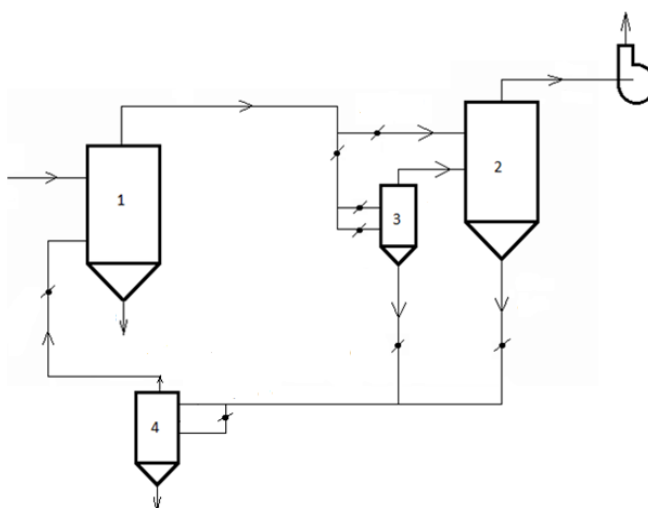


Рисунок 1.15 - Схема компоновки установки пылеочистки с вихревыми инерционными аппаратами на встречных закрученных потоках для производства газобетона [114]

1.3 Анализ существующих методов теоретической оценки эффективности аппаратов ВЗП

Как основные показатели для характеристики процессов и аппаратов обеспыливания приняты общая эффективность и фракционная эффективность или общий проскок и фракционный проскок [2, 5, 19, 24-26, 28, 30, 42, 46, 48, 56, 76, 106-108]. В общем случае прогноз эффективности (проскока) проводится в два

этапа. На первом из них выбирается и обосновывается система уравнений, положенная в основу математической модели рассматриваемого процесса. На втором этапе осуществляется определение искомой функции эффективности (проскока) с использованием различных методов расчета.

При определении траекторий движения пылевых частиц в центробежном поле закрученного потока могут быть использованы детерминистский, стохастический и диффузионный подходы. При использовании детерминистского подхода рассматривают все силы, которые действуют на частицу в потоке, а движение потока определено математически. При расчете радиального перемещения пылевых частиц с применением стохастического подхода учитываются возникающие в разделительном процессе вероятностные явления. При диффузионном подходе закономерности переноса частиц в турбулентных потоках представляются уравнениями массопереноса, имеющими формальную аналогию с уравнениями диффузии.

Кутеповым А.М. и Латкиным А.С. предложено разделить существующие модели гидродинамики встречных закрученных потоков и процесса обеспыливания в аппаратах ВЗП на три класса [59].

При расчетах по детерминистской (механической) модели принимается равенство центробежной силы, силы Архимеда и силы сопротивления в радиальном направлении. Последняя в общем виде для частицы сферической формы может быть описана выражением:

$$F_c = K \rho^{a-1} \mu^{2-a} w^a d^a \quad (1.1)$$

где K - коэффициент, равный: в условиях стоксовского движения 3π , в условиях ньютоновского движения 0,125 (или 1/8);

ρ - плотность среды, кг/м³;

μ - динамическая вязкость, кг/м·с;

w - скорость частицы, м/с;

d - диаметр частицы, м;

a - показатель степени, равный: в условиях стоксовского движения

1, в условиях ньютоновского движения 2.

Для описания движения сферической частицы в радиальном направлении можно использовать выражение:

$$\frac{\partial w}{\partial r} = \frac{v^2 * (\rho_m - \rho)}{r * \rho_m^{-6} * K * \rho_m^{a-1} * \mu^{2-a} * w^a * d^{a-3}} \quad (1.2)$$

где ρ_m - плотность частицы, кг/м³;

r - радиус вращения, м;

v - коэффициент кинематической вязкости газа кг/м·с.

Если пренебречь силами инерции с переходом частицы с одного радиуса на другой, то для мгновенной радиальной скорости при установившемся вращении выражение (1.2) преобразуется к виду:

- при стоксовском движении

$$w = \frac{v^2 d^2 (\rho_m - \rho)}{18 \mu r} \quad (1.3)$$

- при ньютоновском движении

$$w = v \left[\frac{4 \pi d (\rho_m - \rho)}{3 r \rho_m} \right]^{0.5} \quad (1.4)$$

Для пространственного движения сферической частицы пыли в лагранжевой система координат можно записать

$$M dw/dt = 3 \pi \mu d (v - w) - (grad P)^{0.5} + Mg \quad (1.5)$$

где v - вектор скорости потока;

w - вектор скорости частицы;

M - масса частицы, кг;

P - гидростатическое давление потока, Па;

g - ускорение силы тяжести, м/с².

Эта модель для расчета траекторий частиц может быть использована применительно к двухфазным потокам с небольшой концентрацией, для которых характерно достаточно малое взаимодействие частиц между собой [2, 74].

В основу стохастической модели положено допущение о том, что на движение находящихся в потоке частиц оказывает влияние некоторое случайное

воздействие. При этом, помимо действия центробежной силы, учитывается действие силы сопротивления среды и обусловленного взаимодействием частиц случайного воздействия. Тогда для описания установившегося радиального движения частиц в центробежном аппарате может быть применена зависимость вида [74] :

$$\frac{dr}{dt} = d^2 \left(\frac{\rho_m}{\rho - 1} \right) \frac{\omega^2 r}{18\nu} - V_r + \frac{C(t)}{3\pi\rho\nu d} \quad (1.6)$$

где ω - угловая скорость, м/с;

V_r - радиальная скорость, м/с;

$C(t)$ - коэффициент, учитывающий случайное воздействие.

При составлении уравнения, как допущение, не учитываются: относительное движение частиц в окружном направлении; относительная сила инерции и сила Кориолиса; составляющая сопротивления от нестационарности движения частицы. По мнению Кутепова А.М. и Латкина, случайное воздействие – это дельтакоррелированная функция времени с нулевым средним значением [59]. Поэтому случайное движение частицы можно характеризовать одномерной плотностью вероятности $W(t, r)$ [59]. Этой величиной определяется концентрация частиц в сечении r в момент времени t , которую можно найти, решая уравнение Колмогорова-Фоккера-Планка:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d \left(-aW + \frac{b}{2} \frac{dW}{dr} \right)}{dr} \quad (1.7)$$

Входящим в выражение (1.7) коэффициентом a характеризуется интенсивность осаждения частиц в центробежном поле:

$$a = \frac{d^2(\rho_m/\rho)\omega^2 r}{18\nu}$$

В свою очередь коэффициентом b определяется мера неупорядоченности движения частиц, возникающего вследствие случайных воздействий [2, 59, 74].

$$b = \frac{b_0}{9\pi^2 \rho^2 \nu^2 d^2}$$

Диффузионная модель основана на положении теории турбулентной диффузии. Упомянутое положение заключается в том, что перенос какой-либо фазы пропорционален градиенту ее содержания в потоке. Уравнение турбулентной диффузии для равномерного плоского потока имеет вид [59, 74]:

$$wc = \nu \frac{\partial C}{\partial y} = \text{const} \quad (1.8)$$

где C - осредненное значение концентрации частиц на уровне y ;

w - гидравлическая крупность частиц;

ν - коэффициент турбулентного переноса.

В настоящее время для построения математических моделей процессов переноса в многофазных потоках применяется несколько подходов. Мясниковым В.П. и Струминским В.В. предлагается следующая классификация [2, 74]: феноменологический подход; феноменологический подход с включением элементов статистики; статистический подход с элементами механики сплошных сред; статистический подход.

В [82] авторами выделены три подхода при описании явлений переноса в процессах химической технологии:

- подход, основанный на использовании метода молекулярной динамики;
- феноменологический подход;
- подход, основанный на применении методов статистики.

При разработке математических моделей для описания процессов обеспыливания широкое применение находит подход, основанный на уравнениях классической механики. Такой подход позволяет отразить все основные физические явления. Однако в этом случае не учтены случайные явления, характерные для процессов обеспыливания.

Феноменологический подход, основанный на известных законах физики (законы сохранения массы, количества движения, энергии и др.), физических аналогиях, интуитивных представлениях и других эвристических предпосылок, позволяет определять осредненные параметры движения газовой среды, пылевых частиц, а также распределение концентрации дисперсной фазы в потоке.

В статистическом подходе [82] объединяются все преимущества перечисленных выше подходов. Основным преимуществом этого подхода, так же, как и его основным недостатком, является значительный объем исходной информации. Кроме того, в некоторых случаях значительно возрастает сложность математической модели.

В реальных условиях многие физические явления обуславливают появление как случайных, так и детерминированных сил. Перечислим основные случайные силы, воздействию которых подвержены частицы пыли во многофазном потоке:

- сила, возникающая из-за турбулентных пульсаций несущей среды (силы турбулентной пульсации);
- сила, учитывающая турбулентные пульсации присоединенной массы среды;
- сила, которая характеризует нестационарность обтекания частиц средой;
- сила Магнуса, возникающая вследствие турбулентных пульсаций несущей среды при вращении пылевых частиц;
- сила, проявляющаяся при соударении частиц между собой и с ограничивающими поверхностями;
- силы, воздействию которых подвергаются частицы, движущиеся в электромагнитных, тепловых, звуковых и других полях;
- сила, обусловленная флуктуациями массы отдельных частиц, входящих в дисперсную их совокупность, за счет диаметра и плотности;
- сила, зависящая от варьирования формы частицы;
- составляющая сил аутогезии и адгезии, обуславливающая коагуляцию и налипание частиц;
- случайная составляющая сил трения;
- составляющая, учитывающая химические процессы, в которых может участвовать частица пыли.

Очевидно, что воздействие случайных сил при движении частицы в пылевом потоке может быть, как непрерывным по времени, так и дискретным.

Воздействующие на частицу пыли детерминированные силы можно представить в виде двух слагаемых – внешних поверхностных сил и массовых сил [74].

В [5, 29] показано, что для расчетов аппаратов со встречными закрученными потоками целесообразна физически обоснованная с позиций вероятностно-стохастического подхода постановка задачи. Для этого использовано понятие о вероятности сложного процесса обеспыливания, введенного Богуславским Е.И. и Азаровым В.Н. При этом считается, что процесс массопереноса происходит из двух как бы параллельных входных зон – зоны А (верхняя часть аппарата с верхним патрубком ввода запыленного потока) и зоны В (нижняя часть аппарата с нижним патрубком ввода запыленного потока). Вероятность этого сложного процесса составит:

$$P = \frac{P_A m_{\text{вх}A} + P_B m_{\text{вх}B}}{m_{\text{вх}A} + m_{\text{вх}B}} \quad (1.9)$$

При вероятностном подходе расчет эффективности пылеуловителей ВЗП основывается на том, что движение частиц в потоке, проходящем через аппарат, определяется факторами, имеющими стохастическую природу. К таким факторам можно отнести режим работы пылеуловителя и физико-химические особенности улавливаемого материала [5, 29, 91, 92].

Для расчета эффективности аппарата ВЗП при использовании вероятностного подхода используются выражения [5, 91, 92]:

- для зоны А

$$P_A = \left\{ 1 - \frac{\exp[-\lambda(1 - W_{rA}/V_{rA})R_A] - \exp[-\lambda(1 - W_{rA}/V_{rA})R_H]}{(1 - W_{rA}/V_{rA})(R_H - R_A)} \right\}^x \times \operatorname{erf} \left[\frac{(R_H - 0,5R_B)^2}{2\bar{\mu}^2 b(\tau_A - \tau_0)} \right]^{0,5} \quad (1.10)$$

- для зоны В

$$P_B = \left\{ 1 - \frac{\exp[-\lambda(1 - W_{rB}/V_{rB})R_B] - \exp[-\lambda(1 - W_{rB}/V_{rB})R_H]}{(1 - W_{rB}/V_{rD})(R_H - R_B)} \right\}^x$$

$$\exp \left[\frac{(R_H - 0,5R_B)^2}{2\bar{\mu}^2 b(\tau_B - \tau_0)} \right]^{0,5} \quad (1.11)$$

где R_H, R_A, R_B - радиусы цилиндрической части корпуса, выходного патрубка и воздуховода подачи вторичного потока в зону В соответственно;

$\bar{\mu}^2$ - коэффициент диффузии газа;

b - степень увлечения частиц пульсирующей средой.

Рассмотрим установившееся движение частицы и момент достижения ею границы раздела потоков. Если будем считать, что центробежная сила равна силе лобового сопротивления воздуха, определенной по закону Стокса, то можно получить выражение для оценки минимального диаметра частицы, улавливаемой в аппарате [100]:

$$d_{min} = \frac{3}{2} \frac{(L_1 + 0,5L_2)^2}{(L_1 + L_2)^2} \frac{r_*}{n} \sqrt{\frac{\nu H \rho_r L_2}{\pi \rho_{\text{ч}}}} \quad (1.12)$$

где L_1, L_2 - расход газа в первичном и вторичном потоках соответственно;

r_* - радиус границы разделения газовых потоков;

H - высота сепарационной пылеуловителя;

n - число витков твердой фазы в аппарате.

Расчеты по выражению (1.12) проведены для аппаратов ВЗП-600 и ВЗП-800 при следующих условиях: соотношение расходов в первичном и вторичном потоках составляет 0,25; плотность пыли 2000 кг/м³. Полученные результаты показали, что минимальный диаметр частицы, улавливаемой в аппарате ВЗП-600, составляет 1,43 мкм, в аппарате ВЗП-800 - 1,53 мкм.

1.4 Обоснование и выбор направления исследований

Опыт эксплуатации систем обеспыливания выбросов в производстве строительных материалов и изделий показывает, что в процессе эксплуатации отдельные элементы этих систем (пылеуловители, фасонные детали воздухопроводов и т.д.) подвержены абразивному износу. В циклонах износу в первую очередь подвергаются стенки корпуса в цилиндрической и конической частях. Сначала на внутренней поверхности корпуса образуются спиральные канавки, особенно в конической части – в зоне концентрированного пылевого потока. Затем в корпусе образуются сквозные отверстия.

Интенсивность износа элементов систем пылеочистки, главным образом, зависит от скорости очищаемого воздуха [19, 86, 87, 108]. Поэтому для снижения интенсивности абразивного износа рекомендуется снижать скорость пылевоздушного потока в поперечном сечении пылеуловителя. Однако такое решение приводит к возрастанию проскока пыли в атмосферный воздух.

Другим вариантом решения рассматриваемой проблемы является изготовление циклонов из износостойких материалов, например, чугуна или современных композитных материалов, используемых в авиационной, космической и военной промышленности. Практикующееся в некоторых случаях изготовление корпуса циклона из чугуна, как показал опыт эксплуатации, не дает положительного результата. В этом случае после срабатывания защитной корки отбеленного чугуна абразивный износ такого корпуса происходит в два раза быстрее, чем при изготовлении аппарата из обычной стали [20]. Кроме того, при использовании чугунного корпуса циклона возникают трудности с его изготовлением и ремонтом, поскольку для соблюдения соотношения размеров и требования по обеспечению гладкой внутренней поверхности, а также в связи с недопустимостью механической обработки, требуется специальная технология подготовки отливки [20].

С другой стороны, стоимость упомянутых выше композитных материалов достаточно велика, что препятствует их широкому применению в системах

обеспыливания выбросов. Для уменьшения абразивного износа циклона возможно также использование футеровки внутренних поверхностей корпуса плитками из материалов, которые обладают стойкостью к истиранию, например, из плавленого базальта или других каменных пород [20]. Такое решение приводит к усложнению изготовления и ремонта аппарата, а также к повышению его аэродинамического сопротивления, и, следовательно, возрастанию затрат электроэнергии на реализацию процессов пылеочистки. Кроме того, нельзя не отметить, что утяжеление самого пылеуловителя, обусловленное футеровкой, потребует дополнительных мероприятий по обеспечению его безопасной эксплуатации.

Большей устойчивостью к абразивному износу характеризуются циклоны с обратным конусом (циклоны конструкции ВЦНИИОТ, ЦОК, ЦР, ЦМ), в которых в результате расширения конической части происходит снижение скорости пылевоздушного потока с высоким содержанием пылевых частиц [19, 60, 76, 79, 98, 99, 104-106, 108].

Вместе с тем, общеизвестно, что, несмотря на признанные достоинства циклонов, эти аппараты не обеспечивают требуемой степени снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду. Особенно это относится к пыли, размеры частиц которой составляют менее 10 мкм и 2,5 мкм [19, 60, 76, 79, 98, 99, 104-106, 108]. Помимо того, что содержание таких частиц в атмосферном воздухе населенных мест жестко регламентируется действующими санитарно-гигиеническими нормативами, возрастает негативное воздействие пыли на окружающую природную среду вследствие ее абразивных свойств.

Снижение проскока пыли в городскую воздушную среду достигается при использовании в системах обеспыливания выбросов пылеуловителей на встречных закрученных потоках [1, 3, 5, 9, 10, 14, 17, 31, 34, 43-45, 47, 50, 60, 65, 69, 84, 90, 93, 94-96, 111, 114]. Для снижения абразивного износа этих аппаратов в работе [113] предложена конструкция пылеуловителя ВЗП с сепарационной камерой, выполненной в виде обратного конуса.

С другой стороны, для обеспечения надежности систем обеспыливания выбросов необходимо уже на стадии их проектирования прогнозировать наступление отказа в результате абразивного износа отдельных элементов. Такой прогноз можно сделать по результатам расчетов по известной методике [20, 86], используя данные о характеристиках улавливаемой пыли, обуславливающих ее абразивные свойства (плотность, фракционный состав, форма частиц и др.), а также данные о величине коэффициента абразивности. Значения последнего показателя экспериментально установлены только для нескольких видов пыли строительных материалов и приведены в [97].

Изложенное выше послужило основанием для выбора направления исследований: экспериментальные исследования основных характеристик, обуславливающих абразивные свойства, для некоторых видов пыли в производстве строительных материалов; экспериментальные исследования влияния степени абразивного износа циклонов на величину проскока пыли в атмосферный воздух; теоретические и экспериментальные исследования по оценке зависимости степени снижения пылепоступлений в городскую воздушную среду от конструктивно-режимных параметров аппарата ВЗП с обратным конусом.

1.5 Выводы по главе 1

1. Анализ проектной и нормативно-технической документации показал, что для снижения поступлений абразивной пыли в городскую воздушную среду при производстве строительных материалов в системах обеспыливания выбросов применяются циклоны с обратным конусом.

2. По результатам анализа известных научно-технических источников установлено, что значения количественного показателя абразивных свойств пыли – коэффициента абразивности – определены только для небольшого числа видов пыли строительных материалов.

3. Проведены обоснование и выбор направления исследований.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВЫБРОСОВ НА ВЕЛИЧИНУ ПЫЛЕПОСТУПЛЕНИЙ В ГОРОДСКУЮ ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ

2.1 Объекты и методология исследований

Экспериментальные исследования проводились на предприятиях по производству строительного керамзита и строительных материалов с использованием кварцевого песка в г. Волгограде и Волгоградской области, а также на заводе строительных материалов компании «Абразж-Алькарама (AKSTrading&ContractingL.L.C) (султанат Оман) (приложение 1). На этом же предприятии производятся напольные доски из древесины пальмы (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Производство напольных досок из древесины пальмы

При проведении натурных исследований: обследовались системы местной вытяжной вентиляции; проводилась оценка проскока пыли из циклонов в атмосферный воздух; исследовалась аэродинамическая устойчивость систем местной вытяжной вентиляции в период эксплуатации; проводилась оценка

изменения проскока пыли из циклонов в зависимости от срока эксплуатации аппаратов; исследовались фракционный состав и основные свойства образующейся в рассматриваемых производствах пыли[5].

При обследовании систем местной вытяжной вентиляции и исследовании их аэродинамической устойчивости измерялись: площади сечения воздуховодов; давление внутри воздуховодов; температура воздушного потока; концентрация пыли в воздуховоде. Для измерения давлений использовался дифференциальный цифровой манометр *testo* 512 в сочетании с пневмометрической трубкой [35-37]. Для определения содержания пыли в воздуховодах и в воздушной среде применялся стандартный набор пылеотборного оборудования конструкции НИИОГАЗ [36, 37].

Исследования по оценке фракционного состава и формы пылевых частиц проводились в лаборатории кафедры «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве» ВолгГАСУ. При этом применялась методика микроскопического анализа [13, 16, 18, 40, 55], апробированная и рекомендованная к использованию при проведении исследований содержания мелкодисперсных частиц пыли PM_{10} и $PM_{2,5}$ [66]. При обработке результатов микроскопического анализа использовалась программа обработки изображений частиц DUST 1, разработанная в ВолгГАСУ и получившая свидетельство о государственной регистрации [81].

Для исследования основных свойств пыли, определяющих ее абразивные свойства, пробы отбирались на заводе строительных материалов компании «Абрадж-Алькарама» (рисунок 2.2), а сами исследования проводились в лабораториях этой компании (приложение А).

Для определения плотности исследуемой пыли использовался манометрический способ, основанный на законе Бойля-Мариотта [57, 98]. Для оценки абразивных свойств исследуемой пыли была использована экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 2.3 [57].



Рисунок 2.2 – Пробы пыли, отобранные на заводе строительных материалов компании «Абрадж-Алькарама»

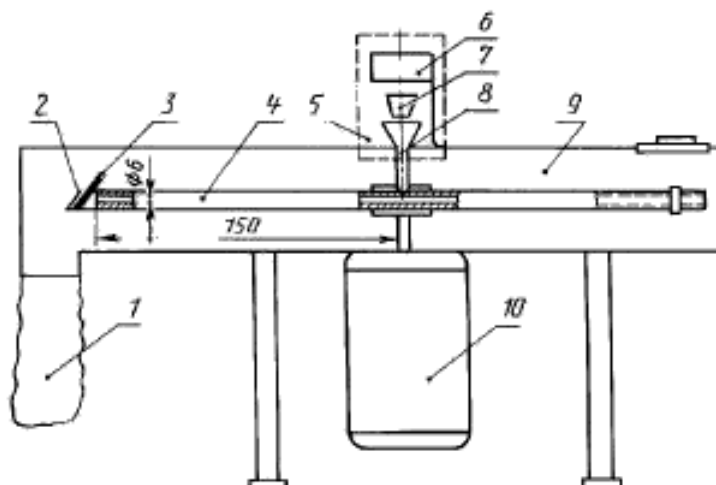


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки для определения коэффициента абразивности исследуемой пыли.

- 1 – сборник пыли; 2 – кассета для крепления образца; 3 – образец;
 4 – разгонная трубка; 5 – вибрационный питатель; 6 – бункер;
 7 – электромагнитная катушка; 8 – воронка; 9 – корпус;
 10 – электродвигатель

Метод основан на определении степени износа пластинки из исследуемой марки стали. При этом пластинка располагается под углом 45^0 к пылевой струе. Исследуемая пыль подается из бункера в воронку и из нее – в разгонное

устройство, которое представляет собой трубку с диаметром 6 мм и длиной 150 мм. На одном конце трубки устанавливается кассета с образцом.

Разгонное устройство вращается электродвигателем в горизонтальной плоскости. Пылевые частицы разгоняются под действием центробежных сил, ударяются об образец и через проем кассеты выносятся в сборник пыли. По результатам взвешивания образца до и после эксперимента определялся массовый износ образца. Количество засыпаемой пыли, скорость вращения трубки во всех опытах были одинаковыми [57, 93].

Коэффициент абразивности исследуемой пыли определялся по результатам экспериментов по выражению [57, 93]:

$$K_a = A\Delta m, \text{ м}^2/\text{Н} \quad (2.1)$$

где A - постоянная установки (при угловой скорости двигателя 50 с^{-1} и длине трубки разгонного устройства 0,15 м $A = 1,0804 \cdot 10^{-6}$ [55]), $\text{м}^2/(\text{Н} \cdot \text{кг})$;

Δm - изменение массы стального образца, кг.

За результат испытаний принималось среднее арифметическое результатов трех основных измерений [57, 93].

2.2 Результаты испытаний систем обеспыливания выбросов

В этом разделе приводятся результаты испытания систем аспирации на момент начала проведения исследований.

На рисунке 2.4 показана схема системы обеспыливания выбросов, обслуживающей элеватор песка. Результаты испытаний системы приведены в таблице 2.1.

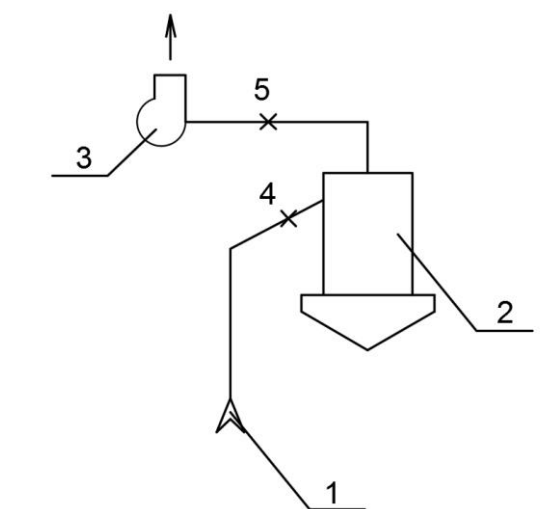


Рисунок 2.4 – Схема обследованной системы обеспыливания выбросов от элеватора песка

1 – местный отсос; 2 – циклон; 3 – вентилятор; 4, 5 – точки проведения замеров

Таблица 2.1 - Результаты испытаний системы обеспыливания выбросов от элеватора песка

Номер замерной точки	Диаметр воздуховода, м	Динамическое давление, Па	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Подсос воздуха, %	Концентрация пыли, мг/м ³	Проскок пыли, %
4	0,2	114	13,7	1550		9456,05	
5	0,2	120	14,1	1595	2,9	319,31	3,38

На рисунке 2.5 представлена схема системы локализации и очистки выбросов от узлов пересыпки песка. Результаты испытаний системы показаны в таблице 2.2.

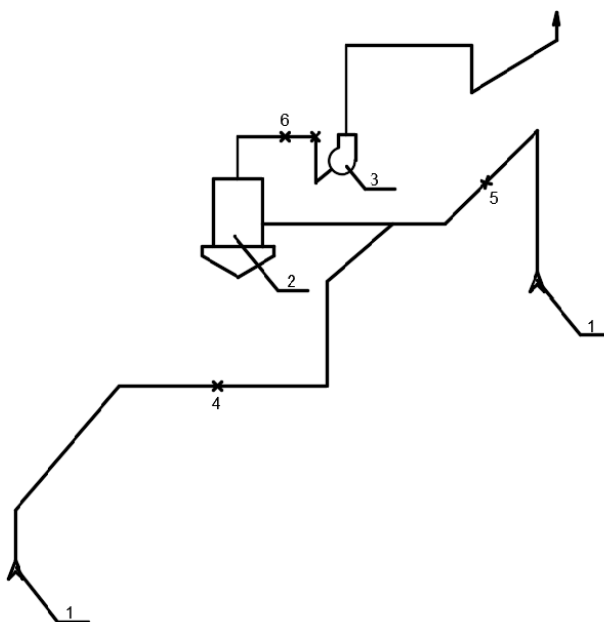


Рисунок 2.5 – Схема обследованной системы аспирации
от узлов пересыпки песка

1 – местный отсос; 2 – циклон; 3 – вентилятор; 4-6 – точки проведения замеров

Таблица 2.2 - Результаты испытаний системы аспирации
от узлов пересыпки песка

Номер замерной точки	Диаметр воздуховода, м	Динамическое давление, Па	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Подсос воздуха, %	Концентрация пыли, мг/м ³	Проскок пыли, %
4	0,18x0,18	121	14,2	1656		113,4	
5	0,2x0,2	139	15,2	2190		847,5	
6	0,34x0,2	159	16,3	3980	3,5	141,25	27,5%

На рисунке 2.6 приведена схема обследованной системы локализации и очистки выбросов, обслуживающей транспортер песка. Результаты испытаний системы представлены в таблице 2.3.

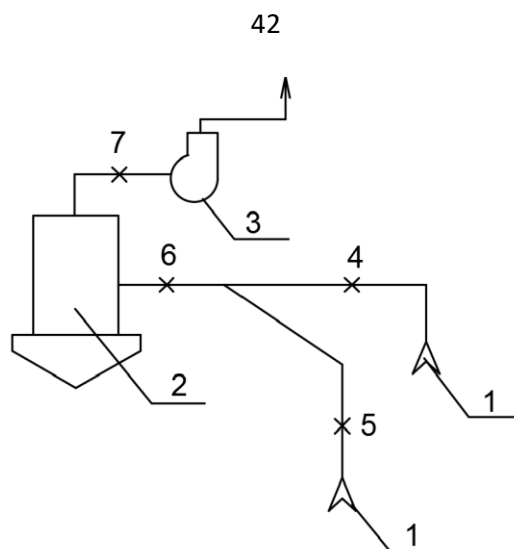


Рисунок 2.6 – Схема обследованной системы локализации и очистки выбросов, обслуживающей транспортер песка

Таблица 2.3 - Результаты испытаний системы локализации и очистки выбросов, обслуживающей транспортер песка

Номер замерной точки	Диаметр воздуховода, м	Динамическое давление, Па	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Подсос воздуха, %	Концентрация пыли, мг/м ³	Проскок пыли, %
4	0,2	124	14,4	1628		123,6	
5	0,2	119	14,1	1594		147,4	
6	0,25	199	18,2	3222		135,4	
7	0,25	228	19,5	3436	6,6	25,18	19,8

На рисунке 2.7 представлена схема системы локализации и очистки выбросов, обслуживающей грохоты керамзита. Результаты испытаний системы показаны в таблице 2.4.

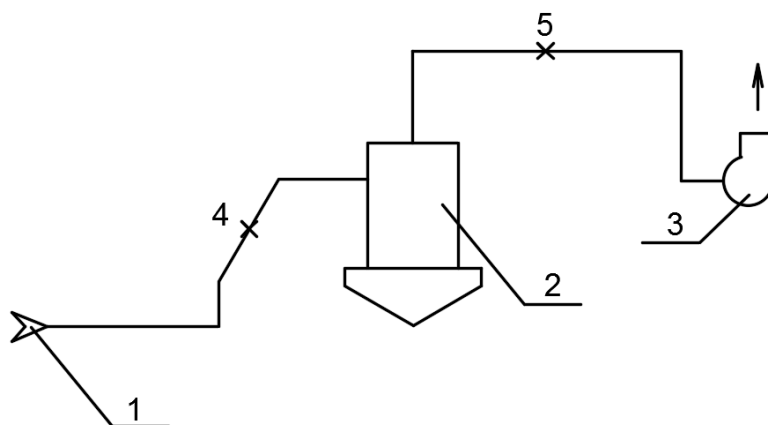


Рисунок 2.7 – Схема обследованной системы локализации и очистки выбросов от грохотов керамзита

1 – местный отсос; 2 – циклон; 3 – вентилятор; 4, 5 – точки проведения замеров

Таблица 2.4 - Результаты испытаний системы локализации и очистки выбросов от грохотов керамзита

Номер замерной точки	Диаметр воздуховода, м	Динамическое давление, Па	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Подсос воздуха, %	Концентрация пыли, мг/м ³	Проскок пыли, %
4	0,2	28,6	6,9	996		536,03	
5	0,2	61,2	10,1	1454	46	54,4	10,1

На рисунке 2.8 показана схема системы аспирации, обслуживающей транспортер керамзита. Результаты испытаний системы приведены в таблице 2.5.

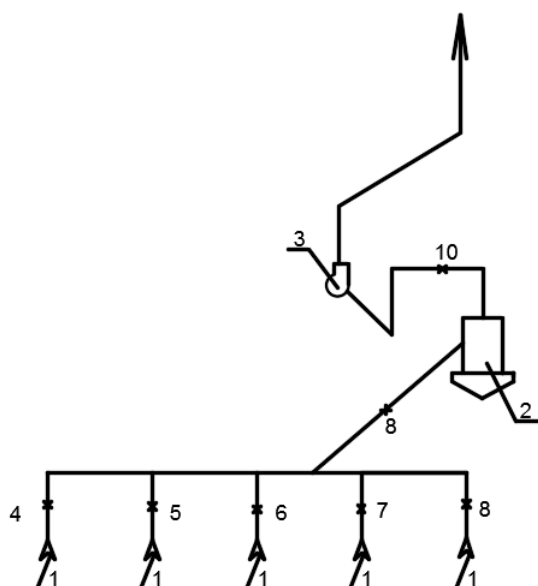


Рисунок 2.8 – Схема обследованной локализации и очистки выбросов
от транспортера керамзита

1 – местный отсос; 2 – циклон; 3 – вентилятор; 4-10 – точки проведения
замеров

Таблица 2.5 - Результаты испытаний локализации и очистки выбросов
от транспортера керамзита

Номер замерной точки	Диаметр воздуховода, м	Динамическое давление, Па	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Подсос воздуха, %	Концентрация пыли, мг/м ³	Проскок пыли, %
4	0,25	24,6	6,4	1130		803,4	
5	0,25	31	7,2	1272		626,7	
6	0,25	21	5,9	1042		659,2	
7	0,25	23	6,2	1095		726,8	
8	0,25	39	8,1	1430		659,2	
9	0,5	46,5	8,8	6200	3,9	666,2	
10	0,5	53	9,3	6570	6,0	157,2	25

На рисунке 2.9 и 2.10 представлены схемы системы локализации и очистки выбросов от деревообрабатывающих станков. Результаты испытаний систем приведены в таблице 2.6.

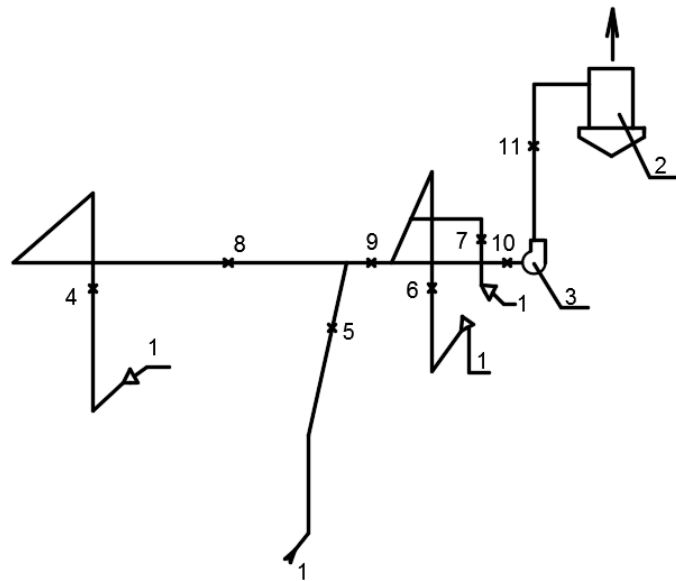


Рисунок 2.9 – Схема обследованной локализации и очистки выбросов от деревообрабатывающих станков В1

1 – местный отсос; 2 – циклон; 3 – вентилятор; 4-11 – точки проведения замеров

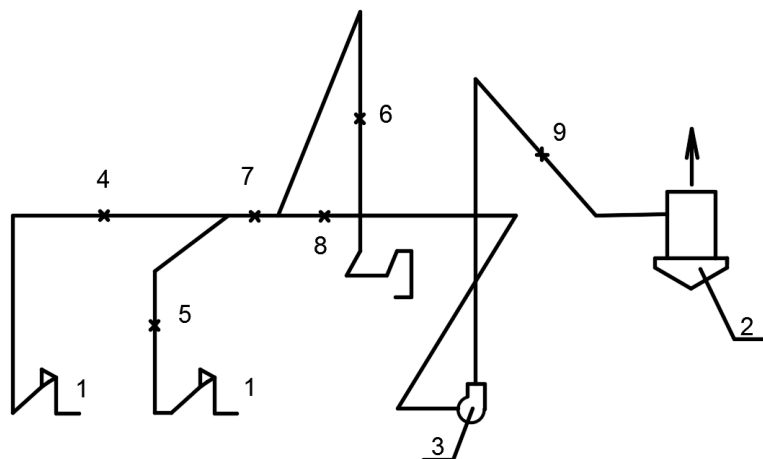


Рисунок 2.10 – Схема обследованной локализации и очистки выбросов от деревообрабатывающих станков В2

1 – местный отсос; 2 – циклон; 3 – вентилятор; 4-11 – точки проведения замеров

Таблица 2.6 - Результаты испытаний локализации и очистки выбросов от деревообрабатывающих станков

Номер замерной точки	Диаметр воздуховода, м	Динамическое давление, Па	Скорость воздуха, м/с	Расход воздуха, м ³ /ч	Подсос воздуха, %	Концентрация пыли, мг/м ³	Проскок пыли, %
Система В1							
4	140	139	15,2	842		329,6	
5	140	161	16,4	908		438,2	
6	140	148	15,7	870		243,8	
7	160	142	15,4	1114		198,9	
8	140	140	15,3	847		327	
9	200	144	15,5	1755		385,2	
10	250	270	21,2	3740		297,2	
11	250	272	21,3	3760	0,5	295,7	12,6
Система В2							
4	160	180	17,3	1251		212,5	
5	140	156	16,1	892		197,8	
6	140	139	15,2	842		264,5	
7	200	214	18,9	2145		206,2	
8	250	171	16,9	2990		222,4	
9	250	190	17,8	3115	4,1	213,5	17,7

Полученные результаты показали наличие незначительных (в пределах установленных нормативов [87]) подсосов воздуха в системах местных отсосов и высокое значение проскока пыли в циклонах обследованных систем.

2.3 Оценка фракционного состава и основных характеристик, определяющих абразивные свойства исследуемой пыли

Результаты определения фракционного состава исследуемой пыли представлены на рисунке 2.11-2.13.

На рисунке 2.11 приведены данные о пофракционном распределении массы частиц по размерам для керамзитовой пыли, поступающей в циклон. Для сравнения здесь же представлены результаты оценки дисперсного состава этой же пыли, приведенные в [50, 58, 95].

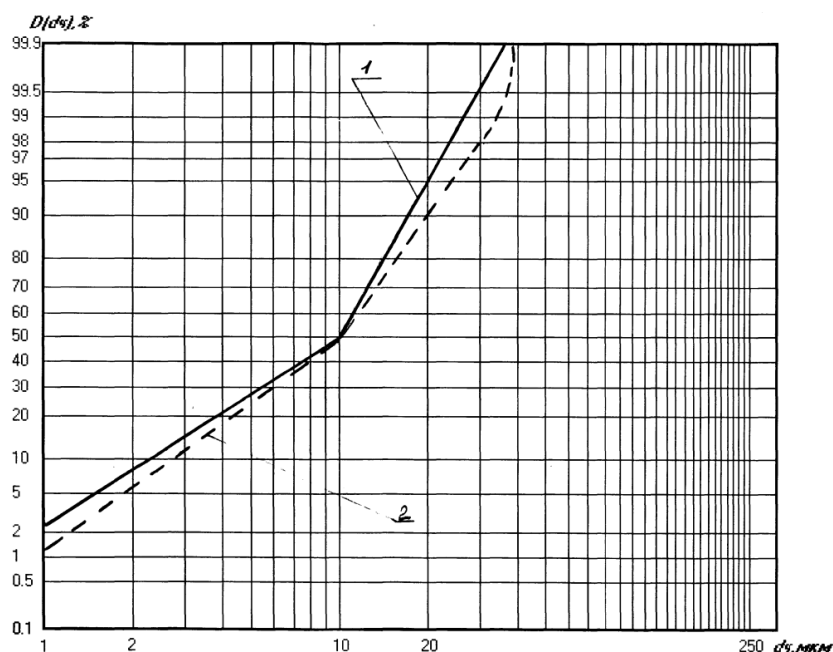


Рисунок 2.11 – Пофракционное распределение массы по диаметрам частиц керамзитовой пыли, поступающей в систему обеспыливания выбросов.

1 – результаты собственных экспериментальных исследований;

2 – по данным [50, 58, 95]

Полученные результаты свидетельствуют о том, что основную долю (до 50% по массе) в керамзитовой пыли, поступающей в системы очистки выбросов, составляют частицы с размерами до 10 мкм, и медианный диаметр $d_m = 10$ мкм. Размеры частиц изменяются в пределах от 0,5 до 35 мкм.

На рисунке 2.12 представлены результаты анализа фракционного состава пыли песка, поступающей в системы пылеочистки.

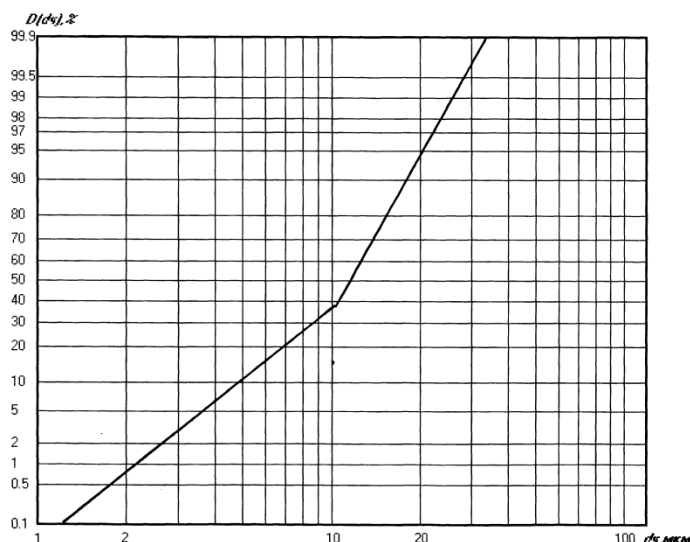


Рисунок 2.12 – Результаты анализа фракционного состава пыли песка, поступающей в систему обеспыливания выбросов

Размеры частиц изменяются в диапазоне 1,3 – 32 мкм. На долю частиц с размерами менее 10 мкм приходится 38 %, медианный диаметр d_m составляет 12 мкм.

На рисунке 2.13 показано пофракционное распределение массы по диаметрам поступающих в системы пылеочистки частиц пыли, образующихся при механической обработке древесины пальмы. Размеры частиц изменяются от 5 мкм до 35 мкм. На долю частиц с размерами менее 10 мкм приходится 9,5 %, медианный диаметр $d_m = 20$ мкм.

Полученные данные показали, что фракционный состав керамзитовой пыли и пыли песка, поступающих в системы обеспыливания выбросов, подчиняется усеченному логарифмически-нормальному распределению. Дисперсный состав пыли, образующейся при механической обработке древесины пальмы, так же, как дисперсный состав пыли, образующейся при обработке древесины других пород деревьев [61, 113], описывается формулой Годэна-Андреева-Шумана [55], которая для рассматриваемого случая приобретает вид:

$$D(d_q) = 0,0108 d_q^{2,84} \quad (2.2)$$

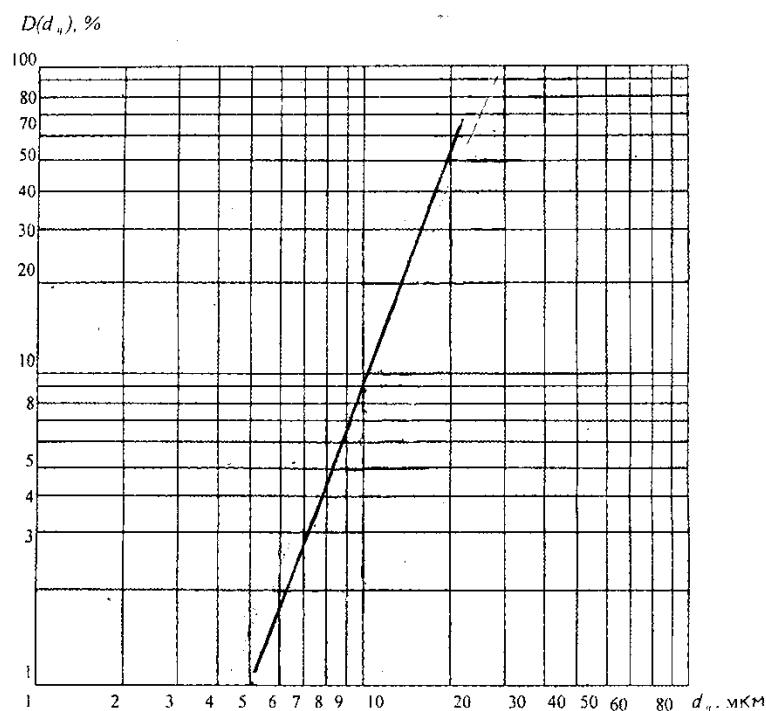


Рисунок 2.13 – Пофракционное распределение массы по диаметрам поступающих в системы обеспыливания выбросов частиц пыли, образующихся при механической обработке древесины пальмы

Изучение формы частиц исследуемой пыли проводилось по микрофотографиям, полученным при проведении дисперсионного анализа (рисунок 2.14). Очевидно, что частицы песка в большинстве своем имеют форму, близкую к шарообразной (рисунок 2.14, б). Частицы пыли древесины пальмы в основном характеризуются вытянутой палочкообразной или иглообразной формой (рисунок 2.14, в). Наибольшим разнообразием формы отличаются частицы керамзитовой пыли – от пластинчатой, палочкообразной до редко близкой к шарообразной (рисунок 2.14, а).

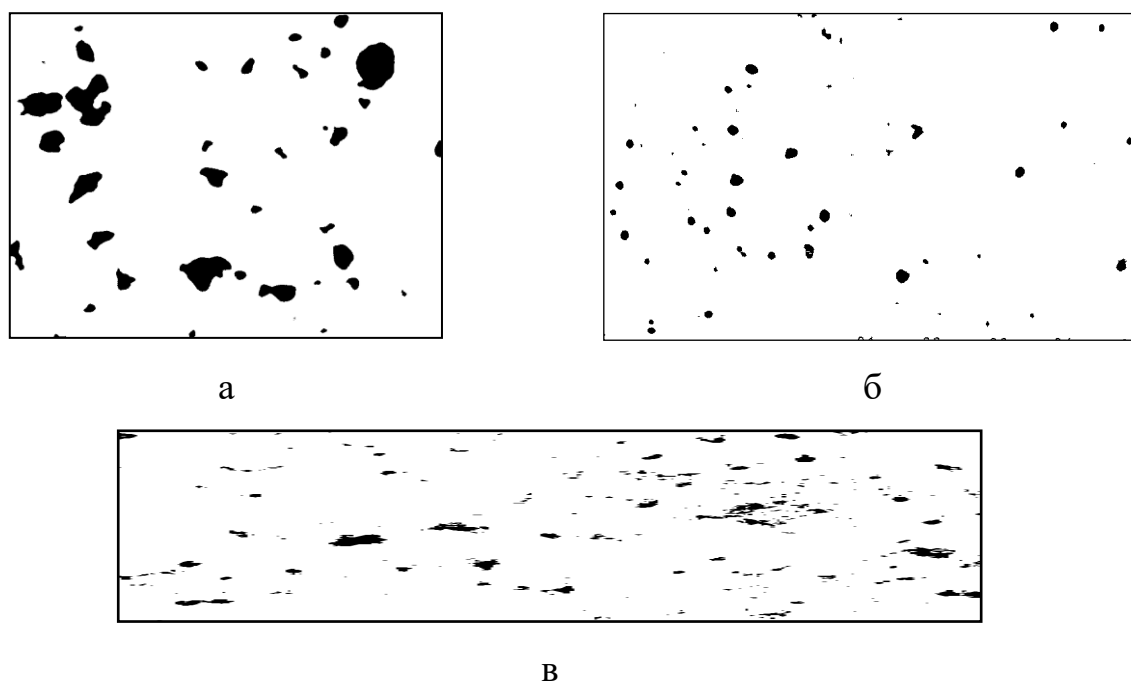


Рисунок 2.14 – Микрофотографии частиц исследуемой пыли, поступающей в системы местных отсосов:

а – керамзитовая пыль; б – пыль песка; в – пыль древесины пальмы

Результаты экспериментальных исследований по определению плотности исследуемой пыли показали, что эта величина в среднем составляет: для керамзитовой – 2600 кг/м^3 , песка – 1500 кг/м^3 , древесины пальмы – 1300 кг/м^3 .

Экспериментально получены значения коэффициента абразивности для исследуемой пыли: керамзитовой – $0,66 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{кг}$, песка – $0,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{кг}$, древесины пальмы – $0,42 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{кг}$.

2.4 Расчет интенсивности абразивного износа циклонов в обследованных системах обеспыливания выбросов

Для расчетной оценки интенсивности абразивного изнашивания циклонов при очистке выбросов в атмосферный воздух от исследуемой пыли воспользуемся выражением [57, 97]:

$$\tau = \frac{hq}{3600Esv^2K_a}, \text{ч} \quad (2.2)$$

где τ - время абразивного износа элемента установки обеспыливания на заданную глубину, ч;

h - линейный износ, м;

c/q - массовая концентрация материала, кг/с²/м²;

E - коэффициент вероятности попадания частиц на изнашиваемую поверхность, в долях от единицы;

v - скорость газового потока, м/с;

K_a - коэффициент абразивности исследуемой пыли, м²/кг.

В таблице 2.1 приведены результаты прогнозного расчета абразивного износа циклонов в обследованных системах обеспыливания выбросов, выполненного на основе экспериментальных данных о скорости и концентрации пыли в очищаемых воздушных потоках, а также на основе экспериментально полученных значений коэффициентов абразивности исследуемой пыли.

Таблица 2.1 - Результаты прогнозного расчета абразивного износа циклонов в обследованных системах обеспыливания выбросов

Вид пыли	Схема установки обеспыливания	Время абразивного износа, год
Песок	рисунок 2.4	2,1
Песок	рисунок 2.5	1,9
Песок	рисунок 2.6	2,9
Керамзитовая	рисунок 2.7	1,8
Керамзитовая	рисунок 2.8	1,3
Древесина пальмы	рисунок 2.9	1,9
Древесина пальмы	рисунок 2.10	2,5

2.5 Экспериментальные исследования изменения проскока пыли в процессе эксплуатации систем обеспыливания выбросов

С учетом результатов прогнозного расчета времени абразивного износа циклонов в течение 2,5 лет каждые полгода проводились натурные исследования по оценке изменения величины проскока пыли в атмосферный воздух в зависимости от времени эксплуатации установок обеспыливания выбросов. Полученные данные представлены в таблице 2.2 и на рисунке 2.15-2.17.

Таблица 2.2 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от срока эксплуатации систем обеспыливания выбросов

Вид пыли	Схема установки обеспыливания	Продолжительность эксплуатации системы обеспыливания, год				
		0,5	1	1,5	2	2,5
		Проскок пыли в атмосферу, %				
Песок	рисунок 2.4	3,6	3,8	4	4,3	5
Песок	рисунок 2.5	3,5	3,6	3,8	4,2	4,8
Песок	рисунок 2.6	2,8	3,1	3,3	3,6	3,8
Керамзитовая	рисунок 2.7	11,5	12,0	14,9	16,8	
Керамзитовая	рисунок 2.8	10,2	10,4	13,8	16,2	
Древесина пальмы	рисунок 2.9	17,2	16,8	17,2	18,3	20,3
Древесина пальмы	рисунок 2.10	15,1	15,1	15,1	15,8	18,3

Полученные данные свидетельствуют о том, что в период эксплуатации системы очистки выбросов от пыли песка проскок в атмосферный воздух вследствие абразивного износа элементов циклонов в среднем увеличивается на 28,6%, от пыли древесины пальмы – на 21%.

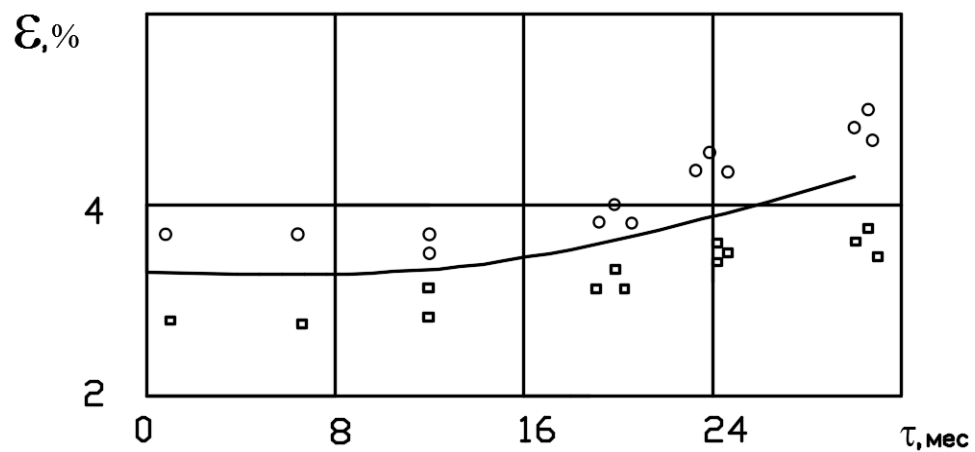


Рисунок 2.15 – Изменение величины проскока при очистке выбросов от пыли песка

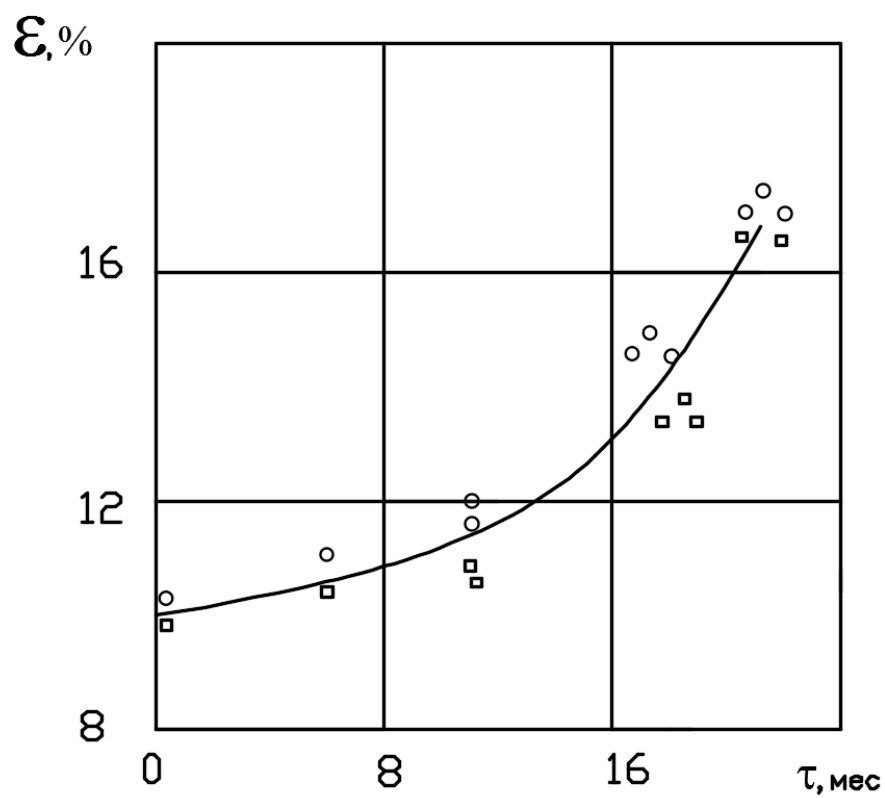


Рисунок 2.16 – Изменение величины проскока при очистке выбросов от пыли керамзитовой

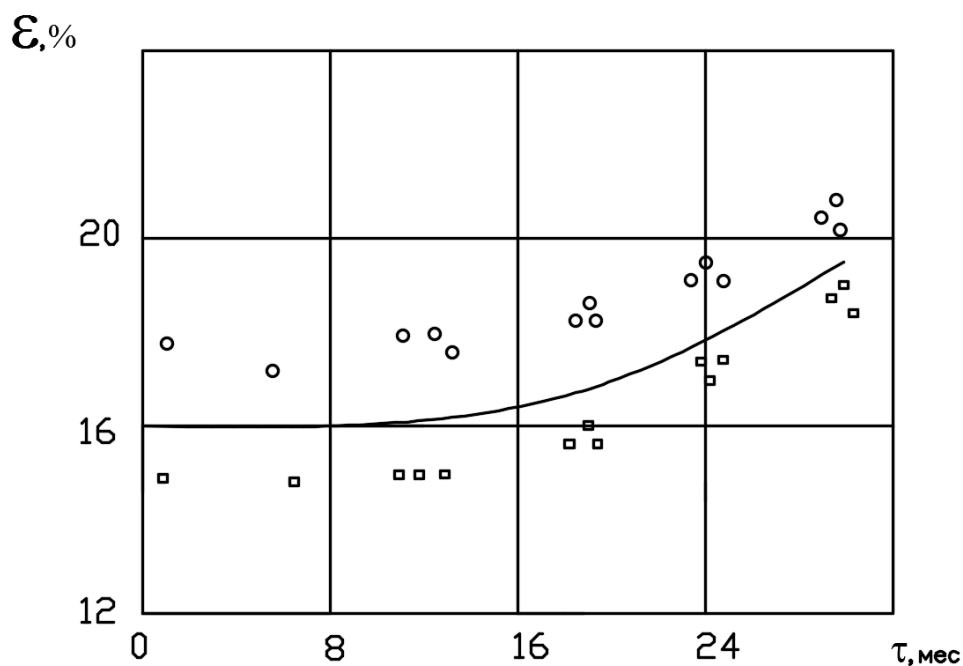


Рисунок 2.17 – Изменение величины проскока при очистке выбросов от пыли, образующейся при механической обработке древесины пальмы

Как показывают полученные данные, больше всего подвергаются абразивному износу циклоны, применяемые для очистки выбросов от пыли керамзитовой. В этом случае в период эксплуатации проскок пыли в атмосферу в среднем увеличивается на 69,8%.

2.6 Выводы по главе 2

1. В натурных условиях проведены испытания систем обеспыливания выбросов от некоторых видов пыли строительных материалов.
2. По результатам экспериментальных исследований получены данные об основных свойствах исследуемой пыли (фракционном составе, форме частиц и плотности), обуславливающих ее абразивные свойства.
3. Экспериментально установлены значения коэффициента абразивности исследуемой пыли.
4. Проведен прогнозный расчет срока надежной эксплуатации циклонов в системах очистки выбросов от исследуемой пыли.

ГЛАВА 3 ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВЫБРОСОВ В ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯХ НА ВСТРЕЧНЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ С КОНИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИОННОЙ КАМЕРОЙ

3.1 Анализ сил, обуславливающих движение твердой пылевой частицы в конической сепарационной камере пылеуловителя на встречных закрученных потоках

Движение пылевой частицы в сепарационной камере пылеуловителя происходит под действием аэродинамических сил, действующих на частицу со стороны газового потока. Попадая в сепарационную камеру через тангенциальный ввод, пылевая частица движется по осесимметричной спиральной траектории, приближаясь к стенке под действием массовых и инерционных сил. Уравнение, описывающее движение твердой частицы находящейся в газовом потоке, протекающем в сепарационной камере, имеет вид:

$$m \frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{F}_m + \bar{F}_g + \bar{F}_N \quad (3.1)$$

где \bar{F}_m - результирующая массовых сил;
 \bar{V} - вектор скорости пылевой частицы;
 \bar{F}_g - результирующая гидродинамических сил;
 \bar{F}_N - реакция стенки канала;
 m - масса пылевой частицы.

Для упрощения описания движения принимается допущение о шарообразной форме твердой пылевой частицы, при котором масса распределяется по объему равномерно. При этом вектор силы тяжести, направленный вертикально вниз из геометрического центра частицы, может быть определен как:

$$\bar{F}_m = \rho_{\text{ч}} \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} g \quad (3.2)$$

где $d_{\text{ч}}$ - диаметр частицы;
 g - ускорение свободного падения;

$\rho_{\text{ч}}$ - плотность частицы.

Вектор сил, действующих на частицу со стороны газового потока, может быть представлен в виде результирующей сил

$$\bar{F}_g = \bar{F}_\mu + \bar{F}_a + \bar{F}_w + \bar{F}_p \quad (3.3)$$

где \bar{F}_μ - сила сопротивления движения частицы в газовом потоке (сила обтекания);

\bar{F}_a - сила, обусловленная наличием присоединенной массы газа при ускоренном движении частицы в потоке;

\bar{F}_w - поперечно направленная сила, возникающая в результате вращения частицы в потоке вязкой жидкости (сила Магнуса);

\bar{F}_p - сила, обусловленная наличием градиента статических давлений (сила Архимеда).

Анализ влияния выше перечисленных сил на движение твердой частицы в закрученном газовом потоке позволяет упростить модель. Согласно данным [21, 26, 34, 43, 44, 59, 60, 62, 64, 65, 90, 100, 102], при движении частиц в закрученном газовом потоке, протекающем по осесимметричному каналу, из числа оказывающих значимое влияние на движение частицы в условиях, характерных для вентиляционных систем, можно исключить:

- силу Архимеда, вследствие значительной разницы между плотностью газовой фазы потока и плотностью частиц пыли;

- силы, обусловленные наличием присоединенных масс - по результатам обобщения данных [21, 26, 34, 43, 44, 59, 60, 62, 64, 65, 90, 100, 102];

- силу Магнуса, т.к. отсутствует вращение частицы вокруг собственной оси. Для появления такого вращения необходимо действие пары разнонаправленных сил, отсутствующее в газовом потоке. Подобное вращение может сложиться за счет появления силы трения между поверхностями частицы и стенкой сепарационной камеры. Однако, достижение частицей поверхности сепарационной камеры означает ее сепарацию и перемещение в зону уловленных частиц (бункер). Это позволяет не рассматривать ее дальнейшее движение в

настоящей расчетной модели. По этой же причине может быть исключена реакция стенки канала.

Предварительный анализ условий движения, основанный на теоретических выводах и практических наблюдениях, показывает, что частица, попавшая в сепарационную камеру пылеуловителя ВЗП, совершает сложное движение. Вращательное движение закрученного газового потока, протекающего по цилиндрической сепарационной камере вдоль оси, вынуждает частицу совершать вращательное движение в горизонтальной плоскости. Возникающая при этом центробежная сила описывается выражением:

$$F_{\text{ц}} = \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 r m \quad (3.4)$$

где r, φ - радиальная и угловая координаты в цилиндрической системе координат соответственно.

Наличие центробежной силы заставляет частицу двигаться в радиальном направлении. Следовательно, движение частицы в плоскости вращения можно охарактеризовать как сложное, характеризующееся наличием силы Кориолиса:

$$F_{\text{К}} = 2 \sin \beta \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} m \quad (3.5)$$

где β - угол между векторами переносной и относительной скорости.

Сила сопротивления обтеканию частицы газовым потоком определяется как:

$$F_{\mu} = \lambda_{\text{ч}} \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{4} \frac{\rho (\bar{u} - \bar{V})^2}{2} \quad (3.6)$$

где $\lambda_{\text{ч}}$ - коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;

ρ - плотность газа;

u - скорость газового потока.

Для определения значения величины сопротивления обтеканию твердой частицы газовым потоком существует несколько способов. Наибольшее распространение получил метод Стокса. В этом случае коэффициент $\lambda_{\text{ч}}$ шарообразного тела определяется как функция от его диаметра и критерия Рейнольдса. Однако практическое применение этой зависимости затрудняется

необходимостью учета влияния скорости частицы на искомое значение коэффициента. Кроме того, оценочные расчеты показывают, что в диапазоне изменения чисел Рейнольдса, характерных для движения пылевой частицы в аспирационном потоке, величина λ_q изменяется несущественно. Большее влияние на нее оказывает коэффициент формы. Поскольку величины скоростей газового потока и пылевой частицы в выражении (3.6) являются векторными величинами, для практического использования уравнения необходимы сведения о кинематической картине течения потока. При этом интерес представляет только пристеночная зона течения, в которой происходит сепарация пылевых частиц в результате соприкосновения со стенками сепарационной камеры.

Изучению аэродинамики сепарационных камер пылеуловителей циклонного типа посвящен ряд работ [21, 26, 34, 43, 44, 59, 60, 62, 64, 65, 90, 100, 102]. Приводимые в них данные получены для циклонов и пылеуловителей ВЗП, имеющих цилиндрическую сепарационную камеру.

Для получения данных о параметрах пристеночного течения в пылеуловителях ВЗП с обратной конической сепарационной камерой были проведены экспериментальные исследования, суть которых заключалась в определении изменения направления и абсолютной величины вектора скорости газового потока в пристеночной зоне.

В качестве экспериментальной установки был использован пылеуловитель на встречных закрученных потоках с обратной конической формой сепарационной камеры. Для изменения интенсивности закрутки потока первичного ввода пылеуловитель снабжен тремя сменными тангенциальными закручивателями. Для изменения параметра конусности сепарационной камеры использованы три различных сменных сепарационных камеры с параметром конусности $\Theta = 10\%$, 15% и 20% .

Для характеристики интенсивности закрутки потока в настоящее время используются несколько параметров. Наибольшее распространение из них получили два - интегральный Φ^* и локальный $\operatorname{tg} \alpha$ [102]. Параметр $\operatorname{tg} \alpha$ представляет собой предельный (поверхностный) тангенс угла закрутки потока и является

отношением поверхностных касательных напряжений трения в тангенциальном и осевом направлениях. Интегральный параметр Φ^* характеризует отношение момента количества движения M к осевому количеству движения K в произвольном сечении в масштабе линейного размера канала L [102]:

$$\Phi^* = \frac{M}{KL} \quad (3.7)$$

Значение M и K можно рассчитать по следующей формуле:

$$M = 2\pi \int_0^R p u \omega r^2 dr$$

$$K = 2\pi \int_0^R p \omega^2 r dr$$

Эти параметры однозначно связаны между собой и для обобщения опытных данных можно использовать любой из них. Между локальным и интегральным параметрами закрутки существует связь, определяемая зависимостью:

$$\operatorname{tg} \alpha = 1,18 \Phi^{*0,76} \quad (3.8)$$

Для основных типов закручивающих устройств выведены выражения, позволяющие исходя из характерных конструктивных размеров определять интегральный параметр закрутки потока, получаемый на выходе. Для тангенциального закручивателя выражение имеет [102]:

$$\Phi_{\text{вых}}^* = \frac{\pi}{4} * \frac{D(D-a)}{ab} * \cos \alpha \quad (3.9)$$

где D - диаметр цилиндрической части закручивателя (сепарационной камеры пылеуловителя);

b - высота сечения тангенциального ввода закручивателя, отнесенная к диаметру цилиндрической камеры;

a - ширина сечения тангенциального ввода закручивателя, отнесенная к диаметру цилиндрической камеры

α - угол наклона оси тангенциального патрубка к оси воздуховода.

Схема к определению конструктивных размеров пылеуловителя ВЗП приведена на рисунке 3.1. При проведении экспериментальных исследований использовано три закручивателя с параметром интенсивности закрутки $\Phi_o^* = 4, 5$ и 6.

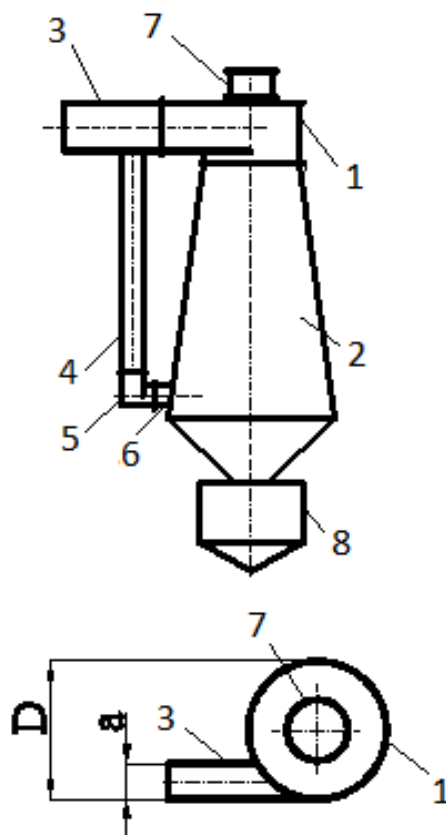


Рисунок 3.1 - Схема к определению конструктивных размеров пылеуловителя ВЗП

1 – верхний тангенциальный ввод; 2 – сепарационная камера; 3 – тангенциальный патрубок верхнего ввода; 4 – вторичный (нижний ввод); 5 – закручиватель вторичного ввода; 6 – выходной патрубок вторичного закрученного потока; 7 – выходной патрубок; 8 – бункер уловленной пыли

Экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 62000 - 38000$, характеризующих оптимальный режим работы пылеуловителей ВЗП. Помимо числа Рейнольдса, характеризующего количество газа, подаваемого на очистку, аэродинамический режим пылеуловителя ВЗП характеризуется отношением расхода, подаваемого на нижний ввод, к общему,

подаваемому на очистку $L_n/L_{общ}$. При проведении экспериментов значение доли расхода, подаваемого на нижний ввод, принято равным $L_n/L_{общ} = 0,28$, являющимся оптимальным для получения максимальной эффективности улавливания [5, 9, 10, 12, 14, 31, 34, 42-44, 50, 60, 65, 80, 90, 91, 93, 95, 96].

Измерение величины и направления скорости газового потока в пристеночной зоне сепарационной камеры производится при помощи шарового пятиканального зонда, батарейного микроманометра и устройства для измерения угла наклона оси центрального канала зонда, смонтированного на замерном штуцере (рисунок 3.2).

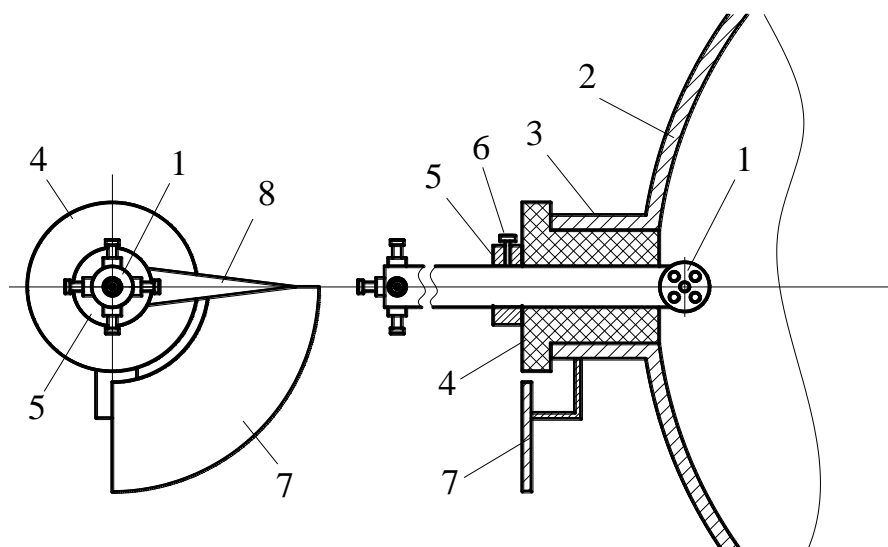


Рисунок 3.2 - Устройство для определения направления и величины скорости газового потока в сепарационной камере

- 1 – шаровой пятиканальный зонд; 2 – стенка воздуховода; 3 – замерный штуцер; 4 – вращающаяся втулка; 5 – муфта крепления стрелки; 6 – фиксирующий винт муфты; 7 – транспортер; 8 – стрелка

Восемь замерных штуцеров равномерно располагаются по высоте сепарационной камеры с шагом, равным 100 мм, что составляет половину диаметра сепарационной камеры ($0,5 D$). Угол между вектором скорости воздушного потока и осью сепарационной камеры в пристеночной области течения выясняется поворотом пятиканального зонда вокруг горизонтальной оси. Тангенс полученного угла по определению равен значению локального параметра закрутки потока $\tan \alpha$. Значения скорости вычисляются, исходя из полученных

значений динамического давления. Таким образом, исходя из полученных данных, вычисляются значения окружной (тангенциальной) и осевой (вертикальной) составляющих скорости газового потока в пристеночной зоне.

Результаты определения окружной и осевой составляющих скоростей газового потока в пристеночной зоне сепарационной камеры при различных значениях формпараметра закрутки потока Φ^*_0 соответственно приведены на рисунке 3.3 и 3.4.

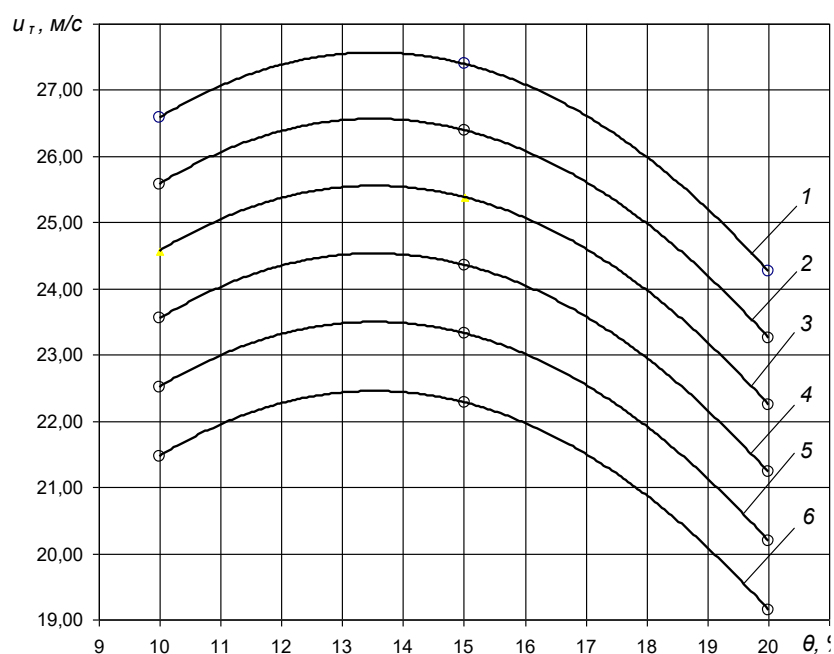


Рисунок 3.3 - Зависимость окружной скорости газового потока в пристеночной области от конусности сепарационной камеры

1 – $h/d = 1$; 2 – $h/d = 2$; 3 – $h/d = 3$; 4 – $h/d = 4$; 5 – $h/d = 5$; 6 – $h/d = 6$

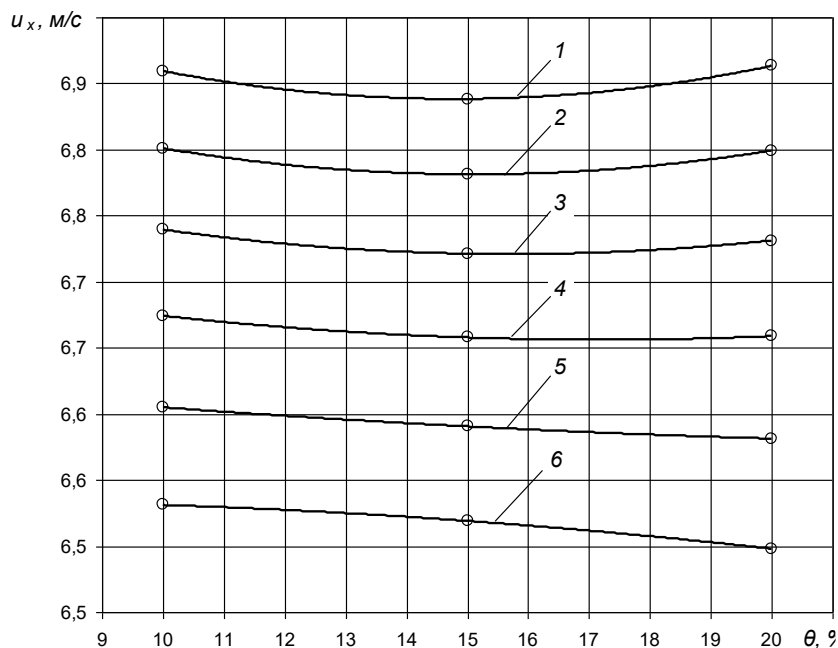


Рисунок 3.4 - Зависимость осевой скорости газового потока в пристеночной области от конусности сепарационной камеры

1 – $h/d = 1$; 2 – $h/d = 2$; 3 – $h/d = 3$; 4 – $h/d = 4$; 5 – $h/d = 5$; 6 – $h/d = 6$

Анализ формы кривых позволяет сделать предположение об автомодельности кинематической структуры течения в пристеночной зоне по отношению к значениям начальной интенсивности закрутки потока Φ_0^* и конусности сепарационной камеры θ .

Для проверки данной гипотезы на основании экспериментальных значений построены кривые, характеризующие изменение локального параметра интенсивности закрутки потока по высоте сепарационной камеры, а также отношения значений тангенциальной скорости к ее начальному значению по высоте сепарационной камеры $tg\alpha/tg\alpha_0(h/D)$ и $u_\tau/u_{\tau 0}(h/D)$.

Как следует из результатов, представленных на рисунке 3.5, 3.6, 3.7 и 3.8 затухание скоростей газового потока в пристеночной зоне сепарационной камеры описывается гладкими поверхностями.

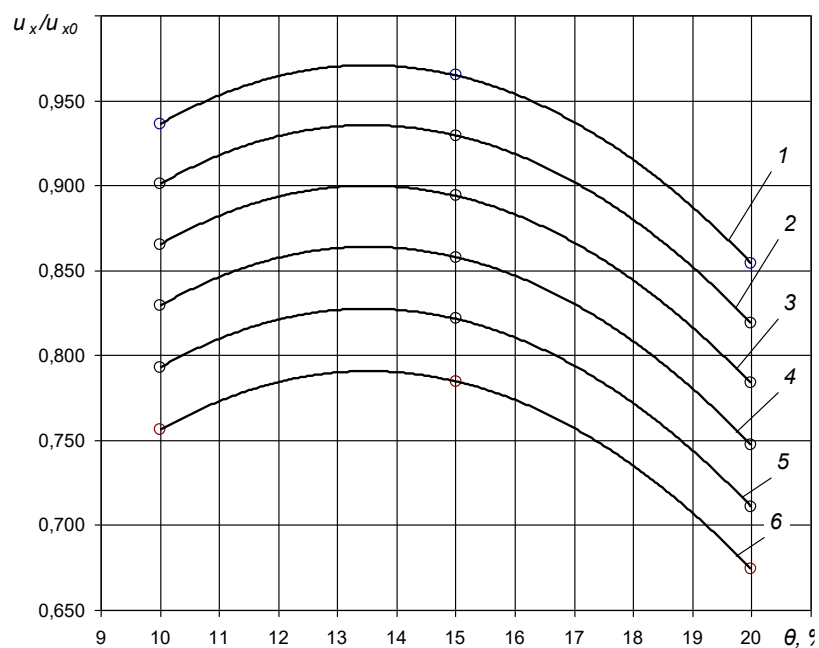


Рисунок 3.5 - Зависимость затухания осевой скорости газового потока в пристеночной области от конусности сепарационной камеры
 $1 - h/d = 1; 2 - h/d = 2; 3 - h/d = 3; 4 - h/d = 4; 5 - h/d = 5; 6 - h/d = 6$

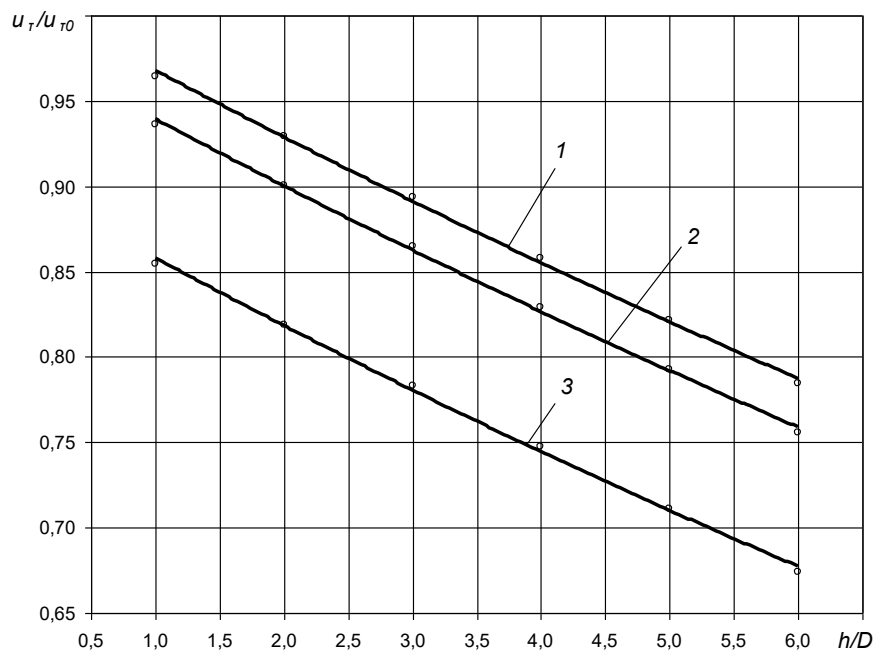
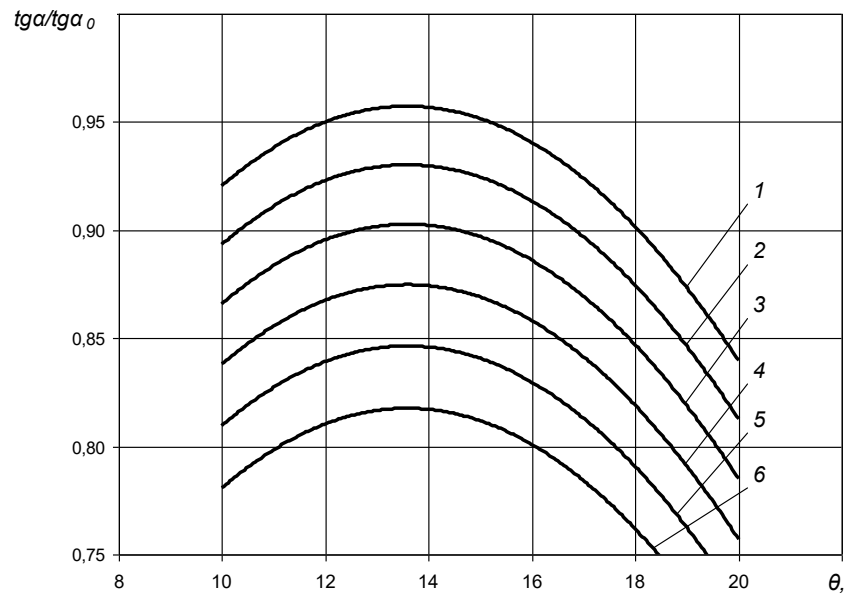


Рисунок 3.6 - Зависимость затухания окружной скорости газового потока в пристеночной области от осевой координаты сепарационной камеры
 $1 - \theta = 0,15; 2 - \theta = 0,10; 3 - \theta = 0,20$



Размер 3.7 - Зависимость затухания интенсивности закрутки от конусности
сепарационной камеры

1 – $h/d = 1$; 2 – $h/d = 2$; 3 – $h/d = 3$; 4 – $h/d = 4$; 5 – $h/d = 5$; 6 – $h/d = 6$

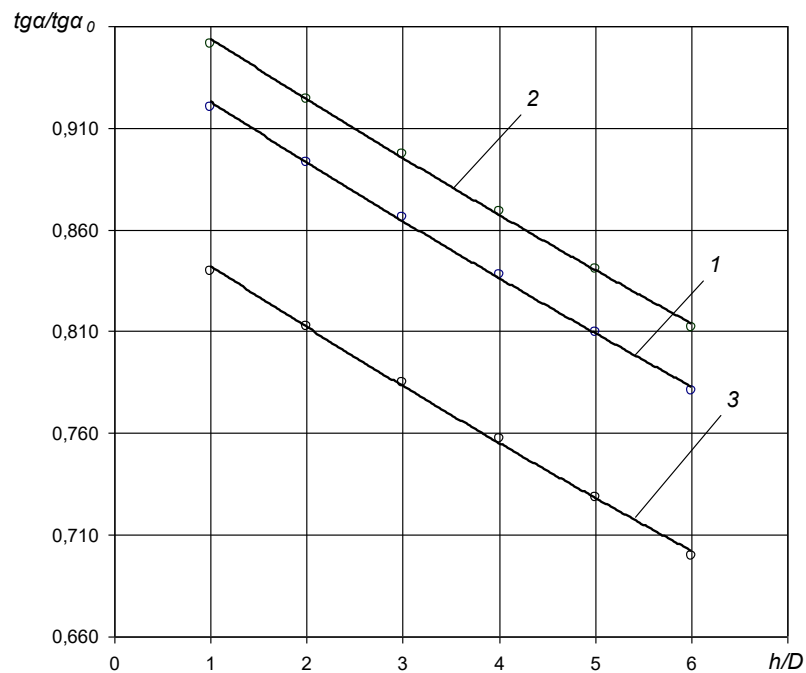


Рисунок 3.8 - Зависимость затухания интенсивности закрутки по высоте
сепарационной камеры

1 – $\theta = 0,10$; 2 – $\theta = 0,15$; 3 – $\theta = 0,20$

Полученные значения, характеризующие затухания локальной пристеночной интенсивности закрутки потока, являются функциями параметра конусности сепарационной камеры и начальной интенсивности закрутки, и не зависят от абсолютных начальных значений скоростей во всем диапазоне изменения чисел Рейнольдса.

Для практического использования полученных результатов исследования кинематической структуры потока в пристеночной области обратной конической сепарационной камеры пылеуловителя на встречных закрученных потоках данные по затуханию интенсивности локальной закрутки и тангенциальной составляющей скорости аппроксимированы полиномиально-экспоненциальными регрессионными зависимостями.

Уравнение регрессии, описывающее затухание тангенциальной скорости газового потока в пристеночной области обратно конической сепарационной камеры пылеуловителя на встречных закрученных потоках имеет вид:

$$\frac{u_{\tau}}{u_{\tau 0}} = 3,835 - 0,00278\theta^2 + 0,0752\theta - 3,338\exp\left(\frac{0,0104h}{D}\right) \quad (3.10)$$

где u_{τ} - тангенциальная скорость газового потока в пристеночной области;

$u_{\tau 0}$ - начальное значение тангенциальной скорости газового потока на входе в сепарационную камеру;

h - вертикальная (осевая) координата;

D - диаметр цилиндрической части тангенциального закручивателя потока первичного ввода ВЗП;

θ - конусность сепарационной камеры.

Уравнение регрессии, описывающее затухание осевой скорости газового потока в пристеночной области обратно конической сепарационной камеры пылеуловителя на встречных закрученных потоках, имеет вид:

$$\frac{u_x}{u_{x0}} = 2,967 - 0,00199\theta^2 + 0,0812\theta - 2,996\exp\left(\frac{0,0231h}{D}\right) \quad (3.11)$$

где u_x - осевая скорость газового потока в пристеночной области;

u_{x0} - начальное значение осевой скорости газового потока на входе в сепарационную камеру.

Аналогичная регрессионная зависимость, характеризующая затухание локального параметра интенсивности закрутки потока в пристеночной зоне обратно конической сепарационной камеры, имеет вид:

$$\frac{tg\alpha}{tg\alpha_0} = 2,155 - 0,0029\theta^2 + 0,0776\theta - 1,699\exp\left(\frac{0,01557h}{D}\right) \quad (3.12)$$

где $tg\alpha$ - локальный параметр интенсивности закрутки потока в пристеночной области;

$tg\alpha_0$ - локальный параметр интенсивности закрутки потока на входе в сепарационную камеру.

Дисперсия аппроксимации значений, полученных на основе экспериментальных данных составляет $R^2 = 0,901 \dots 0,934$, что свидетельствует о адекватности гипотезы об автомодельности кинематической структуры течения в пристеночной зоне по отношению к параметру конусности сепарационной камеры и начальному значению интенсивности закрутки потока во всем диапазоне рассмотренных значений критерия Рейнольдса. Данный вывод позволяет использовать полученные безразмерные регрессионные зависимости при составлении расчетной модели движения пылевой частицы в обратной конической сепарационной камере пылеуловителей на встречных закрученных потоках.

3.2 Методика расчета эффективности улавливания пылевых частиц пылеуловителем ВЗП с обратной конической формой сепарационной камеры

Как отмечено в предыдущем параграфе, наибольший интерес с точки зрения определения эффективности улавливания, представляет движение пылевой частицы в пристеночной зоне сепарационной камеры. Очевидно, что данное утверждение справедливо и для пылеуловителей с обратной конической формой сепарационной камеры. Траектория движения пылевой частицы в рассматриваемом случае также представляет собой осесимметричную спираль увеличивающегося радиуса и шага [102]. Поэтому, наиболее удобным для описания движения частицы представляется использование цилиндрической системы координат.

Исходя из анализа сил, оказывающих значимое воздействие на движение пылевой частицы, проведенного в предыдущем параграфе, при составлении расчетной модели учитываются следующие силы - центробежная сила, Кориолисова сила, сила тяжести и сила обтекания частицы газовым потоком (Стоксова сила).

Исходя из представленной схемы, составлены проекции сил, оказывающих значимое влияние на движение частицы на оси принятой цилиндрической системы координат.

В радиальном направлении на частицу оказывают воздействие центробежная сила $F_{ц}$, и радиальная проекция силы сопротивления обтеканию газовым потоком F_{μ} . Для определения последней использована гипотеза об отсутствии радиальной составляющей скорости газового потока в пристенной зоне слабо и умеренно закрученного течения [102]. Таким образом, радиальная проекция скорости обтекания частицы газовым потоком равна радиальной составляющей скорости частицы. Проецируя на радиальную ось, имеем:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 r + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 * \frac{p \lambda_{\text{ч}} \pi d_{\text{ч}}^2}{8} \quad (3.13)$$

Проекция сил на подвижную касательную ось τ складывается из проекции силы сопротивления обтеканию потоком F_μ и Кориолисовой силы F_k . Кориолисова сила действует в плоскости вращения (в горизонтальной плоскости) и направлена против движения частицы (рисунок 3.9). Проецируя на подвижную касательную ось τ , имеем:

$$m \frac{d^2 \tau}{dt^2} = (F_\mu - F_{\text{Кор}}) = \left(\frac{d\tau}{dt} - U_\tau \right)^2 * \frac{p \lambda_q \pi d_q^2}{8} - 2m \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.14)$$

Заменяя угловую скорость линейной на подвижной оси получаем:

$$m \frac{d^2 \tau}{dt^2} = \left(\frac{d\tau}{dt} - U_\tau \right)^2 * \frac{p \lambda_q \pi d_q^2}{8} - m \frac{2}{r} \frac{dr}{dt} \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.15)$$

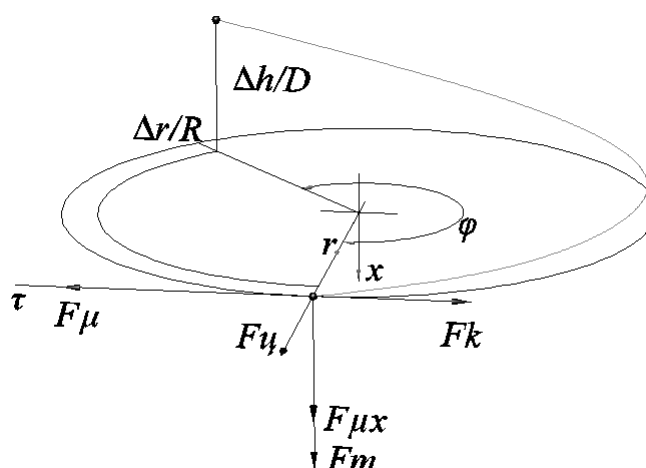


Рисунок 3.9 - Расчетная схема к определению траектории пылевой частицы в сепарационной камере пылеуловителя.

r – радиальная ось; x – продольная (вертикальная) ось; φ – угловая координата; τ – подвижная тангенциальная ось; h/D – осевая координата;
 r/R – радиальная координата.

F_μ – сила сопротивления обтеканию частицы газовым потоком;

F_μ – центробежная сила; F_m – сила тяжести; F_k – Кориолисова сила

Проекция сил на вертикальную (продольную) ось складывается из силы тяжести F_m и вертикальной проекции силы сопротивления обтеканию частицы газовым потоком F_μ :

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = (F_\mu + P) = \left(\frac{dy}{dt} - U_x \right)^2 * \frac{p \lambda_{xq} \pi d_q^2}{8} - mg \quad (3.16)$$

Для упрощения полученных уравнений, характеризующих проекции сил на продольную и подвижную касательную оси, принимается допущение о совпадении окружной и продольной составляющих скорости соответствующим проекциям скорости газового потока. Данное допущение основано на результатах визуального наблюдения за движением пылевых частиц в прозрачных аспирационных воздуховодах и сепарационных камерах инерционных пылеуловителей. Данные этих наблюдений позволяют утверждать, что частицы крупностью до 180 мкм в пристеночной области практически движутся по траектории движения закрученного газового потока в виду незначительностью масс и сил инерции в сравнении с аэродинамическими силами [21, 29, 34, 43, 62, 65, 90].

Таким образом, (3.14) и (3.15) принимают вид:

$$m \frac{d^2 \tau}{dt^2} = U_\tau^2 * \frac{p \lambda_q \pi d_q^2}{8} - 2m \frac{dr}{dt} \frac{U_\tau}{R} \quad (3.17)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = U_x^2 * \frac{p \lambda_q \pi d_q^2}{8} - 2m \frac{dr}{dt} \frac{U_\tau}{R} \quad (3.18)$$

где R – радиус сепарационной камеры.

Ввиду того, что сепарационная камера имеет коническую форму, значение радиуса R определяется как:

$$R = R_0 + \theta \frac{h}{D} \quad (3.19)$$

где $R_0 = \frac{D}{2}$

Следовательно, если воспользоваться допущением о том, что сила тяжести и сила Кориолиса не оказывают значимого влияния на движение частицы, то система принимает вид:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 r + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 * \frac{p\lambda_q \pi d_q^2}{8} \quad (3.20)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{U_\tau}{R_0 + \theta \frac{h}{D}}; \quad \frac{dx}{dt} = U_x$$

Для осуществления практических вычислений необходимо располагать значениями тангенциальных и осевых (вертикальных) составляющих скорости газового потока в пристеночной зоне по всей высоте сепарационной камеры. Для определения искомых значений необходимо воспользоваться эмпирическими безразмерными зависимостями (3.10) и (3.11). Ввиду того, что значение параметра конусности сепарационной камеры θ является конструктивным параметром, и, как следствие, константой, не меняющей значение на всем протяжении расчета, зависимости (3.10) и (3.11), можно упрощенно представить в виде:

$$\frac{U_\tau}{U_{\tau 0}} = B_1 - 3,338 \exp\left(\frac{0,0104h}{D}\right) \quad (3.21)$$

$$\frac{U_x}{U_{x0}} = B_2 - 2,996 \exp\left(\frac{0,0231h}{D}\right) \quad (3.22)$$

$$\text{где } B_1 = 3,835 - 0,00278\theta^2 + 0,0752\theta$$

$$B_2 = 2,967 - 0,00199\theta^2 + 0,0812\theta$$

Таким образом, тангенциальные и осевые составляющие скорости газового потока в пристеночной зоне сепарационной камеры могут быть представлены как:

$$U_\tau = U_{\tau 0} \left(B_1 - 3,338 \exp\left(\frac{0,0104h}{D}\right) \right) \quad (3.23)$$

$$U_x = U_{x0} \left(B_2 - 2,996 \exp\left(\frac{0,0231h}{D}\right) \right) \quad (3.24)$$

Подставляя (3.23) и (3.24) в (3.20), получаем:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = mr \left(\frac{U_{\tau 0} \left(B_1 - 3,338 \exp\left(\frac{0,0104h}{D}\right) \right)}{R_0 + \theta \frac{h}{D}} \right)^2 + \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 * \frac{p\lambda_q \pi d_q^2}{8} \quad (3.25)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{U_{\tau 0} \left(B_1 - 3,338 \exp\left(\frac{0,0104h}{D}\right) \right)}{R_0 + \theta \frac{h}{D}}; \quad \frac{dx}{dt} = U_{x0} \left(B_2 - 2,996 \exp\left(\frac{0,0231h}{D}\right) \right)$$

Для получения частных решений полученной системы приняты следующие начальные условия:

- за начало отсчета принимается точка, расположенная на нижней границе тангенциального ввода, наиболее близкая к центру поперечного сечения цилиндрической камеры тангенциального закручивателя $x = 0$, $r = 0,6R$ (ширина тангенциального патрубка принята равной $0,4R$);

- тангенциальная составляющая скорости частицы $\frac{d\tau}{dt} = U_{\tau 0}$, а начальное значение угловой скорости соответственно $\frac{d\varphi}{dt} = \frac{U_{\tau 0}}{R_0}$;

- значение вертикальной (продольной) составляющей скорости частицы на входе в сепарационную камеру, согласно допущениям, принятым при составлении уравнений, равна начальному значению вертикальной составляющей скорости газового потока $\frac{dx_0}{dt} = U_{x0}$;

- радиальная составляющая скорости частицы во входном сечении сепарационной камеры исходя из тех же допущений равна таковой составляющей скорости воздушного потока т.е. $\frac{dr_0}{dt} = 0$.

3.3 Исследование процесса улавливания пылевых частиц на расчетной модели пылеуловителя ВЗП с обратной конической сепарационной камерой

Для определения влияния, оказываемого параметром конусности сепарационной камеры на эффективность улавливания пылеуловителя на встречных закрученных потоках, проведены численные эксперименты на системе уравнений (3.25), характеризующих движение пылевой частицы в пристеночной зоне сепарационной камеры. Частные решения системы уравнений, предложенных для описания движения пылевой частицы, получены при помощи приложения Mathcad [32].

Целью численного интегрирования являлось определение траектории движения частицы в сепарационной камере пылеуловителя. Поскольку траектория имеет вид осесимметричной спирали, достаточным условием, позволяющим сделать вывод о сепарации пылевидной частицы, является значение радиальной координаты, равное радиусу сепарационной камеры на данной осевой координате $r = R_0 + \theta h/D$. При этом значение угловой координаты φ , на которой достигнуто соприкосновение со стенкой, не имеет практического значения.

Модель пылеуловителя ВЗП по заданным для расчета конструктивным характеристикам повторяет лабораторную установку. Диаметр цилиндрической камеры первичного тангенциального ввода составляет $D = 200$ мм, конусность сепарационной камеры изменяется в пределах $\theta = 0,10-0,20$, параметр интенсивности закрутки потока, создаваемого верхним тангенциальным вводом, изменяется в диапазоне $\Phi^*_{\theta} = 4-5$. Расход газа, подаваемого на очистку, принят соответствующим оптимальному значению критерия Рейнольдса для пылеуловителей на встречных закрученных потоках $Re = 50000$ [5, 9, 10, 12, 14, 31, 34, 42-44, 50, 60, 65, 80, 90, 91, 93, 95, 96]. Начальные значения тангенциальной и осевой скоростей газового потока на входе в пристеночную зону сепарационной камеры определяются, исходя из заданных значений расхода газа, подаваемого на очистку, и начальной интенсивности закрутки потока, создаваемой первичным тангенциальным вводом пылеуловителя.

При проведении расчетов переменными являются эквивалентный диаметр пылевой частицы $d_{\text{ч}}$, конусность сепарационной камеры пылеуловителя θ и начальная интенсивность закрутки потока tga/tga_0 (вычисляется, исходя из заданного значения формпараметра закрутки первичного тангенциального ввода Φ^*_{θ}). Физические свойства пылевых частиц (плотность $\rho_{\text{ч}}$, и коэффициент аэродинамического сопротивления $\lambda_{\text{ч}}$) приняты равными таковым для пылевых частиц исследуемых материалов.

Порядок проведения вычислительного эксперимента следующий:

1. После ввода начальных условий в качестве аргументов задаются начальное значение параметра конусности сепарационной камеры θ начальный параметр

интенсивности закрутки Φ^*_0 , безразмерное значение вертикальной координаты h/D и размер частицы d_{ψ} . В качестве отклика получается значение относительной радиальной координаты r/R .

2. При прочих заданных параметрах значение h/D увеличивается синтервалом 0,4 до тех пор, пока значение относительной радиальной координаты не будет удовлетворять условию $\frac{r}{R_0 + \frac{\theta h}{D}} \geq 1$. Если относительная вертикальная координата достигает значения $h/D = 4$, а условие $\frac{r}{R_0 + \frac{\theta h}{D}} \geq 1$ не выполняется, то делается вывод, что частица данного размера не сепарируется при текущих условиях.

3. Расчет повторяется при увеличенных значениях Φ^*_0 или d_{ψ} .

В таблице 3.1. представлены результаты расчета сепарирования пыли древесины пальмы в виде зависимости вертикальной координаты, на которой происходит соприкосновение частиц заданного эквивалентного диаметра с поверхностью обратной конической сепарационной камеры.

Таблица 3.1. – Результаты вычислительного эксперимента

№	Размер частицы d_{ψ} , мкм	Начальный параметр интенсивности закрутки потока Φ^*_0	Параметр конусности сепарационной камеры θ , %	Вертикальная координата h/D
1	2	3	4	5
1	30	4	10	5,272
2	30	4	15	5,337
3	30	4	20	6,036
4	30	4,5	10	4,841
5	30	4,5	15	4,906
6	30	4,5	20	5,605
7	30	5	10	4,431
8	30	5	15	4,496
9	30	5	20	5,196
10	50	4	10	3,675
11	50	4	15	3,740
12	50	4	20	4,439
13	50	4,5	10	3,244
14	50	4,5	15	3,309
15	50	4,5	20	4,008

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4	5
16	50	5	10	2,834
17	50	5	15,03	2,902
18	50	5	20	3,599
19	250	4	10	1,738
20	250	4	15	1,804
21	250	4	20	2,503
22	250	4,5	9,97	1,309
23	250	4,5	15	1,373
24	250	4,5	20	2,072
25	250	5	10	0,898
26	250	5	15	0,963
27	250	5	20	1,662

В графическом виде результаты расчета представлены на рисунке 3.10.

Диаметры частиц, для которых приведены результаты расчета, подобраны исходя из максимальной наглядности. Эквивалентный диаметр 30 мкм. характеризует наименьшую крупность древесных пылевых частиц, улавливаемых при заданных условиях. Практические исследования сепарации древесных пылевых частиц показывают, что данный размер является практической границей инерционной сепарации, ввиду соотношения аэродинамических и весовых характеристик мелких фракций. Максимальный диаметр, принятый при расчетах $d_{\text{ч}} = 250$ мкм, представляет верхнюю границу при которой рационально производить расчет, ввиду достаточно раннего достижения частицами стенок сепарационной камеры. Промежуточные значения исключены, ввиду сложностей, связанных с восприятием графических зависимостей при их наложениях и пересечениях.

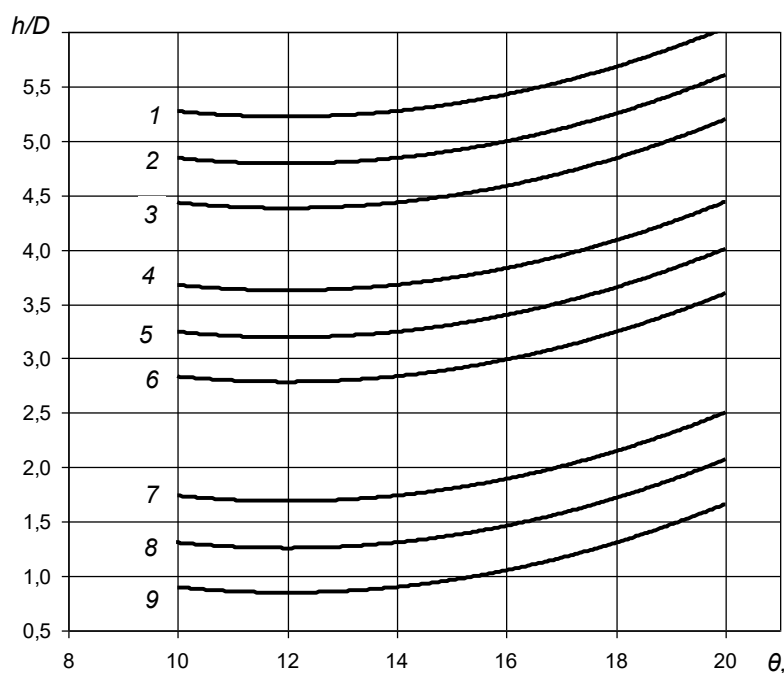


Рисунок 3.10 - Зависимость вертикальной координаты сепарирования пылевой частицы от конусности сепарационной камеры

1 – $d_q = 30$ мкм., $\Phi^*_0 = 4$; 2 – $d_q = 30$ мкм., $\Phi^*_0 = 4,5$; 3 – $d_q = 30$ мкм., $\Phi^*_0 = 5$;
 4 – $d_q = 80$ мкм., $\Phi^*_0 = 4$; 5 – $d_q = 80$ мкм., $\Phi^*_0 = 4,5$; 6 – $d_q = 80$ мкм., $\Phi^*_0 = 5$;
 7 – $d_q = 150$ мкм., $\Phi^*_0 = 4$; 8 – $d_q = 150$ мкм., $\Phi^*_0 = 4,5$; 9 – $d_q = 150$ мкм., $\Phi^*_0 = 5$

Анализ результатов, полученных в ходе вычислительного эксперимента, показывает, что максимальная эффективность улавливания пылевых частиц наблюдается в диапазоне параметра конусности сепарационной камеры $\theta = 0,10-0,14$ при всех сочетаниях экспериментальных факторов. Данный вывод сделан, исходя из наименьших расчетных значений осевой координаты, при которых происходит прикосновение частицы и поверхности сепарационной камеры, что свидетельствует о максимальных значениях радиальной составляющей результирующей сил, действующих на частицу, и, как следствие, о наиболее благоприятных условиях сепарации.

Также в ходе анализа полученных результатов установлено, что эффективность сепарации возрастает с увеличением параметра начальной интенсивности закрутки потока во всем диапазоне его изменения. Это

объясняется увеличением тангенциальной скорости потока, и как следствие возрастание центростремительного ускорения пылевой частицы.

Следует отметить, что предложенная расчетная модель не учитывает возрастание турбулентных пульсаций, ухудшающих условия сепарации [102], которым неизбежно сопровождается повышение скорости в пристеночной области течения. Кроме того, увеличение интенсивности закрутки потока, создаваемого первичным тангенциальным вводом, может привести к увеличению аэродинамического сопротивления пылеуловителя до значений, делающих его эксплуатацию экономически нецелесообразной.

Вышеперечисленные факты в совокупности с наличием допущений, принятых на стадии разработки модели движения частицы, не позволяют однозначно руководствоваться результатами вычислений при подборе оптимальных конструктивных характеристик пылеуловителей на встречных закрученных потоках с обратной конической формой сепарационной камеры. Для проверки адекватности предложенной расчетной модели необходимо провести сравнения данных, полученных расчетным путем, с экспериментальными значениями.

3.4 Выводы по главе 3

1. С целью определения параметров пристеночного течения в пылеуловителях ВЗП с обратной конической формой сепарационной камеры проведены экспериментальные исследования, в ходе которых измерены абсолютные величины и направления вектора скорости газового потока в пристеночной зоне.

2. В результате аппроксимации полученных данных полиномиально-экспоненциальными зависимостями получены безразмерные уравнения регрессии, характеризующие изменения тангенциальной и осевой (вертикальной) составляющих вектора скорости газового потока в пристеночной зоне сепарационной камеры.

3. Во всем диапазоне изменения экспериментальных факторов наблюдается автомодельность кинематической структуры течения относительно значений

параметра конусности сепарационной камеры и параметра начальной интенсивности закрутки потока на входе в сепарационную камеру.

4. Полученные эмпирические зависимости использованы при построении расчетной модели, предназначенной для оценки влияния параметра конусности сепарационной камеры пылеуловителя на встречных закрученных потоках на эффективность обеспыливания выбросов.

5. На разработанной расчетной модели проведен вычислительный эксперимент по определению эффективности улавливания пылевых частиц при различных значениях конусности сепарационной камеры и интенсивности начальной закрутки.

6. В результате обработки данных вычислительного эксперимента установлено, что наименьший проскок пыли наблюдается в диапазоне параметра конусности сепарационной камеры $\theta = 0,10-0,14$ при всех сочетаниях экспериментальных факторов.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ ОТ АБРАЗИВНОЙ ПЫЛИ АППАРАТА ВЗП С ОБРАТНЫМ КОНУСОМ

4.1 Экспериментальная установка и методология исследований

Экспериментальные исследования по оценке эффективности применения в системах местной вытяжной вентиляции аппарата ВЗП с обратным конусом для улавливания абразивной пыли проводились в лаборатории кафедры «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве» ВолгГАСУ (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1-Экспериментальное исследование на лабораторной установке

Для проведения экспериментальных исследований процесса очистки выбросов от абразивной пыли в пылеуловителе со встречными закрученными потоками с сепарационной камерой, выполненной в виде обратного конуса, была использована экспериментальная установка.

Описываемая установка представляет собой систему аспирации, в которой основным элементом является аппарат ВЗП с обратным конусом (рисунок 4.2).

Для изменения конструктивных параметров пылеуловителя основные элементы конструкции выполнены сменными. Для изменения параметра конусности сепарационной камеры Θ и параметра закрутки потока Φ_0^* , создаваемого первичным вводом пылеуловителя ВЗП, корпус пылеуловителя выполнен разборным, и состоящим из двух основных монтажных единиц. Первичный ввод пылеуловителя, представляющий собой тангенциальный закручиватель с постоянным диаметром цилиндрической части $D = 200$ мм, с помощью фланцевого соединения стыкуется с конической частью сепарационной камеры. Закручиватель вторичного потока находится внутри сепарационной камеры по аналогии с пылеуловителями серии ВИП [5, 9, 14].

Таким образом, наличие трех сменных первичных вводов пылегазового потока и трех сменных сепарационных камер позволяет реализовать различные сочетания основных конструктивных параметров, оказывающих влияние на процесс пылеулавливания в пылеуловителе со встречными закрученными потоками.

В установке использован вентилятор ВР 300-45-2,5, установленный после пылеуловителя, который по аналогии с системами местной вытяжной вентиляции, предназначенных для локализации, удаления и очистки абразивной пыли, находится под разрежением. Для измерения давления газового потока и концентрации пыли в воздуховодах предусмотрены штуцеры, снабженные герметично завинчивающимися крышками. Для обеспечения возможности корректного замера величин давлений в замерных сечениях установка снабжена лопастными успокоителями потока.

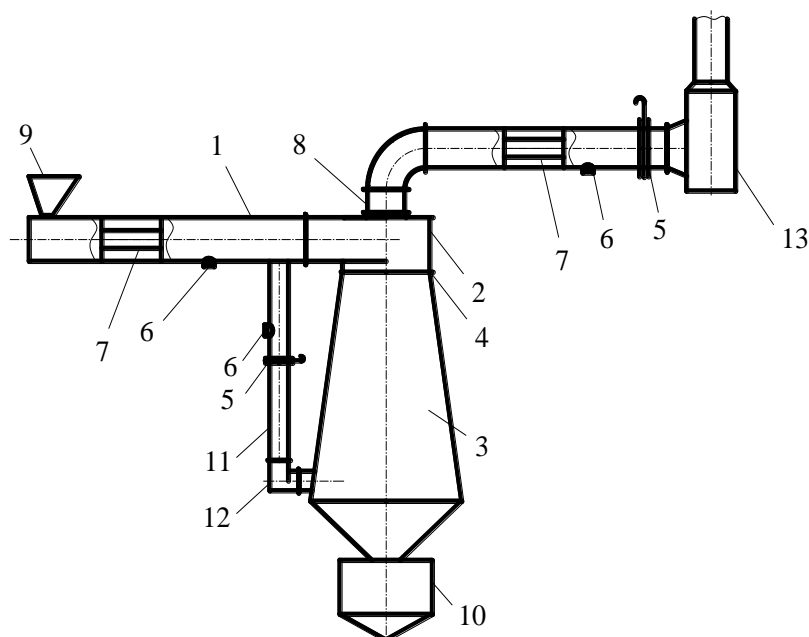


Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки

1 – входной воздуховод; 2 - сменный верхний тангенциальный ввод;
 3 – пылеуловитель ВЗП; 4 – фланцевое соединение; 5 – регулирующий шибер;
 6 – замерный штуцер; 7 – лопастной успокоитель потока; 8 – патрубок
 очищенного газа; 9 – узел приготовления пылевоздушной смеси; 10 – бункер
 уловленной пыли; 11 – вторичный ввод потока; 12 - тангенциальный
 закручиватель вторичного ввода; 13 – вентилятор ВР 300-45-2,5

Регулирование аэродинамического режима работы установки, в том числе доли расхода, подаваемого на нижний ввод аппарата, осуществляется при помощи шиберов. Для регулирования общего расхода использовался шибер, расположенный перед вентилятором. Для создания пылевоздушной смеси используется смесительное устройство, создающее двухфазный пылегазовый поток с равномерно распределенной концентрацией пылевых частиц за счет комбинированного аэродинамического и механического воздействий. Применение смесительного устройства позволяет подавать во входное сечение экспериментальной установки пылевоздушный поток с параметрами, аналогичными действующим системам местной вытяжной вентиляции.

Схема определения конструктивных параметров верхнего ввода пылеуловителя показана на рисунке 4.3.

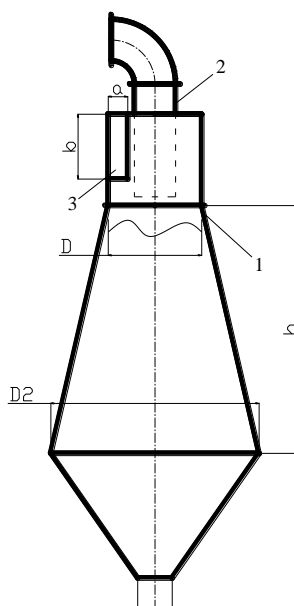


Рисунок 4.3 - Схема определения основных конструктивных размеров верхнего ввода пылеуловителя в экспериментальной установке

1 – сепарационная камера; 2 – патрубок очищенного газа;
3 – тангенциальный ввод.

a – ширина сечения тангенциального ввода; b – высота сечения тангенциального ввода; D – диаметр камеры первичного тангенциального ввода потока пылеуловителя; D_2 – диаметроснования обратной конической сепарационной камеры; h – высота обратной конической сепарационной камеры

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с принятыми стандартными методиками [35-38, 51, 63]. По величинам давлений в замерных сечениях установки, измеряемых с помощью цифрового дифференциального манометра *testo* 512 в сочетании с пневмометрической трубкой, определяются значения: общего расхода пылегазовой смеси, подаваемой на очистку; соотношения расходов пылегазовой смеси в верхних и нижних вводах пылеуловителя; аэродинамического сопротивления.

Эффективность очистки пылегазовой смеси определялась на основе сопоставления поступающей и выходящей массы пыли, определяемых путем отбора проб и измерений в замерных сечениях воздухопроводов, и контролируемых по весу пыли в пылесборнике. Измерения значений запыленности газового потока

в замерных сечениях производились с помощью комплекта пылеотборного оборудования конструкции НИИОГАЗ. Отбор проб осуществлялся одновременно во всех замерных сечениях, чем обеспечивалась идентичность отбора проб в каждом из сечений режиму работы системы и поступления пыли.

Исследование эффективности улавливания проводилось с предварительно высушенным кварцевым песком с плотностью $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$, фракционный состав которого характеризуется следующим образом: содержание частиц с размерами 0,3-1 мкм составляет 20%, с размерами 1-5 мкм - 20%, с размерами 5-10 мкм - 40%, с размерами более 10 мкм - 20%.

На основе результатов проведенного анализа процесса пылеулавливания в аппарате ВЗП с обратным конусом в качестве изменяющихся регулируемых переменных [22, 31] были выбраны:

- Θ - параметр конусности сепарационной камеры;
- Φ_z^* - формпараметр закрутки, создаваемой сменным верхним тангенциальным вводом;
- Re_{cp} - число Рейнольдса, вычисленное по значению средней скорости пылегазового потока в сечении цилиндрической камеры первичного тангенциального ввода потока;
- $\bar{L}_n = L_n / L_{общ}$ - отношение расхода пылегазовой смеси, поступающего в нижний (вторичный) ввод к общему расходу, подаваемому на очистку.

Параметр конусности сепарационной камеры в виде обратного конуса Θ определяется как тангенс угла наклона образующей поверхности сепарационной камеры к ее продольной (вертикальной) оси:

$$\Theta = \frac{D_2 - D}{2h} \quad (4.1)$$

Формпараметр закрутки потока определяется по зависимости (3.9). Число Рейнольдса, характеризующее расход пылегазовой смеси, подаваемой на очистку в пылеуловитель, определяется по выражению:

$$Re_{cp} = \frac{Dv_{cp}}{\nu} \quad (4.2)$$

где v_{cp} - средняя скорость потока в сечении цилиндрической камеры
первичного тангенциального ввода потока пылеуловителя, м/с;

ν - кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

$$v_{cp} = \frac{L_{общ}}{3600 \frac{\pi D^2}{4}} \quad (4.3)$$

В соответствии с [22, 31] определяющие факторы приведены к виду:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{\Theta - \Theta_0}{\Delta\Theta}; & X_3 &= \frac{Re_{cp} - Re_{cp0}}{\Delta Re_{cp}}; \\ X_2 &= \frac{\Phi_{\Gamma}^* - \Phi_{\Gamma_0}^*}{\Delta\Phi_{\Gamma}^*}; & X_4 &= \frac{\bar{L}_H - \bar{L}_{H_0}}{\Delta\bar{L}_H}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

Исходные данные для планирования эксперимента приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Исходные данные для планирования эксперимента

Условия опыта	Обозначения	Факторы			
		X_1	X_2	X_3	X_4
Нулевой уровень	X_{i_0}	0,17	4,5	50000	0,3
Интервал варьирования	ΔX_i	0,05	0,5	10000	0,1
Верхний уровень $X_{i_{\delta}} = +1$	$X_{i_{0\delta}}$	0,22	5,0	60000	0,4
Нижний уровень $X_{i_n} = -1$	X_{i_n}	0,12	4,0	40000	0,2

План эксперимента – матрица планирования, соответствующая центральному композиционному рототабельному плану, имеет в основе план полного факторного эксперимента 2^4 (ядро матрицы планирования). и дополняется определенными точками факторного пространства – звездными точками и опытами в центре плана. Для рассматриваемого случая $n = 4$ звездное плечо равно $\alpha = \pm 2,000$, количество опытов ядра матрицы $2^4 = 16$, число звездных точек $N_{\alpha} = 8$, число нулевых точек $N_0 = 7$. Следовательно, матрица рототабельного плана второго порядка состоит из 31 опыта (таблица 4.2) [31].

Таблица 4.2 - План эксперимента

Номер опыта	X_0	Факторы				Парные	
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3
1	2	3	4	5	6	7	8
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1
10	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
14	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1
15	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
17	+1	+2,0	0	0	0	0	0
18	+1	-2,0	0	0	0	0	0
19	+1	0	+2,0	0	0	0	0
20	+1	0	-2,0	0	0	0	0
21	+1	0	0	+2,0	0	0	0
22	+1	0	0	-2,0	0	0	0
23	+1	0	0	0	+2,0	0	0
24	+1	0	0	0	-2,0	0	0
25	+1	0	0	0	0	0	0
26	+1	0	0	0	0	0	0
27	+1	0	0	0	0	0	0
28	+1	0	0	0	0	0	0
29	+1	0	0	0	0	0	0
30	+1	0	0	0	0	0	0
31	+1	0	0	0	0	0	0

Продолжение таблицы 4.2

взаимодействия				Квадратичные члены			
X_1X_4	X_2X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_1X_4	X_2X_3
9	10	9	10	9	10	9	10
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1

Окончание таблицы 4.2

-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1
+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
0	0	0	0	4,0	0	0	0
0	0	0	0	4,0	0	0	0
0	0	0	0	0	4,0	0	0
0	0	0	0	0	4,0	0	0
0	0	0	0	0	0	4,0	0
0	0	0	0	0	0	4,0	0
0	0	0	0	0	0	0	4,0
0	0	0	0	0	0	0	4,0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

В качестве функций отклика при проведении экспериментальных исследований приняты величина проскока пыли и аэродинамическое сопротивление пылеуловителя со встречными закрученными потоками с обратным конусом:

$$\zeta = 2 \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}}{\rho v_{cp}^2} \quad (4.5)$$

где $P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}$ - полное давление на входе и на выходе из пылеуловителя соответственно, Па.

Общий вид уравнений регрессии [22, 31]:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_3 + b_{13}X_1X_3 + \\ + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + \\ + b_{33}X_3^2 + b_{44}X_4^2 \quad (4.6)$$

Обработка экспериментальных данных проведена с помощью пакета программ статистического анализа «STATISTICA 6» [32]. Значимость вычисленных коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента [22, 31]. Для оценки адекватности полученных регрессионных зависимостей использован критерий Фишера с учетом выполнения условия, что расчетное значение F_p меньше табличного F_m [22, 31]. Оценка воспроизводимости полученных результатов проводилась с помощью критерия Кохрена [22, 31].

4.2 Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований по оценке проскока пыли приведены в таблице 4.3 и на рисунке 4.4-4.21.

Таблица 4.3 - Экспериментальные значения величины проскока пыли

Определяющие факторы				ε
Θ	Φ_{Γ}^*	Re_{cp}	\bar{L}_H	
1	2	3	4	5
0,12	4,0	40000	0,2	0,1405
			0,3	0,1252
			0,4	0,1321
0,17	4,0	40000	0,2	0,148
			0,3	0,1276
			0,4	0,1302
0,22	4,0	40000	0,2	0,1982
			0,3	0,1784
			0,4	0,1871
0,12	4,5	40000	0,2	0,132
			0,3	0,1009
			0,4	0,1222
0,17	4,5	40000	0,2	0,1376
			0,3	0,116
			0,4	0,125

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5
0,22	4,5	40000	0,2	0,1825
			0,3	0,164
			0,4	0,174
0,12	5,0	40000	0,2	0,111
			0,3	0,091
			0,4	0,0998
0,17	5,0	40000	0,2	0,114
			0,3	0,0905
			0,4	0,104
0,22	5,0	40000	0,2	0,1638
			0,3	0,140
			0,4	0,155
0,12	4,0	50000	0,2	0,099
			0,3	0,0756
			0,4	0,102
0,17	4,0	50000	0,2	0,106
			0,3	0,0,84
			0,4	0,0972
0,22	4,0	50000	0,2	0,155
			0,3	0,1342
			0,4	0,133
0,12	4,5	50000	0,2	0,083
			0,3	0,063
			0,4	0,0791
0,17	4,5	50000	0,2	0,087
			0,3	0,0703
			0,4	0,084
0,22	4,5	50000	0,2	0,1401
			0,3	0,12
			0,4	0,133
0,12	5,0	50000	0,2	0,061
			0,3	0,043
			0,4	0,0562
0,17	5,0	50000	0,2	0,065
			0,3	0,061
			0,4	0,0695
0,22	5,0	50000	0,2	0,1302
			0,3	0,096
			0,4	0,12

Окончание таблицы 4.3

1	2	3	4	5
0,12	4,0	60000	0,2	0,0705
			0,3	0,0506
			0,4	0,0631
0,17	4,0	60000	0,2	0,076
			0,3	0,055
			0,4	0,0645
0,22	4,0	60000	0,2	0,127
			0,3	0,1055
			0,4	0,117
0,12	4,5	60000	0,2	0,0565
			0,3	0,038
			0,4	0,0475
0,17	4,5	60000	0,2	0,063
			0,3	0,0415
			0,4	0,0545
0,22	4,5	60000	0,2	0,117
			0,3	0,0905
			0,4	0,104
0,12	5,0	60000	0,2	0,036
			0,3	0,0155
			0,4	0,0256
0,17	5,0	60000	0,2	0,0405
			0,3	0,02
			0,4	0,032
0,22	5,0	60000	0,2	0,1065
			0,3	0,071
			0,4	0,082

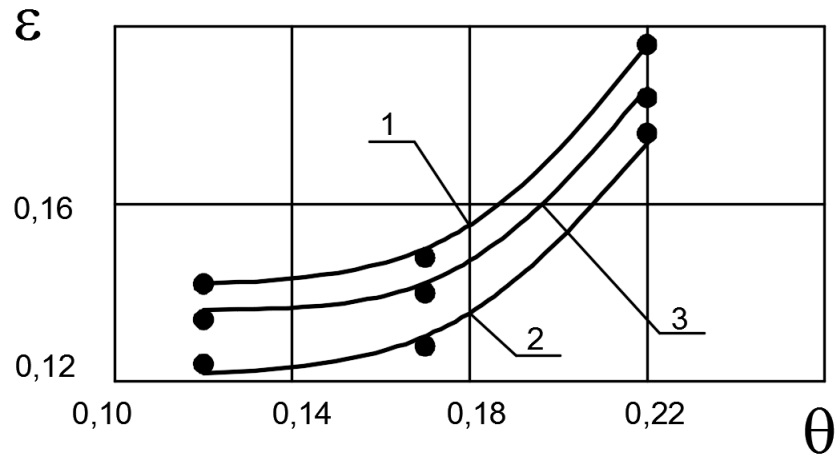


Рисунок 4.4 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 4,0$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

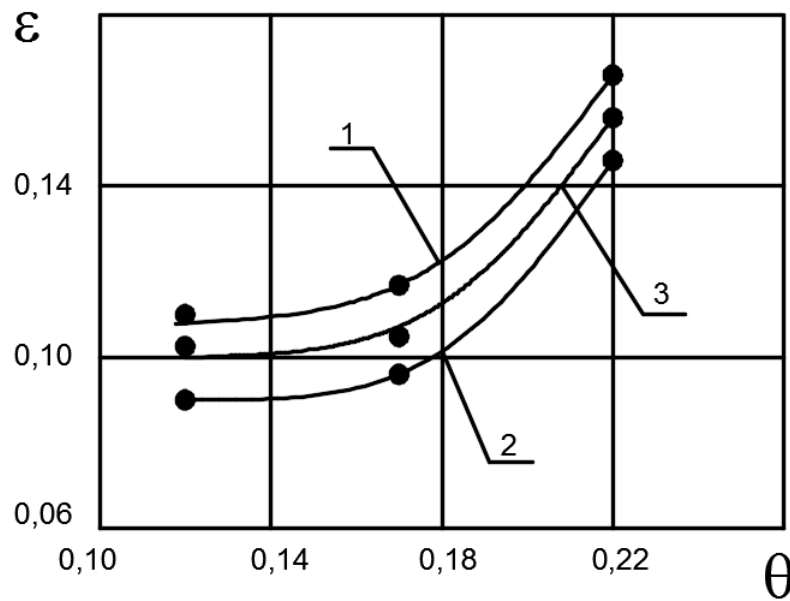


Рисунок 4.5 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 4,5$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

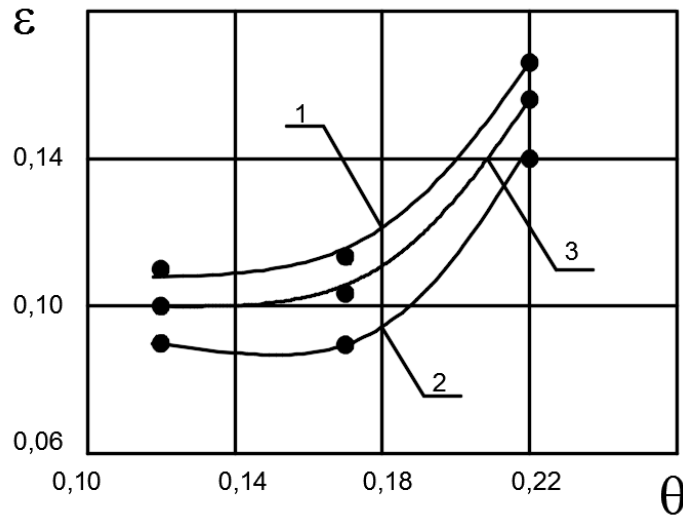


Рисунок 4.6 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_r^* = 5,0$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\bar{L}_n = 0,2$; 2 - $\bar{L}_n = 0,3$; 3 - $\bar{L}_n = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

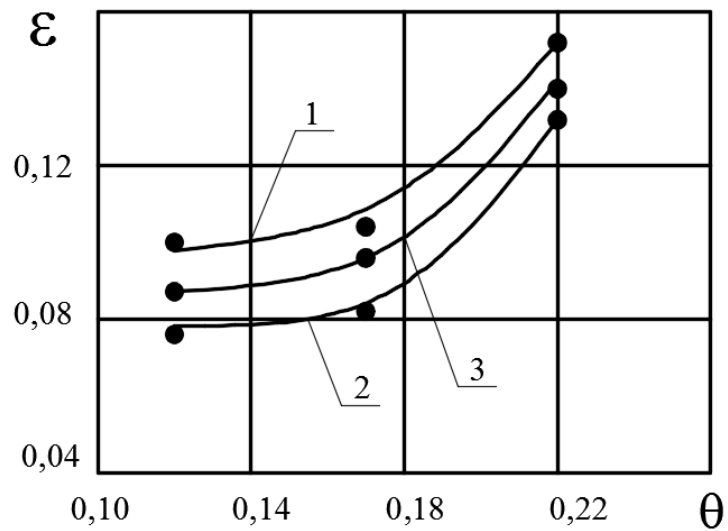


Рисунок 4.7 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_r^* = 4,0$ и $Re_{cp} = 50000$;

1 - $\bar{L}_n = 0,2$; 2 - $\bar{L}_n = 0,3$; 3 - $\bar{L}_n = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

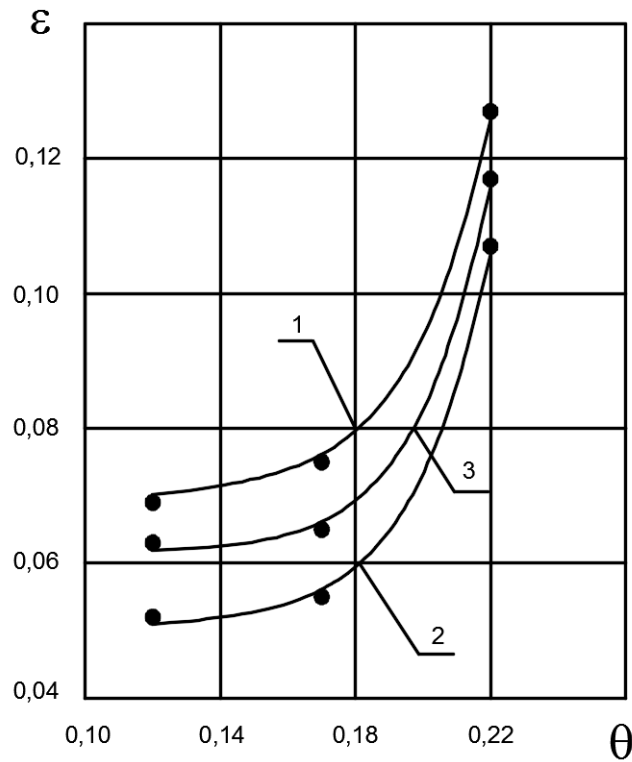


Рисунок 4.8 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 4,5$ и $Re_{cp} = 50000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

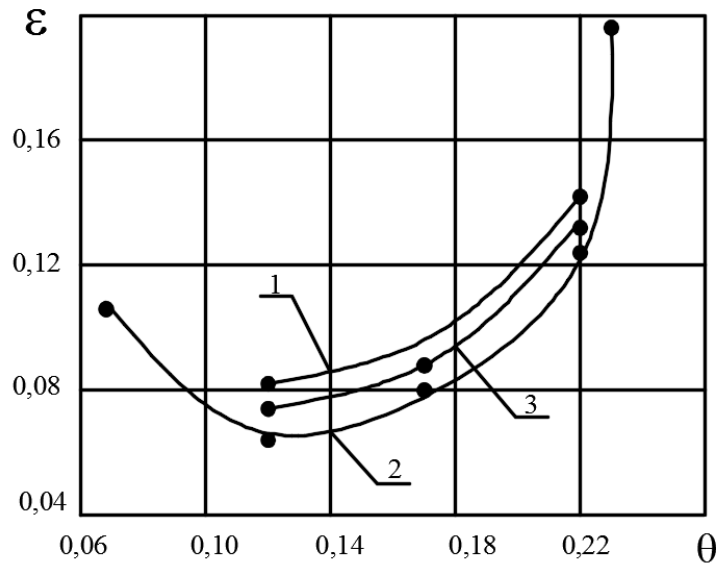


Рисунок 4.9 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 5,0$ и $Re_{cp} = 50000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

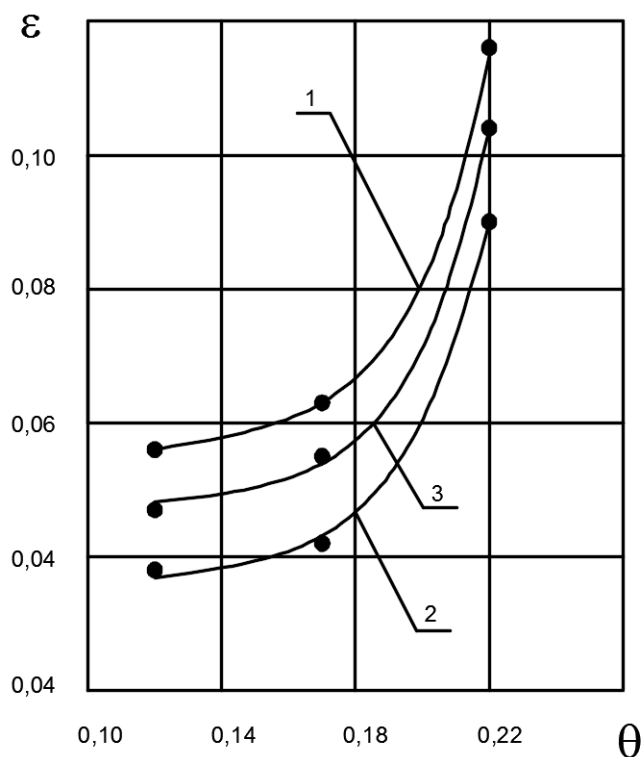


Рисунок 4.10 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_r^* = 4,0$ и $Re_{cp} = 60000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

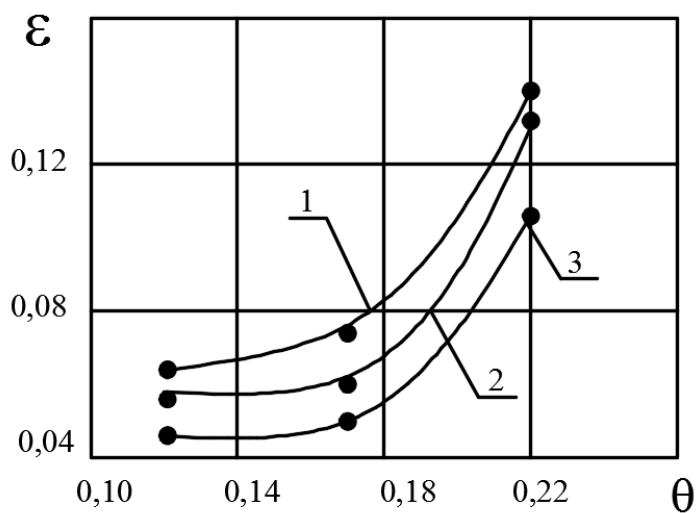


Рисунок 4.11 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_r^* = 4,5$ и $Re_{cp} = 60000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

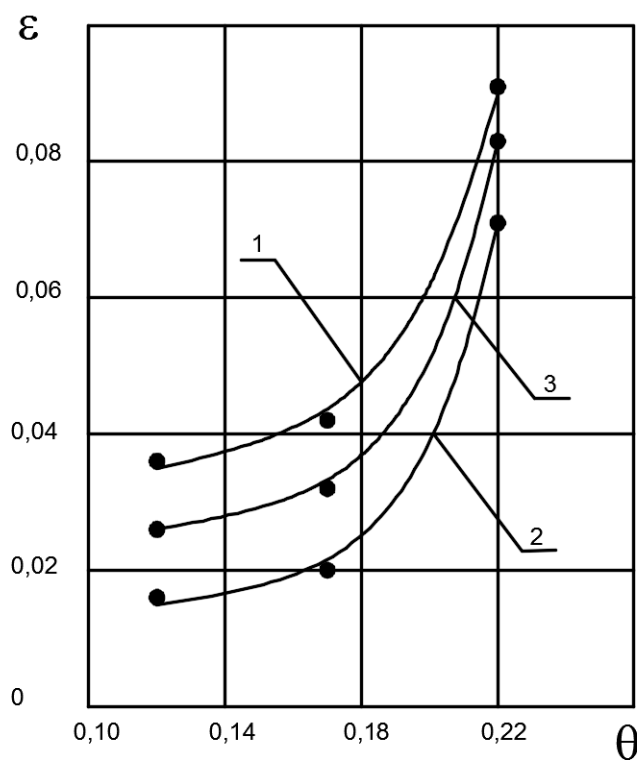


Рисунок 4.12 – Изменение величины проскока пыли в зависимости от параметра конусности сепарационной камеры при $\Phi_r^* = 5,0$ и $Re_{cp} = 60000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

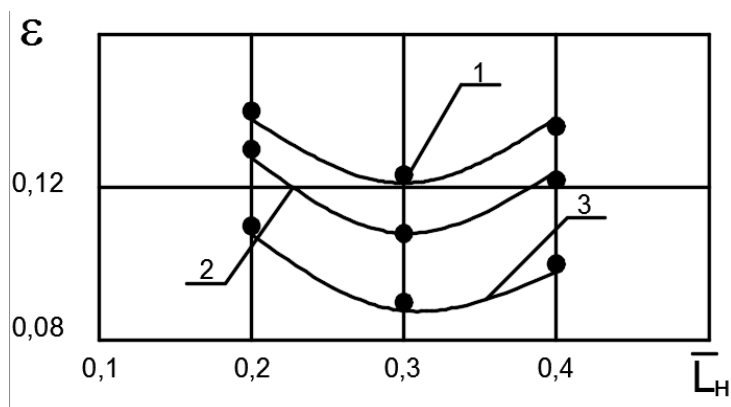


Рисунок 4.13 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего при $\Theta = 0,12$ и $Re_{cp} = 40000$;

при $\Theta = 0,12$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\Phi_r^* = 4,0$; 2 - $\Phi_r^* = 4,5$; 3 - $\Phi_r^* = 5,0$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

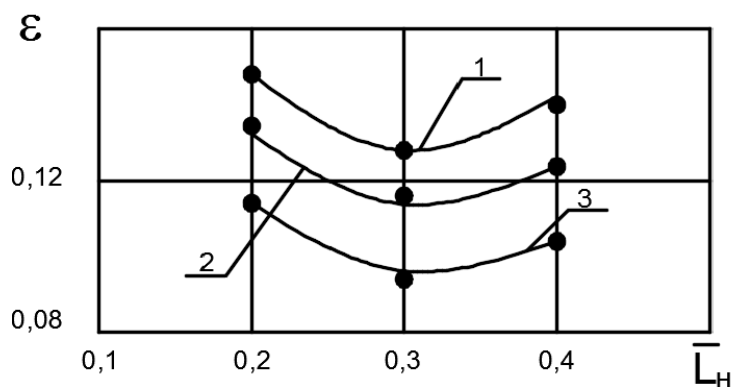


Рисунок 4.14 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего

при $\Theta = 0,17$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\Phi_r^* = 4,0$; 2 - $\Phi_r^* = 4,5$; 3 - $\Phi_r^* = 5,0$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

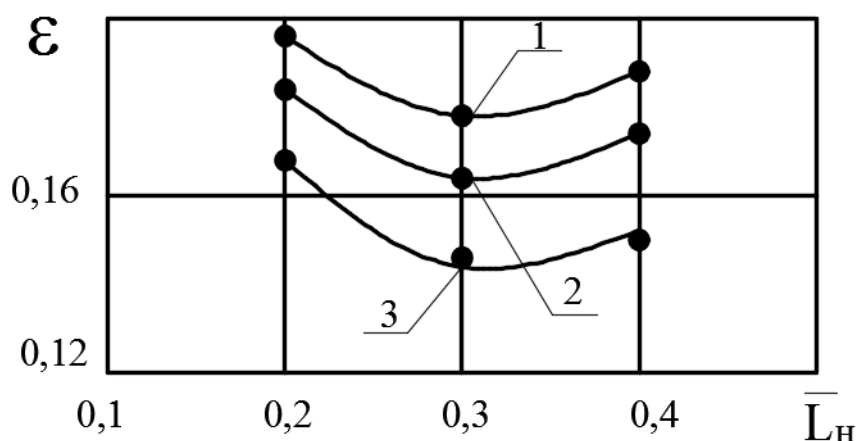


Рисунок 4.15 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего при

$\Theta = 0,22$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\Phi_r^* = 4,0$; 2 - $\Phi_r^* = 4,5$; 3 - $\Phi_r^* = 5,0$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

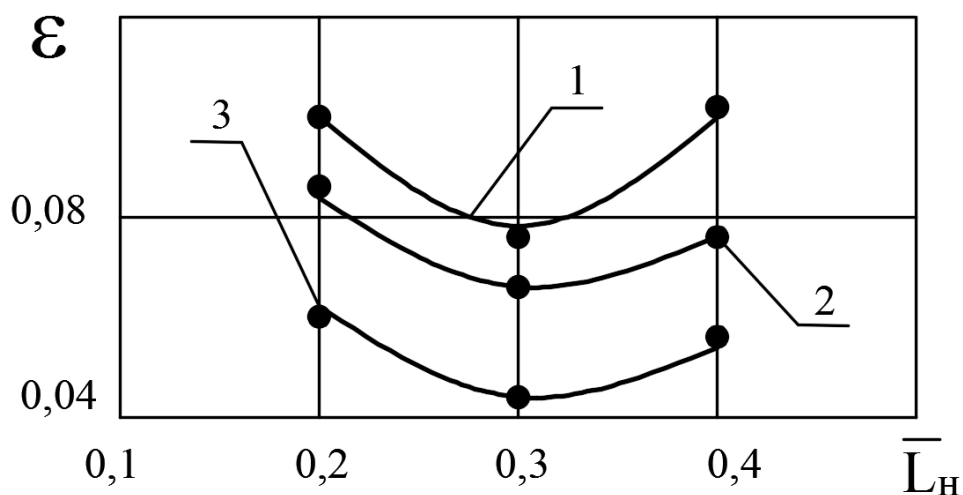


Рисунок 4.16 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего

при $\Theta = 0,12$ и $Re_{cp} = 50000$;

1 - $\Phi_r^* = 4,0$; 2 - $\Phi_r^* = 4,5$; 3 - $\Phi_r^* = 5,0$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

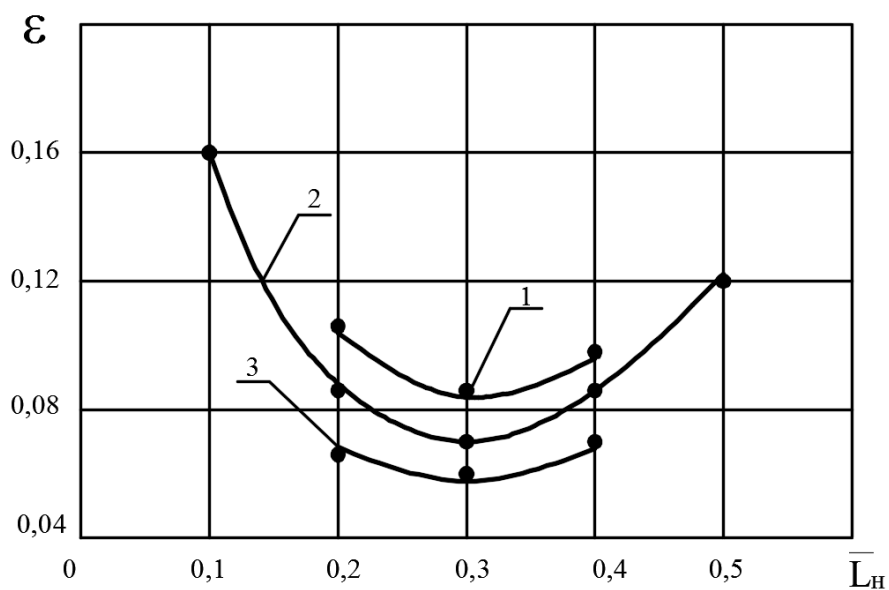


Рисунок 4.17 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего

при $\Theta = 0,17$ и $Re_{cp} = 50000$;

1 - $\Phi_r^* = 4,0$; 2 - $\Phi_r^* = 4,5$; 3 - $\Phi_r^* = 5,0$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

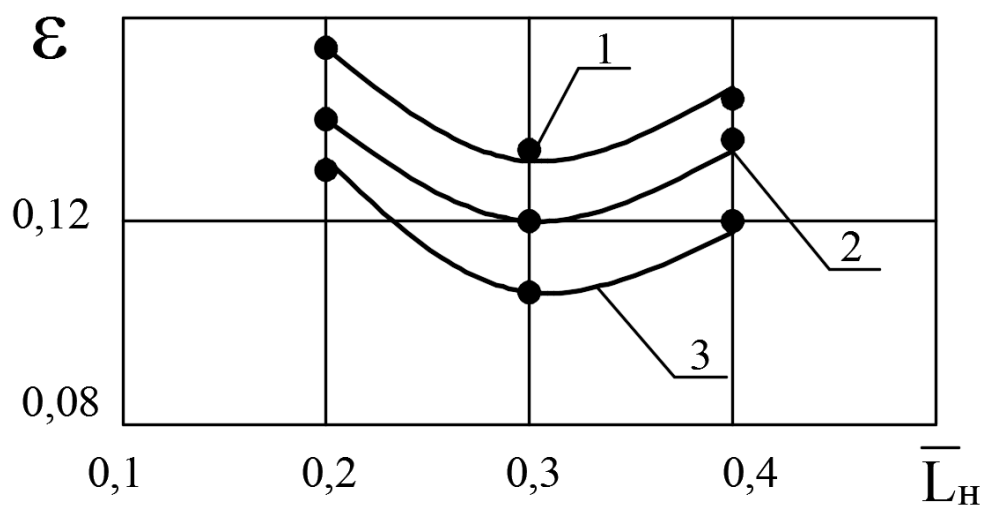


Рисунок 4.18 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего

при $\Theta = 0,22$ и $Re_{cp} = 50000$;

1 - $\Phi_r^* = 4,0$; 2 - $\Phi_r^* = 4,5$; 3 - $\Phi_r^* = 5,0$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

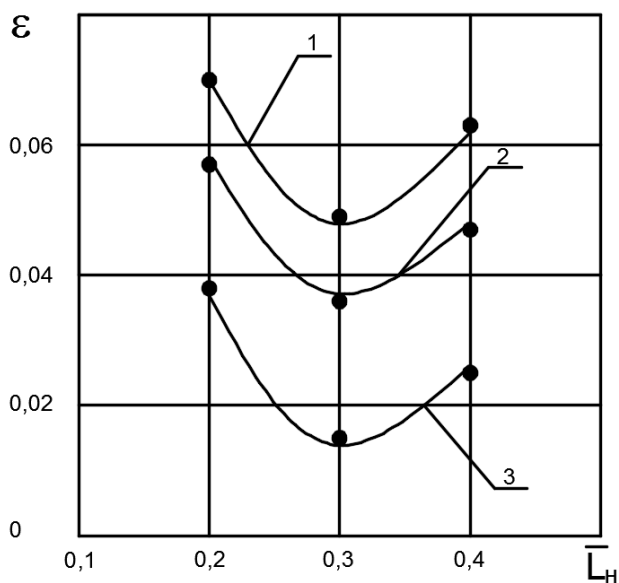


Рисунок 4.19 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего

при $\Theta = 0,12$ и $Re_{cp} = 60000$;

1 - $\Phi_r^* = 4,0$; 2 - $\Phi_r^* = 4,5$; 3 - $\Phi_r^* = 5,0$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

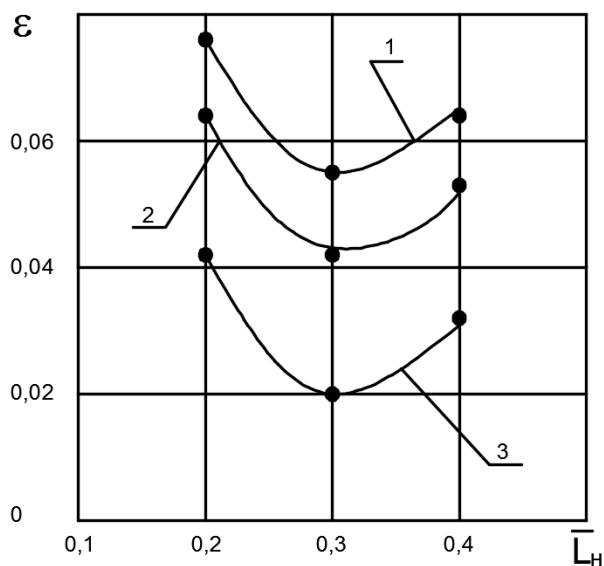


Рисунок 4.20 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего при

$$\Theta = 0,17 \text{ и } Re_{cp} = 60000;$$

$$1 - \Phi_r^* = 4,0; 2 - \Phi_r^* = 4,5; 3 - \Phi_r^* = 5,0$$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

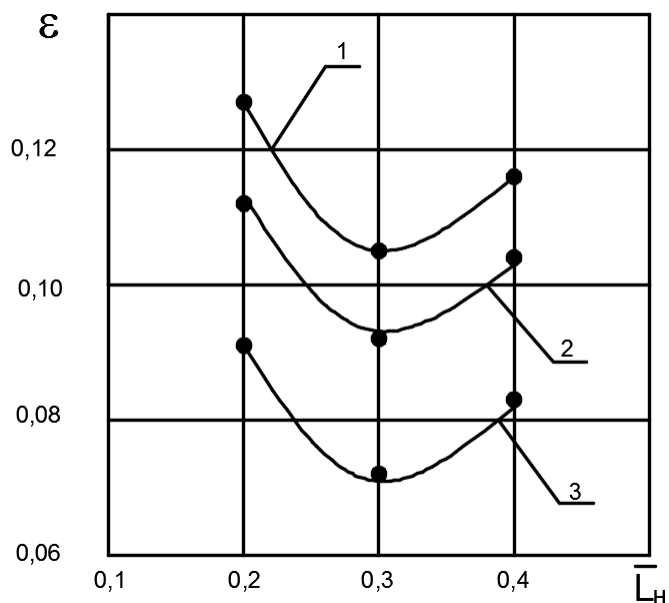


Рисунок 4.21 - Изменение величины проскока пыли в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего при

$$\Theta = 0,22 \text{ и } Re_{cp} = 60000;$$

$$1 - \Phi_r^* = 4,0; 2 - \Phi_r^* = 4,5; 3 - \Phi_r^* = 5,0$$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.7)

Математическая обработка экспериментальных данных показала, что после проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента, проверки адекватности по критерию Фишера и перехода к натуральным значениям определяющих факторов зависимость, характеризующая степень снижения массы пылевых выбросов приобретает вид:

$$\varepsilon = 0,0416 + 9,103(\Theta - 0,14)^2 - 0,018(\Phi_{\Gamma}^* - 3,53)^2 + \\ + 0,0908 \cdot 10^{-9}(Re - 70000)^2 + 1,6148(\bar{L}_{\text{н}} - 0,313)^2 \quad (4.7)$$

Как следует из полученных данных, наименьшие значения проскока наблюдаются в диапазоне изменения значений конусности сепарационной камеры $\theta = 0,13-0,15$, что позволяет считать данные значения наиболее рациональными.

Зависимость проскока от доли расхода, подаваемого на нижний ввод пылеуловителя, имеет вид, близкий к таковому для пылеуловителей ВЗП с цилиндрической сепарационной камерой. Минимальные значения эффективности наблюдаются в диапазоне значений $L_{\text{н}}/L_{\text{общ}} = 0,27-0,35$. Также проскок пыли уменьшается при увеличении формпараметра закрутки потока, создаваемого первичным вводом пылеуловителя. Зависимость величины проскока от начальной интенсивности закрутки потока является убывающей во всем диапазоне варьирования экспериментальных факторов.

Результаты экспериментальных исследований по оценке энергозатрат на реализацию процессов обеспыливания выбросов в аппарате ВЗП с сепарационной камерой, выполненной в виде обратного конуса представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Экспериментальные значения величины коэффициента
аэродинамического сопротивления пылеуловителя ВЗП с
обратным конусом

Определяющие факторы				ζ
θ	Φ_{Γ}^*	Re_{cp}	\bar{L}_H	
1	2	3	4	5
0,12	4,0	40000	0,2	116,23
			0,3	114,11
			0,4	111,32
0,17	4,0	40000	0,2	106,04
			0,3	104,12
			0,4	99,26
0,22	4,0	40000	0,2	100,00
			0,3	98,76
			0,4	95,34
0,12	4,5	40000	0,2	106,58
			0,3	104,72
			0,4	102,36
0,17	4,5	40000	0,2	96,34
			0,3	94,22
			0,4	92,61
0,22	4,5	40000	0,2	90,03
			0,3	87,70
			0,4	85,61
0,12	5,0	40000	0,2	91,92
			0,3	88,78
			0,4	87,04
0,17	5,0	40000	0,2	80,12
			0,3	79,00
			0,4	77,00
0,22	5,0	40000	0,2	74,03
			0,3	72,11
			0,4	70,00
0,12	4,0	50000	0,2	110,2
			0,3	100,6
			0,4	94,3
0,17	4,0	50000	0,2	96,6
			0,3	98,8
			0,4	100,6
0,22	4,0	50000	0,2	88,3
			0,3	91,3
			0,4	94,1

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5
0,12	4,5	50000	0,2	109,8
			0,3	111,2
			0,4	112,4
0,17	4,5	50000	0,2	98,6
			0,3	101,1
			0,4	103,2
0,22	4,5	50000	0,2	90,4
			0,3	93,9
			0,4	97,1
0,12	5,0	50000	0,2	115,5
			0,3	117,2
			0,4	118,5
0,17	5,0	50000	0,2	104,5
			0,3	107,3
			0,4	109,1
0,22	5,0	50000	0,2	96,6
			0,3	100,5
			0,4	104,1
0,12	4,0	60000	0,2	117,38
			0,3	114,32
			0,4	112,26
0,17	4,0	60000	0,2	107,38
			0,3	105,16
			0,4	103,76
0,22	4,0	60000	0,2	101,52
			0,3	99,87
			0,4	97,51
0,12	4,5	60000	0,2	107,24
			0,3	104,83
			0,4	102,52
0,17	4,5	60000	0,2	98,12
			0,3	95,53
			0,4	93,12
0,22	4,5	60000	0,2	91,53
			0,3	89,82
			0,4	87,54
0,12	5,0	60000	0,2	91,56
			0,3	89,00
			0,4	88,02

Окончание таблицы 4.4

1	2	3	4	5
0,17	5,0	60000	0,2	83,57
			0,3	82,00
			0,4	79,04
0,22	5,0	60000	0,2	77,52
			0,3	75,34
			0,4	74,03

Графическая интерпретация полученных данных приведена на рисунках 4.22 – 4.30.

Зависимость коэффициента местного аэродинамического сопротивления от конусности сепарационной камеры пылеуловителя является убывающей во всем диапазоне варьирования экспериментальных факторов.

Данный факт объясняется увеличением сечения сепарационной камеры и снижением скоростей движения газового потока. При этом снижаются также и абсолютные величины сил, способствующих сепарации частицы, что делает нерациональным повышение конусности камеры выше значения $\theta = 0,16$.

Увеличение интенсивности начальной закрутки потока выше значения $\Phi^*_{\text{з}} = 4,5$ приводит к резкому росту аэродинамического сопротивления пылеуловителя.

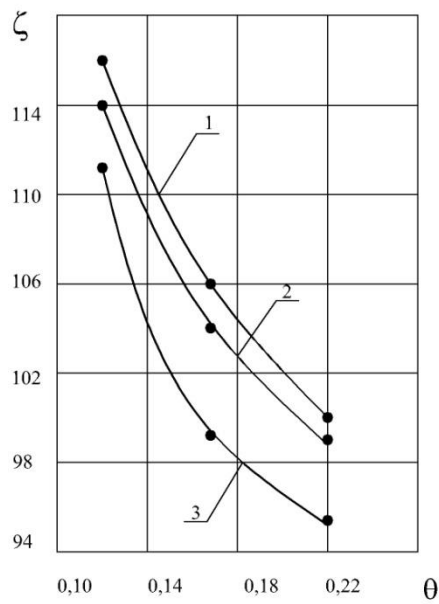


Рисунок 4.22 – Изменение ζ в зависимости от параметра конусности
сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 4,5$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

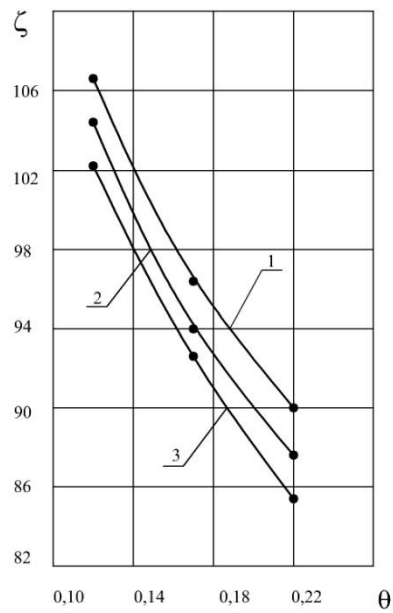


Рисунок 4.23 – Изменение ζ в зависимости от параметра конусности
сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 5,0$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\bar{L}_H = 0,2$; 2 - $\bar{L}_H = 0,3$; 3 - $\bar{L}_H = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

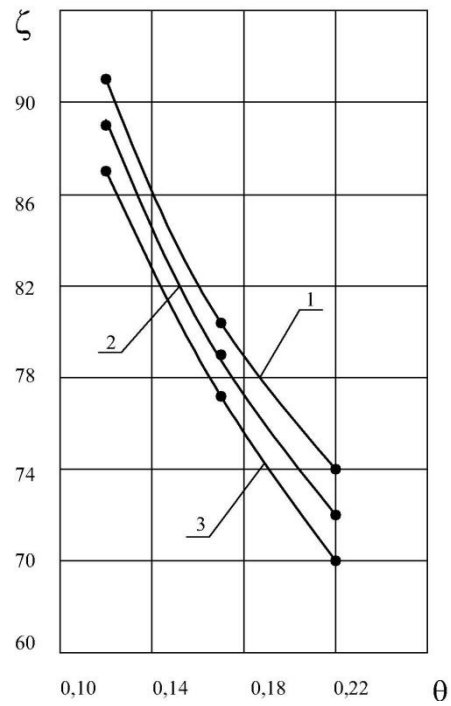


Рисунок 4.24 – Изменение ζ в зависимости от параметра конусности
сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 4,5$ и $Re_{cp} = 40000$;

1 - $\bar{L}_n = 0,2$; 2 - $\bar{L}_n = 0,3$; 3 - $\bar{L}_n = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

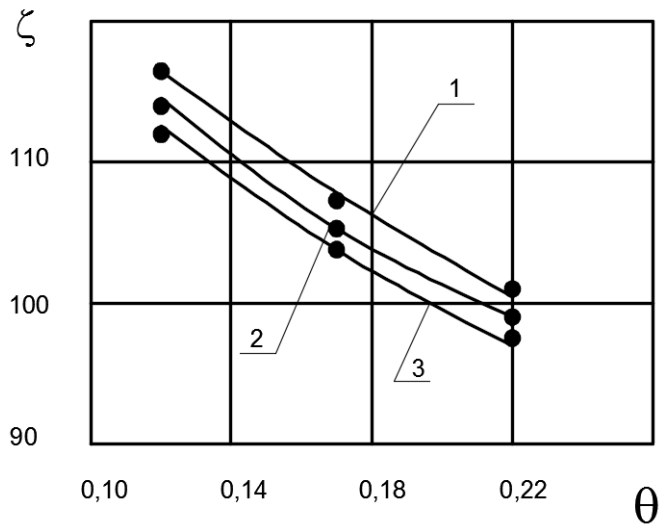


Рисунок 4.25 – Изменение ζ в зависимости от параметра конусности
сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 4,5$ и $Re_{cp} = 50000$;

1 - $\bar{L}_n = 0,2$; 2 - $\bar{L}_n = 0,3$; 3 - $\bar{L}_n = 0,4$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

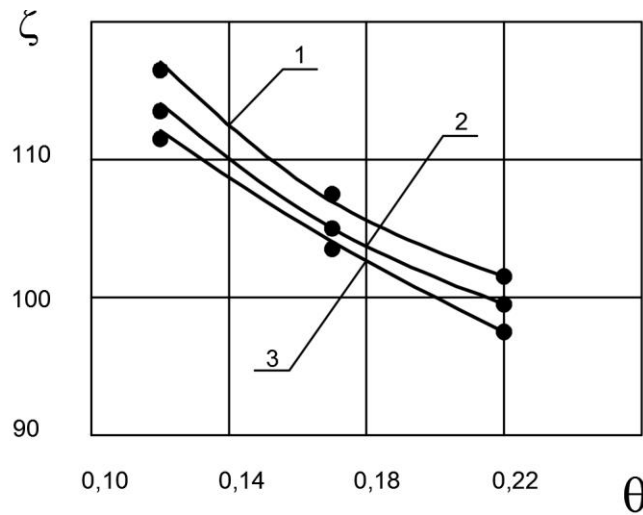


Рисунок 4.25 – Изменение ζ в зависимости от параметра конусности
сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 4,5$ и $Re_{cp} = 60000$;

$$1 - \bar{L}_H = 0,2; 2 - \bar{L}_H = 0,3; 3 - \bar{L}_H = 0,4$$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

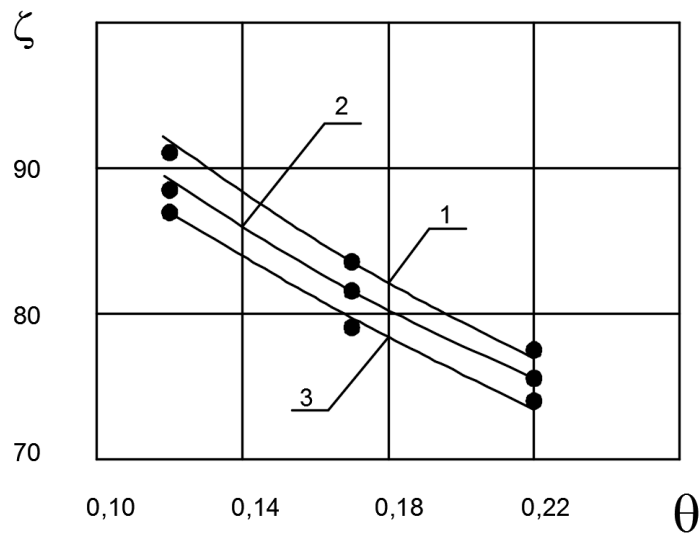


Рисунок 4.26 – Изменение ζ в зависимости от параметра конусности
сепарационной камеры при $\Phi_{\Gamma}^* = 5,0$ и $Re_{cp} = 60000$;

$$1 - \bar{L}_H = 0,2; 2 - \bar{L}_H = 0,3; 3 - \bar{L}_H = 0,4$$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

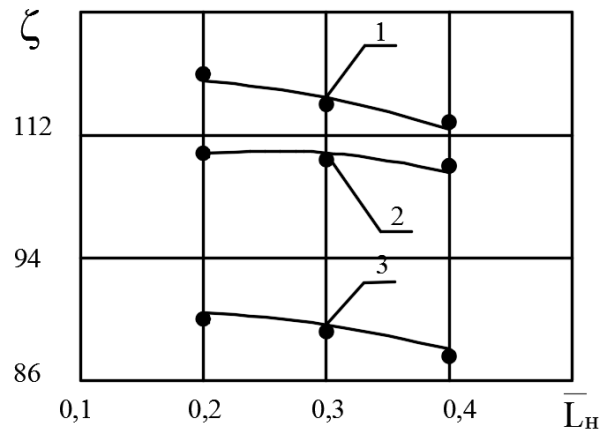


Рисунок 4.27 - Изменение ζ в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего при $\Theta = 0,12$ и

$$Re_{cp} = 40000;$$

$$1 - \Phi_r^* = 4,0; 2 - \Phi_r^* = 4,5; 3 - \Phi_r^* = 5,0$$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

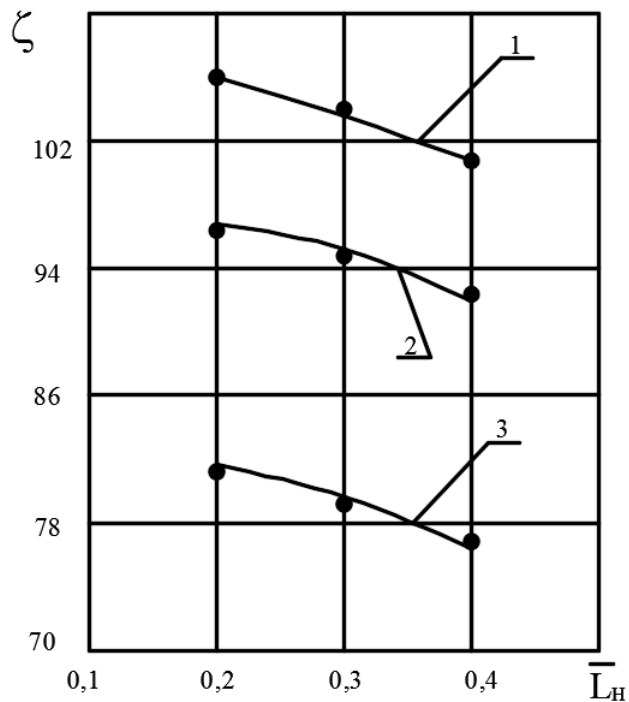


Рисунок 4.28 - Изменение ζ в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего при $\Theta = 0,17$ и

$$Re_{cp} = 40000;$$

$$1 - \Phi_r^* = 4,0; 2 - \Phi_r^* = 4,5; 3 - \Phi_r^* = 5,0$$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

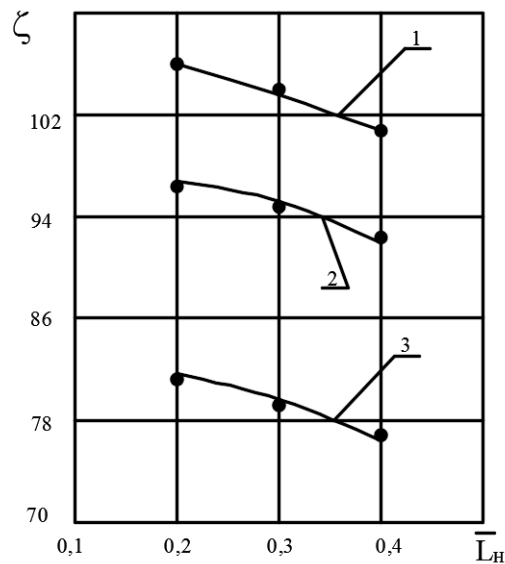


Рисунок 4.29 - Изменение ζ в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего при $\Theta = 0,22$ и

$$Re_{cp} = 40000;$$

$$1 - \Phi_r^* = 4,0; 2 - \Phi_r^* = 4,5; 3 - \Phi_r^* = 5,0$$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

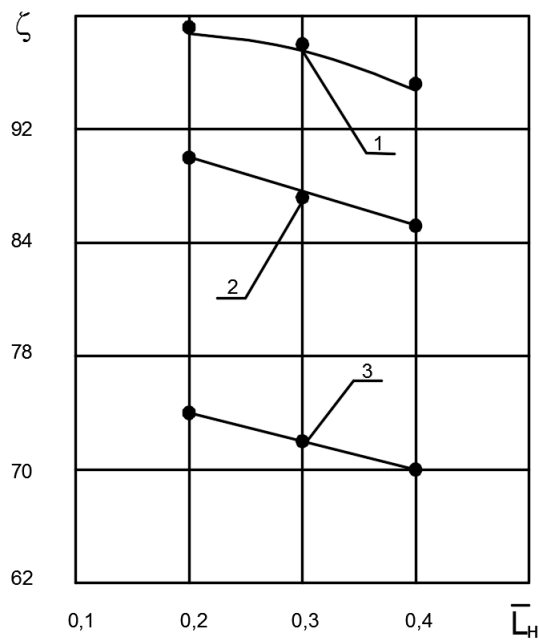


Рисунок 4.30 - Изменение ζ в зависимости от соотношения расходов, подаваемого в нижний ввод пылеуловителя, и общего при $\Theta = 0,12$ и

$$Re_{cp} = 50000;$$

$$1 - \Phi_r^* = 4,0; 2 - \Phi_r^* = 4,5; 3 - \Phi_r^* = 5,0$$

• - результаты эксперимента; — расчетные данные по (4.8)

Таким образом, совместный анализ зависимостей, характеризующих проскок пыли и аэродинамическое сопротивление пылеуловителя на встречных закрученных потоках при очистке пылевых загрязнений позволяет считать наиболее рациональным диапазон значений конусности сепарационной камеры $\theta = 0,12-0,15$. Влияние значения доли расхода, подаваемого на нижний ввод пылеуловителя с конической сепарационной камерой на величину проскока и аэродинамическое сопротивление, практически аналогично таковому для пылеуловителей с цилиндрической сепарационной камерой. Таким образом, в соответствии с полученными результатами диапазон оптимальных значений доли расхода, подаваемого на нижний ввод составляет $L_n/L_{\text{общ}} = 0,27-0,35$.

По результатам математической обработки экспериментальных результатов получено выражение, характеризующее затраты электроэнергии на реализацию процессов обеспыливания выбросов в аппарате ВЗП с обратным конусом:

$$\begin{aligned} \zeta = & 245,91 + 601,91(tg\theta)^2 + 8,007(\Phi_r^*)^2 - 3,144 * 10^{-10} Re^2 - 18,597 \left(\frac{L_n}{L_{\text{общ}}} \right)^2 \\ & - 414248 * tg\theta - 65,543 * \Phi_r^* + 0,001 Re + 3,981 \frac{L_n}{L_{\text{общ}}} + 0,001 \\ & * tg\theta * \Phi_r^* * Re * \frac{L_n}{L_{\text{общ}}} \quad (4.8) \end{aligned}$$

4.4 Выводы по главе 4

1. С целью изучения процесса улавливания пыли пылеуловителями ВЗП с обратной конической формой сепарационной камеры проведены теоретические и экспериментальные исследования.

2. Получены эмпирические зависимости, характеризующие величину проскока пыли и затраты электроэнергии на реализацию процессов очистки пылевых выбросов пылеуловителя ВЗП при различных значениях конусности сепарационной камеры.

4. Экспериментально подтверждена адекватность предложенной расчетной модели. Минимальные значения проскока пыли наблюдаются при достаточно близких значениях конусности сепарационной камеры и интенсивности закрутки потока, полученных расчетным и экспериментальным методами;

5. Установлено, что минимальные значения проскока пыли наблюдаются в диапазоне значений конусности сепарационной камеры $\theta = 0,13-0,15$.

6. Совместный анализ экспериментальных данных по оценке проскока пыли и затраты электроэнергии на реализацию процессов очистки пылевых выбросов в аппарате ВЗП позволяет считать наиболее рациональными значения интенсивности закрутки верхнего ввода пылеуловителя на встречных закрученных потоках с обратной конической сепарационной камерой лежащим в пределах $\Phi^*_{\text{с}} = 4,6-4,8$.

7. Экспериментально установлено, что максимальная эффективность улавливания достигается в диапазоне значений $\frac{L_{\text{н}}}{L_{\text{общ}}} = 0,28-0,35$ во всем диапазоне варьирования экспериментальных факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе приводится решение важной и актуальной задачи по защите городской воздушной среды от пылевого загрязнения при производстве строительных материалов на основе повышения эффективности и надежности систем очистки выбросов от абразивной пыли. На основании результатов выполненных исследований можно сделать следующие **основные выводы по работе.**

1. Анализ опыта эксплуатации систем обеспыливания выбросов в производстве строительных материалов и изделий показал, что в процессе эксплуатации циклоны в этих системах подвержены абразивному износу. Кроме того, несмотря на признанные достоинства циклонов, эти аппараты не обеспечивают требуемой степени снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду. Особенно это относится к пыли, размеры частиц которой составляют менее 10 мкм и 2,5 мкм. Помимо того, что содержание таких частиц в атмосферном воздухе населенных мест жестко регламентируется действующими санитарно-гигиеническими нормативами, возрастает негативное воздействие пыли на окружающую природную среду вследствие ее абразивных свойств.

2. По результатам экспериментальных исследований для некоторых видов пыли строительных материалов (керамзитовой, песка, древесины пальмы) получены данные о фракционном составе, форме частиц, плотности, обуславливающих абразивные свойства исследуемой пыли.

3. На основе результатов экспериментальных исследований определены значения коэффициента абразивности исследуемой пыли, что позволило провести прогнозный расчет интенсивности абразивного износа циклонов в системах обеспыливания выбросов для оценки периода безотказной работы этих систем. Результаты такого расчета подтверждены результатами натурных исследований по оценке изменения величины проскока исследуемой пыли в атмосферу в зависимости от срока эксплуатации систем пылеочистки с циклонами. Например, было установлено, что в течение 2,5 лет проскок пыли песка в атмосферу в

результате абразивного износа аппаратов в среднем увеличивается на 28,6%, проскок пыли древесины пальмы – на 21%. Полученные данные показали, что больше всего подвергаются абразивному износу циклоны, применяемые для очистки выбросов от пыли керамзитовой. В этом случае в период эксплуатации проскок пыли в атмосферу в среднем увеличивается на 69,8%.

4. Для снижения массы пылепоступлений в городскую воздушную среду и повышения надежности работы систем очистки выбросов от абразивной пыли в производстве строительных материалов предложено использовать аппараты ВЗП с сепарационной камерой, выполненной в форме обратного конуса. На основе анализа сил, обуславливающих движение твердой пылевой частицы в конической сепарационной камере пылеуловителя на встречных закрученных потоках, составлена расчетная модель для оценки степени снижения проскока пыли в атмосферный воздух в исследуемом аппарате. По результатам вычислительного эксперимента определены режимно-конструктивные параметры пылеуловителя ВЗП с обратным конусом, при которых обеспечивается наименьший проскок пыли в городскую воздушную среду.

5. По результатам экспериментальных исследований получены зависимости, характеризующие степень снижения массы выбросов пыли в атмосферный воздух и затраты электроэнергии на проведение процессов очистки выбросов от абразивной пыли при использовании аппарата ВЗП с конической сепарационной камерой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулджалил, М. С. А. Об опыте применения аппаратов ВЗП в системах очистки пылевых выбросов [Текст] / М. С. А. Абдулджалил // Проблемы охраны производственной и окружающей среды : сб. материалов и науч. трудов инженеров-экологов. – Волгоград : Прин-Терра-Дизайн, 2015. – Вып. 6. – С. 106-108.
2. Абдулджалил, М. С. А. О теоретических подходах к оценке эффективности обеспыливания выбросов в атмосферу в производстве строительных материалов [Текст] / М. С. А. Абдулджалил // Проблемы охраны производственной и окружающей среды : сб. материалов и науч. трудов инженеров-экологов. – Волгоград : Прин-Терра-Дизайн, 2015. – Вып. 6. – С. 108-110.
3. Абдулджалил, М. С. А. О снижении уровня пылевого загрязнения городской воздушной среды при производстве строительных материалов [Текст] / М. С. А. Абдулджалил, М. Остаали // Современные парадигмы научных воззрений : сб. науч. статей по материалам междунар. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург : ЦСА, «КультИнформПресс», 2016. – С. 105.
4. Абдулджалил, М. С. А. Оптимизация конструктивных параметров пылеуловителей на встречных закрученных потоков в системах местной вытяжной вентиляции [Электронный ресурс] / М. С. А. Абдулджалил, В. В. Россошанский, Л. М. Миронова // Инженерный вестник Дона. – 2016. - №2. – Режим доступа : www.ivdon.ru.
5. Абдулджалил, М. С. А. О результатах испытаний систем обеспыливания выбросов в атмосферу при производстве некоторых строительных материалов и изделий [Текст] / М. С. А. Абдулджалил // Проблемы охраны производственной и окружающей среды : сб. материалов и науч. трудов инженеров-экологов. – Волгоград : Прин-

Терра-Дизайн, 2018. – Вып. 8. – С. 3-5.

6. Азаров, В. Н. О концентрации и дисперсном составе пыли в воздухе рабочих и обслуживаемых зон предприятий стройиндустрии [Текст] / В. Н. Азаров // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы междунар. конф. – Волгоград. – 2003. – С. 1-7.
7. Азаров, В. Н. Об устойчивости аспирационных систем [Текст] / В. Н. Азаров // Достижения в теории и практике теплогазоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха и охраны воздушного бассейна : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург, 1997. – С. 29.
8. Азаров, В. Н. Системы пылеулавливания и пневмотранспорта с использованием закрученных потоков [Текст] / В. Н. Азаров // Концепция создания экологически чистых регионов : материалы науч.-практ. конф. – Волгоград, 1991. – С. 20 – 24.
9. Азаров, В. Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Опыт внедрения [Текст] / В. Н. Азаров. – Волгоград : РПК Политехник, 2003.
10. Азаров, В. Н. Улавливание промышленных выбросов аппаратами на встречных закрученных потоках [Текст] / В. Н. Азаров // Достижения в теории и практике теплогазоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха и охраны воздушного бассейна : сб. науч. тр. – Пенза : ПДНТП, 1997. - С. 44-45.
11. Азаров, В. Н. О дисперсном составе пыли в системах обеспыливающей вентиляции строительных производств [Текст] / В. Н. Азаров, Е. Ю. Есина // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. – 2008. - №11(30). – С. 119-122.
12. Азаров, В. Н. Опыт реконструкции системы аспирации на Себряковском асбестоцементном заводе [Текст] / В. Н. Азаров, В. Н. Пешков // Проблемы охраны производственной и окружающей среды :

- материалы междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград, 2001. – С.92-94.
13. Азаров, В. Н. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением ПК [Текст] / В. Н. Азаров, Н. М. Сергина. - Москва, 2002. - 9 с. - Деп. в ВИНТИ 15.07.2002, № 1333.
 14. Азаров, В. Н. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов [Текст] / В. Н. Азаров, Н. М. Сергина // Строительные материалы. – 2003. –№8. – С. 14-15.
 15. Азаров, В. Н. О дисперсном составе пыли в выбросах строительных производств [Текст] / В. Н. Азаров, М. Е. Горбунова, Е. Ю. Есина // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы IV междунар. науч.-технич. конф.– Волгоград, 2006. – С. 21-24.
 16. Азаров, В. Н. Дисперсный анализ методом микроскопии с применением ПЭВМ [Текст] / В. Н. Азаров, А. В. Ковалева, Н. М. Сергина // Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических комплексов : материалы междунар. науч.-практ. конф. - Волгоград, 1999. - С. 76.
 17. Азаров, В. Н. Улавливание мелкодисперсной пыли с использованием вихревых пылеуловителей [Текст] / В. Н. Азаров, С. А. Кошкарев, О. Т. Кавеева // Процессы и оборудование экологических производств : материалы III межреспубл. научн.-техн. конф. - Волгоград, 1995. - С. 107-108.
 18. Азаров, В. Н. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) [Текст] / В. Н. Азаров, О. В. Юркъян, Н. М. Сергина // Законодательная и прикладная метрология. - 2004. - №1. - С. 46-48.
 19. Алиев, Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Текст] / Г. М. Алиев. - Москва : Металлургия, 1986. - 543 с.
 20. Алиев, Г. М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок [Текст] / Г. М. Алиев. - Москва :

Металлургия, 1988. – 368 с.

21. Ахмедов, Б. В. Аэродинамика закрученных струй [Текст] / Б. В. Ахмедов. – Москва : Энергия, 1977. – 240 с.
22. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст] : учеб. пособие / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. - Москва : Высш.шк., 1985. - 327 с.
23. Баев, А. В. О повышении эффективности систем пылеулавливания на предприятиях по производству строительных материалов / А. В. Баев, В. И. Боглаев, М. В. Тетерев [Текст] // Проблемы региональной экологии. – 2006 . - № 4. – С. 73-76.
24. Балтеренас, П. С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов [Текст] / П. С. Балтеренас. – Москва : Стойиздат, 1990. – 180 с.
25. Банит, Ф. Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов [Текст] / Ф. Г. Банит, А. Д. Мальгин. – Москва : Стройиздат, 1979. – 320 с.
26. Белоусов, В. В. Теоретические вопросы процессов газоочистки [Текст] / В. В. Белоусов. - Москва : Metallurgy, 1988.
27. Беспалов, В. И. Теория и практика обеспыливания воздуха [Текст] / В. И. Беспалов. - Киев : Наукова думка, 2000. - 191 с.
28. Бобровников, Н. А. Охрана воздушной среды от пыли на предприятиях строительной индустрии [Текст]/ Н. А. Бобровников. – Москва : Стройиздат, 1981.
29. Богуславский, Е. И. Вероятностно-стохастический подход к проблемам охраны окружающей среды [Текст] : Кн. 1: Основы подхода / Е. И. Богуславский. – Ростов-на-Дону, 1997. – 207 с.
30. Богуславский, Е. И. Жизнеобеспечение в окружающей среде [Текст] : учеб. пособие / Е. И. Богуславский. - Ростов-на-Дону : Ростов. гос. акад. стр-ва, 1992. - 111 с.

31. Богуславский, Е. И. Аппараты со встречными закрученными потоками в производственных помещениях [Текст] / Е. И. Богуславский, С. ЛПушенко, В. Н. Азаров // Материалы междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : РИЦ Ростов. гос. строит. ун-та, 1997. - С. 49.
31. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии [Текст] : учеб. пособие / А. Г. Бондарь. - Киев : Вища школа, 1976. - 184 с.
32. Боровиков, А. В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере [Текст] / А. В. Боровиков. – Санкт-Петербург : Изд. дом «Питер», 2001. - 656 с.
33. Боровков, Д.П. Исследование эффективности пылеуловителя на встречных закрученных потоках с коаксиальным вводом вторичного потока при улавливании мелкодисперсной пыли производства керамических строительных материалов[Текст] / Д. П. Боровков, Е.В. Гладков, Е.О. Черевиченко, М.С.А. Абдулджалил // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. - 2017. - №50(69). – С. 88-97.
34. Ганчуков, В. И. Вихревые аппараты со встречными закрученными потоками [Текст] / В. И. Ганчуков, А. В. Екимова. - Череповец : Череповецкий гос. ун-т, 1998. - 33 с.
35. ГОСТ 17.2.4.06-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения [Текст]. - Москва : Изд-во стандартов, 1991. - 12 с.
36. ГОСТ 17.2.4.07-90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения [Текст]. - Москва : Изд-во стандартов, 1991. - 6 с.
37. ГОСТ Р 50820-95. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков [Текст]. -

Москва : Изд-во стандартов, 1997.

38. ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ. Методики выполнения измерений [Текст].- Москва : Изд-во стандартов, 2003.
39. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения [Текст]. – Москва : Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 37 с.
40. Градус, Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии [Текст] / Л. Я. Градус. - Москва : Химия, 1979. - 232 с.
41. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях [Текст] / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. - Ленинград : Энергоатомиздат, 1990. - 288 с.
42. Гудим, Л. И. Методы определения общей и фракционной эффективности пылеуловителей [Текст] / Л. И. Гудим, Б. С. Сажин, Ю. Н. Маков // Химическая промышленность. – 1987. - №34.- С. 40-42.
43. Даниленко, Н. В. Разделение пылегазовых смесей в аппаратах вихревого типа [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Даниленко Н. В. – Москва : МИХМ, 1988.
44. Даниленко, Н. В. Повышение эффективности пылеулавливания вихревого пылеуловителя [Текст] / Н. В. Даниленко// Расчет и конструирование биотехнической аппаратуры. – 1988.
45. Димитренко, М. В. Сравнение эффективности инерционных пылеуловителей по методу М.И. Шиляева [Текст] / М. В. Димитренко, Е. В. Гладков, М. С. А. Абдулджалил // Проблемы охраны производственной и окружающей среды : сб. материалов и науч. трудов инженеров-экологов. – Волгоград : Прин-Терра-Дизайн, 2015. – Вып. 6. – С. 89-91.
46. Ефремов, Г. И. Пылеочистка [Текст] / Г. И. Ефремов, Б. П. Лукачевский. - Харьков : Химия, 1990. - 72 с.
47. Зайцев, О. Н. Встречные смещенные закрученные потоки в

- многоступенчатых пылеуловителях [Текст] / О. Н. Зайцев // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 3. – С. 78-79.
48. Квашнин, И. М. Очистка воздуха от пыли [Текст] : учеб. пособие / И. М. Квашнин, Ю. И. Юнкеров. - Пенза : Пензен. гос. архит.-строит. ин-т, 1995. – 111 с.
 49. Кирсанова, Н. С. Новые исследования в области центробежной сепарации пыли [Текст] / Н. С. Кирсанова. – Москва : ЦИНТИхимнефтемаш, 1989. – 137 с.
 50. Кисленко, Т. А. Совершенствование систем обеспыливания в производстве керамзита [Текст] : дис. . . . канд. техн. наук : 05.23.19, 05.26.01 / Кисленко Тамара Александровна. – Волгоград, 2015. – 126 с.
 51. Клименко, А. П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли [Текст] / А. П. Клименко. - Москва : Химия, 1978, - 208 с.
 52. Константинова, З. И. Защита воздушного бассейна от промышленных выбросов [Текст] / З. И. Константинова. - Москва : Стройиздат, 1981. - 104 с.
 53. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1984.
 54. Котельников, Р. Б. Анализ результатов наблюдений [Текст] / Р. Б. Котельников. -Москва : Энергоатомиздат, 1986. - 144 с.
 55. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов [Текст] / П. А. Коузов. - 3-е изд. перераб. - Ленинград : Химия, 1987. - 264 с.
 56. Коузов, П. А. Сравнительная оценка циклонов различных типов. Обеспыливание в металлургии [Текст]/ П. А. Коузов. – Москва : Металлургия, 1971. - С. 185-196.
 57. Коузов, П. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей [Текст] / П. А. Коузов, Л. Я. Скрыбина. - Ленинград : Химия, 1983. – 138 с.

58. Кошкарев, С. А. О применении аппарата пылеулавливания с комбинированной схемой сепарации пыли из пылегазового потока в производстве керамзита [Текст] / С. А. Кошкарев, Т. А. Кисленко // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. - №11. - С. 47-49.
59. Кутепов, А. М. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем [Текст] / А. М. Кутепов, А. С. Латкин. – Москва : Наука, 1999. – 250 с.
60. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители [Текст] : справ. / В. А. Лазарев. - 2-е изд., перераб и доп. - Нижний Новгород : Фирма ОЗОН-НН, 2006. – 320 с.
61. Лапкаев, А. Г. Создание безопасности и нормальных условий труда в процессах деревообработки по пылевому фактору [Текст] : дис. д-ра техн. наук / Лапкаев Алексей Григорьевич. – Красноярск, 2006. – 320 с.
62. Латкин, А. С. Вихревые аппараты для технологических процессов [Текст] / А. С. Латкин. - Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. - 248 с.
63. Леончик, Б. И. Измерения в дисперсных потоках [Текст] / Б. И. Леончик, В. П. Маякин – Москва : Энергия, 1971. – 248 с.
64. Лопатин, А. Г. Применение центробежного гравитационного обогащения для доводки золотосодержащих концентратов [Текст] / А. Г. Лопатин, С. Н. Золин, В. М. Муллов // Цветные металлы. – 1973. - №11. – С. 77-78.
65. Медников, Е. П. Вихревые пылеуловители [Текст] / Е. П. Медников // Промышленная и санитарная очистка газов. - 1975. - Сер. ХМ–14. – С. 44.
66. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) [Текст] // Перечень методик измерений концентраций загрязняющих веществ в выбросах промышленных предприятий, допущенных к применению в 2014 году. - Санкт-Петербург : НИИ Атмосфера, 2013.

67. Минко, В. А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов [Текст] / В. А. Минко. – Воронеж : Изд-во Воронежского государственного университета, 1981. - 176 с.
68. Молчанов, Б. С. Проектирование промышленной вентиляции [Текст] / Б. С. Молчанов. – Ленинград : Стройиздат, 1970.
69. Мухутдинов, Р. Х. Результаты испытаний вихревых пылеуловителей [Текст] / Р. Х. Мухутдинов, В. К. Маслов, П. И. Корнилаев // Промышленная и санитарная очистка газов. - 1980. - № 3. - С. 9-10.
70. Нейков, О. Д. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков [Текст] / О. Д. Нейков, И. Н. Логачев. – Москва : Металлургия, 1981. - 264 с.
71. О дисперсном составе пыли в системах аспирации промышленных предприятий [Текст] / В. Н. Азаров [и др.] // Аэрозоли в промышленности и в атмосфере : материалы всерос. науч.-практ. конф. – Пенза, 2001. – С. 65-66.
72. Об оценке концентрации мелкодисперсной пыли ($PM_{2,5}$ и PM_{10}) в воздушной среде [Текст] / В. Н. Азаров [и др.] // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. – 2011. – Вып. 25(44). – С. 403-407.
73. О значимости параметров инерционных устройств очистки вентиляционных выбросов в производстве керамзита [Электронный ресурс] / С. А. Кошкарев [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. - №1. – Режим доступа : www.science-education.ru/115-12003.
74. О теоретической оценке эффективности пылеуловителей со встречными закрученными потоками в системах очистки выбросов в городскую воздушную среду [Текст] / Н. М. Сергина, М. С. А. Абдулджалил [и др.] // Современная наука и инновации. – 2016. - №1. – С. 112-118.
75. Охрана окружающей среды и инженерное обеспечение микроклимата

- на предприятиях стройиндустрии [Текст] : учеб. пособие / А. И. Еремкин [и др.]. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2003.
76. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] / В. Н. Ужов [и др.]. – Москва : Химия, 1989. – 415 с.
 77. Павловский, Б. А. Комплексное измерение скоростей, размеров и концентрации движущихся частиц в двухфазном потоке [Текст] / Б. А. Павловский, Н. В. Семидентов // Измерительная техника. – 1991. – №9. – С. 40 – 43.
 78. Пат. 2617473 Российская Федерация. МПК В04С 3/06 (2006М). Вихревой пылеуловитель / С. А. Кошкарев, Д. В. Азаров, Е. В. Гладков, А. В. Азаров, М. С. Абдулджалил, М. А. Николенко, Л. М. Абрамова, Е. А. Семенова ; заявитель и патентообладатель ООО «Проектно-технологическое бюро Волгоградгражданстрой». – 2015112726 ; заявл. 07. 04. 2015 ; опубл. 25. 04. 2017 . Бюл. №12.
 79. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А. И. Пирумов. – Москва : Стройиздат, 1974. – 207 с.
 80. Повышение эффективности очистки от пыли выбросов от сушильных барабанов кирпичного производства [Текст] / В. Н. Азаров, Н. М. Сергина [и др.] // Строительство 2000 : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону, 2000. – С.126-127.
 81. Программа обработки изображений частиц DUST 1 [Текст] : а. с. о гос. рег. программы для ЭВМ DUST-1 № 2014618468 от 24.08.2014. № 2014616162 ; заявл. 26.06.2014 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 21.08.2014.
 82. Протодьяконов, И. О. Статистическая теория явлений переноса в химической технологии [Текст] : учеб. пособие / И. О. Протодьяконов, С. Р. Богданов. – Ленинград : Химия, 1983. – 400 с.
 83. Пылеуловители инерционно-центробежного типа [Текст] / А. Н.

- Володин [и др.] // ЭКиП : Экология и промышленность России. – 2002. – N 7. – С. 13-14.
84. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Обзор изобретений [Текст] / В. Н. Азаров, Н. М. Сергина [и др.]. – Волгоград : ООО «Ассоциация «Волгоградэкотехзерно», 1999. – 48 с.
 85. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теории [Текст] / П. Райст. – Москва : Мир, 1987. – 280 с.
 86. РД153-34.1-27.512-2001. Методические указания по снижению абразивного износа пневмотранспортных трубопроводов систем пылеприготовления и золошлакоудаления ТЭС [Текст].
 87. Рекомендации по проектированию очистки воздуха от пыли в системах вытяжной вентиляции [Текст] / ЦНИИпромзданий. – Москва : Стройиздат, 1985.
 88. Русак, О. Н. Борьба с пылью на деревообрабатывающих предприятиях [Текст] / О. Н. Русак, В. В. Молохов. – Москва : Лесная промышленность, 1975. - 151 с.
 89. Сазонов, Э. В. Теоретические основы расчета вентиляции [Текст] / Э. В. Сазонов. – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1990. - 208 с.
 90. Сажин, Б. С. Вихревые пылеуловители [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим. – Москва : Химия, 1995.
 91. Сергина, Н.М. Об оценке эффективности систем пылеочистки в производстве строительных материалов [Текст] / Н. М. Сергина, М. С. А. Абдулджалил // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. – 2015. – Вып. 42(61). – С. 108-119.
 92. Сергина, Н. М. Теоретическая оценка эффективности вихревых пылеуловителей с отсосом из бункерной зоны [Текст] / Н. М. Сергина, Д. В. Азаров // Альтернативная энергетика и экология. - 2013. №10. - С. 26-29.
 93. Сергина, Н. М. Исследование некоторых свойств отдельных видов пыли

- строительных материалов [Текст] // Современная наука и инновации. - 2017. - №4 (20). - С. 175-181.
94. Сергина, Н.М. Пылеуловители со встречными закрученными потоками в системах очистки пылевых выбросов в производстве строительных материалов [Электронный ресурс] / Н. М. Сергина, М. С. А. Абдулджалил, Л. А. Абрамова // Инженерный вестник Дона. – 2015. - №3. - Режим доступа : www.ivdon.ru.
 95. Сергина, Н. М. Система обеспыливания для производства керамзита [Электронный ресурс] / Н. М. Сергина, Е. А. Семенова, Т. А. Кисленко // «Инженерный вестник Дона». - 2013. - №4. -Режим доступа : ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013.
 96. Сергина, Н. М. Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов [Текст] / Н. М. Сергина, Д. В. Азаров, Е. В. Гладков // Строительные материалы. – 2013 - №2. - С. 66-68.
 97. Скрыбина, Л. Я. Атлас промышленных пылей [Текст] : обзорная информация. В 3 ч. Ч. II. Пыли предприятий металлургии, машиностроения и строительной промышленности / Л. Я. Скрыбина. – Москва : ЦИНТИНЕФТЕХИММАШ, 1981. – 38 с.
 98. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / М. И. Биргер [и др.] ; Под общ. ред. А. А. Русанова. – Москва : Энергия» 1975. - 246 с.
 99. Страус, В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус. - Москва, 1981. - 616 с.
 100. Суслов, А. Д. Вихревые аппараты [Текст] / А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин. – Москва : Машиностроение, 1985. - 256 с.
 101. Торговников, Б. М. Проектирование промышленной вентиляции [Текст] / Б. М. Торговников, В. Е. Табачник, Б. М. Ефанов. – Киев : Будивельник, 1983. – 256 с.
 102. Халатов, А. А. Теория и практика закрученных потоков [Текст] / А. А.

- Халатов. - Киев : Наукова Думка, 1989. - 192 с.
103. Халилова, Р. Х. Очистка от пыли выбросов предприятий теплоизоляционных, огнеупорных и дорожно-строительных материалов [Текст] / Р. Х Халилова. - Ташкент, 1987. - 256 с.
 104. Циклоны (пылеуловители) с обратным конусом типа ЦОК [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.cikloni.ru (дата обращения 00.00.00).
 105. Циклон ЦМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.e-Formula.ru (дата обращения 00.00.00).
 106. Швыдкий, В. С. Очистка газов [Текст] : справ. / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладычигев. - Москва : Теплоэнергетик, 2005. - 640 с.
 107. Шиляев, М. И. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования [Текст] : учеб. пособие / М. И. Шиляев. – Томск : Томский гос. арх.-строит. ун-т, 1999.
 108. Штокман, Е. А. Очистка воздуха [Текст] : учеб. пособие / Е. А. Штокман. – Москва : Изд-во АСВ, 1999. – 320 с.
 109. Шульга С. В. Снижение пылевых выбросов в атмосферу от передвижных и мобильных асфальтосмесительных установок [Текст] : дис. . . канд. техн. наук : 05.23.19 / Шульга Сергей Владиирович. – Волгоград, 2016. – 150 с.
 110. Шургальский, Э. Ф. О влиянии конструктивных параметров вихревого пылеуловителя на гидродинамику взаимодействия двухфазных закрученных потоков [Текст] / Э. Ф. Шургальский, Н. Х.Еникеев// Конструирование, исследование машин, аппаратов и реакторов химической технологии. – Москва : МИХМ, 1986.
 111. Шургальский, Э. Ф. О сепарации частиц в вихревых пылеулавливающих аппаратах [Текст] / Э. Ф. Шургальский, Н. Х.Еникеев// Процессы и аппараты для микробиологических производств. /Биотехника - 86. – Грозный, 1986.

112. Циклоны СИОТ-М, СИОТ-М1 [Электронный ресурс]. - Режим доступа : evromash.ru.
113. Экба, С. И. Снижение запыленности воздуха рабочей зоны при производстве деревянных строительных конструкций [Текст] : дис. . . . канд. техн. наук /05.26.01 / Экба Сергей Игоревич. – Волгоград, 2015 г.
114. Экспериментальная оценка решения по снижению пылевых выбросов в атмосферу в производстве газобетона [Электронный ресурс] / Н. М. Сергина [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №1. – Режим доступа : www.ivdon.ru.
115. Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик вихревых пылеуловителей [Текст] / В. Н. Азаров, Н. М. Сергина [и др.] // Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических комплексов : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград, 1999. – С. 67 – 68.
116. Azarov, V. N. Application of Swirling Flows in Aspiration Systems [Text] / V. N. Azarov, D. P. Borovkov, A. M. Redhwan. // International Review of Mechanical Engineering (IREME). – 2014. - Vol. 8, № 4. – P. 750-753.
117. Buick, K. Characterische Uterschide zwischen Drehstromungsentstauber un Zyklon [Text] / K. Buick // Verfahrenstechnik. - 1970. - Bd. 4, №11. - P. 511-513.
118. Cortelis, C. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separation [Text] / C. Cortelis, A. Gil // Progress in energy and combustion Science. - - 2007. - Vol. 33., № 5.- P. 409-452.
119. Chol-Ho Hong. The effect of cyclone shape and dust collector on gas-solid flow and performance [Text] / Chol-Ho Hong, Ji-Won Han, Byeong-Sam Kim, Cha-Sik Park, Oh Kyung Kwon // International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering. 2012. - №6. -P.37-42.
120. Dantherm Filtration. New products and industries [Electronic resource]<http://www.danthermfiltration.ru/> (датаобращения 00.00.00)

121. Giliberti, D. F. Performance of rotary flow cyclones [Text] / D. F. Giliberti, B. W. Lancaster // AIChE J. - 1976. - Vol. 22, №2. - P. 499-503.
122. Nabil Kharoua. Study of the pressure drop and flow field in standard gas cyclone models using the granular model [Text] / Nabil Kharoua, Lyes Khezzar, Zoubir Nemouchi // International Journal of Chemical Engineering. – 2011. - Volume 2011. – P. 11.
123. Pasquill, F. Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modeling [Text] : Part II. Possible Requirements for Change in the Turner Workbook Values / F. Pasquill. - EPA-600/4-76-030b. U.S. Environmental Protection Agency. 1976. - 44 p.
124. Rammler, E. Zwz Anwendung der logistischen Function in der mechanischen und thermischen Verfahrenstechnik [Text] / E. Rammler. - Freib-Forsch-Herf A 524, Leipzig ; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1974.
125. Strauss, W. Industrial gas cleaning [Text] / W. Strauss. - Pergamon Press, 2006. - 472 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

**AKC Trading & Contracting
L.L.C**



**أبراج الكرامة للتجارة والمقاولات
ش.م.م**

رقم-345 ت.11001312 ج

تاريخ-07 /03 /2016

مذكره (للجهة المطلوبة)

شركة ابراج الكرام للتجارة والمقاولات سلطنة عمان تؤكد استلام المهندس / محمد سيف علي عبد الجليل
يمني الجنسسيه مجموعه من العينات المختلفه المتوفره لديها من غبار الاسمنت والسليكا والسيراميك و عينات
اخرى لاجراء البحوث عليها والاختبارات في روسيا الاتحاديه .
كما تشير الى انه قد قام باجراء بعض الاختبارات على العديد من العينات في المعامل المتوفره لدينا .

Yours sincerely,

Eng Alaa El Miry

Project Manager



Абрадж-Алькарама (ООО) (AKC Trading & Contracting L.L.C)

Круглая печать* ООО Абрадж-Алькарама * (AKC Trading & Contracting L.L.C) *

Справка

Компания «Абрадж-Алькарама (ООО), (AKC Trading & Contracting L.L.C) в Султанате Оман свидетельствует о том что гражданину республики Йемен Абдуджалил Мохаммеду Саид Али были выданы элементы (керамзитная пыль и песок, применяемый для дорожного покрытия и др.) для проведения экспериментальной практики в России , а также подтверждает его сотрудничество в лаборатории нашей компании и проведение экспериментов с различными материалами.

Круглая печать* ООО Абрадж-Алькарама * (AKC Trading & Contracting L.L.C) *

Подпись

Инженер Алаа Ель Мири

Менеджер проекта*

Документ переведен с арабского языка на русский язык
переводчиком Омар Абдул Нассер Мохамад Али

