

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Донской государственный технический университет»

На правах рукописи



**КОНДРАТЕНКО ТАТЬЯНА ОЛЕГОВНА**

**СНИЖЕНИЕ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГАЗОБЕТОНА И ГАЗОБЕТОННЫХ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

05.23.19 - Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Николенко Максим Александрович

Ростов-на-Дону - 2018 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
1.1. Анализ технологических процессов в производстве газобетона и газобетонных блоков как источников выделения пыли в атмосферу города. ....	12
1.2. Анализ методов и средств снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду при производстве строительных материалов. ....	22
1.3. Обоснование и выбор направления исследований. ....	33
1.4. Выводы по первой главе. ....	35
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ИСТОЧНИКОВ ЦЕХА ПО ПРОИЗВОДСТВУ ГАЗОБЕТОННЫХ БЛОКОВ НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА НОРМИРУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ. ....	37
2.1. Характеристика объекта и методика проведения исследований. ....	37
2.2. Результаты определения фактической массы пылевых выбросов в атмосферу от источников цеха. ....	41
2.3. Оценка фракционного состава пыли. ....	43
2.4. Оценка концентрации пыли в выбросах в атмосферу и в атмосферном воздухе. ....	48
2.5. Исследование основных свойств пыли в производстве газобетона и газобетонных блоков. ....	50

2.6.	Выводы по второй главе. . . . .	52
ГЛАВА 3.	РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ МАССЫ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ В ГОРОДСКУЮ ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГАЗОБЕТОНА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ. . . .	53
3.1.	Описание предлагаемых систем пылеочистки для производства газобетона. . . . .	53
3.2.	Теоретическая оценка эффективности предлагаемых систем для снижения выбросов пыли в городскую воздушную среду при производстве газобетона. . . . .	56
3.3.	Выводы по третьей главе. . . . .	67
ГЛАВА 4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ В ГОРОДСКУЮ ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГАЗОБЕТОНА. . . . .	68
4.1.	Экспериментальная установка и методика проведения исследований. . . . .	68
4.2.	Результаты предварительного эксперимента. . . . .	76
4.3.	Результаты экспериментальных исследований по оценке степени снижения пылевых выбросов в атмосферный воздух при компоновке системы обеспыливания по первому варианту. . . . .	78
4.4.	Результаты экспериментальных исследований по оценке степени снижения пылевых выбросов в атмосферный воздух при компоновке системы обеспыливания по второму варианту. . . . .	90
4.5.	Практическая реализация результатов исследований. . . . .	104
4.5.1.	Результаты эксплуатации опытно-промышленной установки очистки пылевых выбросов. . . . .	104

4.5.2.	Расчет предотвращенного экологического ущерба. . . . .	105
4.6.	Выводы по четвертой главе. . . . .	106
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ. . . . .	108
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ. . . . .	110
	ПРИЛОЖЕНИЯ. . . . .	125
	Приложение А. Патентная документация. . . . .	126
	Приложение Б. Документация о реализации результатов работы. . . . .	129

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность избранной темы.** Газобетон, выпускаемый как теплоизоляционный, конструктивно-теплоизоляционный и конструктивный, является универсальным современным строительным материалом, отличается долговечностью и высокой прочностью на сжатие, не горит и не поддерживает горение. Применение газобетона при возведении, как небольших домов, так и высотных зданий, а также торговых и развлекательных комплексов, позволяет сократить время строительства и капитальные затраты. Поэтому в настоящее время производство газобетона и строительных конструкций на его основе находит в нашей стране все более широкое применение, особенно в связи с реализацией государственной программы «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации».

Вместе с тем, предприятия по производству газобетона и газобетонных строительных конструкций, так же, как предприятия по производству других строительных материалов, располагаются в пределах населенных пунктов и характеризуются большими, значительно превышающими нормативы ПДВ, выбросами пыли в окружающую среду застроенных территорий.

Анализ научно-технической литературы и проектных решений показал, что по условиям технологии для решения задачи снижения пылепоступлений в городскую воздушную среду в рассматриваемом производстве возможна только сухая очистка пылевых выбросов, и что с этой целью чаще всего используются циклоны. Однако опыт эксплуатации систем обеспыливания на предприятиях отрасли показывает, что применяемые в настоящее время установки пылеочистки не обеспечивают необходимой степени уменьшения пылепоступлений. Особенно это относится к мелкодисперсным частицам  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ , содержание которых в атмосферном воздухе населенных мест в настоящее время регламентируется повышенными требованиями. Поэтому

актуальными являются исследования, направленные на разработку решений, обеспечивающих высокую степень сокращения поступлений пыли в атмосферный воздух при производстве газобетона и газобетонных строительных конструкций.

Работа выполнялась в соответствии с планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Ростовский государственный строительный университет» и ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет».

**Степень разработанности темы.** Вопросами защиты окружающей среды от негативного воздействия пылевых выбросов при производстве строительных материалов и конструкций занимались многие исследователи – Азаров В.Н., Балтеренас П.С., Банит Ф.Г., Бобровников Н.А., Богуславский Е.И., Мензелинцева Н.В., Минко В.А., Примаков А.В., Сидоренко В.Ф., Сергина Н.М. и другие. В некоторых из работ этих авторов приводятся схемы компоновки систем обеспыливания выбросов от организованных источников, которые предполагают использование практически всех типов пылеуловителей (сухих и мокрых циклонов, скрубберов, рукавных фильтров и электрофильтров). Однако, как уже отмечалось, в рассматриваемом производстве возможно применение только сухих методов очистки.

В настоящей работе проведены исследования по оценке влияния пылевых выбросов в производстве газобетона и строительных конструкций из него на качество атмосферного воздуха, по оценке фракционного состава пыли, поступающей в систему пылеочистки, содержащейся в выбросах и в атмосферном воздухе. Разработаны схемы компоновки системы обеспыливания и разработаны методические основы проведения расчетной оценки степени снижения выбросов пыли в атмосферный воздух при использовании предложенных схем. Проведена экспериментальная оценка степени снижения выбросов пыли в атмосферный воздух при использовании каждого из предложенных вариантов.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является обеспечение экологической безопасности производства газобетона и газобетонных

строительных конструкций посредством повышения эффективности систем для защиты городской воздушной среды от загрязнения пылевыми выбросами.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- анализ технологических процессов производства газобетона и строительных конструкций из него как источников загрязнения городской воздушной среды выбросами пыли;
- анализ существующих методов и средств обеспыливания выбросов в промышленности строительных материалов;
- проведение экспериментальных исследований по оценке влияния пылевых выбросов от источников цеха по производству газобетона и газобетонных блоков на качество воздуха нормируемых территорий, включающих: обследование систем локализации и очистки пылевых выбросов; инструментальное определение концентрации пыли в выбросах и в атмосферном воздухе; анализ фракционного состава пыли, образующейся при производстве газобетона и газобетонных блоков, поступающей в систему пылеочистки и в городской атмосферный воздух; изучение основных свойств исследуемой пыли; оценку уровня загрязнения городской воздушной среды частицами  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ ;
- разработка технических решений по снижению пылевых выбросов в атмосферу при производстве газобетона и газобетонных строительных конструкций;
- расчетная оценка степени снижения выбросов пыли в атмосферу при использовании предложенных решений;
- проведение опытно-промышленных испытаний для определения степени снижения пылепоступлений в окружающую среду, достигаемой в результате применения разработанных решений, а также для оценки энергозатрат на проведение процессов пылеочистки.

**Научная новизна:**

- получены системы расчетных уравнений для теоретической оценки степени снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду при использовании предложенных схем компоновки установок обеспыливания;

- предложена систематизация балансовых уравнений для унификации расчетной оценки степени снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду при использовании различных схем компоновки установок обеспыливания в производстве строительных материалов;

- по результатам экспериментальных исследований, проведенных в промышленных условиях, выявлены зависимости, характеризующие степень снижения пылевых выбросов в атмосферу при производстве газобетона и газобетонных блоков для двух вариантов компоновки системы пылеочистки;

- на основе результатов опытно-промышленных исследований получены зависимости для оценки энергозатрат на проведение процессов обеспыливания выбросов в атмосферу при производстве газобетона и газобетонных блоков для двух вариантов компоновки системы пылеочистки.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

- на основе анализа балансов пылевых и воздушных потоков в системах обеспыливания разработаны методические основы расчетной оценки степени снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду при использовании в производстве строительных материалов этих систем с различными схемами компоновки;

- применительно к проблематике диссертации результативно использованы: экспериментальные методики для оценки величины снижения массы пылепоступлений в окружающую среду при применении разработанных вариантов схем компоновки систем пылеочистки в производстве газобетона и газобетонных блоков; экспериментальные методики определения основных свойств пыли; методика микроскопического анализа фракционного состава пыли;

- приведены экспериментальные зависимости для оценки степени снижения пылевых выбросов в атмосферу, а также для оценки энергозатрат на

проведение процессов обеспыливания при производстве газобетона и газобетонных блоков для двух вариантов компоновки системы пылеочистки;

- изучено влияние технологических процессов производства газобетона и газобетонных блоков на уровень пылевого загрязнения городской воздушной среды;

- разработаны системы очистки пылевых выбросов в производстве газобетона и газобетонных блоков; новизна разработки подтверждена патентом РФ № 155711;

- определены пределы и перспективность практического использования разработанных систем очистки пылевых выбросов в производстве газобетона и газобетонных блоков;

- на промышленной базе ОП ООО «Масикс» проведены опытно-промышленные испытания предложенной системы обеспыливания выбросов.

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

**Положения, выносимые на защиту:**

- полученные системы расчетных уравнений для теоретической оценки степени снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду при использовании предложенных схем компоновки установок обеспыливания;

- предложенная систематизация балансовых уравнений для унификации расчетной оценки степени снижения пылевых выбросов в атмосферный воздух города при использовании различных схем компоновки установок обеспыливания в производстве строительных материалов;

- установленные по результатам экспериментальных исследований, проведенных в промышленных условиях, зависимости, характеризующие степень снижения пылевых выбросов в атмосферу при производстве

газобетона и газобетонных блоков для двух вариантов компоновки системы пылеочистки;

- полученные на основе результатов опытно-промышленных исследований зависимости для оценки энергозатрат на проведение процессов обеспыливания выбросов в атмосферу при производстве газобетона и газобетонных блоков для двух вариантов компоновки системы пылеочистки.

**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-технической конференции Industrial Engineering (Челябинск, 2016 г.); международной научно-технической конференции MATEC Web of Conferences International Science Conference SPbWOSCE-2016 «SMART City» (2017 г.г.); международной научной конференции International scientific conference EMSUDT-2017 «Energy Management for Sustainable Urban Development and Transport» (Черногория, 2017 г.); международных научно-практических конференциях «Строительство-2013. Строительство-2014. Современные проблемы промышленного и гражданского строительства» (г. Ростов-на-Дону, 2013 г. 2014 г.); VIII международной научно-практической конференции «Современная наука: тенденции развития» (г. Краснодар, 2014 г.); XIV международной научно-практической конференции «Приоритетные научные направления: от теории к практике» (г. Новосибирск, 2014 г.); международном форуме «Инновации в сфере жизнедеятельности человека XXI века (г. Ростов-на-Дону, 2016 г.); ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО

«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Волгоград, 2013-2015 г.г.); ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» (г. Ростов-на-Дону, 2013-2015 г.г.).

Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 21 работе, в том числе: в 3 статьях, опубликованных в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science; в 8 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях; в 1 патенте РФ.

# ГЛАВА 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Анализ технологических процессов в производстве газобетона и газобетонных блоков как источников выделения пыли в атмосферу города

Газобетон – универсальный современный строительный материал - является представителем семейства ячеистых бетонов [17, 27-29, 38, 39, 58, 100]. Газобетонные блоки могут использоваться при возведении зданий различного размера и назначения – от небольших бескаркасных загородных домов до высотных зданий, торговых и развлекательных комплексов, устроенных на каркасной основе. Параметры этого строительного материала обуславливают значительное уменьшение количества операций по возведению стен и перегородок, позволяя сократить время строительства и капитальные затраты [27-29]. Классификация газобетона в зависимости от назначения приведена в таблице 1.1 [38, 39, 100].

Таблица 1.1- Классификация газобетона по назначению

Назначение материала	Средняя плотность материала в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Общая пористость, %
Теплоизоляционный газобетон	300-500	более 75
Конструктивно-теплоизоляционный газобетон	500-900	55-75
Конструктивный газобетон	900-1200	40-55

Газобетон отличается долговечностью и высокой прочностью на сжатие – 28-40 кг/см<sup>2</sup>. Сухой автоклавный газобетон имеет коэффициент

теплопроводности 0,09-0,18 Вт/м·°С, следствием чего является низкая тепловая инерция материала [38, 39, 100]. Газобетон не горит и не поддерживает горение, и может в течение 3-7 часов выдерживать одностороннее воздействие огня [17, 27-29, 38, 39, 58, 100].

Газобетон может быть автоклавного и неавтоклавного твердения. Газобетон автоклавного твердения более прочен и дает меньшую усадку [38, 39, 100]. Неавтоклавный газобетон производится значительно реже, чем автоклавный.

В строительстве применяются газобетонные блоки (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Газобетонные блоки

В настоящее время производители предлагают газобетонные блоки плотностью 400 и 500 кг/м<sup>3</sup>. Класс прочности при сжатии газобетона плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> - В2,5, плотностью 500 кг/м<sup>3</sup> - В3,5. Стандартная высота блока – 250 мм, длина – 625 мм [100]. Гладкие газобетонные блоки плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> имеют ширину 150, 200, 240, 250, 300, 375, 400 и 500 мм. Ширина гладких газобетонных блоков плотностью 500 кг/м<sup>3</sup> - от 50 до 150 мм с величиной шага между размерами в 25 мм [100]. Блоки большего размера имеют ширину 200, 240, 250, 300, 375, 400 и 500 мм. Блоки с пазом и гребнем плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> выпускаются шириной 240, 250, 300 и 375 мм [100]. Стандартная толщина блоков, соединяющихся по типу паз-гребень,

плотностью 500 кг/м<sup>3</sup> - 175, 200, 240, 250, 300 и 375 мм. Оптимальная толщина стен из газобетона в климатических условиях средней полосы России составляет 375 – 400 мм [100].

Производство газобетонных блоков осуществляется по [17, 38]:

- станковому методу (формы под заливку газомассы расположены стационарно, газомассу к формам подвозит самоходный смеситель-активатор, передвигающийся по собственному рельсовому пути) [17, 38];

- стандово-конвейерному методу (формы под заливку газомассы могут передвигаться кран-балкой или погрузчиком, газомассу к формам подвозит самоходный смеситель-активатор по собственному рельсовому пути) [17, 38];

- конвейерному методу (формы под заливку газомассы подаются к смесителю-активатору по собственному конвейеру, смеситель-активатор расположен стационарно или имеет небольшую подвижность в зоне заливки) [17, 38].

В качестве исходных материалов для производства газобетона используются:

- цемент (поступает на предприятие в хопрах-цементовозах бункерного типа, вагонными поставками; хранится в силосах партиями отдельно по маркам и видам от различных поставщиков) [17, 38];

- известь кальциевая, тонкомолотая, негашеная, быстро и среднегасящаяся по [33] (поступает в хопрах бункерного типа; складировается и хранится в силосах партиями отдельно от различных поставщиков) [17, 38];

- песок кварцевый (складирование и хранение песка осуществляется отдельно в бункерах) [17, 38];

- алюминиевая паста, пудра (доставляется на предприятие автотранспортом; банки с алюминиевой пастой, пудрой хранятся на складе) [19];

- вода для бетонов и растворов по ГОСТ 23732 [38];

- гипс строительный по ГОСТ 125-79, камень гипсовый и гипсоангидритовый по ГОСТ 4013-82 [17, 38].

Технологическая схема производства газобетона и газобетонных блоков автоклавного твердения приведена на рисунке 1.2-1.4 [17, 27-29].

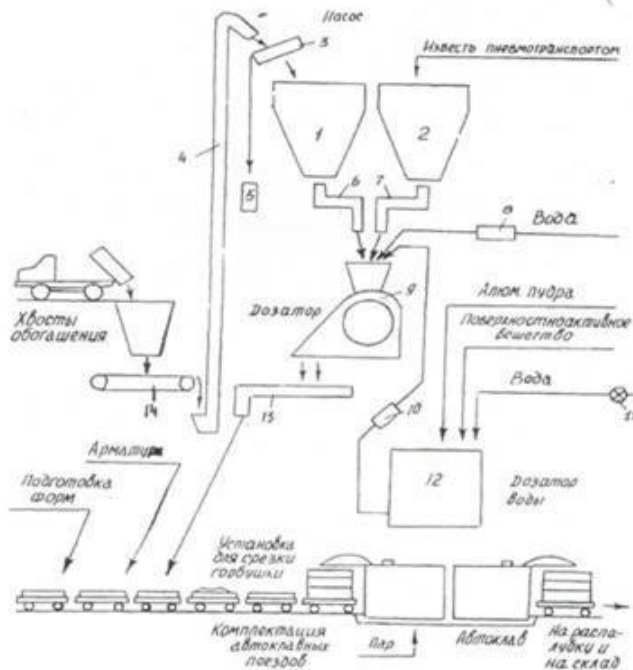


Рисунок 1.2 - Технологическая схема получения газобетона.

- 1 – бункер хранилищ; 2 – бункер извести; 3 – вибросито; 4 – элеватор;  
 5 – отходы; 6 – дозатор; 7 – дозатор извести; 8 – дозатор воды;  
 9 – дезинтегратор; 10 – дозатор алюминиевой суспензии; 11 – водомер;  
 12 – смеситель; 13 – разливочное устройство; 14 – питатель [17, 27-29]



Рисунок 1.3 - Технологическая схема производства газобетонных блоков [17, 27-29]

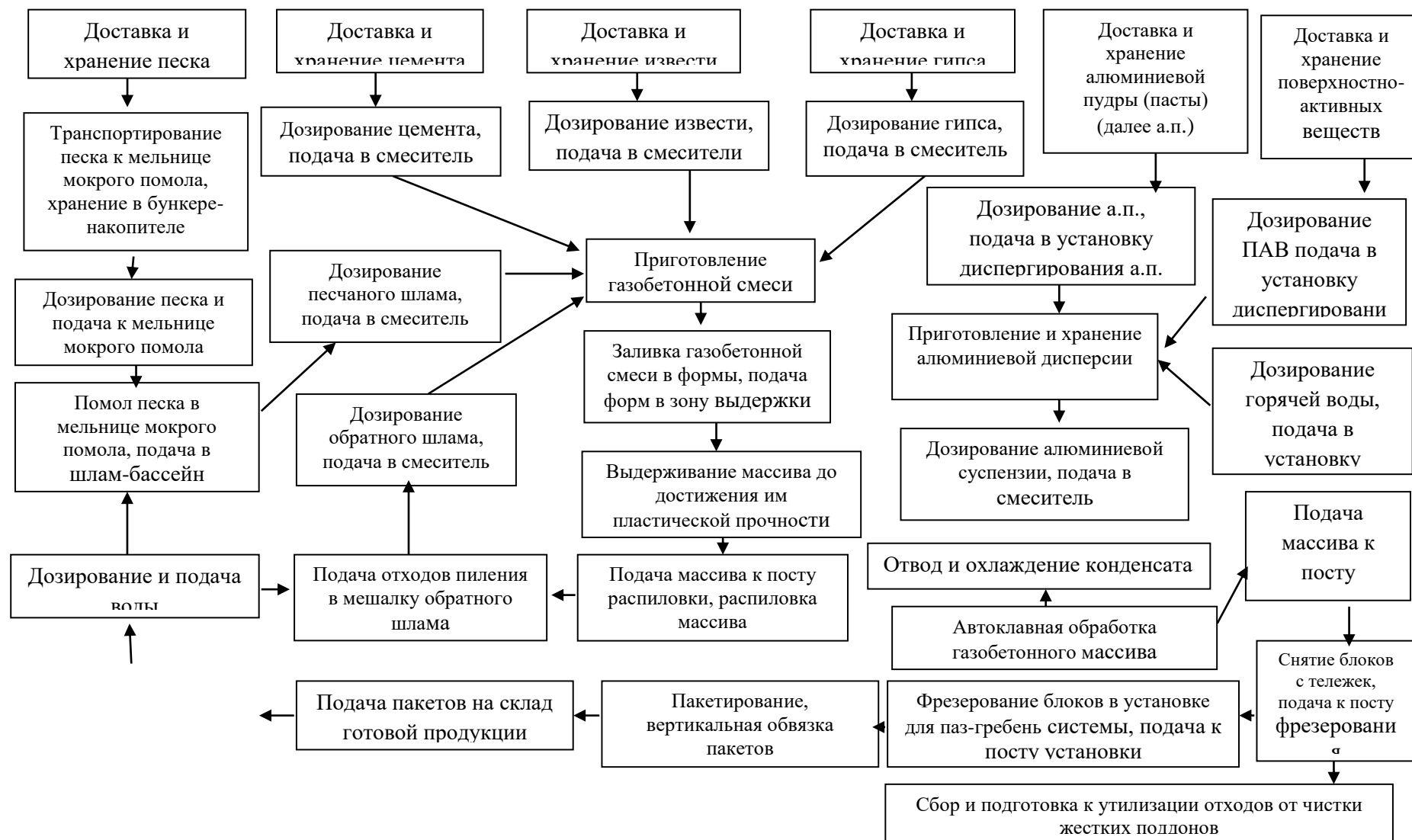


Рисунок 1.4 – Функциональная технологическая схема производства газобетонных блоков

Доставка песка осуществляется автомобильным транспортом из песчаных карьеров или ковшовым погрузчиком из открытых складов на территории предприятия в расходный бункер песка, далее в цеховой расходный бункер емкостью 5 м<sup>3</sup> и далее в мельницу мокрого помола для производства песчаного шлама [17, 27-29].

Цемент поступает в специальных железнодорожных вагонах - хопрах-цементовозах, оборудованных местами выкачки. Выкачивается с помощью компрессора в автоцементовозы, затем транспортируется в силос хранения емкостью 110 т. Из силоса хранения шнековым транспортером цемент подается в бункерные весы цемента смесительного отделения цеха по производству газобетонных блоков [17, 27-29].

Известь поступает от поставщиков в хопах бункерного типа и хранится в силосных емкостях. Из силоса хранения известь шнековым транспортером подается в бункерные весы извести смесительного отделения цеха по производству газобетонных блоков [17, 27-29].

Гипс поступает на предприятие в специальных полуприцепах-цементовозах и выкачивается с помощью компрессора в силос хранения емкостью 110 т. Из силоса хранения шнековым транспортером гипс подается в бункерные весы гипса смесительного отделения цеха [17, 27-29]. Гипс используется в качестве регулятора структурообразования, нарастания пластической прочности, ускорителя твердения и пластифицирующей добавки.

Песок подвергается помолу по мокрому способу в шаровой мельнице 2,0x10,5 м. Песчаный шлам перекачивается в шламбассейны емкостью по 250 т, где производится его усреднение, а затем центробежным насосом подается в бункерные весы шлама смесительного отделения цеха [17, 27-29].

Обратный шлам – это приготовленные отходы от резки массивов, которые накапливаются в приемке под линией резки массивов. Отходы, образующиеся при калибровке и профилировке газобетонных массивов, падают в лоток, находящийся в приемке под распиловочными машинами, смываются водой в

прямо́к с мешалкой и центробежным насосом и перемешиваются. Сюда же поступают промывочные воды, образующиеся при промывке разгрузочного устройства (распределителя) после каждого замеса. Под смесителем находится прямо́к с насосом объемом 5 м<sup>3</sup> для улавливания грязной воды после промывки [17, 27-29].. Затем промывочные воды при помощи винтового насоса из прямо́ка закачиваются в промывочную емкость на смесительной башне, откуда перекачиваются в прямо́к с мешалкой под линией резки, где происходит перемешивание и усреднение. После набора плотности 1,40-1,45 кг/м<sup>3</sup> обратный шлам закачивается в шламбассейны, откуда транспортируется в бункерные весы шлама [17, 27-29].

Алюминиевая паста (пудра) доставляется в отделение приготовления алюминиевой суспензии в цех газобетонных блоков автопогрузчиком в количестве, необходимом для обеспечения суточного производства. Приготовление алюминиевой суспензии с рабочей концентрацией осуществляется в специальной установке, состоящей из двух стальных баков емкостью по 1 т каждый с мешалками с двигателями и весовыми емкостями. Готовая суспензия перекачивается мембранным насосом в бункерные весы смесительного отделения цеха. При неиспользовании алюминиевой суспензии из бункерных весов происходит аварийный сброс в емкость, находящуюся за пределами здания цеха. В зависимости от исходного материала существуют особенности приготовления алюминиевой суспензии [17, 27-29]. Суспензия, изготавливаемая из алюминиевой пасты, получается при тщательном перемешивании расчетного количества пасты и воды, подогретой до температуры 40-50°C. Для приготовления суспензии из алюминиевой пудры смешивается необходимое количество пудры и предварительно подготовленного раствора воды с поверхностно-активным веществом в расчетном количестве. При этом подогретая вода и ПВА подвергаются предварительному перемешиванию в баке с мешалкой и весами [17, 27-29].

Приготовление газобетонной смеси происходит в смесителе, который стационарно установлен в смесительном отделении (башне). Управление

процессом дозирования и смесеприготовления осуществляется с центрального пульта смесительного отделения. На пульте управления находятся все контрольно-измерительные приборы для сырьевых компонентов. Система управления процессом дозирования и смесеприготовления с программной памятью работает автоматически и управляется компьютером. Расчет состава газобетонной смеси осуществляется компьютером по внесенным в программу расчета качественным показателям сырьевых материалов по результатам входного контроля [28, 29].

В бункерных весах (дозаторе) шлама сначала дозируется обратный шлам заданной плотности из шламбассейна. Затем дозируется песчаный шлам заданной плотности, также подаваемый из шламбассейна. В смеситель поступает смесь песчаного и обратного шлама, количество которой отдозировано согласно расчета. После дозирования горячая и холодная вода подается в дозатор шлама, промывает его, и затем в смесителе перемешивается со шламом. Водотвердое отношение смеси в среднем составляет  $B/T = 0,75$  [28, 29]. Затем за шламом и водой в смеситель из дозатора цемента поступает цемент, который перемешивается с этими компонентами. Далее в смеситель после дозирования в заданном количестве подается известь, и происходит ее перемешивание с поступившими ранее компонентами. После этого из дозатора в необходимом количестве в смеситель поступает гипс для перемешивания с остальными составляющими смеси [28, 29]. Перемешивание извести с другими компонентами происходит в течение 60 с. После этого из дозатора алюминия в смеситель для перемешивания поступает алюминиевая суспензия. Полученная смесь перемешивается еще 60 с. В целом весь процесс продолжается от 8 до 10 мин. [28, 29].

Приготовленная газобетонная смесь выгружается из смесителя через специальное разгрузочное устройство в предварительно смазанную форму, которая подается на формовку трансбордером под линией литья на ударный стол, если формование происходит по ударной технологии, или сразу

подается в камеру созревания, если формование происходило по литьевой технологии [28, 29]. Общий цикл формования массивов по ударной технологии до достижения максимальной высоты в зависимости от реологических свойств смеси не превышает 10-15 мин. По окончании процесса формования (процесс заканчивается полной стабилизацией вспученного массива) ударный стол отключается [28, 29].

В камере созревания газобетонная смесь схватывается, и сырец набирает пластическую прочность  $2,75-3,0 \text{ кг/см}^2$ , достаточную для транспортировки, кантования и распиловки массива. Время выдержки массива-сырца до начала кантования и распиловки составляет 3-5 ч [28, 29]. Из камеры созревания форма с массивом-сырцом подается трансбордером на выставочный путь в зону работы крана-кантователя. Захват кантователя подводится к цапфам формы, фиксируется и дальше кран перемещает форму к распиловочной тележке, после чего форма с массивом-сырцом кантуется на  $90^\circ$  и опускается отверждающим днищем на фиксаторы распиловочной тележки. Замки формы автоматически открываются и корпус формы отделяется от массива-сырца, а массив остается на отверждающем днище [28, 29].

Распиловочная тележка с массивом-сырцом на отверждающем днище подается под распиловочные машины. На первой распиловочной машине – станции боковой обрезки и профилировки струнами с диаметром 0,8 мм – осуществляется боковая вертикальная калибровка массива, а также специальными стальными ножами – нарезка различных профилей [28, 29]. Затем массив подается под вторую распиловочную машину – продольную пилу для горизонтальной продольной резки, где производится резка массива по толщине с шагом, равным 25 мм. Далее массив подается на третью распиловочную машину – поперечную пилу с вакуумным устройством для снятия горбушки фрезерования ручных захватов. Здесь распиловка массива осуществляется за счет опускающейся сверху вниз рамы со струнами, совершающими колебательные движения [28, 29]. После снятия вакуумным устройством верхняя горбушка сбрасывается в приямок для дальнейшей

переработки. Боковыми ножами удаляется вертикальная горбушка по торцам массива [27].

После резки массива-сырца на изделия заданных размеров распиловочная тележка продолжает двигаться под разгрузочный кран, который устанавливает массив на автоклавную тележку, находящуюся на выставочном пути. На автоклавную тележку устанавливают три массива на отверждающих днищах [27]. Скомплектованные автоклавные тележки с изделиями устройством подачи тележек загружают в автоклав. Режим автоклавной обработки блоков из газобетона следующий: подъем давления до 12,0 МПа – 2 ч; выдержка при 12,0 МПа – 8-9 ч; сброс давления – 1,5-2 ч. Общий цикл запаривания в пределах 13-11,5 ч [27].

После окончания процесса твердения и сброса давления в автоклаве его открывают. Автоклавные тележки с изделиями с помощью устройства подачи выгружаются из автоклава и подаются на выставочный путь, откуда загрузочным краном отверждающее днище с запаренными изделиями выставляется на роликовый транспортер. По роликовому транспортеру отверждающее днище с изделиями подается на делитель [27].

Разделение изделий в горизонтальной плоскости осуществляется послойно, снизу-вверх или сверху-вниз посредством захвата массива изделий с обеих сторон гидравлическими губками (колодками). Разделение проводится с целью ликвидации горизонтального слипания изделий, образовавшегося после автоклавной обработки. После делителя массив на отверждающем днище подается по роликовому транспортеру в рабочую зону пакетировщика [27].

Захватом пакетировщика снимается часть массива и устанавливается на промежуточный стол. После «поворота» захват устанавливает изделия на деревянный поддон, находящийся на цепном конвейере, по которому поддоны с изделиями подаются на пост упаковки и автоматической вертикальной обвязки пакетов [27].

Освобожденные отверждающие днища роликовым транспортом подаются на автоматическую станцию очистки отверждающих днищ. Специальными дисками подрезной слой дробится на куски, которые удаляются ножом на ленточный конвейер, по которому они подаются на дальнейшую переработку. После очистки отверждающие днища поступают в накопитель отверждающих днищ [27].

Из накопителя днища подаются на пост сборки форм, находящийся под краном-кантователем. Корпус формы транспортируется к устройству для обратной подачи днищ. Выполняется фиксация отверждающего днища к корпусу формы замками-фиксаторами, форма перемещается в исходную позицию к рельсовому пути, переворачивается краном-кантователем на 90° в горизонтальное положение, устанавливается на рельсовый путь и подается на пост смазки. Смазка формы производится вручную с помощью малярных валиков. Далее смазанная форма трансбордером подается под смеситель для очередной заливки [27-29].

Таким образом, приготовление газобетонной смеси для последующего производства блоков, включает в себя перемещение и загрузку в оборудование порошкообразных компонентов. Каждый из этих процессов сопровождается выделением пыли, которая затем выбрасывается в атмосферный воздух [49, 56].

## **1.2 Анализ методов и средств снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду при производстве строительных материалов**

Основные меры защиты атмосферы от загрязнений промышленной пылью при производстве строительных материалов предусматривают широкое использование пылеулавливающих аппаратов и систем [5, 14, 18-20, 23, 26, 31,

45, 46, 81, 83, 84, 87, 88, 94, 96, 98, 99, 104, 107, 108, 110, 111, 112, 116, 121, 125].

Для очистки пылевых выбросов в цехах по производству газобетона применяются сухие методы, т. к. это обусловлено технологией производства [27-29]. При использовании сухих пылеуловителей обычно применяют двухступенчатую очистку. Это обусловлено высокими концентрациями пыли и присутствием в ней крупных и тонких фракций. На первой ступени очистки чаще всего устанавливают циклоны различных типов, а на второй - рукавные фильтры [14, 18-20, 23, 26, 45, 57, 64, 74, 81, 83, 84, 86, 89, 90, 104, 107, 108, 110, 111, 112, 116, 121, 125].

Преимуществами циклонов являются простота конструкции, надежность работы, малые габаритные размеры, низкие энергозатраты и эксплуатационные расходы. Однако эффективность улавливания этими аппаратами пыли, образующейся при производстве строительных материалов, в большинстве случаев не достигает требуемых значений [14, 18-20, 23, 26, 45, 57, 74, 81, 83, 84, 86, 89, 90, 104, 107, 108, 110, 111, 112, 116, 121, 125].

Рукавные фильтры имеют ряд конструктивных особенностей, затрудняющих их эксплуатацию на производстве: сравнительно сложный и недостаточно надежный механизм встряхивания и обратной продувки, сложность сборки и замены рукавов. Кроме того, превышение рекомендуемой удельной воздушной нагрузки приводит к снижению эффективности пылеосаждения тканей [14, 18-20, 23, 26, 45, 57, 74, 81, 83, 84, 86, 89, 90, 104, 107, 108, 110, 111, 112, 116, 121, 125].

На рисунке 1.5-1.7 показаны схемы компоновки систем обеспыливания выбросов в атмосферу, применяемые в производстве извести [18-20, 94]. На рисунке 1.8, 1.9 показаны схемы систем обеспыливания, применяемые в производстве гипсового вяжущего.

На многих предприятиях строительной и других отраслей промышленности в системах обеспыливания выбросов в атмосферу

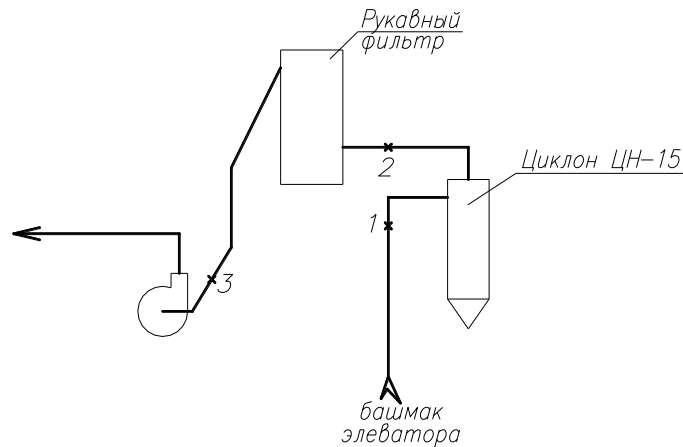


Рисунок 1.5 – Схема установки обеспыливания в системе аспирации  
от элеватора извести

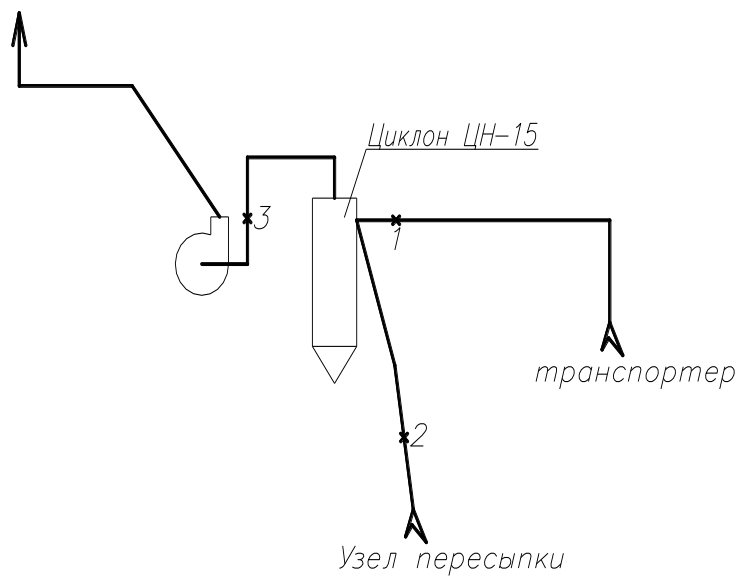


Рисунок 1.6 - Схема установки обеспыливания в системе аспирации  
от узла пересыпки и транспортера извести

применяются инерционные пылеуловители со встречными закрученными потоками (ВЗП), которые по сравнению с циклонами обладают рядом преимуществ [1-3, 5, 7, 11-13, 15, 30, 46, 52, 54, 55, 57, 58, 63-65, 67, 72, 73, 78, 82, 87, 88, 91-96, 98, 99, 101, 105, 108, 110, 113-115, 117, 126-128]. В частности, вихревые пылеуловители имеют более четкую организацию крутки (в нижней

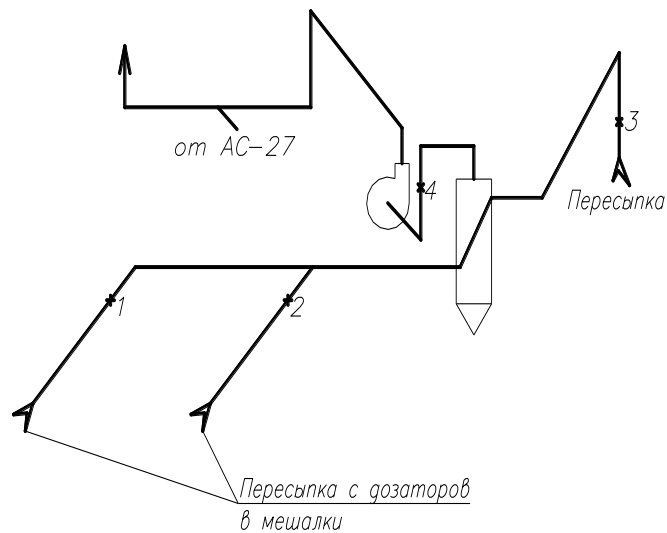


Рисунок 1.7 - Схема установки обеспыливания в системе аспирации от пересыпки из дозаторов в мешалки и пересыпки с транспортера на транспортер

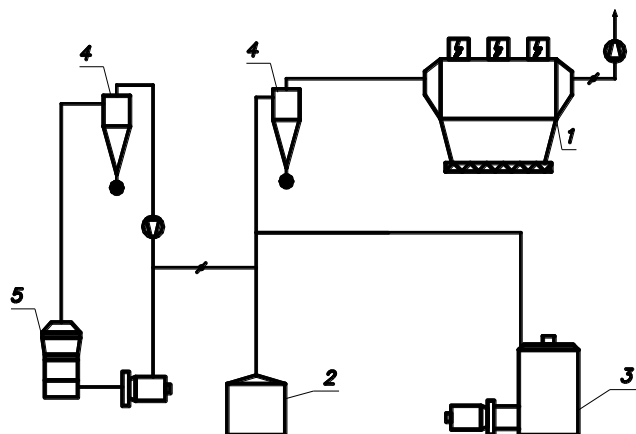


Рисунок 1.8 – Схема установки обеспыливания в системе аспирации, обслуживающей линию производства гипсовых вяжущих.

1 – электрофильтр; 2 – охладитель; 3 – гипсоварочный котел; 4 – циклон; 5 – мельница

части корпуса крутка поддерживается за счет закрученного вторичного потока). В цилиндрической части аппаратов происходит разделение на высоко- и низкоконтрированные потоки. Поток с повышенной

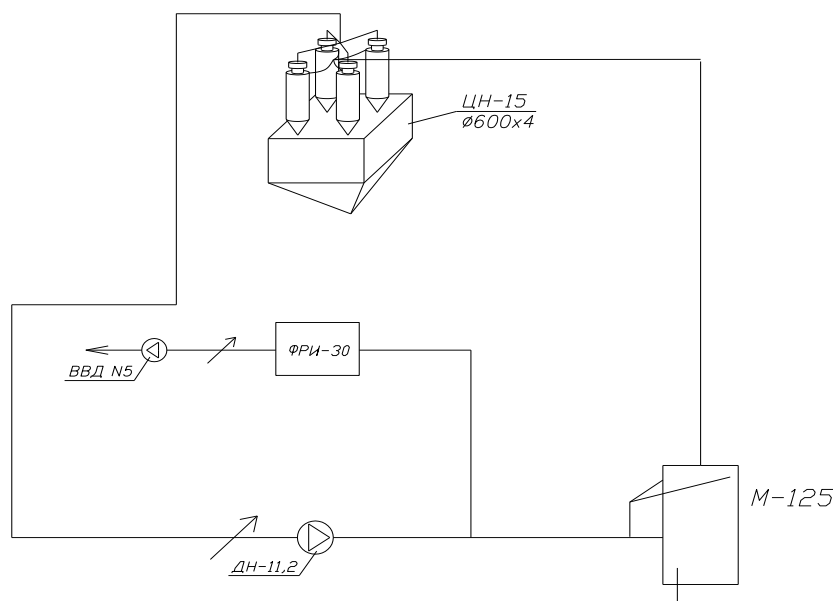


Рисунок 1.9 - Схема системы аспирации от мельницы в производстве гипса.

1 - мельница; 2 - батарея циклонов; 3 - рукавный фильтр; 4 - дымосос;  
5 – вентилятор

концентрацией вращается в периферийной зоне завихрителя, а поток с пониженной концентрацией - в центральной части. После выхода в сепарационную камеру низкоконтцентрированный поток оттесняет высококонтцентрированный поток к периферии аппарата, что обуславливает повышение эффективности улавливания [1-3, 5, 7, 11-13, 15, 30, 46, 52, 54, 55, 57, 58, 63-65, 67, 72, 73, 78, 82, 87, 88, 91-96, 98, 99, 101, 105, 108, 110, 113-115, 117, 126-128]. Опыт проектирования и эксплуатации систем с аппаратами ВЗП в стране и за рубежом показал их эффективную работу, меньшую степень абразивного износа, слабую чувствительность к колебаниям нагрузки по воздуху и концентрации пыли в очищаемом пылевоздушном потоке. Благодаря этому, вихревые инерционные аппараты со встречными закрученными потоками получили широкое распространение [[1-3, 5, 7, 11-13, 15, 30, 46, 52, 54, 55, 57, 58, 63-65, 67, 72, 73, 78, 82, 87, 88, 91-96, 98, 99, 101, 105, 108, 110, 113-115, 117, 126-128].

На рисунке 1.10 показаны принципиальные схемы компоновки установок обеспыливания с аппаратами ВЗП при организации отсоса из бункера пылеуловителя второй ступени [1, 41, 95, 97, 128].

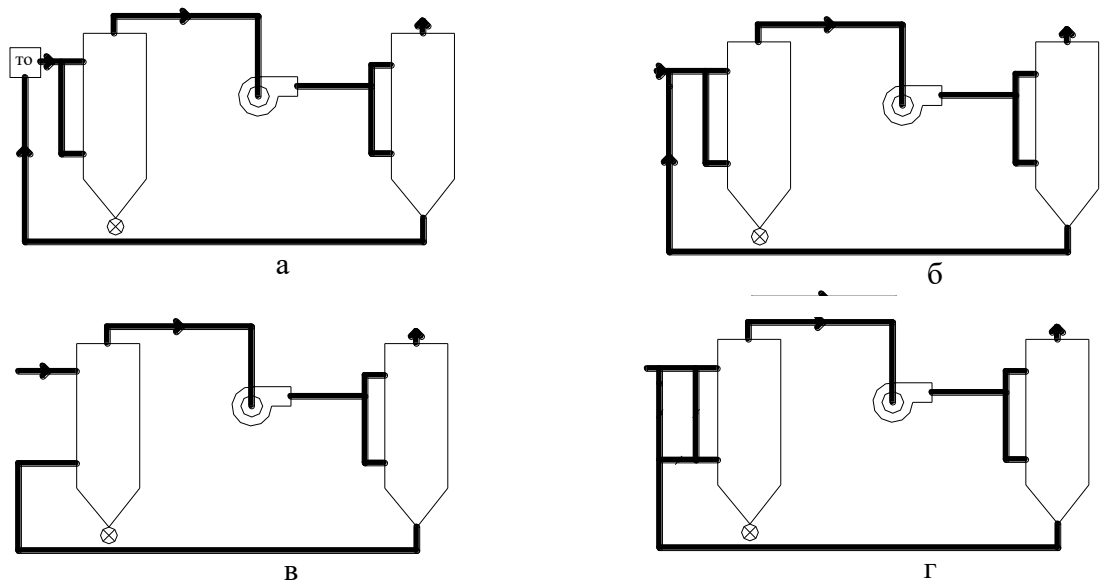


Рисунок 1.10 – Принципиальные схемы компоновки систем обеспыливания выбросов с аппаратами ВЗП с организованным отсосом из бункера пылеуловителя второй ступени при возврате уловленного продукта:  
а – в технологическое оборудование; б – в систему обеспыливания выбросов; в – в пылеуловитель первой ступени; г – комбинированный вариант [1, 41, 95, 97, 128]

При этом уловленный в пылеуловителе ВЗП второй ступени продукт может возвращаться либо в технологический процесс (рисунок 1.10, а), или в систему обеспыливания (рисунок 1.10, б), либо подаваться непосредственно на нижний ввод аппарата первой ступени [1, 41, 95, 97, 128]. При таком решении:

- предотвращается пылевыведение при выгрузке из аппарата уловленного продукта [1, 41, 95, 97, 128];
- уменьшается абсолютное значение давления в аппарате, что, в свою очередь, приводит к снижению выбивания пыли [1, 41, 95, 97, 128];

- исключается установка шлюзового питателя, что также обеспечивает уменьшение количества пыли, выбивающейся из пылеулавливающего аппарата [1, 41, 95, 97, 128];

- повышается надежность работы систем аспирации в результате снижения вероятности забивания пылеуловителя [1, 41, 95, 97, 128];

- подача воздуха, отсасываемого из бункера аппарата второй ступени, на нижний ввод пылеуловителя первой ступени обеспечивает в последнем уменьшение абсолютного значения давления и, вследствие этого, снижение подсосов воздуха [1, 41, 95, 97, 128].

Компоновка системы по схеме, показанной на рисунке 1.10, б, целесообразна при реконструкции существующих установок обеспыливания выбросов при объеме отсасываемого воздуха 10–15% от общего расхода, поступающего на очистку, с учетом производительности и напора установленного вентилятора [95, 128]. Компоновка системы по схеме, приведенной на рисунке 1.10, в, предпочтительнее при проектировании новых объектов [95]. Возврат уловленных порошкообразных компонентов в производственный процесс по воздуховоду системы, скомпонованной по схеме, показанной на рисунке 1.10, а, позволяет предотвратить пылевыведения при транспортировке материала от пылеуловителя к технологическому оборудованию [95].

Предложенные решения реализованы в системах для снижения выбросов пыли в городскую воздушную среду при производстве различных строительных материалов [1-3, 5, 46, 54, 57, 58, 76, 82, 87, 88, 94, 95-99, 101, 108, 110, 126]. Так, например, для производства керамзита в [46, 98] предложена установка пылеочистки, схема которой приведена на рисунке 1.11. В системе обеспыливания предусмотрена последовательная установка двух пылеуловителей ВЗП. Из бункера аппарата первой ступени организован отсос. Для очистки пылевоздушной смеси, отсасываемой из бункера первого основного аппарата, предназначен дополнительный аппарат с меньшим

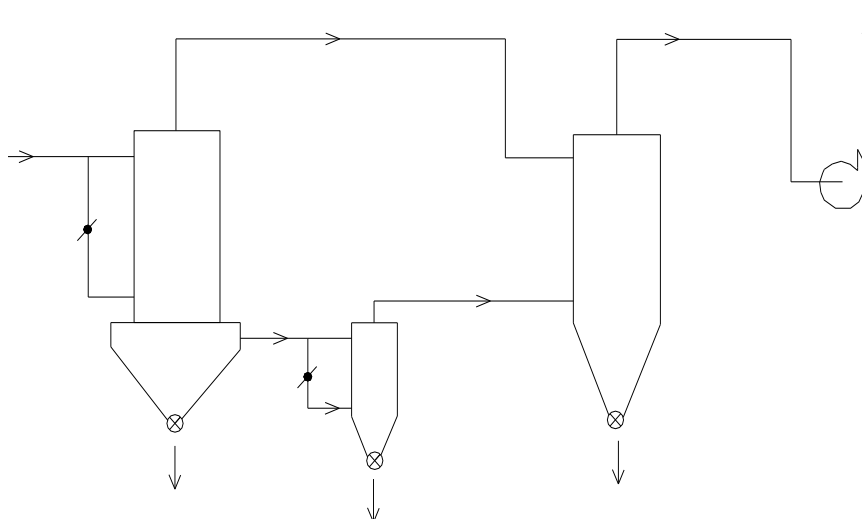


Рисунок 1.11 - Схема компоновки системы пылеочистки с вихревыми инерционными аппаратами на встречных закрученных потоках ВЗП для производства керамзита [46, 98]

диаметром, чем основные. После очистки в дополнительном аппарате воздух подается на нижний ввод пылеуловителя второй ступени [46, 98]. Уловленная пыль выгружается из бункеров всех трех аппаратов и возвращается в технологический процесс [46, 98].

Следует отметить, что для повышения эффективности циклонов также может быть применен отсос пылевоздушной смеси из бункера с последующей ее очисткой в аппарате ВЗП. Такие решения реализованы в производстве гипсового вяжущего (рисунок 1.12, 1.13).

На рисунке 1.12 показана схема системы локализации и очистки пылевых выбросов от мельницы и гипсоварочного котла в цехе производства гипса на ОАО «Кубанский гипс-Кнауф». При производительности системы 30 тыс. м<sup>3</sup>/ч пропуск пыли в атмосферу в зависимости от режима работы технологического оборудования изменяется в пределах 1,8-16% [99]. На рисунке 1.13 показана схема системы очистки выбросов от мельницы, установленная в цехе производства гипса на ОАО «Волгоградский гипс». При производительности системы 37 тыс. м<sup>3</sup>/ч пропуск пыли в атмосферу был снижен до 23-29% в зависимости от режима работы технологического оборудования [99].

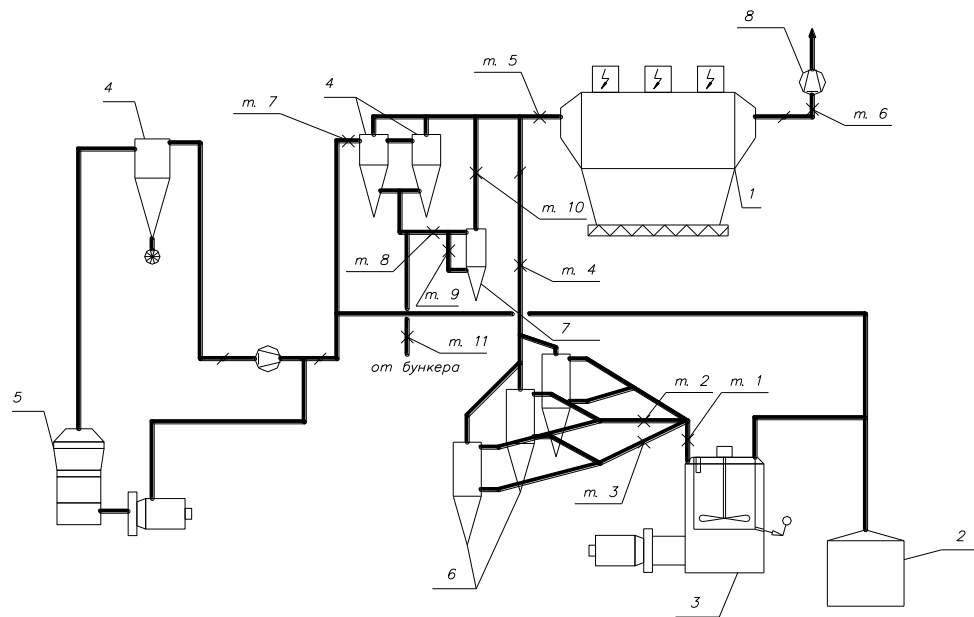


Рисунок 1.12 – Схема системы локализации и очистки пылевых выбросов от мельницы и гипсоварочного котла в цехе производства гипса.

1 – электрофильтр; 2 – охладитель; 3 – гипсоварочный котел; 4 – циклон;  
5 – мельница; 6 – аппарат ВЗП-600; 7 – аппарат ВЗП-400; 8 – вентилятор  
[99]

:

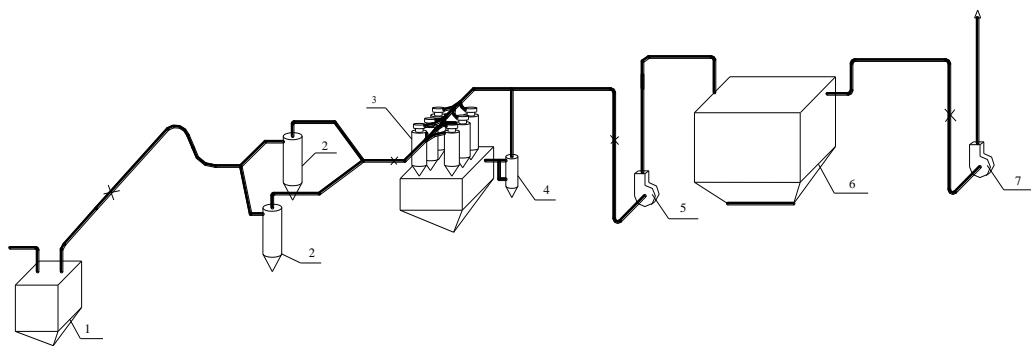


Рисунок 1.13 - Схема системы локализации и очистки пылевых выбросов от мельницы в цехе производства гипса [99].

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

Для производства извести предложены системы пылеочистки, схемы которых показаны на рисунке 1.14, 1.15 [87, 94, 108].

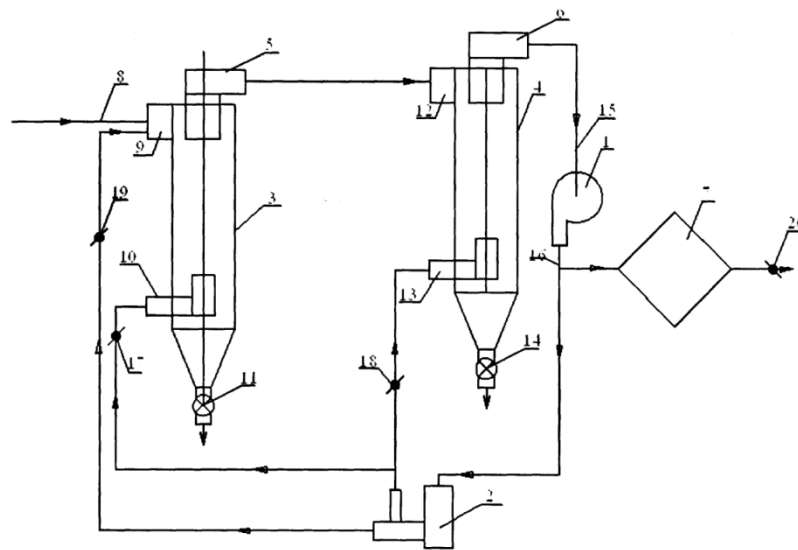


Рисунок 1.14 – Схема установки очистки пылевых выбросов для производства извести (первый вариант компоновки) [94].

- 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

Отличительной особенностью системы, схема которой приведена на рисунке 1.14, является: установка на выходе из инерционных аппаратов раскручивателей потока; использование разделителя-концентратора, вход которого через вентилятор подключен к выходу из раскручивателя потока аппарата ВЗП второй ступени, а его выход через регулировочные заслонки подключен к верхнему входу пылеуловителя первой ступени и к нижним входам аппаратов ВЗП первой и второй ступени; дополнительная установка тканевого фильтра для тонкой очистки выходящего из системы воздуха [87, 94, 108].

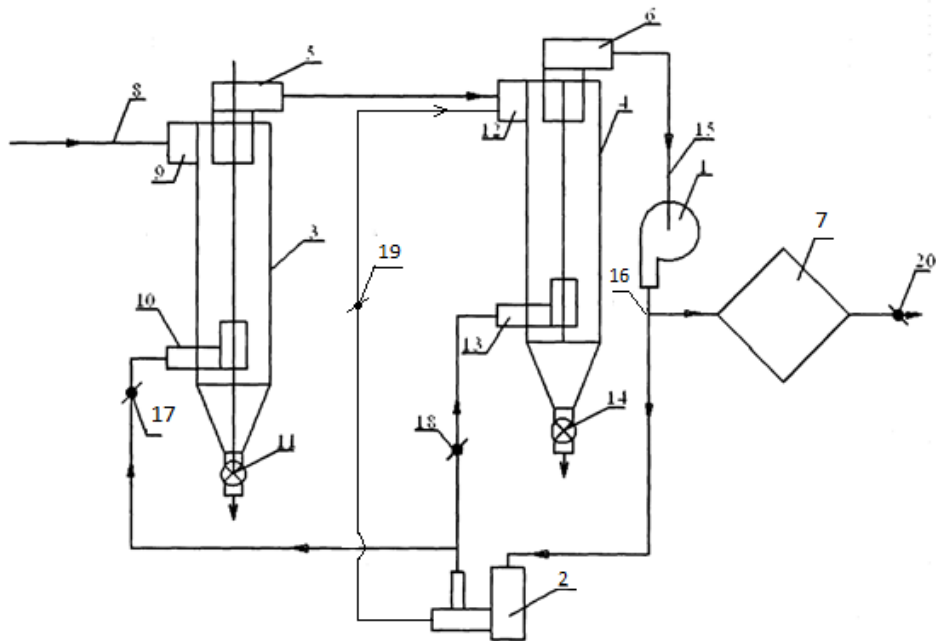


Рисунок 1.15 – Схема установки очистки пылевых выбросов для производства извести (второй вариант компоновки) [94].

- 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

Система, схема которой приведена на рисунке 1.15, состоит из тех же элементов, но отличается от предыдущей тем, что после разделителя-концентратора поток с меньшей концентрацией подается на нижние входы первого и второго вихревых пылеуловителей, поток с большей концентрацией – на верхний вход аппарата второй ступени. Повышению эффективности системы способствует установка тканевого фильтра, который обеспечивает тонкую очистку воздуха, а также применение разделителя-концентратора. Результаты ранее проведенных исследований [95, 96] показали, что при подаче разнозапыленных потоков на верхний и нижний входы пылеуловителя ВЗП повышается эффективность аппарата. При этом тканевый фильтр за счет установки инерционных аппаратов защищен от перегрузки по пыли, что

позволяет обеспечить устойчивую работу системы. Кроме того, понижено аэродинамическое сопротивление аппаратов ВЗП в результате установки раскручивателей, которые позволяют переводить энергию остаточной закрутки воздуха на выходе из пылеуловителя в энергию осевого движения потока [87, 94, 108].

### **1.3 Обоснование и выбор направления исследований**

В настоящее время в России реализуется государственная программа «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации», утвержденная постановлением правительства РФ от 15.04.2014 г. №323. Одной из целей этой программы называется повышение доступности жилья за счет увеличения объемов жилищного строительства, включая малоэтажное строительство, а также создание условий для увеличения объема капитального ремонта жилищного фонда с целью повышения его комфортности, энергоэффективности и экологичности.

В этой связи, очевидно, должно возрасти производство современных экологически чистых и имеющих высокую энергетическую эффективность строительных материалов, изделий и конструкций для жилищного строительства. Всем этим требованиям отвечает газобетон и строительные изделия на его основе, которые могут использоваться при возведении зданий различного размера – от небольших бескаркасных загородных домов до высотных зданий, торговых и развлекательных комплексов, устроенных на каркасной основе. Свойства этого строительного материала обеспечивают значительное уменьшение количества операций по возведению стен и перегородок, что позволяет сократить сроки строительства и капитальные затраты.

Однако большинство технологических операций в производстве газобетона и строительных конструкций из него сопровождается поступлением в атмосферный воздух значительного количества пыли. Вследствие этого, располагаясь на территории населенных пунктов, предприятия отрасли оказывают существенное негативное воздействие на качество городской воздушной среды. При этом в атмосферный воздух поступает пыль, характеризующаяся разнообразным составом: взвешенные вещества, известь, пыль неорганического гипсового вяжущего, пыль с различным содержанием диоксида кремния, цементная пыль и др.

Проведенный анализ показал, что для очистки пылевых выбросов в цехах по производству газобетона применяются сухие методы, т. к. это обусловлено технологией производства, и для этой цели чаще всего используются циклоны. Однако, несмотря на простоту конструкции, надежность работы, малые габаритные размеры, низкие энергозатраты и эксплуатационные расходы, эти аппараты, даже при двухступенчатой установке, не обеспечивают необходимой степени сокращения выбросов в атмосферу пыли, образующейся при производстве строительных материалов. Во многих случаях это приводит к превышению гигиенических нормативов по содержанию в атмосферном воздухе населенных пунктов частиц с размерами менее 10 мкм и 2,5 мкм.

В настоящее время на многих предприятиях строительной и других отраслей промышленности в системах обеспыливания выбросов в атмосферу применяют инерционные пылеуловители со встречными закрученными потоками (ВЗП), которые по сравнению с циклонами обладают рядом преимуществ. Опыт проектирования и эксплуатации систем с аппаратами ВЗП в стране и за рубежом показал их эффективную работу, меньшую степень абразивного износа, слабую чувствительность к колебаниям нагрузки по воздуху и концентрации пыли в очищаемом пылевоздушном потоке.

По данным некоторых авторов повышение эффективности пылеуловителей ВЗП может быть обеспечено при организации отсоса из

бункера и при подаче на нижний и верхний вводы потоков с разным содержанием пыли. Поэтому для организации разделения газопылевого потока на потоки с большей и меньшей концентрацией пылевых частиц может быть использована установка дополнительных аппаратов ВЗП.

Изложенное выше послужило основанием для выбора направления исследований по снижению уровня пылевого загрязнения городской воздушной среды на основе разработки и исследования компоновочных схем систем очистки пылевых выбросов для производства газобетона и газобетонных строительных изделий с использованием пылеулавливающих аппаратов на встречных закрученных потоков, с организацией отсоса из бункерной зоны пылеуловителей, и с установкой дополнительного аппарата на рециркуляционном воздуховоде.

#### **1.4 Выводы по первой главе**

1. Проведенный анализ показал, что большинство технологических операций в производстве газобетона и строительных конструкций из него сопровождается поступлением в атмосферный воздух значительного количества пыли, что оказывают существенное негативное воздействие на качество городской воздушной среды.

2. По результатам анализа методов и средств, применяющихся в промышленности строительных материалов для сокращения поступлений в атмосферу пыли, схожей по составу с пылью, образующейся при производстве газобетона и газобетонных блоков, установлено, что для этой цели применяются практически все виды пылеулавливающего оборудования.

3. В связи с особенностями технологии, для очистки пылевых выбросов на рассматриваемых предприятиях могут использоваться только сухие методы

очистки, чаще всего с установкой циклонов, которые не обеспечивают необходимой степени сокращений пылепоступлений в атмосферный воздух.

4. Обосновано и выбрано направление исследований по снижению уровня пылевого загрязнения городской воздушной среды при производстве газобетона и газобетонных строительных изделий

## **ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ИСТОЧНИКОВ ЦЕХА ПО ПРОИЗВОДСТВУ ГАЗОБЕТОННЫХ БЛОКОВ НА КАЧЕСТВО ВОЗДУХА НОРМИРУЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

### **2.1 Характеристика объекта и методика проведения исследований**

Экспериментальные исследования по оценке влияния пылевых выбросов от источников цеха по производству газобетонных блоков на качество воздуха городской среды проводились на действующем предприятии в г. Ростове-на-Дону. Общий вид территории предприятия представлен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Общий вид территории обследуемого цеха

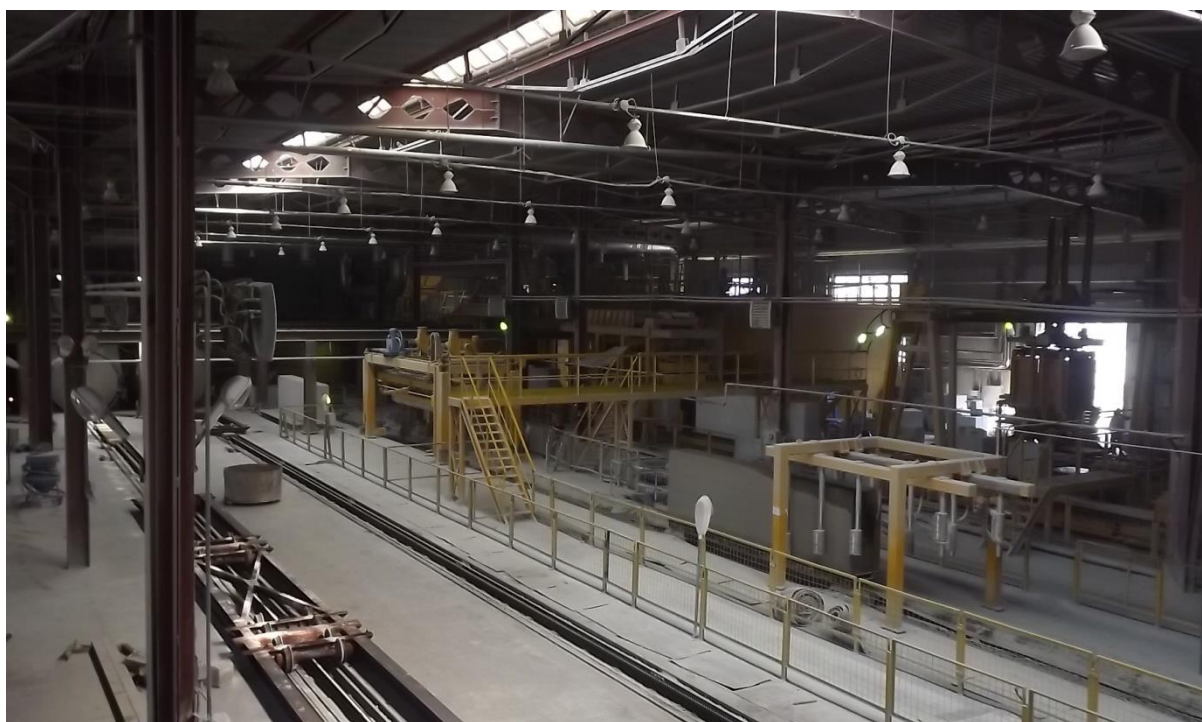


Рисунок 2.2 – Общий вид производственных помещений

Обследуемый цех предназначен для производства строительных блоков из газобетона автоклавного твердения. Производство ведется по стандартной технологии, описанной в п.п. 1.1. Сырьём для производства газобетонных блоков являются: цемент, известь, гипс строительный, песок кварцевый, алюминиевая паста (пудра). Производственная структура цеха включает в себя следующие операционные посты: химическая водоподготовка; приемное отделение; помольное отделение; отделение приготовления алюминиевой суспензии; смесительное отделение; пост заливки; пост созревания; линия резки; отделение автоклавной обработки; деление продукции и подготовка форм; пакетирование продукции и упаковка; склад готовой продукции; пост дробления подрезного слоя.

При проведении экспериментальных исследований по оценке влияния пылевых выбросов от источников цеха на качество воздуха городской среды оценивались: масса фактических пылевых выбросов в атмосферный воздух; фракционный состав и концентрация пыли, содержащейся в атмосферном воздухе на территории промплощадки и на границе санитарно-защитной зоны.

Для определения фактической массы пылевых выбросов применялось выражение

$$M = CL, \text{ г/с} \quad (2.1)$$

где  $C$  - концентрация загрязняющих веществ в воздуховоде, мг/м<sup>3</sup>;

$L$  - объемный расход газового потока в воздуховоде, м<sup>3</sup>/с.

Объемный расход газового потока в газоходе

$$L = vF, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.2)$$

где  $v$  - усредненная скорость газового потока в воздуховоде, м/с;

$F$  - площадь сечения воздуховода, м<sup>2</sup>.

Соответственно для определения выброса пыли проводились инструментальные замеры: диаметров воздухопроводов; давления в воздуховоде; температура воздушного потока; концентрация пыли в воздуховоде. Измерения проводились по стандартным методикам [34-37] и осуществлялись в следующей последовательности:

1. Подготовка оборудования для измерений (взвешивались фильтры; проверялись аспираторы и манометры; подготавливались газонапорные трубки и пробоотборные зонды).

2. Проверка штуцеров на воздуховодах и наличие электричества на месте проведения замеров.

3. Измерение диаметра воздуховода для определения площади его сечения в месте измерения.

4. Для определения усредненной скорости потока и объёмного расхода в воздуховодах - измерение динамического давления потока и определение скорости в точках по сечению воздухопроводов.

5. Измерение статического давления в воздуховодах.

6. Измерение температуры и атмосферного давления воздуха на площадке отбора.

7. Отбор проб пыли на фильтры в точках по сечению воздухопроводов, расчет скорости отбора проб через аспиратор для соблюдения условия изокINETичности отбора. Измерение температуры и скорости потока в

воздуховодах между отборами проб пыли (для контроля объёмного расхода в воздуховоде и соблюдения условия изокINETичности отбора).

8. Обработка результатов измерений, подготовка к анализу отобранных проб, проведение в лаборатории количественных анализов пыли в отобранных пробах (высушивание и взвешивание фильтров и др.). Расчет концентрации пыли в воздуховодах.

9. Определение массы выбросов пыли от источника. Расчет погрешности измерений.

Места для отбора проб и проведения измерений параметров потока выбросов выбирались с таким расчетом, чтобы эти измерения обеспечивали получение достоверных результатов. Измерительное сечение выбиралось на прямом участке воздуховода на достаточном расстоянии от мест, где изменяется направление потока газа (колена, отводы и т.д.) или площадь поперечного сечения воздуховода. Измерения проводились на вертикальных участках воздуховодов, в которых крупные фракции пыли не оседают на стенках воздуховодов под действием силы тяжести.

Для измерений аэродинамических характеристик потока использовались трубки Прандтля и манометр дифференциальный цифровой ДМЦ-01/М. Для измерения запыленности использовался стандартный комплект пылезабортного оборудования НИИОГАЗ (пробоотборная трубка (зонд) с наконечником, электроаспиратор Мигунова (модель 822), аэрозольные аналитические фильтры АФА, размещаемые в закрытом или открытом аллонже).

При проведении замеров на территории промплощадки и на границе санитарно-защитной зоны для измерения скорости ветра использовался анемометр цифровой ИСП-МГ4 (разработчик и изготовитель СКБ «Стройприбор») (диапазон измерения скорости 0,1-30 м/с). Для измерения температуры и относительной влажности наружного воздуха в точках отбора проб был использован термометр цифровой электронный RSTO6412/S412

(диапазон измерения температуры -  $50^{\circ}\text{C}$ - $70^{\circ}\text{C}$ ; диапазон измерения относительной влажности 1% -99%).

При оценке фракционного состава пыли применялась методика микроскопического анализа [4, 6, 8-10, 40, 61, 95]. Методика апробирована и рекомендована НИИ Атмосфера к использованию при проведении исследований содержания мелкодисперсных частиц пыли  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$  [68]. При обработке результатов микроскопического анализа использовалась программа обработки изображений частиц DUST 1, разработанная в ФГБОУ ВПО ВолгГАСУ и получившая свидетельство о государственной регистрации [85].

## **2.2 Результаты определения фактической массы пылевых выбросов в атмосферу от источников цеха**

На рисунках 2.3-2.6 приведены примеры устройства систем локализации выбросов пыли от некоторых видов технологического оборудования обследуемого цеха.

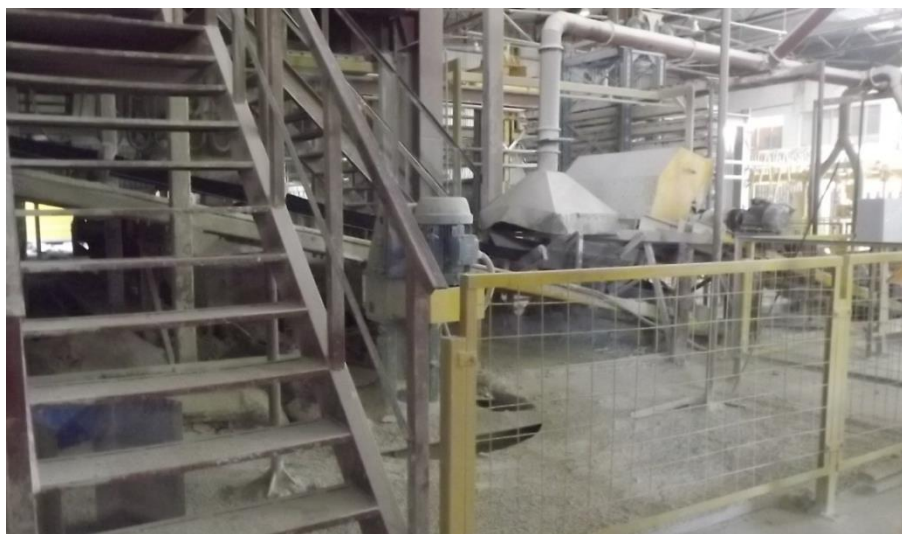


Рисунок 2.3 – Аспирация транспортера исходных материалов в приемном отделении



Рисунок 2.4 – Устройство аспирации на линии резки



Рисунок 2.5 – Аспирация транспортера обрезков к посту дробления



Рисунок 2.6 – Система локализации выбросов пыли от поста дробления

Для обеспыливания воздуха, поступающего в системы аспирации, применяется сухая очистка, которая осуществляется в циклонах ЦН-15, т. к. это обусловлено технологией производства.

Результаты исследований по оценке мощности пылевых выбросов в атмосферу приведены в таблице 2.1. Полученные данные свидетельствуют о том, что применяемые систем пылеочистки не обеспечивают необходимой степени обеспыливания выбросов, в результате чего масса пыли, выбрасываемой в атмосферный воздух, превышает норматив ПДВ.

### **2.3 Оценка фракционного состава пыли**

При разработке мероприятий по снижению массы пылевых выбросов в атмосферный воздух, был проведен анализ крупности пыли, выделяющейся от технологического оборудования при производстве газобетонных блоков.

Таблица 2.1 - Результаты экспериментальных исследований по оценке мощности пылевых выбросов в атмосферу

Аспирируемое оборудование	Производительность системы аспирации, $\text{м}^3/\text{ч}$	Концентрация пыли в удаляемом воздухе, $\text{г}/\text{м}^3$		Проскок пыли $\varepsilon_{\text{снст}}$ , %	Масса пыли, выбрасываемой в атмосферу, М, г/с	М/ПДВ
		на входе в систему обеспыливания	на выходе из системы			
Транспортер исходных материалов	4750	1,139	0,16	14,1	0,21	1,3
Транспортер обрезков	4000	4,21	0,4	9,4	0,44	2,1
Линия резки	6600	1,16	0,13	10,9	0,24	1,2
Пост дробления	7300	1,23	0,109	11,6	0,11	2,21



а



б

Рисунок 2.7 - Микрофотография частиц пыли, отобранной в системе аспирации от смесителя: а – до очистки в циклоне; б – после очистки в циклоне

Некоторые из полученных результатов приведены на рисунке 2.7-2.10. В качестве примера на рисунке 2.7 показаны микрофотографии частиц пыли, отобранной в системе аспирации от смесителя. На рисунке 2.8 в вероятностно-логарифмической сетке представлены интегральные функции прохода для частиц пыли, поступающей с систему аспирации от транспортера исходных материалов.

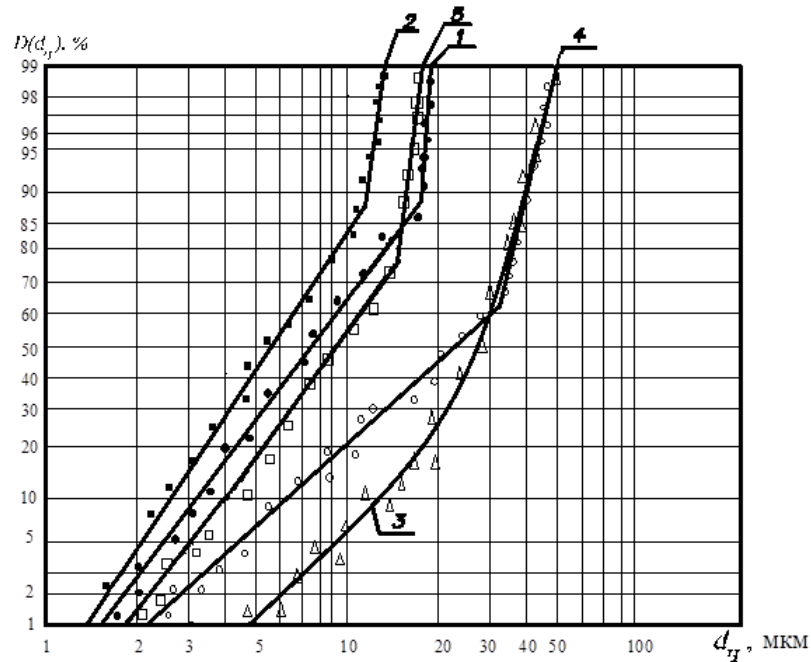


Рисунок 2.8 – Интегральные функции пофракционного распределения массы частиц пыли, поступающей с систему аспирации от транспортера исходных материалов.

1, 2 – при транспортировании извести до циклона и после циклона соответственно; 3-5 - при транспортировании песка, гипсового камня, цемента соответственно

Полученные данные показывают, что после используемой системы обеспыливания выбросов в атмосферный воздух поступает, например, пыль извести, частицы которой имеют медианный диаметр 5,5 мкм и диапазон изменения крупности от 1,5 до 15 мкм.

На рисунке 2.9 показана интегральная функция прохода, для частиц пыли, выбрасываемой после очистки в атмосферный воздух из системы аспирации, обслуживающей пост дробления.

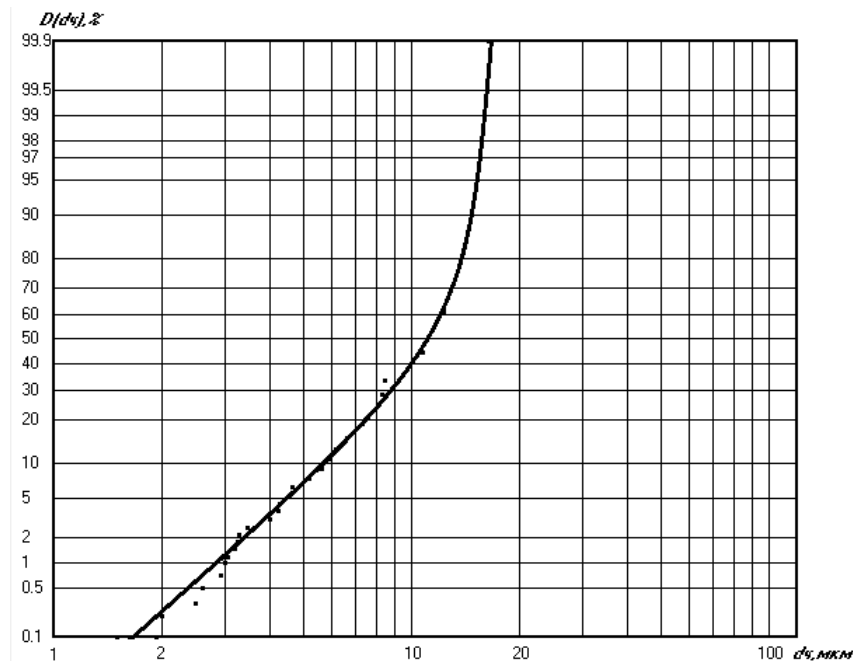


Рисунок 2.9 - Интегральная функция прохода, для частиц пыли, выбрасываемой после очистки в атмосферный воздух из системы аспирации, обслуживающей пост дробления

Таким образом, в атмосферный воздух от поста дробления поступают частицы пыли с медианным диаметром 12 мкм и диапазоном изменения размеров от 1,8 до 18 мкм [53].

На рисунке 2.10 приведены результаты оценки фракционного состава пыли, содержащейся в атмосферном воздухе на территории промплощадки в теплый период года. Анализ полученных данных показывает присутствие частиц мелкодисперсной пыли размером менее 10 мкм. Представленные результаты свидетельствуют о том, что значения доли частиц летом колеблются: для  $PM_{10}$  - от 12 % до 40 % ; для  $PM_{2,5}$  - от 0,3 % до 0,5 %. Медианный диаметр частиц составляет 11-15 мкм [53]. Размеры частиц

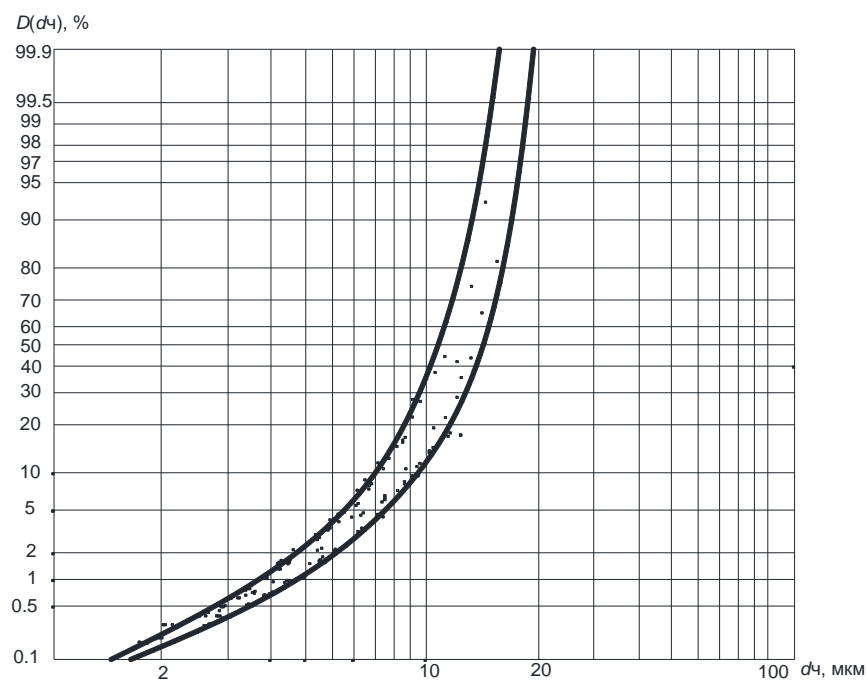


Рисунок 2.10 – Результаты оценки фракционного состава пыли, содержащейся летом в атмосферном воздухе на территории промплощадки

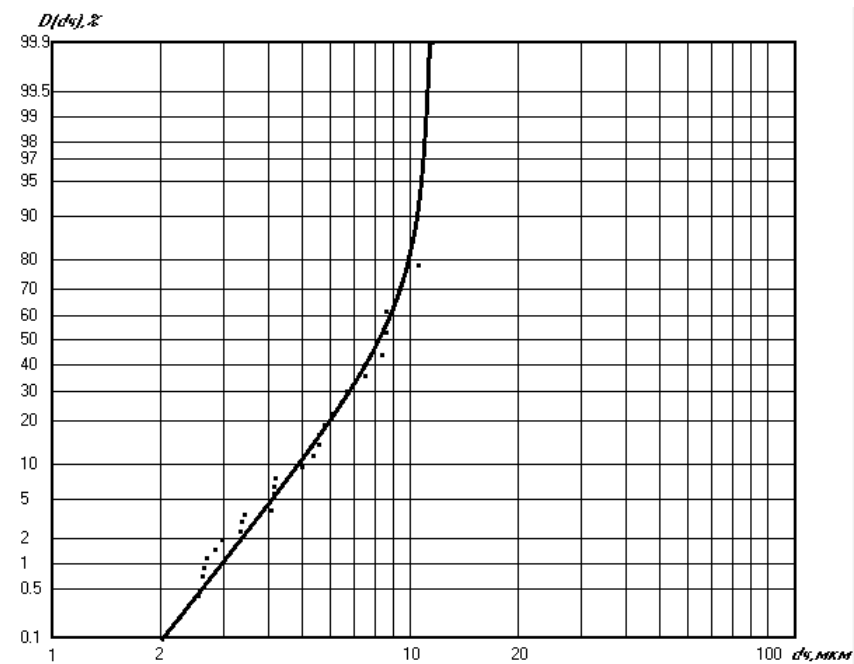


Рисунок 2.11 – Результаты оценки фракционного состава пыли, содержащейся летом в атмосферном воздухе на границе санитарно-защитной  
зоны

изменяются в пределах от 1,5 до 20 мкм [53].

На рисунке 2.11 представлены результаты дисперсионного анализа частиц пыли, содержащейся в атмосферном воздухе на границе санитарно-защитной зоны. Полученные данные также свидетельствуют о наличии в воздушной среде частиц с размерами менее 10 мкм. При этом на долю частиц  $PM_{10}$  приходится 80% массы пыли, на долю частиц  $PM_{2,5}$  – 0,5%. Пылевые частицы имеют медианный диаметр 8,2 мкм и пределы изменения размера от 2 мкм до 12 мкм [53].

## 2.4 Оценка концентрации пыли в выбросах в атмосферу и в атмосферном воздухе

Результаты измерений общей концентрации пыли в выбросах в атмосферу после систем обеспыливания приведены в таблице 2.2.

Для определения концентрации мелкодисперсных частиц с размерами менее 10 мкм и менее 2,5 мкм воспользуемся подходом, предложенным АО «Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха (НИИ «Атмосфера»))» и ООО «ПТБ Волгоградгражданстрой» [75, 76]. Имея результаты измерений общей концентрации пыли в выбросах от источника  $C_0^B$  и данные о фракционном составе частиц пыли в выбросах от источника, можно рассчитать концентрацию мелкодисперсных частиц по выражениям

$$C_{PM_{10}}^B = C_0^B D(d_q = 10 \text{ мкм}) \quad (2.3)$$

$$C_{PM_{2,5}}^B = C_0^B D(d_q = 2,5 \text{ мкм}) \quad (2.4)$$

Некоторые результаты определения концентрации частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ , содержащихся в выбросах от источников обследованного цеха по производству газобетонных блоков, представлены в таблице 2.2.

Результаты проведения измерений общей концентрации пыли в атмосферном воздухе показали, что средние значения этой величины в летний период составляют: на территории промплощадки - 0,8 мг/м<sup>3</sup>; на границе санитарно-защитной зоны – 0,44 мг/м<sup>3</sup>.

Используя выражения (2.3) и (2.4) и данные, приведенные на рисунке (2.10) и (2.11), получаем значения концентрации частиц РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>2,5</sub> в атмосферном воздухе (таблица 2.3).

Таблица 2.2 - Концентрация частиц РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>2,5</sub> в выбросах от источников цеха

Источник выброса	Общая концентрация, мг/м <sup>3</sup>	РМ <sub>10</sub>		РМ <sub>2,5</sub>	
		содержание, %	концентрация, мг/м <sup>3</sup>	содержание, %	концентрация, мг/м <sup>3</sup>
Система аспирации от транспортера исходных материалов	160	83	133	10	16
Система аспирации от поста дробления	109	40	43,6	0,5	0,55

Полученные данные свидетельствуют о том, что при производстве строительных блоков из газобетона в результате недостаточной степени обеспыливания выбросов может отмечаться превышение содержания частиц РМ<sub>10</sub>, предельно допустимая концентрация которых для воздуха населенных мест установлена 0,3 мг/м<sup>3</sup>. Превышение установленных нормативов по концентрации частиц РМ<sub>2,5</sub> не установлено.

Таблица 2.3 -

Концентрация частиц  $PM_{10}$  и  $PM_{2,5}$ 

в атмосферном воздухе

Место отбора проб	Общая концентрация, $мг/м^3$	$PM_{10}$		$PM_{2,5}$	
		содержание, %	концентрация, $мг/м^3$	содержание, %	концентрация, $мг/м^3$
Территория промплощадки	0,8	12-40	0,096-0,32	0,3-0,5	0,002-0,004
Граница санитарно-защитной зоны	0,44	80	0,32	0,5	0,0022

## 2.5 Исследование основных свойств пыли в производстве газобетона и газобетонных блоков

Применение метода микроскопии для дисперсионного анализа позволило, наряду с последним, провести изучение формы частиц пыли, выделяющейся при производстве газобетона и газобетонных блоков [40].

По результатам исследований установлено, что частицы пыли, образующейся при производстве газобетона, близка к шарообразной или вытянутая, продолговатая и характеризуется значениями геометрического фактора формы  $\Phi_r$  и коэффициента сферичности (коэффициента формы) от 1,061 до 1,564 и от 0,939 до 0,631 соответственно [53].

Для определения кажущейся плотности, представляющей собой массу единицы объёма частиц, включая объём закрытых пор, был использован манометрический способ [62, 103]. Метод основан на законе Бойля-Мариотта, согласно которому при одной и той же температуре произведение давления на

объём массы газа остаётся постоянным. Насыпная плотность пыли (т.е. масса единицы объёма порошкообразного материала, свободно насыпанного в какую-либо ёмкость непосредственно после её заполнения) определяется с помощью установки, состоящей из мерного цилиндра с прямым кольцом, воронки и штатива [62, 103].

По результатам исследований определено, что кажущаяся и насыпная плотность пыли, выделяющейся при производстве газобетона и строительных блоков из него, колеблется в пределах 200-1710 кг/ м<sup>3</sup> и 80-1100 кг/ м<sup>3</sup> соответственно [53].

Угол естественного откоса, т.е. угол между горизонтальной поверхностью и образующей конуса насыпанного на неё порошкообразного материала, является косвенным показателем, характеризующим комплексные свойства пыли - сыпучесть, аэрируемость, аркообразование [21, 62, 103]. Динамический угол естественного откоса (угол, под которым располагается наружная поверхность зернистого материала при падении частиц на плоскость) определялся методом насыпания порошка на диск, описанным в [62, 103]. Статический угол естественного откоса или угол обрушения (угол наклона поверхности материала, образующийся в результате обрушения слоя частиц при удалении подпорной стенки) определялся с помощью прозрачной прямоугольной ёмкости, имеющей открывающуюся боковую стенку [62, 103].

По полученным данным значения угла естественного откоса – динамического и статического – для исследуемой пыли изменяются в пределах 39-53 град и 44-73 град соответственно [53].

Диспергируемость изучаемой пыли определялась по известной методике Н. Е. Пестова [62]. Установлено, что пыль, образующаяся в производстве газобетона и газобетонных блоков, обладает высокой распыляемостью - от 45 до 88%. Также установлено, что исследуемая пыль характеризуется хорошей сыпучестью большой аэрируемостью и слабым аркообразованием [21, 53].

## 2.6 Выводы по второй главе

1. Исследованы и обобщены основные свойства пылевых частиц, поступающих в системы локализации и очистки выбросов при производстве газобетона и строительных газобетонных блоков.

2. По результатам проведенных исследований установлено, что исследуемая пыль обладает высокой пылеобразующей способностью и характеризуется хорошей сыпучестью. Проведённые исследования также показали, что пыль, образующаяся в рассматриваемом производстве, является полидисперсной. При этом основная доля частиц имеет форму, близкую к шарообразной, или вытянутую, продолговатую.

3. Полученные по результатам натурных исследований данные свидетельствуют о том, что в системы аспирации поступает пыль, от 25 до 100 % массы которой приходится на частицы с размерами до 20 мкм. При этом медианный диаметр изменяется от 5,5 мкм до 28 мкм, доля частиц с размерами менее 10 мкм ( $PM_{10}$ ) составляет от 6% до 65%.

4. Анализ полученных результатов, характеризующих дисперсный состав пылевых частиц, а также содержание частиц  $PM_{10}$  в выбросах и в атмосферном воздухе, позволяет сделать вывод о недостаточной фракционной эффективности пылеулавливающего оборудования, применяемого в системах пылеочистки.

5. Также установлено, что при использовании циклонов в установках обеспыливания выбросов при производстве газобетона и газобетонных блоков в атмосферном воздухе может отмечаться превышение содержания частиц  $PM_{10}$ .

# **ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ МАССЫ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ В ГОРОДСКУЮ ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГАЗОБЕТОНА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

## **3.1 Описание предлагаемых систем пылеочистки для производства газобетона**

Предлагаемые схемы компоновки обеспыливающей установки (рисунок 3.1, 3.2) разработаны [52, 55, 80, 106, 126, 128] (приложение А) с учетом результатов по исследованию режимов работы аппаратов ВЗП, ранее полученных авторами [1-3, 5, 41, 85, 86, 89-96, 98, 102, 105, 107, 110-112 ].

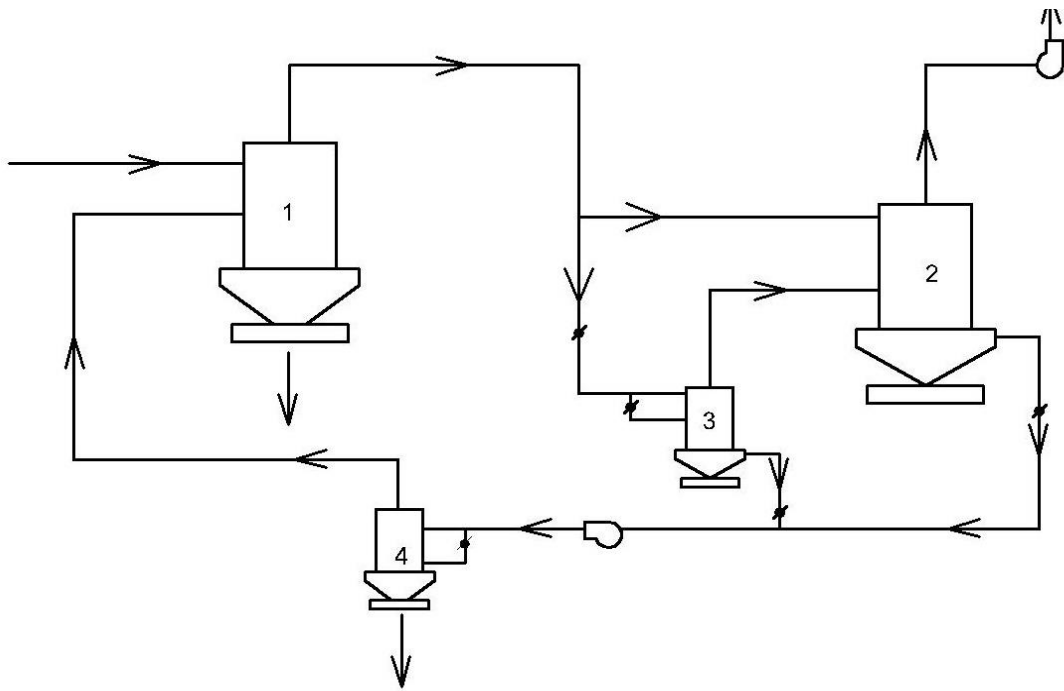


Рисунок 3.1 – Первый вариант схемы компоновки предлагаемой системы для снижения пылевых выбросов в атмосферный воздух с вихревыми инерционными аппаратами на встречных закрученных потоках ВЗП [106] (приложение А)

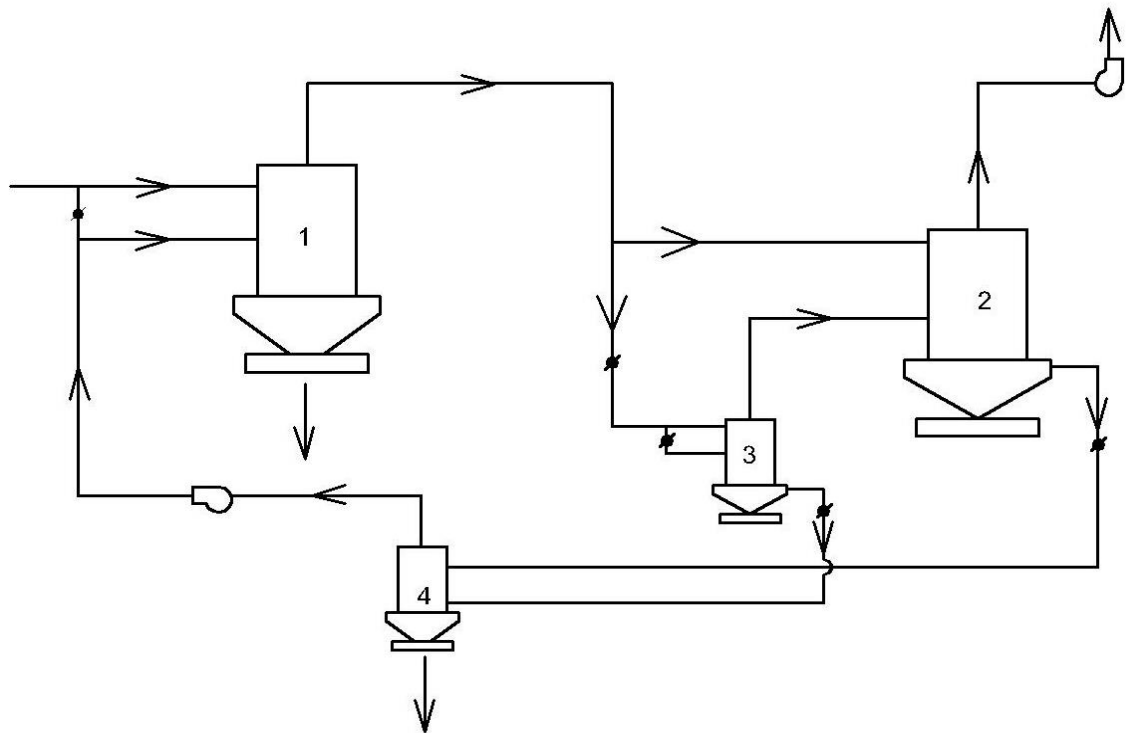


Рисунок 3.2 –Второй вариант схемы компоновки предлагаемой системы для снижения пылевых выбросов в атмосферный воздух с вихревыми инерционными аппаратами на встречных закрученных потоках ВЗП

В перечисленных работах установлено, что при организации отсоса из бункерной зоны инерционного аппарата эффективность последнего возрастает и снижается аэродинамическое сопротивление. Также выявлено, что эффективность аппарата ВЗП повышается при подаче на нижний ввод аппарата пылевоздушного потока с меньшей концентрацией, чем на верхний.

С учетом изложенного выше, предлагаемые системы включают в себя два последовательно установленных аппарата ВЗП. Из бункерной зоны пылеуловителя второй ступени и третьего (дополнительного) аппарата ВЗП с меньшим диаметром корпуса организуется отсос. Для очистки пылевоздушной смеси, отсасываемой из первого и третьего аппаратов, предусмотрена установка еще одного (четвертого) дополнительного пылеуловителя с меньшим диаметром корпуса, из которого после очистки воздух подается на нижний ввод пылеуловителя первой ступени. Уловленная

пыль выгружается из бункеров первого и четвертого аппаратов и возвращается в технологический процесс [54, 57, 109, 126, 128].

Поток пылевоздушной смеси поступает из системы локализации выбросов в верхний ввод вихревого пылеуловителя первой ступени 1. Выходящий из него после очистки поток разделяется, и подается на верхний ввод пылеуловителя второй ступени 2 и на вход дополнительного аппарата ВЗП 3.. Регулировка расходов пылевоздушной смеси осуществляется посредством шиберов. После очистки в аппарате 3 поток подается на нижний ввод пылеуловителя второй ступени 2. Таким образом, в верхний и нижний входы пылеуловителя 2 подаются потоки с разной концентрацией пыли. После очистки в аппарате второй ступени 2 воздух выбрасывается в атмосферу. Отсасываемая из бункера пылеуловителя 2 пылевоздушная смесь подается на очистку в четвертый дополнительный пылеуловитель 4, из которого после очистки воздух подается на нижний ввод пылеуловителя первой ступени 1. Таким образом, обеспечивается подача в верхний и нижний входы пылеуловителя 1 потоков с разным содержанием пыли [54, 57, 109, 126, 128].

На всех патрубках предусмотрена установка шиберов для осуществления регулировки пылевоздушных потоков с целью достижения эффективной работы системы.

Как показано на рисунке 3.1 и 3.2, при компоновке системы обеспыливания выбросов по первому варианту предполагается объединенная подача в аппарат 4 потоков пылевоздушной смеси, отсасываемой из бункеров пылеуловителя второй ступени 2 и дополнительного аппарата ВЗП 3 [54, 57, 109, 126, 128]. При компоновки установки пылеочистки по второму варианту рециркуляционный поток из бункера аппарата 2 подается на верхний вход аппарата 4, рециркуляционный поток из бункера аппарата - на нижний вход четвертого пылеуловителя [54, 57, 128].

Предлагаемые решения позволяют:

- вследствие организации отсоса из бункерной зоны повысить эффективность аппарата второй ступени, что приведет к повышению степени очистки всей системы в целом [54, 57, 128];
- вследствие организации отсоса из бункерной зоны снизить аэродинамическое сопротивление второго пылеуловителя, что предотвратит значительное возрастание потерь давления во всей системе, обусловленное установкой дополнительного оборудования [54, 57, 128];
- вследствие подачи на верхний и нижний входы пылеуловителей первой и второй ступени пылевоздушных потоков с разной концентрацией обеспечить повышение его эффективности, что, в свою очередь, приведет к возрастанию эффективности системы в целом и, соответственно, к большему снижению проскока пыли в атмосферу [54, 57, 128].

### **3.2 Теоретическая оценка эффективности предлагаемых систем для снижения выбросов пыли в городскую воздушную среду при производстве газобетона**

Для теоретической оценки эффективности предложенной обеспыливающей установки, скомпонованной по первому варианту (рисунок 3.1), по аналогии с [46, 94, 95, 97, 98, 127] составим расчетную схему системы (рисунок 3), в соответствии с которой составим системы балансовых уравнений пылевых и воздушных потоков [126, 128].

Система балансовых уравнений воздушных потоков имеет вид [126, 128]

$$\begin{cases} L_0 + L_4 = L_{\text{BX}3} + L_{\text{BX}2}^{\text{B}}; \\ L_{\text{BX}2}^{\text{B}} + L_{\text{BX}2}^{\text{H}} = L_{\text{ВЫХ}} + L_{\text{ОТС}2}; \\ L_{\text{BX}3} = L_{\text{BX}2}^{\text{H}} + L_{\text{ОТС}3}; \\ L_4 = L_{\text{ОТС}2} + L_{\text{ОТС}3}. \end{cases} \quad (3.1)$$

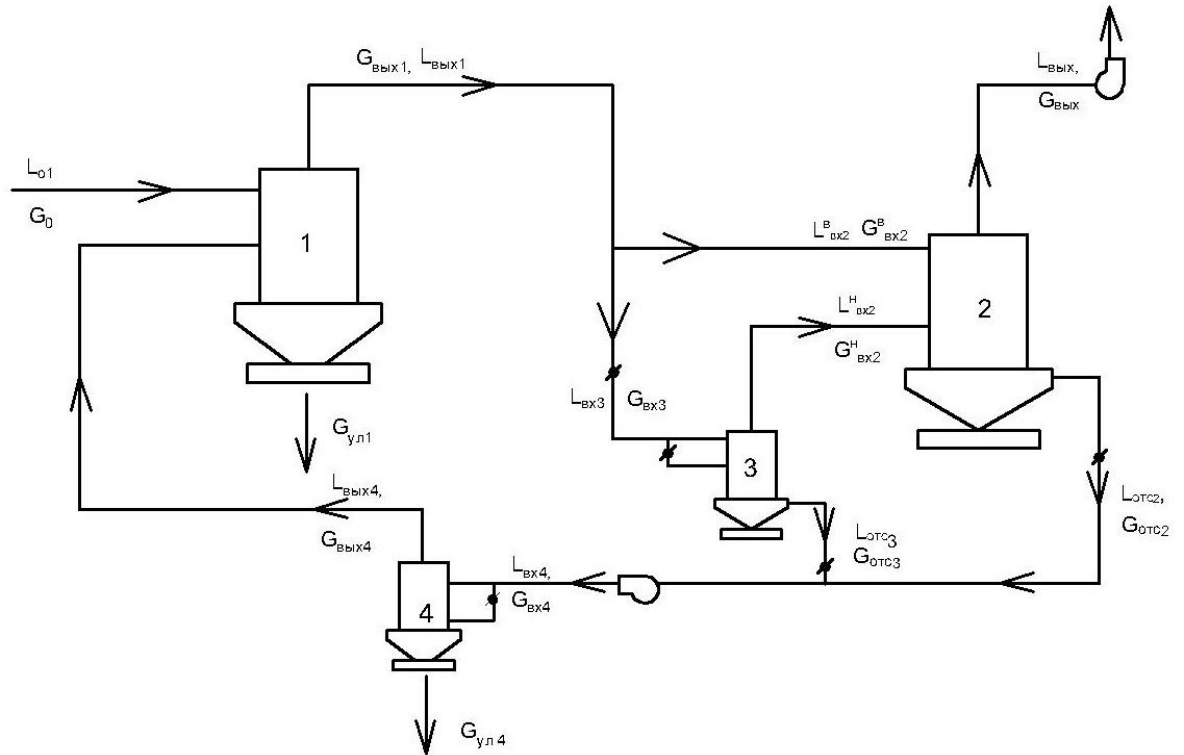


Рисунок 3.3 – Расчетная схема системы пылеочистки, скомпонованной по первому варианту

Система балансовых уравнений пылевых потоков [126, 128]

$$\left\{ \begin{array}{l} G_0 + G_4 = G_{\text{вых}1} + G_{\text{ул}1}; \\ G_{\text{вых}1} = \varepsilon_1 (G_0 + G_4); \\ G_{\text{вх}2}^B = \frac{L_2^B}{L_0 + L_4} G_{\text{вых}1}; \\ \frac{L_B}{L_0 + L_4} G_{\text{вых}1} = G_{22} + G_{34}; \\ G_{\text{вх}2}^B + G_{\text{вх}2}^H = G_{\text{вых}} + G_{\text{отс}2}; \\ G_{\text{вх}2}^H = \varepsilon_3 G_{\text{вх}3}; \\ G_{\text{вых}} = \varepsilon_2 (G_{\text{вх}2}^B + G_{\text{вх}2}^H); \\ G_{\text{вх}4} = G_{\text{вых}4} + G_{\text{ул}4}; \\ G_{\text{вх}4} = G_{\text{отс}2} + G_{\text{отс}3}; \\ G_{\text{вых}4} = \varepsilon_4 G_{\text{вх}4}. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

При этом

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1(L_0; L_4/L_0; G_4/G_0);$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2(L_{\text{BX}2}^{\text{H}}/L_{\text{BX}2}^{\text{B}}; L_{\text{отс}2}; G_{\text{BX}2}^{\text{H}}/G_{\text{BX}2}^{\text{B}});$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_3(L_{\text{BX}3}^{\text{H}}/L_{\text{BX}3}^{\text{B}}; L_{\text{отс}3});$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_4(L_{\text{BX}4}^{\text{H}}/L_{\text{BX}4}^{\text{B}}).$$

Таким же образом поступим для второго варианта компоновки установки обеспыливания. В этом случае расчетная схема системы будет иметь вид, представленный на рисунке 3.4.

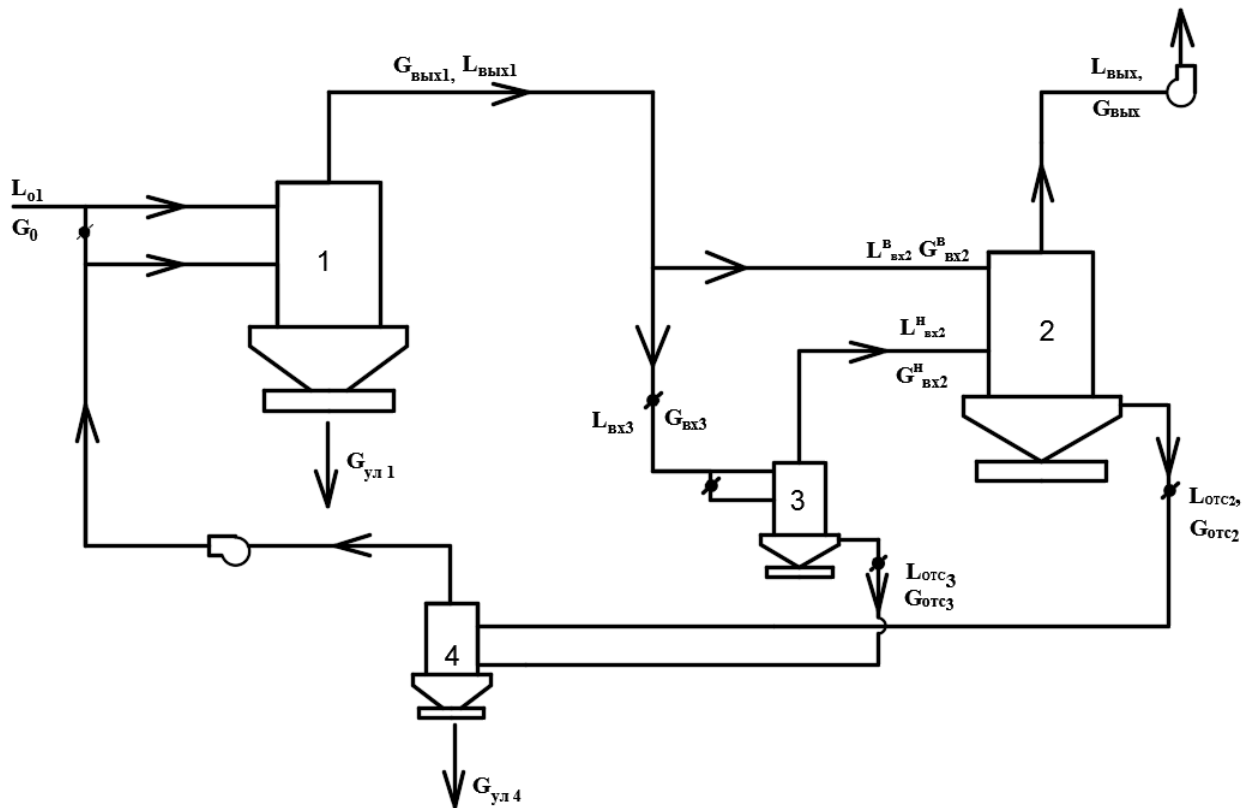


Рисунок 3.4 – Расчетная схема системы пылеочистки, скомпонованной по второму варианту

Системы балансовых уравнений воздушных и пылевых потоков для системы пылеочистки, скомпонованной по второму варианту также будут иметь вид (3.1) и (3.2). Однако в этом случае для проскока четвертого аппарата справедливо выражение

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_4(L_{\text{отс}2}/L_{\text{отс}3}; G_{\text{отс}2}/G_{\text{отс}3})$$

Полученная система, вообще говоря, является нелинейной системой 16 уравнений с 16 неизвестными. Нелинейными элементами в системе являются функции проскока  $\varepsilon_i$ . Эти функции зависят от: расхода воздуха, поступающего на очистку в аппарат  $L_i$ ; соотношения расходов  $L_i^B/L_i$ ,  $L_i^B/L_i$ ,  $L_{отс i}^B/L_0$ ; концентрации  $c_i$  на входе в  $i$ -ый аппарат.

Воспользуемся результатами экспериментальных исследований ряда авторов [2, 46, 94, 95] и представим функцию проскока  $\varepsilon_i$  в виде [126]

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{io} + a_1(\bar{L}_i - \bar{L}_{io})^2 + a_2(\bar{L}_{i \text{ нижн}} - \bar{L}_{i \text{ ниж } o}) + a_3(\bar{L}_{i \text{ отс } i} - \bar{L}_{i \text{ отс } o})^2 + a_4(c_i - c_{io})^2, (3.3)$$

Таким образом, перепишем константы и параметры в следующем виде [126]

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{io} + \sum_{i=1}^4 a_i(x_i - x_{io})^2 \quad (3.4)$$

где индексы  $i = 1, 2, 3, 4$  соответственно обозначают общий расход, долю расхода, поступающего в нижний вход, долю расхода, поступающего в отсос, концентрацию [126].

Обозначим аппараты ВЗП в схеме (рисунок 3.1-3.4) индексами  $j = 1 \div 4$ , где:  $j = 1$  соответствует основному аппарату ВЗП первой ступени;  $j = 2$  соответствует основному аппарату ВЗП второй ступени;  $j = 3$  соответствует вспомогательному аппарату на нижнем вводе в основной аппарат ВЗП второй ступени;  $j = 4$  соответствует вспомогательному аппарату для очистки воздуха, отсасываемого из бункеров аппаратов 2 и 3 (очищенные газы после него возвращаются на вход аппарата 1) [126].

Пусть индексы, характеризующие для каждого аппарата вход или выход, имеют вид:  $k = 1$  – верхний вход;  $k = 2$  – нижний вход;  $k = 3$  – отсос;  $k = 4$  – улавливание;  $k = 5$  – выход [126].

Разделим все уравнения системы (3.2) на  $G_0$  и примем обозначения:  $\bar{G}_4 = G_4/G_0$ ;  $\bar{G}_{\text{вых}1} = G_{\text{вых}1}/G_0$ ;  $\bar{G}_4 = G_4/G_0$ ;  $\bar{G}_{\text{вх}2}^B = G_{\text{вх}2}^B/G_0$ ;  $\bar{G}_{22} = G_{22}/G_0$ ;

$$\bar{G}_{34} = G_{34}/G_0; \bar{G}_{\text{BX}2}^{\text{H}} = G_{\text{BX}2}^{\text{H}}/G_0; \bar{G}_{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ВЫХ}}/G_0; \bar{G}_{\text{ОТС}2} = G_{\text{ОТС}2}/G_0; \bar{G}_{\text{ВХ}4} = G_{\text{ВХ}4}/G_0; \bar{G}_{\text{ВЫХ}4} = G_{\text{ВЫХ}4}/G_0; \bar{G}_{\text{УЛ}4} = G_{\text{УЛ}4}/G_0; \bar{G}_{\text{ОТС}3} = G_{\text{ОТС}3}/G_0 \text{ [126]}.$$

Тогда получаем [126]

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 + \bar{G}_4 = \bar{G}_{\text{ВЫХ}1} + \bar{G}_{\text{УЛ}1}; \\ \bar{G}_{\text{ВЫХ}1} = \varepsilon_1(1 + \bar{G}_4); \\ \bar{G}_2^{\text{B}} = \frac{L_2^{\text{B}}}{L_0 + L_4} \bar{G}_{\text{ВЫХ}1}; \\ \frac{L_{\text{B}}}{L_0 + L_4} \bar{G}_{\text{ВЫХ}1} = \bar{G}_{22} + \bar{G}_{34}; \\ \bar{G}_{\text{ВХ}2}^{\text{B}} + \bar{G}_{\text{ВХ}2}^{\text{H}} = \bar{G}_{\text{ВЫХ}} + \bar{G}_{\text{ОТС}2}; \\ \bar{G}_{\text{ВХ}2}^{\text{H}} = \varepsilon_3 \bar{G}_{\text{ВХ}3}; \\ \bar{G}_{\text{ВЫХ}} = \varepsilon_2(\bar{G}_{\text{ВХ}2}^{\text{B}} + \bar{G}_{\text{ВХ}2}^{\text{H}}); \\ \bar{G}_{\text{ВХ}4} = \bar{G}_{\text{ВЫХ}4} + \bar{G}_{\text{УЛ}4}; \\ \bar{G}_{\text{ВХ}4} = \bar{G}_{\text{ОТС}2} + \bar{G}_{\text{ОТС}3}; \\ \bar{G}_{\text{ВЫХ}4} = \varepsilon_4 \bar{G}_{\text{ВХ}4}. \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Теперь воспользуемся приведенными выше обозначениями для описания этой системы.

Для универсальности предлагаемого подхода расчетной оценки эффективности предлагаемых технических решений систематизируем все уравнения по трем группам [126]:

I группа - уравнения неразрывности [126]

$$y_{j1} + y_{j2} = y_{j3} + y_{j4}, \quad j=1, 2, 3, 4; \quad (3.6)$$

II группа – уравнения эффективности (проскока) [126]

$$y_{j4} = \varepsilon_j(y_{j1} + y_{j2}), \quad j=1, 2, 3, 4; \quad (3.7)$$

III группа – уравнения, характеризующие особенности компоновки системы [126]

$$\begin{array}{l} y_{11} = 1; \\ y_{12} = y_{44}; \\ y_{21} = k_{12}y_{14}; \\ y_{31} + y_{32} = (1 - k_{12})y_{14}; \\ y_{32} = k_{33}(y_{31} + y_{32}); \end{array} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}
y_{22} &= y_{34}; \\
y_{44} &= y_{23} + y_{33}; \\
y_{42} &= k_{44}(y_{23} + y_{33}).
\end{aligned}$$

Относительно  $y_{ji}$  ( $i = 1 \div 4$ ,  $j = 1 \div 4$ ) эта система является нелинейной, т.к. функции  $\varepsilon_i$  зависят от концентрации пыли и соответственно от величин  $y_{j1}$  и  $y_{j2}$ .

Для решения полученной системы составим вспомогательную таблицу 3.1 с коэффициентами уравнений, с помощью которой составим квадратную  $S$ -матрицу  $16 \times 16$  (рисунок 3.5) [126].

Обозначим как вектор  $Y$  вектор характеристик пылеуловителя, размерности 16 [126].

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{14} \\ y_{21} \\ y_{22} \\ y_{23} \\ y_{24} \\ y_{31} \\ y_{32} \\ y_{33} \\ y_{34} \\ y_{41} \\ y_{42} \\ y_{43} \\ y_{44} \end{pmatrix}$$

Обозначим как вектор  $B$  - вектор исходных данных, который составлен из свободных членов системы уравнений размерности 16 [126].

Таблица 3.1

1	2	3	4	5
$y_{11}$	$y_{12}$	$-y_{13}$	$-y_{14}$	0
0	0	0	0	$y_{21}$
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
$-\varepsilon_1 y_{11}$	$-\varepsilon_1 y_{12}$	0	$y_{14}$	0
0	0	0	0	$-\varepsilon_2 y_{21}$
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
$y_{11}$	0	0	0	0
0	$y_{12}$	0	0	0
0	0	0	$-k_{12} y_{14}$	$y_{21}$
0	0	0	$-(1 - k_{12}) y_{14}$	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Продолжение таблицы 3.1

6	7	8	9	10	11
6	7	8	0	0	0
0	0	0	0	0	0
$y_{22}$	$-y_{23}$	$-y_{24}$	$y_{31}$	$y_{32}$	$-y_{33}$
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
$-\varepsilon_2 y_{22}$	0	$y_{24}$	$-\varepsilon_3 y_{31}$	$-\varepsilon_3 y_{32}$	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	$y_{31}$	$y_{32}$	0
0	0	0	$-k_{33} y_{31}$	$(1 - k_{33}) y_{32}$	0
0	0	0	0	0	0
$y_{22}$	0	0	0	0	$-y_{33}$
0	$-y_{23}$	0	0	0	$-k_{44} y_{33}$

Окончание таблицы 3.1

12	13	14	15	16	17
0	0	0	0	0	<b>0</b>
0	0	0	0	0	<b>0</b>
$-y_{34}$	0	0	0	0	<b>0</b>
0	$y_{41}$	$y_{42}$	$-y_{43}$	$-y_{44}$	<b>0</b>
0	0	0	0	0	<b>0</b>
0	0	0	0	0	<b>0</b>
$y_{34}$	0	0	0	0	<b>0</b>
0	$-\varepsilon_4 y_{41}$	$-\varepsilon_4 y_{42}$	0	$y_{44}$	<b>0</b>
0	0	0	0	0	<b>1</b>
0	0	0	0	$-y_{44}$	<b>0</b>
0	0	0	0	0	<b>0</b>
0	0	0	0	0	<b>0</b>
0	0	0	0	0	<b>0</b>
0	0	0	0	0	<b>0</b>
$-y_{34}$	0	0	0	0	<b>0</b>
0	0	0	0	$y_{44}$	<b>0</b>
0	0	$y_{42}$	0	0	<b>0</b>

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ -\varepsilon_1 & -\varepsilon_1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_2 & -\varepsilon_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_3 & -\varepsilon_3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varepsilon_4 & -\varepsilon_4 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{12} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(1-k_{12}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{33} & (1-k_{33}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{33} & 0 & 0 & 0 & -k_{44} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Рисунок 3.5 -  $S$ -матрица

Тогда систему уравнений можно записать в следующем виде

$$SY = B$$

Если определитель матрицы не равен «нулю» ( $\|S\| \neq 0$ ), то вектор  $Y$  находится однозначно следующим образом

$$Y = BS^{-1},$$

где  $S^{-1}$ - матрица, обратная матрице  $S$ .

Величины полученных экспериментально коэффициентов  $k_{12}, k_{33}, k_{44}$  зависят от соотношения расходов и выбираются из требований оптимальности для пыли в производстве газобетона. При этом  $k_{12} = 0,7; k_{33} = k_{44} = 0,28$ .

Перепишем систему в виде, удобном для ее решения методом последовательных приближений

$$SY = B \rightarrow Y = BS^{-1} \quad (3.9)$$

Блок-схема решения этой задачи приведена на рис.3.6 [126].

Первоначально выбираем значения  $G_0, L_0, k_{12}, k_{33}, k_{44}$ . Затем задаем значение  $\varepsilon_i$  из расчета, что входная концентрация в аппарат  $c_{j1} = c_0$  и  $c_{j2} = c_0$ . Затем строим матрицу  $S$ . Находим обратную матрицу  $S^{-1}$ . Вычисляем вектор  $Y$ . Из уравнения находим эффективность всей системы как

$$\frac{y_{24}}{y_{11}}$$

Для всех  $j = 1 \div 4$  вычисляем значения [126]

$$\varepsilon_j = \frac{y_{j4}}{y_{j1} + y_{j2}}$$

Если для всех  $j$  выполняется условие

$$|\varepsilon_{j\text{нов}} - \varepsilon_{j\text{стар}}| < 0,001, \quad (3.10)$$

то решение найдено, и эффективность системы  $\varepsilon$  определена. Если условие не выполняется, то вычисляем новые значения  $y_i$ , переходим вверх и снова проводим вычисления, до тех пор, пока условие (3.9) не будет выполняться.

Для сходимости решения важен выбор первого приближения, то есть набор  $\varepsilon_j$ , где  $j = 1 \div 4$ . В качестве первого приближения выбираем для всех  $j =$



Рисунок 3.6 - Блок-схема решения задачи [126]

Таким образом, полученное значение  $\varepsilon$  системы позволяет при заданных соотношениях расхода внутри системы рассчитать эффективность всей системы. При этом величина  $\varepsilon_1$  существенно зависит от расхода  $L_0$ , соотношения расходов  $L_4/L_0$ , соотношения концентраций  $c_4/c_0$ , размера  $d_{50}$  на входе в первый пылеуловитель [126].

Аналогично  $\varepsilon_j$  зависит от параметров на входе в этот пылеуловитель и величины отсоса из пылеуловителей (это относится к 3 и 4 пылеуловителю).

### 3.3 Выводы по третьей главе

1. Для сокращения пылепоступлений в атмосферный воздух при производстве газобетона и газобетонных строительных конструкций разработаны два варианта схем компоновки установок обеспыливания с аппаратами ВЗП, организацией отсоса из бункеров пылеуловителей и установкой дополнительного пылеулавливающего аппарата на рециркуляционном воздуховоде.

2. Получены балансовые уравнения для расчетной оценки эффективности предложенных установок очистки пылевых выбросов.

3. Для универсальности расчетной оценки степени снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду при использовании различных схем компоновки установок обеспыливания предложена систематизация балансовых уравнений.

4. Разработана блок-схема расчетной оценки эффективности предложенных установок очистки пылевых выбросов.

## **ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ В ГОРОДСКУЮ ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ГАЗОБЕТОНА**

### **4.1 Экспериментальная установка и методика проведения исследований**

Для проведения в экспериментальных исследованиях по оценке проскока пыли и энергозатрат на проведение процесса очистки пылевых выбросов для предложенных вариантов компоновки систем пылеочистки были смонтированы установки, схемы которых показаны на рисунках 4.1 и 4.2.

Основными элементами установок являются: вихревые инерционные аппараты со встречными закрученными потоками ВЗП первой и второй ступени, имеющие диаметр цилиндрического корпуса 800 мм; дополнительные пылеуловители ВЗП с варьирующимся диаметром корпуса; рукавный фильтр; вентиляторы. Пылеулавливающие аппараты 1-4 снабжены пылесборниками 5-8 для приема уловленной пыли. Соотношение расходов пылевоздушной смеси в верхних и нижних входах вихревых пылеуловителей, а также доля расхода, отсасываемого из бункеров пылеуловителей 2 и 3, регулируются шиберами. Для проведения измерений аэродинамических характеристик и отбора пылевых проб воздухопроводы снабжены замерными штуцерами, герметичность которых обеспечивалась завинчивающимися крышками.

При проведении экспериментальных исследований замеры проводились по принятым методикам в соответствии с [34-37, 46, 65]. По величинам давлений, измеряемых в воздухопроводах при помощи трубок Прандтля и дифференциальных цифровых манометров ДМЦ-01/М, определялись: общий расход воздуха в установке; соотношение расходов пылегазовой смеси в

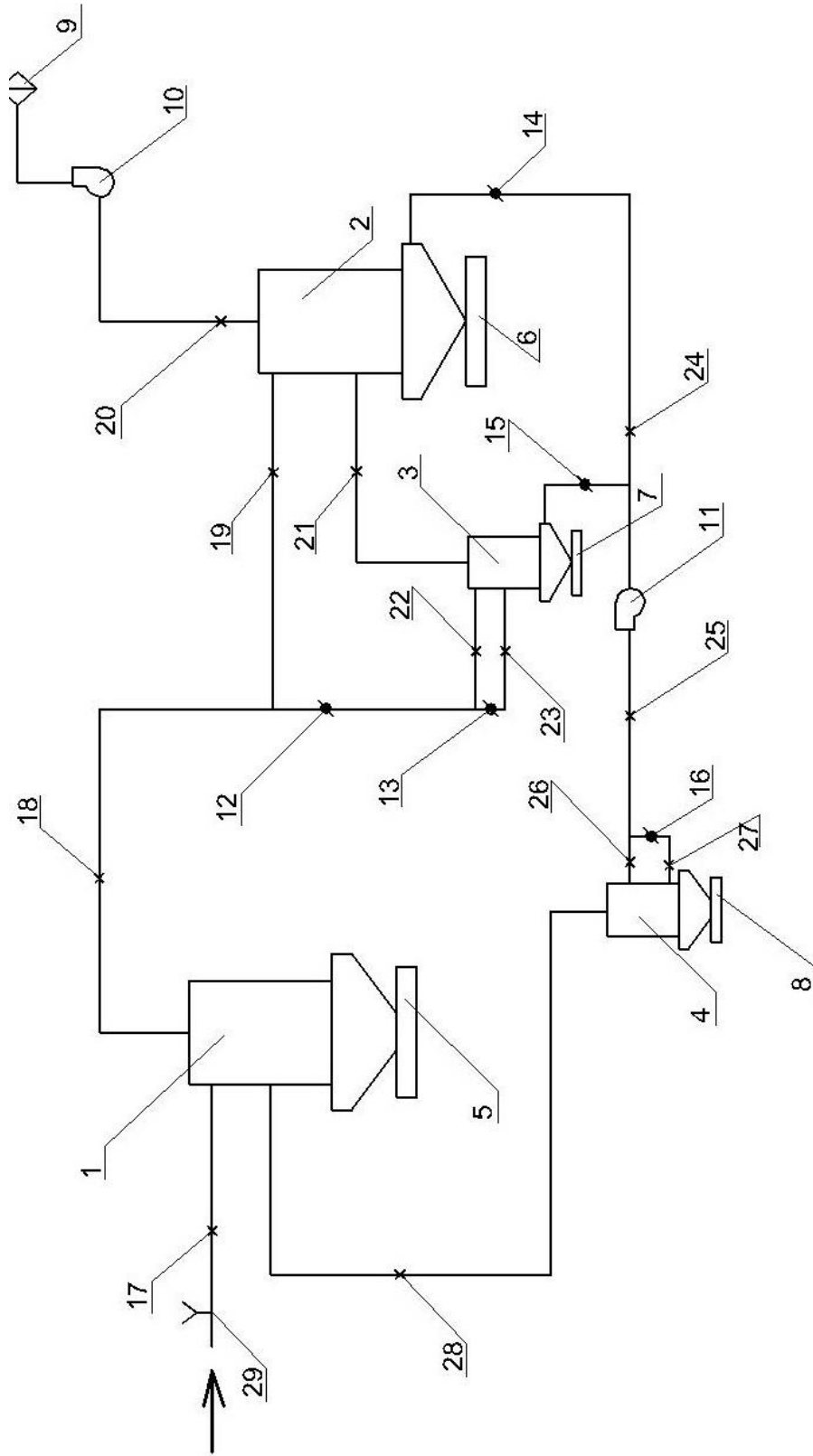


Рисунок 4.1 – Схема экспериментальной установки, скомпонованной по первому варианту.

1, 2 – основные пылеуловители ВЗП первой и второй ступени; 3, 4 – дополнительные вихревые аппараты ВЗП с изменяющимся диаметром корпуса; 5-8 – пылесборники; 9 – рукавный фильтр; 10, 11 – вентиляторы;

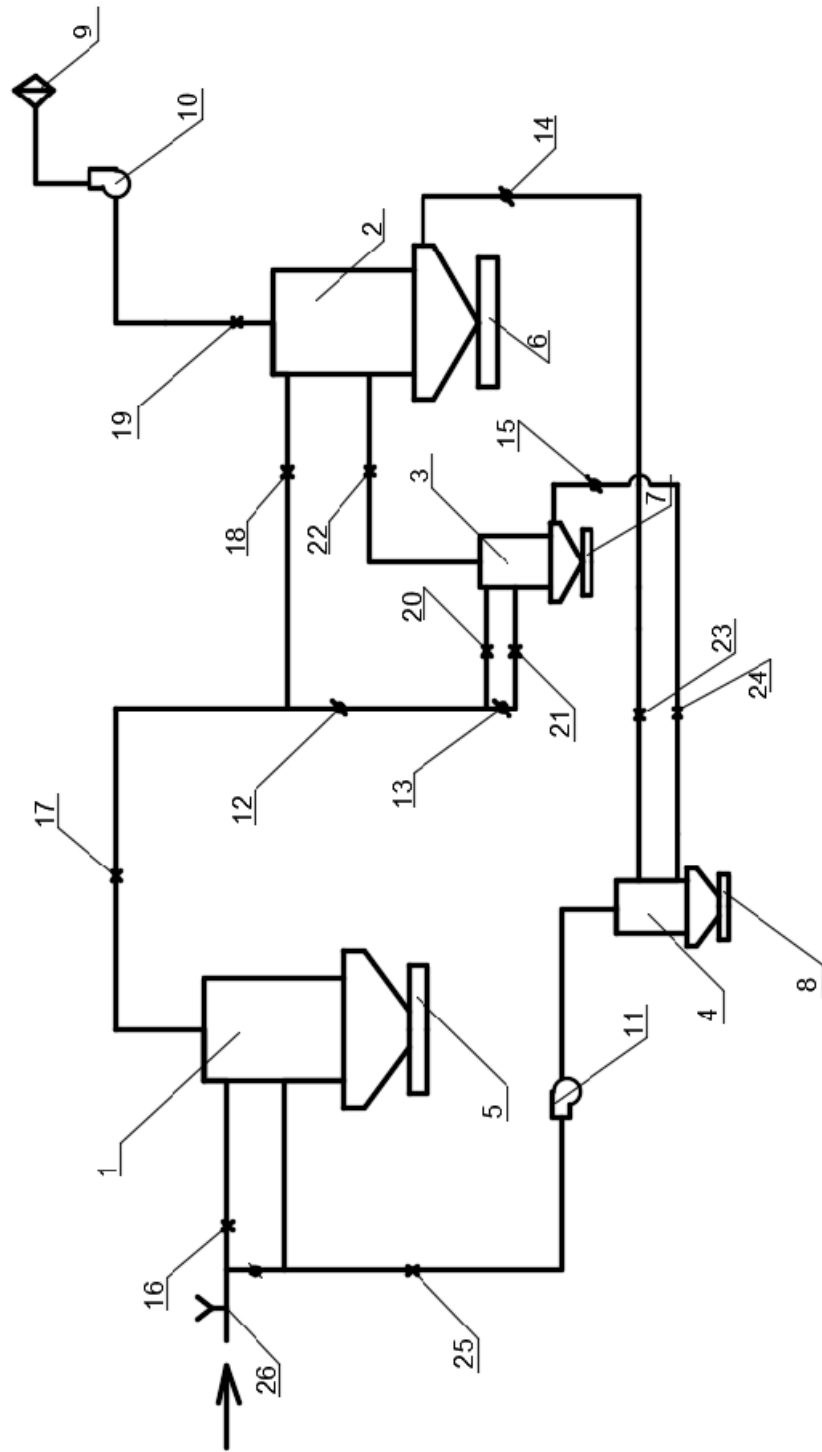


Рисунок 4.2 – Схема экспериментальной установки, скомпонованной по второму варианту.

1, 2 – основные пылеуловители ВЗП первой и второй ступени; 3, 4 – дополнительные вихревые аппараты ВЗП с изменяющимся диаметром корпуса; 5-8 – пылесборники; 9 – рукавный фильтр; 10, 11 – вентиляторы;

верхних и нижних входах вихревых пылеуловителей, а также доля расхода, отсасываемого из бункеров пылеуловителей 2 и 3 регулируются шиберами.

При проведении экспериментальных исследований замеры проводились по принятым методикам в соответствии с [34-37, 46, 101], а также в соответствии с ГОСТ 12.3.018-79 (с изменениями 2001 г.) (Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний).

Скорость потока в воздуховодах установки

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 P_d K}{\rho}}, \text{ м/с} \quad (4.1)$$

где  $P_d$  - динамическое давление в воздуховоде, Па;  
 $K$  - коэффициент пневмометрической трубки;  
 $\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Расход воздуха определялся по выражению

$$L_i = 3600 v_i F_i \quad \text{м}^3/\text{ч} \quad (4.2)$$

где  $v_i$  - скорость воздуха в  $i$ -том замерном сечении, м/с;  
 $F_i$  - площадь поперечного сечения воздуховода в  $i$ -том замерном сечении, м<sup>2</sup>.

Величина проскока пыли для каждого аппарата в отдельности определялась на основе сопоставления поступающей и выходящей массы пыли, определяемых путем отбора проб и измерений в замерных сечениях воздуховодов

$$\varepsilon = G_{\text{вых}}/G_{\text{вх}} \quad (4.3)$$

где  $G_{\text{вх}}, G_{\text{вых}}$  - масса пыли на входе в пылеуловитель и на выходе из него соответственно.

и контролируемых по весу пыли в пылесборниках пылеуловителей. Величина проскока для всей системы в целом определялась по аналогии с контролем по массе пыли, уловленной в рукавном фильтре.

В свою очередь масса пыли определится

$$G = cL \quad (4.4)$$

где  $c$  - концентрация пыли, мг/м<sup>3</sup>.

Измерения 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 режима работы системы и поступления пыли [37]. В качестве устройства, сепарирующего из газопылевого потока пыль, использовались бумажные фильтры АФА, устанавливаемые в специальном патроне – аллонже. Взвешивание чистых бумажных фильтров АФА осуществлялось после выдерживания в эксикаторе до постоянной массы (до равновесной влажности). Бумажные фильтры перед использованием высушивались в сушильном шкафу при температуре 80°C в течение 20–30 мин., после чего выдерживались в течение суток на воздухе. Далее производилось контрольное вторичное взвешивание пакета фильтров АФА. Параллельно с этим проводилось взвешивание контрольного пакета фильтров (10 шт.). После проведения отбора проб на запыленность фильтры снова выдерживались в весовой комнате в течение суток, и затем взвешивались с одновременным взвешиванием контрольного пакета фильтров.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе (предварительный эксперимент) определялось соотношение диаметров основных и дополнительных пылеуловителей  $\bar{D}$ , при котором обеспечивается наименьший проскок пыли

$$\bar{D} = D_3/D_1 = D_3/D_2 = D_4/D_1 = D_4/D_2$$

где  $D_1, D_2, D_3, D_4$  - диаметр сепарационной камеры первого, второго, третьего и четвертого пылеуловителей соответственно, мм.

При этом расход воздуха был принят равным 7200 м<sup>3</sup>/ч, что соответствует скорости в поперечном сечении аппаратов первой и второй ступени, равной 4 м/с.

На втором этапе (основной эксперимент) экспериментальной оценки эффективности предложенных систем в качестве определяющих факторов [18, 22, 43] были приняты [117]

$\bar{L}_0$  - расход воздуха, поступающего в систему на очистку, отнесенный к 1000 м<sup>3</sup>/ч;

$\bar{L}_{отс2}$  - доля (от поступающего на очистку в систему) расхода, отсасываемого из бункера аппарата 2;

$\bar{L}_{отс3}$  - доля (от поступающего на очистку в систему) расхода, отсасываемого из бункера аппарата 3.

$$\bar{L}_{отс2} = L_{отс2}/L_0, \quad \bar{L}_{отс3} = L_{отс3}/L_0$$

где  $L_{отс2}, L_{отс3}$  - расход воздуха, отсасываемого из бункера второго и третьего пылеуловителя соответственно, м<sup>3</sup>/ч;

$L_0$  - расход воздуха, поступающего на очистку, м<sup>3</sup>/ч.

В качестве функции отклика приняты проскок пыли и коэффициент аэродинамического сопротивления. В соответствии с определением величина проскока пыли в атмосферу составляет

$$\varepsilon_{\text{сист}} = \frac{C_{\text{вых}} L_{\text{вых}}}{C_0 L_0} \quad (4.5)$$

Коэффициент местного сопротивления определяется как отношение общих потерь давления всей системы к динамическому давлению, вычисленному, исходя из значения осредненной по расходу скорости газового потока в сечении сепарационной камеры одного из основных пылеуловителей ВЗП

$$\zeta_{\text{сист}} = 2 \frac{P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}}{\rho v_{\text{ср}}^2} \quad (4.6)$$

где  $P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}$  - полное давление во входном и в выходном сечениях установки пылеочистки соответственно, Па;

$v_{\text{ср}}$  - средняя по расходу скорость пылегазового потока в сечении сепарационной камеры основного пылеуловителя ВЗП, м/с.

Определяющие факторы были приведены к виду

$$x_1 = \frac{\bar{L}_{\text{отс2}} - \bar{L}_{\text{отс2}_0}}{\Delta \bar{L}_{\text{отс2}}}; \quad x_2 = \frac{\bar{L}_{\text{отс3}} - \bar{L}_{\text{отс3}_0}}{\Delta \bar{L}_{\text{отс3}}}; \quad x_3 = \frac{\bar{L}_0 - \bar{L}_{0_0}}{\Delta \bar{L}_0} \quad (4.7)$$

Исходные данные для планирования эксперимента приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Исходные данные для планирования эксперимента

Условия опыта		Обозначение	Факторы		
			$x_1$	$x_2$	$x_3$
Компоновка системы по первому варианту					
Нулевой уровень		$x_{i_0}$	0,20	0,10	7,2
Интервал варьирования		$\Delta x_i$	0,05	0,05	1,8
Верхний уровень $x_{i_B} = + 1$		$x_{i_B}$	0,25	0,05	9,0
Нижний уровень $x_{i_H} = - 1$		$x_{i_H}$	0,15	0,15	5,4
Компоновка системы по второму варианту					
Нулевой уровень		$x_{i_0}$	0,15	0,10	7,2
Интервал варьирования		$\Delta x_i$	0,05	0,05	1,8
Верхний уровень $x_{i_B} = + 1$		$x_{i_B}$	0,20	0,05	9,0
Нижний уровень $x_{i_H} = - 1$		$x_{i_H}$	0,10	0,15	5,4
Общий вид уравнения регрессии		$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$			

План эксперимента – матрица планирования, соответствующая центральному композиционному рототабельному плану, имеет в основе план полного факторного эксперимента  $2^3$  (ядро матрицы планирования) и дополняется определенными точками факторного пространства – звездными точками и опытами в центре плана. Для рассматриваемого случая  $n = 2$  звездное плечо равно  $\alpha = \pm 1,682$ , количество опытов ядра матрицы  $2^3 = 8$ , число звездных точек  $N_\alpha = 6$ , число нулевых точек  $N_0 = 6$ . Следовательно, матрица рототабельного плана второго порядка состоит из 20 опытов (таблица 4.2) [18, 22, 43].

Математическая обработка экспериментальных данных проводилась по соответствующему алгоритму [18, 22, 43]:

- рассчитывались коэффициенты уравнения регрессии;

Таблица 4.2 -

План эксперимента

Номер опыта	$x_0$	План			Взаимодействие факторов			Квадратичные члены		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
8	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
9	+1	+1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0
10	+1	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0
11	+1	0	+1,682	0	0	0	0	0	2,829	0
12	+1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0
13	+1	0	0	+1,682	0	0	0	0	0	2,829
14	+1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- рассчитывалась дисперсия воспроизводимости по результатам 6 опытов в центре плана;

- проверялась значимость коэффициентов уравнений регрессии, для этого рассчитывались дисперсии коэффициентов регрессии и значения критерия Стьюдента;

- проводилась проверка адекватности уравнения регрессии. С этой целью: по уравнению регрессии вычислялись значения выходного параметра; определялась остаточная регрессия; вычислялась дисперсия адекватности и число ее степеней свободы; рассчитывалось значение критерия Фишера и определялось его табличное значение; проверялось условие  $F_p < F_T$ .

## 4.2 Результаты предварительного эксперимента

Результаты предварительного эксперимента с целью определения соотношения диаметров основных и дополнительных пылеуловителей  $\bar{D}$ , при котором обеспечивается наименьший проскок пыли, приведены в таблице 4.3 и на рисунке 4.2, 4.3.

Таблица 4.3 - Результаты предварительного эксперимента

Соотношение диаметров основного и дополнительного пылеуловителя $\bar{D}$	Диаметр дополнительного пылеуловителя, мм	Скорость потока в дополнительном пылеуловителе, м/с	Потери давления в дополнительном пылеуловителе, Па	Проскок пыли, $\epsilon_{\text{сист}}$
0,4	320	7,4	3387	0,025
0,5	400	4,8	1034	0,026
0,6	480	3,3	516	0,032
0,7	560	2,4	349	0,035
0,8	640	1,8	259	0,046
0,9	720	1,5	186	0,06

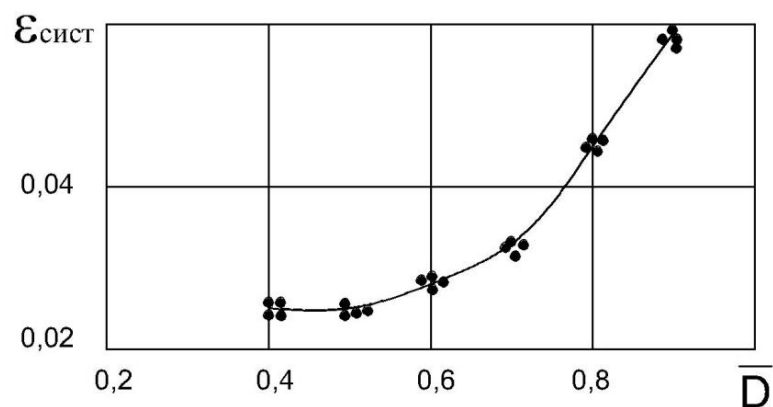


Рисунок 4.3 – Зависимость величины проскока пыли от соотношения диаметров дополнительного и основного пылеуловителей

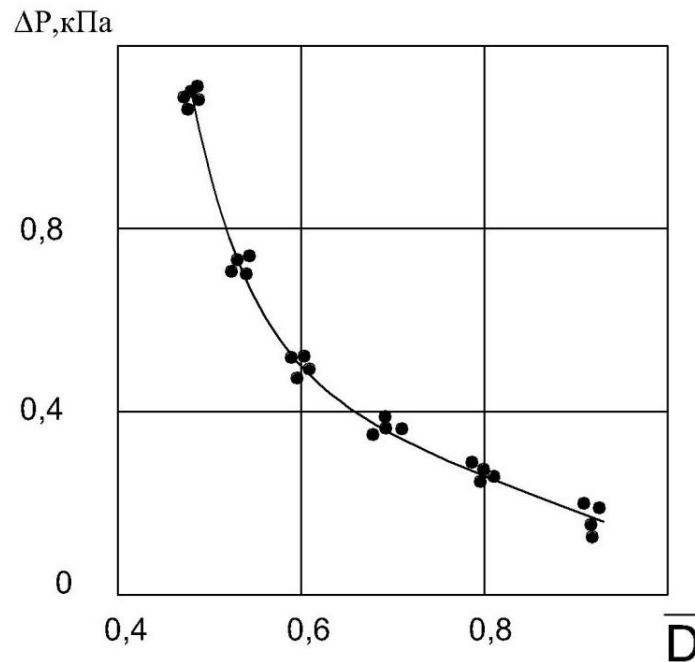


Рисунок 4.4 – Зависимость потерь давления в дополнительном пылеуловителе от соотношения диаметров дополнительного и основного аппаратов

На рисунке 4.3 приведена графическая зависимость, характеризующая изменение проскока пыли от соотношения диаметров дополнительного и основного пылеуловителей. На рисунке 4.4 показана графическая зависимость, характеризующая потери давления в дополнительном пылеуловителе при изменении соотношения диаметров дополнительного и основного аппаратов. Полученные данные свидетельствуют о том, что наименьшая величина проскока  $\varepsilon_{\text{сист}}$  обеспечивается при значениях  $\bar{D} = 0,4-0,5$ . При последующем увеличении диаметра дополнительного пылеуловителя скорость пылевоздушного потока в нем снижается (таблица 4.3), что приводит к возрастанию  $\varepsilon_{\text{сист}}$ , т.е. к снижению эффективности обеспыливания выбросов. Однако при  $\bar{D} < 0,5$  резко возрастает аэродинамическое сопротивление дополнительного аппарата, что влечет за собой повышение затрат на проведение процессов пылеочистки. Поэтому для проведения основного эксперимента по оценке степени снижения пылевых выбросов в атмосферу при использовании предложенных систем диаметр

дополнительных пылеуловителей был принят равным 400 мм из условия  $\bar{D} = 0,5$ .

### 4.3 Результаты экспериментальных исследований по оценке степени снижения пылевых выбросов в атмосферный воздух при компоновке системы обеспыливания по первому варианту

Результаты экспериментальных исследований по оценке величины проскока пыли для системы пылеочистки, скомпонованной по первому варианту, приведены в таблице 4.4 и на рисунках 4.5-4.13.

На рисунках 4.5-4.7 показаны графические зависимости, характеризующие величину проскока при изменении доли расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя ВЗП второй ступени при разных значениях доли расхода, отсасываемого из бункера дополнительного аппарата 3, и расхода воздуха, подаваемого в систему обеспыливания.

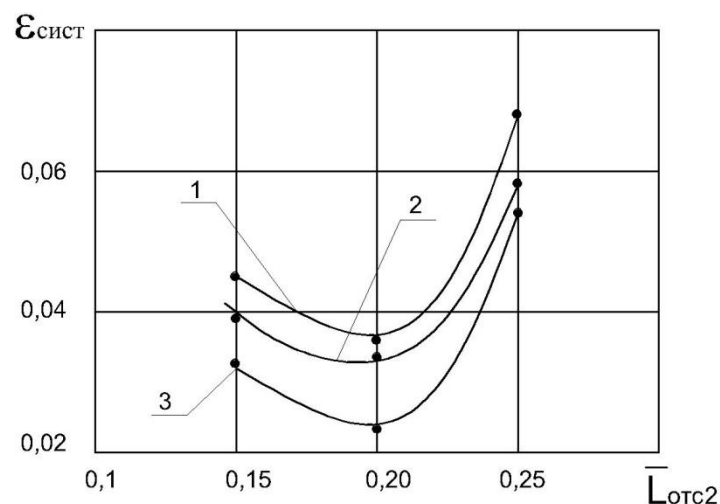


Рисунок 4.5 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя ВЗП второй ступени при  $\bar{L}_{отс3} = 0,05$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

- - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

Таблица 4.4 - Результаты экспериментальной оценки проскока пыли для системы, скомпонованной по первому варианту

Значения определяющих факторов			Величина проскока, $\varepsilon_{\text{сист}}$
доля расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени, $\bar{L}_{\text{отс } 2}$	доля расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя, $\bar{L}_{\text{отс } 3}$	относительный расход пылевоздушной смеси, подаваемой в систему, $\bar{L}_0$	
0,15	0,05	5,4	0,065
		7,2	0,059
		9,0	0,052
0,15	0,10	5,4	0,045
		7,2	0,042
		9,0	0,034
0,15	0,15	5,4	0,052
		7,2	0,050
		9,0	0,043
0,20	0,05	5,4	0,056
		7,2	0,054
		9,0	0,044
0,20	0,10	5,4	0,038
		7,2	0,034
		9,0	0,025
0,20	0,15	5,4	0,045
		7,2	0,041
		9,0	0,034
0,25	0,05	5,4	0,088
		7,2	0,084
		9,0	0,074
0,25	0,10	5,4	0,064
		7,2	0,051
		9,0	0,032
0,25	0,15	5,4	0,075
		7,2	0,070
		9,0	0,068

На рисунках 4.8-4.10 приведены графические зависимости, характеризующие величину проскока при изменении доли расхода,

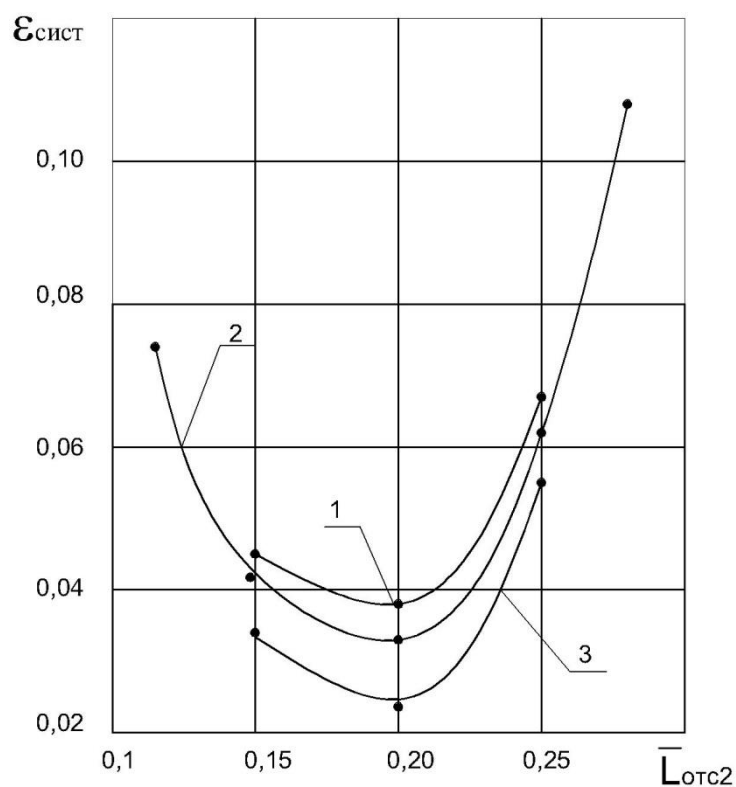


Рисунок 4.6 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя ВЗП второй ступени при  $\bar{L}_{отс3} = 0,10$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

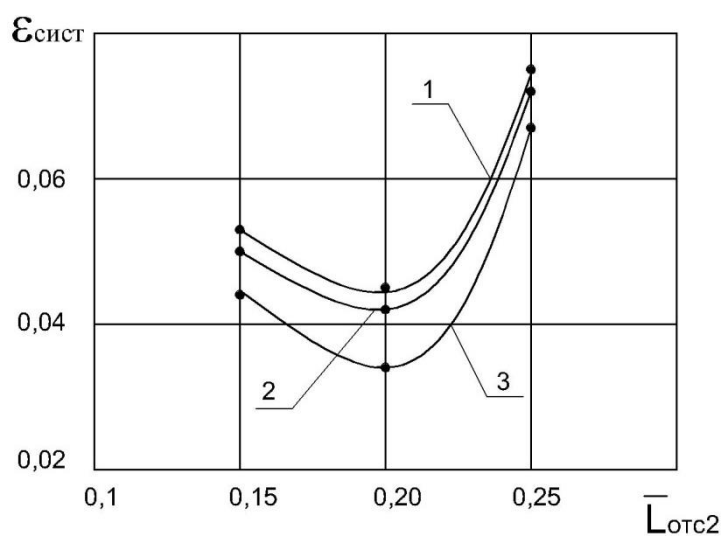


Рисунок 4.7 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя ВЗП второй ступени при  $\bar{L}_{отс3} = 0,15$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

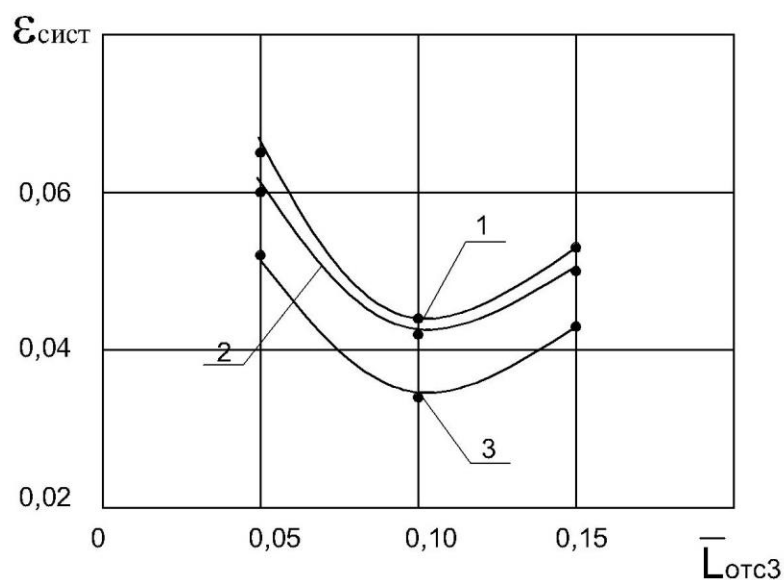


Рисунок 4.8 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя при  $\bar{L}_{отс2} = 0,15$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

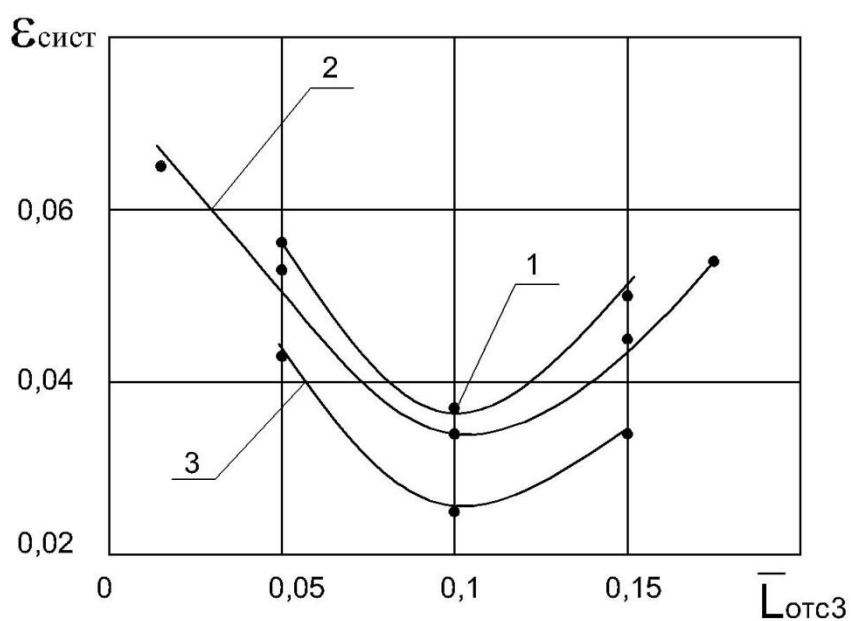


Рисунок 4.9 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя при  $\bar{L}_{отс2} = 0,20$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

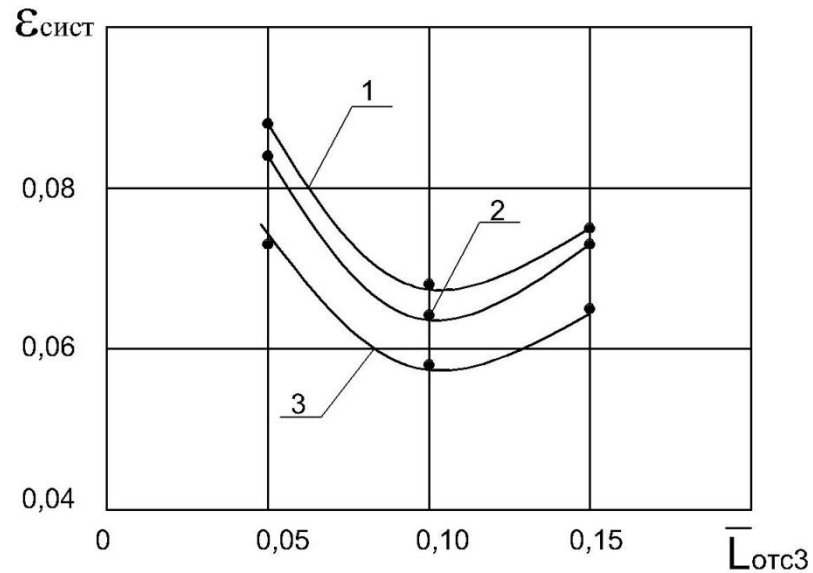


Рисунок 4.10 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя при  $\bar{L}_{отс2} = 0,25$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

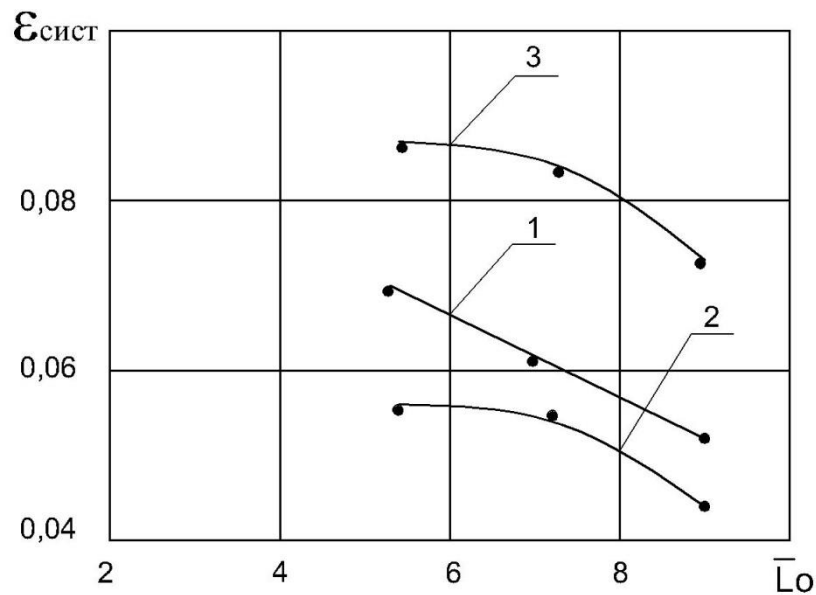


Рисунок 4.11 – Изменение величины проскока в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при

$\bar{L}_{отс3} = 0,05$  и при:

1 -  $\bar{L}_{отс2} = 0,15$ ; 2 -  $\bar{L}_{отс2} = 0,20$ ; 3 -  $\bar{L}_{отс2} = 0,25$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

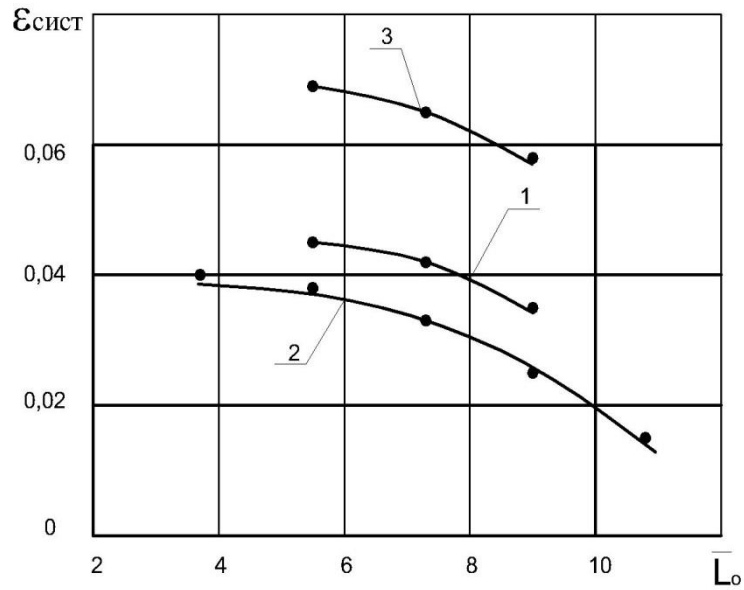


Рисунок 4.12 – Изменение величины проскока в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при

$$\bar{L}_{отс3} = 0,10 \text{ и при:}$$

$$1 - \bar{L}_{отс2} = 0,15; 2 - \bar{L}_{отс2} = 0,20; 3 - \bar{L}_{отс2} = 0,25$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

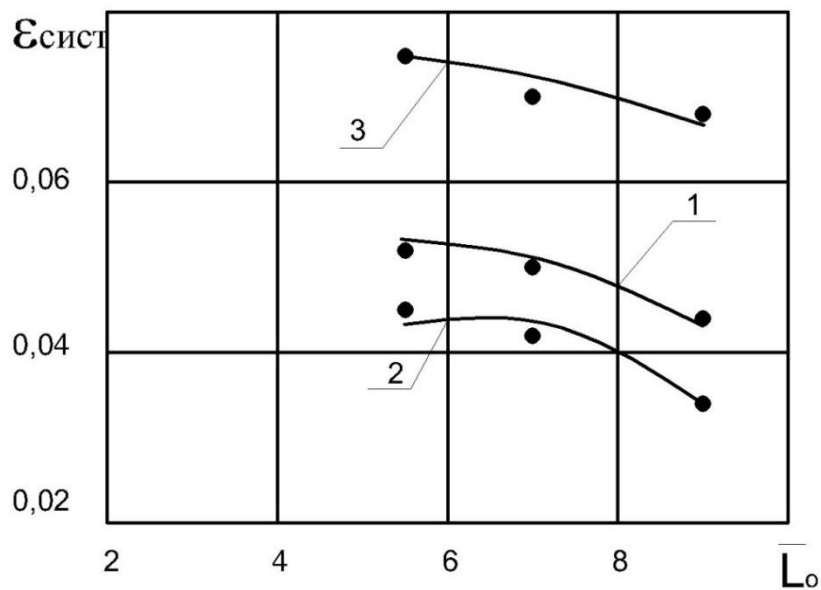


Рисунок 4.13 – Изменение величины проскока в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при

$$\bar{L}_{отс3} = 0,15 \text{ и при:}$$

$$1 - \bar{L}_{отс2} = 0,15; 2 - \bar{L}_{отс2} = 0,20; 3 - \bar{L}_{отс2} = 0,25$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.9)

отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя 3 при разных значениях доли расхода, отсасываемого из бункера аппарата второй ступени, и расхода воздуха, подаваемого в систему обеспыливания. На рисунках 4.11-4.13 представлены графические зависимости, характеризующие изменение величины проскока при изменении расхода воздуха, подаваемого в систему на очистку.

Результаты экспериментальных исследований показали, что с увеличением расхода пылевоздушной смеси снижается проскок пыли в атмосферный воздух, что обусловлено повышением скорости потока в пылеуловителях. Полученные данные также свидетельствуют о том, что наименьший проскок пыли обеспечивается при изменении доли расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени, в пределах  $0,17 \leq \bar{L}_{omc2} \leq 0,22$  и изменении доли расхода, отсасываемого из бункера дополнительного аппарата 3 в пределах  $0,08 \leq \bar{L}_{omc3} \leq 0,12$ , поскольку при таких сочетаниях верхних пределов  $\bar{L}_{omc2}$  с нижними пределами  $\bar{L}_{omc3}$  и наоборот обеспечивается такое соотношение расходов, подаваемых на нижний и верхний вводы аппарата первой ступени, при котором достигается наибольшая эффективность пылеуловителей ВЗП.

Математическая обработка экспериментальных данных проведена по алгоритму, описанному в п.п. 4.1. Коэффициенты уравнения регрессии

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,0063; & b_3 &= -0,0053; & b_{23} &= 0,0011; \\ b_1 &= -0,0113; & b_{12} &= -0,6043; & b_{11} &= 0,0201; \\ b_2 &= 0,0028; & b_{13} &= 0,0345; & b_{22} &= 0,0126; \\ & & & & b_{33} &= -0,0026 \end{aligned}$$

Дисперсия воспроизводимости по результатам 6 опытов в центре плана [18, 22, 43]

$$s_0^2 = 5,9476 \cdot 10^{-4}; \quad f_0 = N_0 - 1 = 6 - 1 = 5$$

Значения критерия Стьюдента

$$t_{b_0} = 16,662; \quad t_{b_3} = 22,544; \quad t_{b_{23}} = 2,674;$$

$$\begin{aligned}
t_{b_1} &= 12,388; & t_{b_{12}} &= 1,0393; & t_{b_{11}} &= 5,6033; \\
t_{b_2} &= 11,432; & t_{b_{13}} &= 2,019; & t_{b_{22}} &= 5,0102; \\
& & & & t_{b_{33}} &= 19,104.
\end{aligned}$$

Табличное значение критерия Стьюдента при  $q = 0,05$ ,  $f_0 = 5$   $t_T = 2,571$ . Условие  $t_p > t_T$  не выполняется для коэффициентов  $b_{12}$  и  $b_{13}$ , следовательно они не значимы [18, 22, 43]. Тогда искомое уравнение регрессии принимает вид

$$\begin{aligned}
y = & 0,0063 - 0,0113x_1 + 0,0028x_2 - 0,0053x_3 + 0,0011x_2x_3 + \\
& + 0,0201x_1^2 + 0,0126x_2^2 - 0,0026x_3^2 \quad (4.8)
\end{aligned}$$

Остаточная дисперсия  $s_{\text{ост}}^2 = 3,089 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_{\text{ост}} = N - l = 20 - 10 = 10$ . Дисперсия адекватности  $s_{\text{ад}}^2 = 0,2344 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_{\text{ад}} = 10 - 5 = 5$ . Тогда расчетное значение критерия Фишера составляет 0,0394. Табличное значение критерия Фишера при  $q = 5\%$ ,  $f_{\text{ад}} = 5$ ,  $f_0 = 5$   $F_T = 5,1$ . Условие  $F_p < F_T$  выполняется, следовательно, полученное уравнение регрессии адекватно реальному процессу [18, 22, 43].

В результате пересчета с использованием формул кодирования (4.7) и учетом условий эксперимента уравнение регрессии в натуральном масштабе приобретает вид

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\text{сист}} = & 0,0266 + 8,04(\bar{L}_{\text{отс2}} - 0,186)^2 + 5,04(\bar{L}_{\text{отс3}} - 0,118)^2 - \\
& - 0,0008(\bar{L}_0 - 4,6)^2 + 0,0123\bar{L}_{\text{отс3}}\bar{L}_0 \quad (4.9) \\
& \text{при } 9,4 \leq \bar{L}_0 \leq 5,4; \quad 0,15 \leq \bar{L}_{\text{отс2}} \leq 0,25; \quad 0,05 \leq \bar{L}_{\text{отс3}} \leq 0,15
\end{aligned}$$

Для оценки энергозатрат на реализацию процессов обеспыливания в рассматриваемой установке был определен коэффициент аэродинамического сопротивления  $\zeta_{\text{сист}}$  как отношение суммарных потерь давления в пылеуловителях первой и второй ступени к динамическому давлению,

рассчитанному по средней скорости потока в основном пылеуловителе. Полученные результаты приведены в таблице 4.5 и на рисунке 4.14-4.17.

Таблица 4.5 - Результаты экспериментальной оценки аэродинамического сопротивления установки обеспыливания выбросов, скомпонованной по первому варианту

Значения определяющих факторов		Суммарные потери давления в основных пылеуловителях первой и второй ступени $\Delta P$ , Па	$\zeta_{\text{сист}}$
доля расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени, $\bar{L}_{\text{отс } 2}$	относительный расход пылевоздушной смеси, подаваемой в систему, $\bar{L}_0$		
0,15	5,4	996,3	186
	7,2	1794	187,5
	9,0	2928	196
0,20	5,4	958,5	177,5
	7,2	1727	179
	9,0	2823	189
0,25	5,4	931,5	172,5
	7,2	1675	176
	9,0	2748	182,5

На рисунке 4.14 и 4.15 приведены данные, характеризующие изменение суммарных потерь давления в пылеуловителях первой и второй ступени и коэффициента аэродинамического сопротивления системы  $\zeta_{\text{сист}}$  в зависимости от изменения расхода пылевоздушной смеси, подаваемой на очистку в систему обеспыливания. На рисунке 4.16 и 4.17 приведены данные, характеризующие изменение суммарных потерь давления в пылеуловителях первой и второй ступени и коэффициента аэродинамического сопротивления системы  $\zeta_{\text{сист}}$  в зависимости от изменения доли расхода пылевоздушной

смеси, отсасываемой из бункера основного пылеуловителя ВЗП второй ступени.

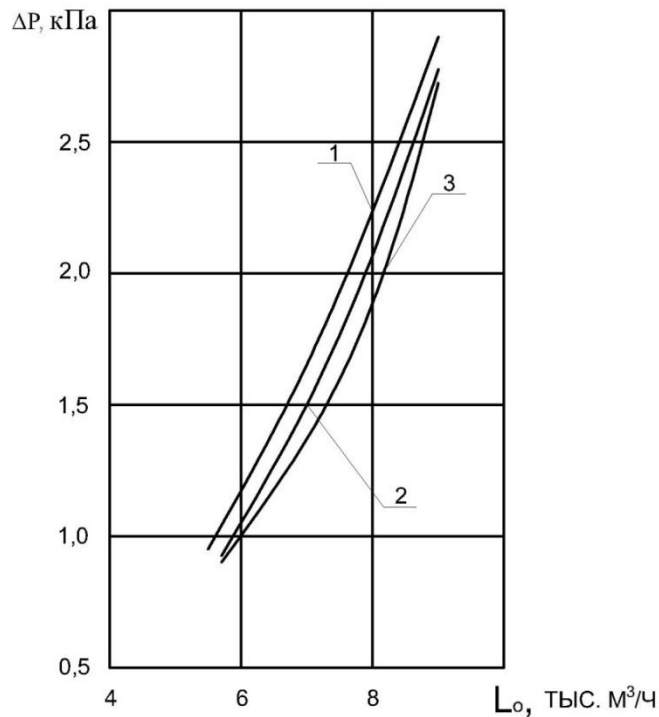


Рисунок 4.14 – Изменение суммарных потерь давления в пылеуловителях первой и второй ступени в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой на очистку в систему обеспыливания при:

$$1 - \bar{L}_{отс2} = 0,15; 2 - \bar{L}_{отс2} = 0,20; 3 - \bar{L}_{отс2} = 0,25$$

Математическая обработка экспериментальных данных проведена по алгоритму, описанному в п.п. 4.1. После оценки значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и отсева незначимых уравнение регрессии приобретает вид

$$y = 5,714 + 1,4143x_1 + 4,1588x_3 + 0,194x_1^2 + 1,6272x_3^2 \quad (4.10)$$

Расчетное значение критерия Фишера составляет 2,31. Табличное значение критерия Фишера при  $q = 5\%$ ,  $f_{ад} = 5$ ,  $f_0 = 5$   $F_T = 5,1$ . Условие  $F_p < F_T$  выполняется, следовательно, полученное уравнение регрессии адекватно

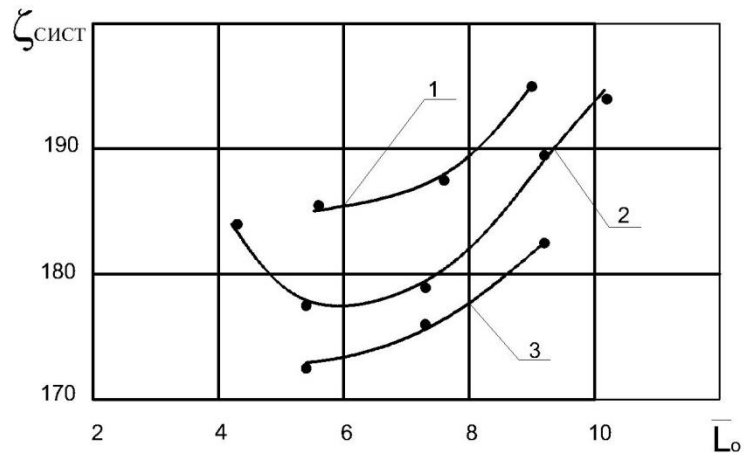


Рисунок 4.15 – Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления  $\zeta_{\text{сист}}$  от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой на очистку в систему обеспыливания при:

$$1 - \bar{L}_{\text{отс}2} = 0,15; 2 - \bar{L}_{\text{отс}2} = 0,20; 3 - \bar{L}_{\text{отс}2} = 0,25.$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.11)

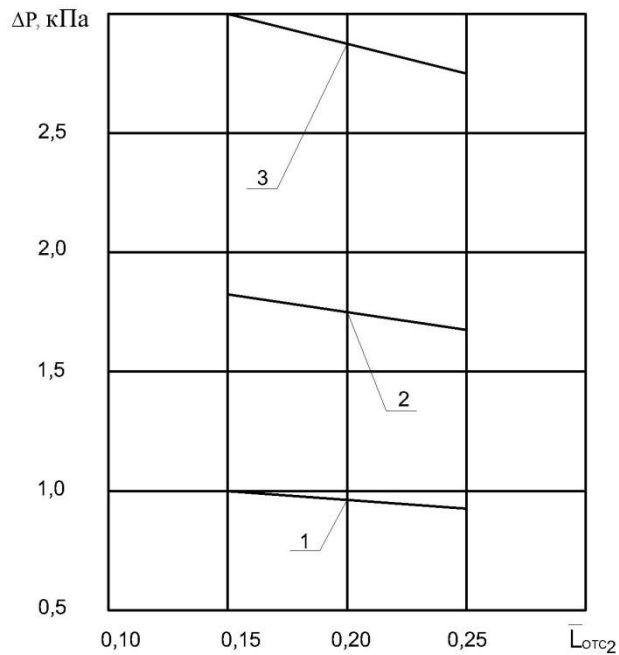


Рисунок 4.16 – Изменение суммарных потерь давления в пылеуловителях первой и второй ступени в зависимости от изменения доли расхода пылевоздушной смеси, отсасываемой из бункера основного пылеуловителя

ВЗП второй ступени при:

$$1 - \bar{L}_0 = 5,4; 2 - \bar{L}_0 = 7,2; 3 - \bar{L}_0 = 9,0$$

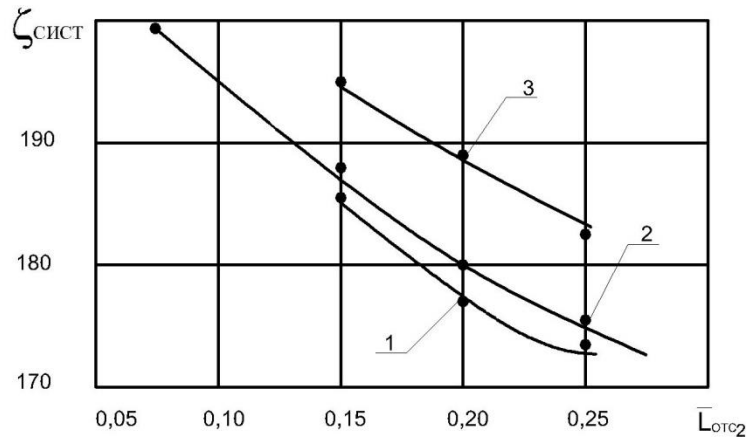


Рисунок 4.17 – Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления  $\zeta_{сист}$  от изменения доли расхода пылевоздушной смеси, отсасываемой из бункера основного пылеуловителя ВЗП второй ступени при:

$$1 - \bar{L}_0 = 5,4; 2 - 1 - \bar{L}_0 = 7,2; 3 - 1 - \bar{L}_0 = 9,0$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.11)

реальному процессу [18, 22, 43].

В результате пересчета с использованием формул кодирования (4.7) и учетом условий эксперимента уравнение регрессии в натуральном масштабе приобретает вид

$$\zeta_{сист} = 244,8 - 0,904L_0(9,8 - L_0) - 388L_{отс2}(0,71 - L_{отс2})$$

или

$$\zeta_{сист} = 174,3 + 0,904(L_0 - 4,9)^2 + 388(L_{отс2} - 0,355)^2 \quad (4.11)$$

$$\text{при } 5,4 \leq \bar{L}_0 \leq 9; 0,15 \leq \bar{L}_{отс2} \leq 0,25; 0,05 \leq \bar{L}_{отс3} \leq 0,15$$

Анализ полученных данных показывает, что наименьшее аэродинамическое сопротивление система обеспыливания выбросов, скомпонованная по первому варианту, имеет при  $\bar{L}_0 = 5,4$  и  $\bar{L}_{отс2} = 0,25$ . Аналогичные результаты получены в работе [95].

Таким образом, наименьшие величины проскока пыли достигаются при изменении доли расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй

ступени, в пределах  $0,17 \leq \bar{L}_{omc2} \leq 0,22$  и  $7,2 \leq \bar{L}_0 \leq 9,4$ . С другой стороны, наименьшее аэродинамическое сопротивление системы, т.е. наименьшие энергетические затраты на проведение процесса пылеочистки, обеспечивается при  $0,20 \leq \bar{L}_{omc2} \leq 0,25$  и при  $5,4 \leq \bar{L}_0 \leq 7,2$ . С учетом этого, наиболее рациональными целесообразно принять следующие режимы работы системы для снижения запыленности выбросов, скомпонованной по первому из предложенных вариантов: изменение доли расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени, в пределах  $0,17 \leq \bar{L}_{omc2} \leq 0,22$ ; изменение доли расхода, отсасываемого из бункера дополнительного аппарата 3 в пределах  $0,08 \leq \bar{L}_{omc3} \leq 0,12$ ; изменение расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему, в пределах  $5,4 \leq \bar{L}_0 \leq 7,2$ .

#### **4.4 Результаты экспериментальных исследований по оценке степени снижения пылевых выбросов в атмосферный воздух при компоновке системы обеспыливания по второму варианту**

Результаты экспериментальных исследований по оценке величины проскока пыли для системы пылеочистки, скомпонованной по первому варианту, приведены в таблице 4.6 и на рисунке 4.18-4.26.

На рисунке 4.18-4.20 показаны графические зависимости, характеризующие величину проскока при изменении доли расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя ВЗП второй ступени при разных значениях доли расхода, отсасываемого из бункера дополнительного аппарата 3, и расхода воздуха, подаваемого в систему обеспыливания. На рисунке 4.21-4.23 приведены графические зависимости, характеризующие величину проскока при изменении доли расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя 3 при разных значениях доли расхода,

Таблица 4.6 - Результаты экспериментальной оценки проскока пыли для системы, сконфигурованной по второму варианту

Значения определяющих факторов			Величина проскока, $\varepsilon_{\text{сист}}$
доля расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени, $\bar{L}_{\text{отс } 2}$	доля расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя, $\bar{L}_{\text{отс } 3}$	относительный расход пылевоздушной смеси, подаваемой в систему, $\bar{L}_0$	
0,10	0,05	5,4	0,078
		7,2	0,075
		9,0	0,070
0,10	0,10	5,4	0,045
		7,2	0,039
		9,0	0,033
0,10	0,15	5,4	0,055
		7,2	0,050
		9,0	0,043
0,15	0,05	5,4	0,091
		7,2	0,085
		9,0	0,080
0,15	0,10	5,4	0,055
		7,2	0,049
		9,0	0,044
0,15	0,15	5,4	0,065
		7,2	0,061
		9,0	0,055
0,20	0,05	5,4	0,096
		7,2	0,092
		9,0	0,086
0,20	0,10	5,4	0,062
		7,2	0,056
		9,0	0,052
0,20	0,15	5,4	0,070
		7,2	0,065
		9,0	0,059

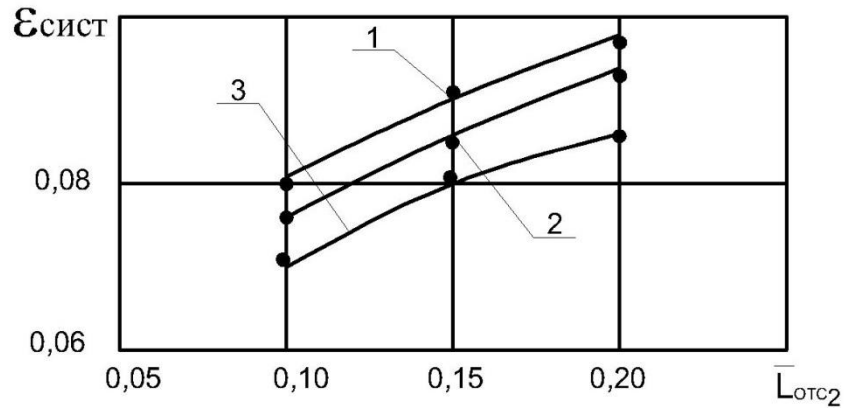


Рисунок 4.18 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя ВЗП второй ступени при  $\bar{L}_{отс3} = 0,05$  и при:

$$1 - \bar{L}_0 = 5,4; 2 - 1 - \bar{L}_0 = 7,2; 3 - 1 - \bar{L}_0 = 9,0.$$

- - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

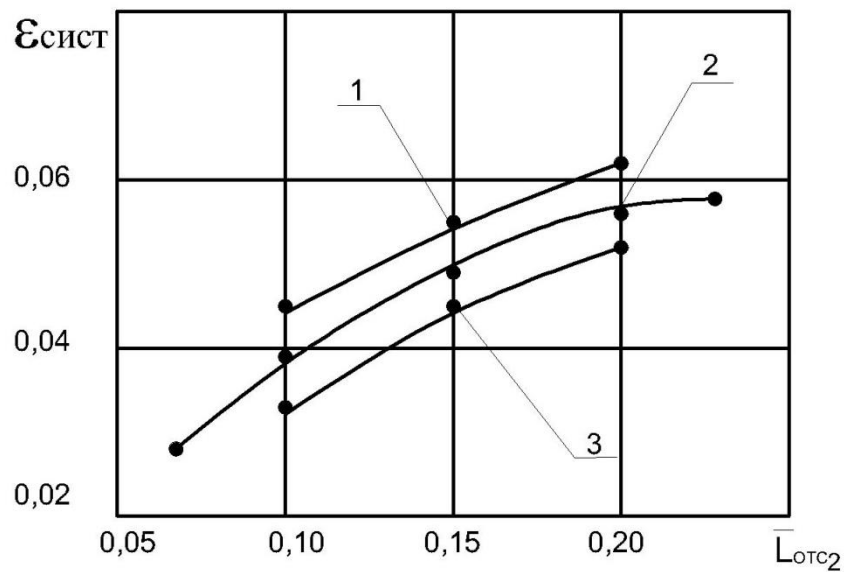


Рисунок 4.19 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя ВЗП второй ступени при  $\bar{L}_{отс3} = 0,10$  и при:

$$1 - \bar{L}_0 = 5,4; 2 - 1 - \bar{L}_0 = 7,2; 3 - 1 - \bar{L}_0 = 9,0.$$

- - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

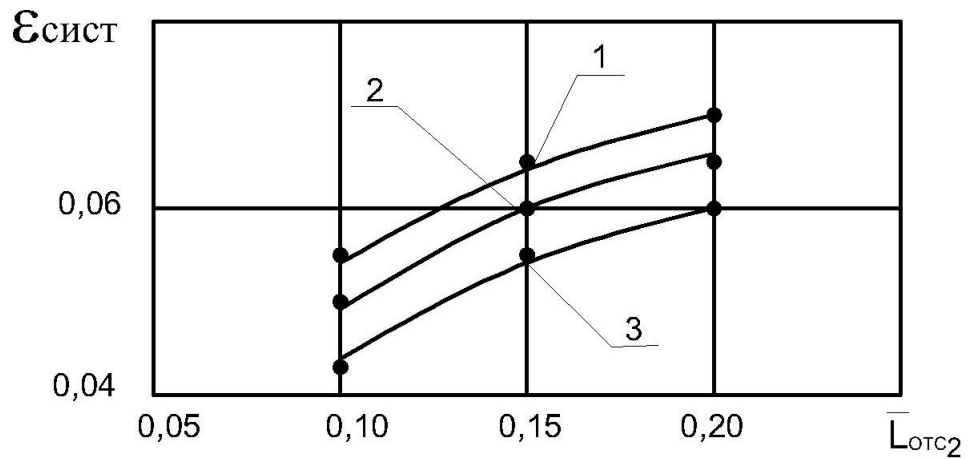


Рисунок 4.20 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя ВЗП второй ступени при  $\bar{L}_{отс3} = 0,15$  и при:

$$1 - \bar{L}_0 = 5,4; 2 - 1 - \bar{L}_0 = 7,2; 3 - 1 - \bar{L}_0 = 9,0.$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

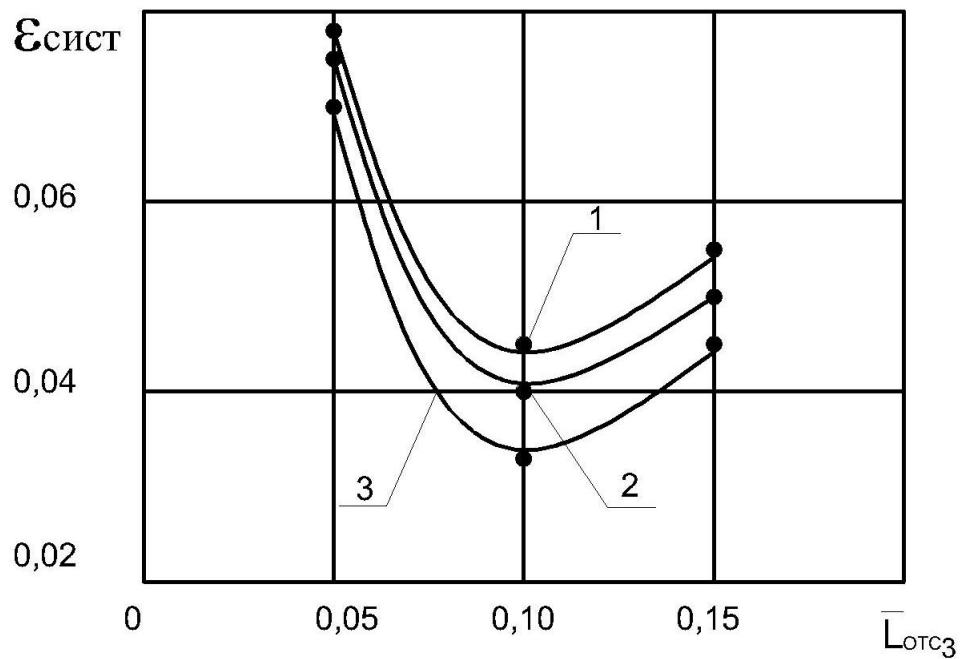


Рисунок 4.21 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя при  $\bar{L}_{отс2} = 0,10$  и при:

$$1 - \bar{L}_0 = 5,4; 2 - 1 - \bar{L}_0 = 7,2; 3 - 1 - \bar{L}_0 = 9,0.$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

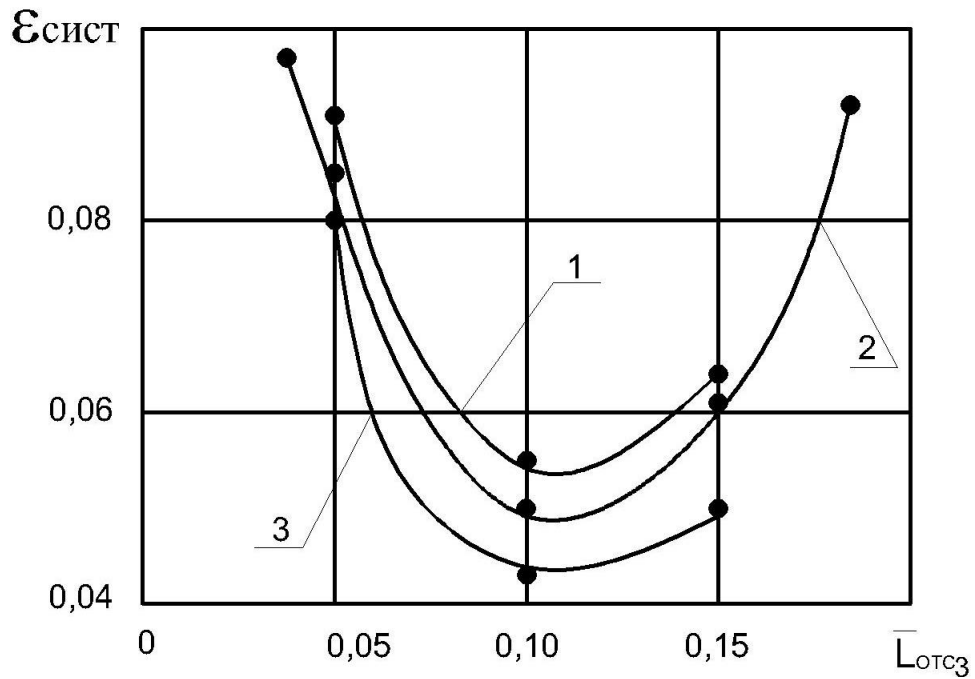


Рисунок 4.22 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя при  $\bar{L}_{отс2} = 0,15$  и при:

$$1 - \bar{L}_0 = 5,4; 2 - 1 - \bar{L}_0 = 7,2; 3 - 1 - \bar{L}_0 = 9,0.$$

- - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

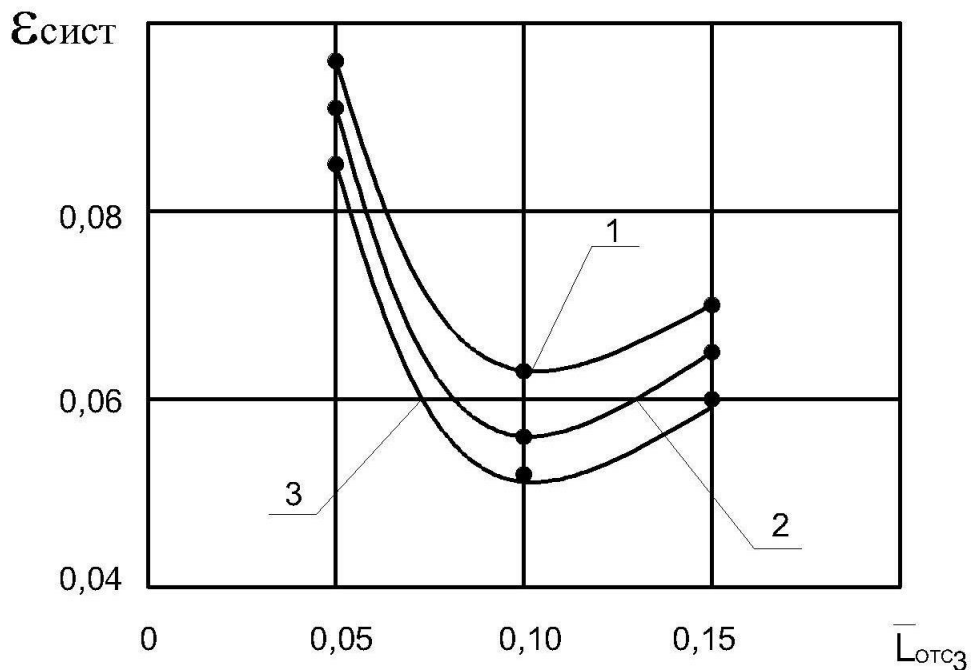


Рисунок 4.23 – Зависимость величины проскока от расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя при  $\bar{L}_{отс2} = 0,20$  и при:

$$1 - \bar{L}_0 = 5,4; 2 - 1 - \bar{L}_0 = 7,2; 3 - 1 - \bar{L}_0 = 9,0.$$

- - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

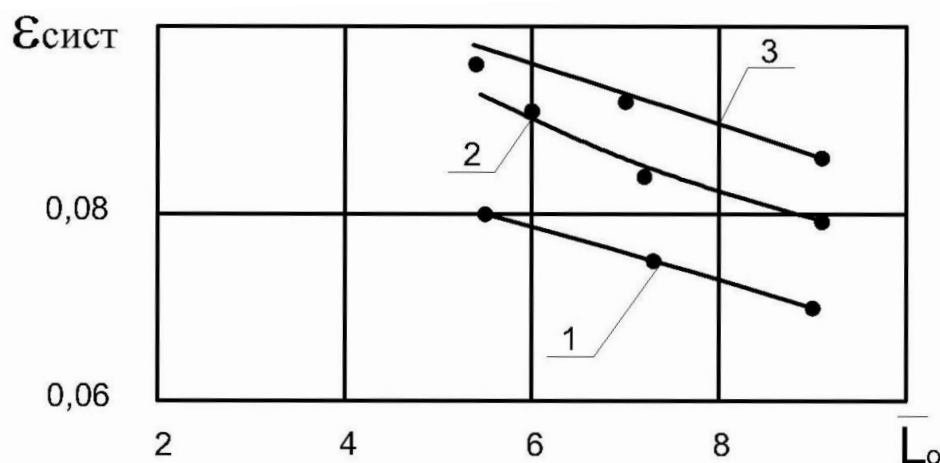


Рисунок 4.24 – Изменение величины проскока в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при  $\bar{L}_{\text{отс}3} = 0,05$  и при:

$\bar{L}_{\text{отс}3} = 0,05$  и при:

1 -  $\bar{L}_{\text{отс}2} = 0,10$ ; 2 -  $\bar{L}_{\text{отс}2} = 0,15$ ; 3 -  $\bar{L}_{\text{отс}2} = 0,20$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

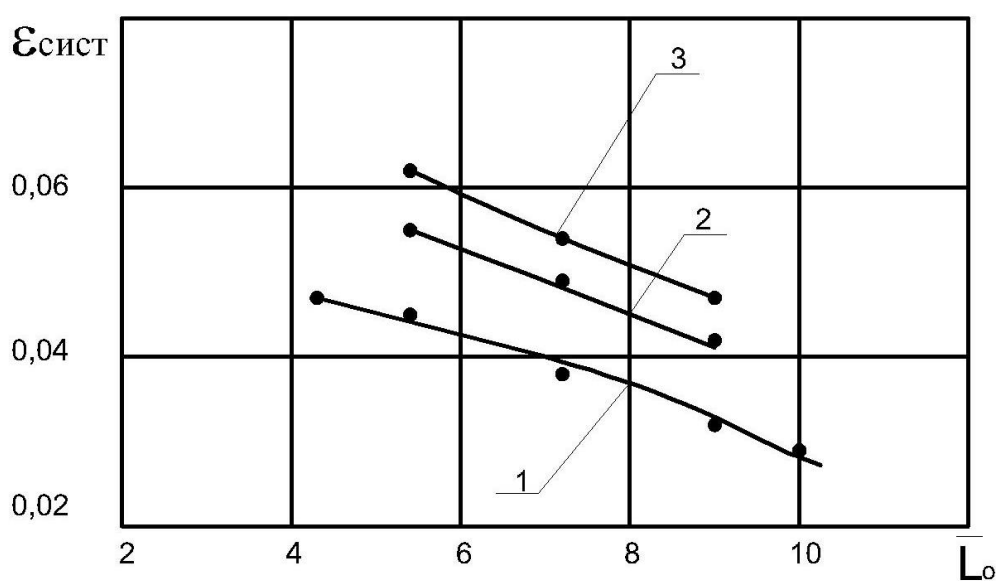


Рисунок 4.25 – Изменение величины проскока в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при  $\bar{L}_{\text{отс}3} = 0,10$  и при:

$\bar{L}_{\text{отс}3} = 0,10$  и при:

1 -  $\bar{L}_{\text{отс}2} = 0,10$ ; 2 -  $\bar{L}_{\text{отс}2} = 0,15$ ; 3 -  $\bar{L}_{\text{отс}2} = 0,20$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

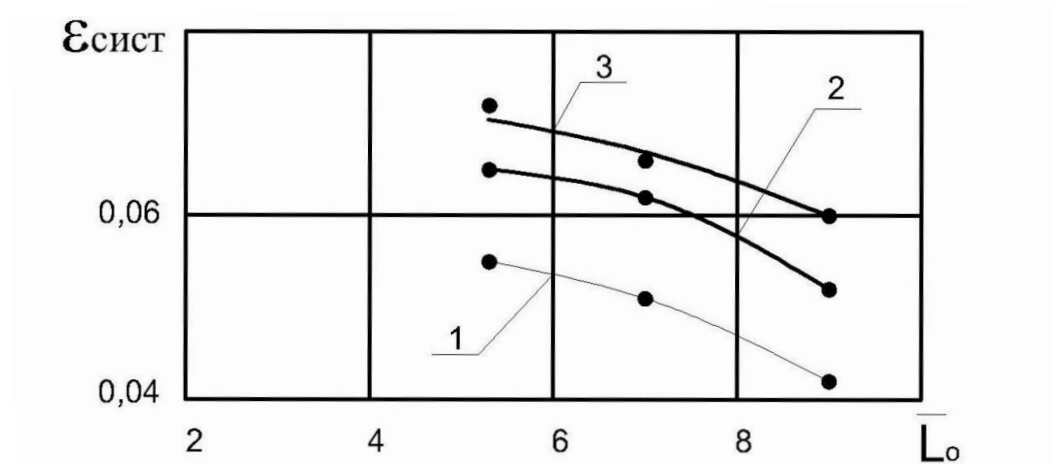


Рисунок 4.26 – Изменение величины проскока в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при

$$\bar{L}_{\text{отс}3} = 0,15 \text{ и при:}$$

$$1 - \bar{L}_{\text{отс}2} = 0,10; 2 - \bar{L}_{\text{отс}2} = 0,15; 3 - \bar{L}_{\text{отс}2} = 0,20$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.12)

отсасываемого из бункера аппарата второй ступени, и расхода воздуха, подаваемого в систему обеспыливания. На рисунке 4.24-4.26 представлены графические зависимости, характеризующие изменение величины проскока при изменении расхода воздуха, подаваемого в систему на очистку.

Результаты экспериментальных исследований показали, что с увеличением расхода пылевоздушной смеси снижается проскок пыли в атмосферный воздух уменьшается, что обусловлено повышением скорости потока в пылеуловителях. Полученные данные также свидетельствуют о том, что наименьший проскок пыли обеспечивается значении доли расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени,  $\bar{L}_{\text{омс}2} = 0,10$  и изменении доли расхода, отсасываемого из бункера дополнительного аппарата 3 в пределах  $0,08 \leq \bar{L}_{\text{омс}3} \leq 0,12$ ., достигая минимума при  $\bar{L}_{\text{омс}3} = 0,10$ .

При увеличении  $\bar{L}_{\text{омс}2}$ , что должно было бы обеспечить возрастание эффективности пылеуловителя второй ступени и, соответственно, возрастание эффективности системы в целом [95], величина проскока, напротив,

увеличивается. Это объясняется тем, что в таком случае нарушается такое соотношение расходов, подаваемых на нижний и верхний входы дополнительного четвертого аппарата первой, при котором достигается наибольшая эффективность пылеуловителей ВЗП. Вследствие этого повышается концентрация пыли в потоке, поступающем из пылеуловителя 4 в нижний вход аппарата первой ступени, что обуславливает снижение его эффективности и, соответственно, снижение эффективности всей системы, что соответствует результатам, приведенным в работе [95].

Следует также отметить, что при компоновке системы обеспыливания по рассматриваемому варианту величина проскока пыли в атмосферу выше, чем в предыдущем варианте, что также обусловлено снижением, по сравнению с первым вариантом, доли расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени. В этом случае снижается эффективность аппарат 2 и, следовательно снижается эффективность системы в целом [95].

После математической обработки полученных результатов по алгоритму, описанному в п.п. 4.1, и перехода к натуральным значениям определяющих факторов уравнение, характеризующее величину проскока, принимает вид

$$\varepsilon_{\text{сист}} = 0,0712 - 0,88(\bar{L}_{\text{отс}2} - 0,255)^2 + 9,024(\bar{L}_{\text{отс}3} - 0,113)^2 - 0,0002\bar{L}_0^2 - 0,16\bar{L}_{\text{отс}3}\bar{L}_{\text{отс}2} \quad (4.12)$$

$$\text{при } 9,4 \leq \bar{L}_0 \leq 5,4; 0,10 \leq \bar{L}_{\text{отс}2} \leq 0,20; 0,05 \leq \bar{L}_{\text{отс}3} \leq 0,15$$

В таблице 4.7 и на рисунке 4.27-4.35 приведены результаты определения коэффициента аэродинамического сопротивления.

Математическая обработка экспериментальных данных проведена по алгоритму, описанному в п.п. 4.1. После оценки значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и отсева незначимых, в результате пересчета с использованием формул кодирования (4.7) и учетом условий эксперимента уравнение регрессии в натуральном масштабе приобретает вид

$$\zeta_{\text{сист}} = 250,2 + 0,967\bar{L}_0(11,1 - \bar{L}_0) - 674\bar{L}_{\text{отс}2}(0,54 - \bar{L}_{\text{отс}2}) - 488\bar{L}_{\text{отс}3}(0,38 - \bar{L}_{\text{отс}3}) + 1200\bar{L}_{\text{отс}2}\bar{L}_{\text{отс}3} \quad (4.13)$$

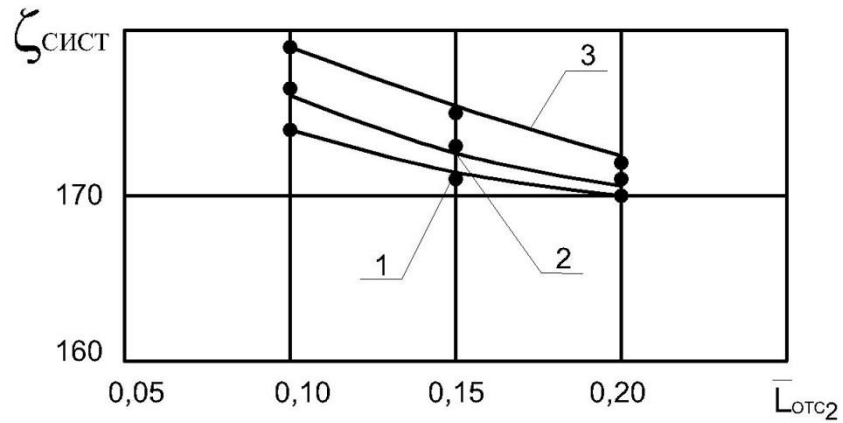


Рисунок 4.27 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от доли расхода пылевоздушной смеси, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени,

при  $\bar{L}_{отс3} = 0,05$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 - 1 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 - 1 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

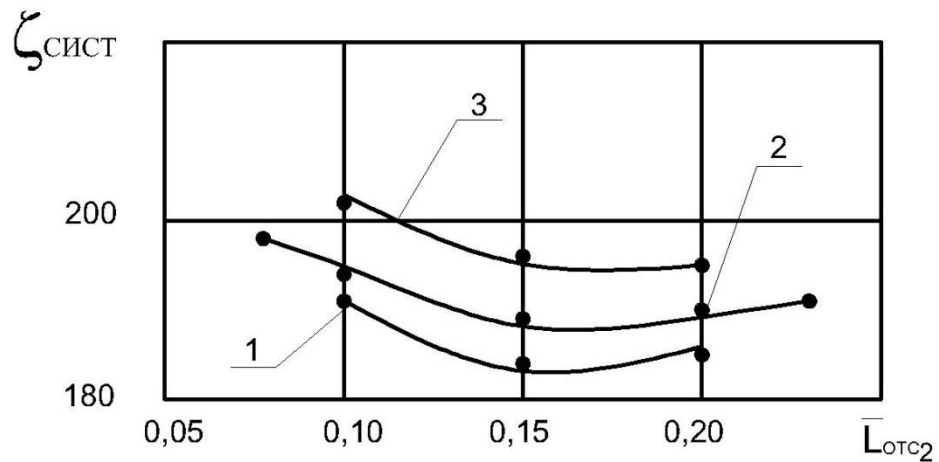


Рисунок 4.28 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от доли расхода пылевоздушной смеси, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени,

при  $\bar{L}_{отс3} = 0,10$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 - 1 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 - 1 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

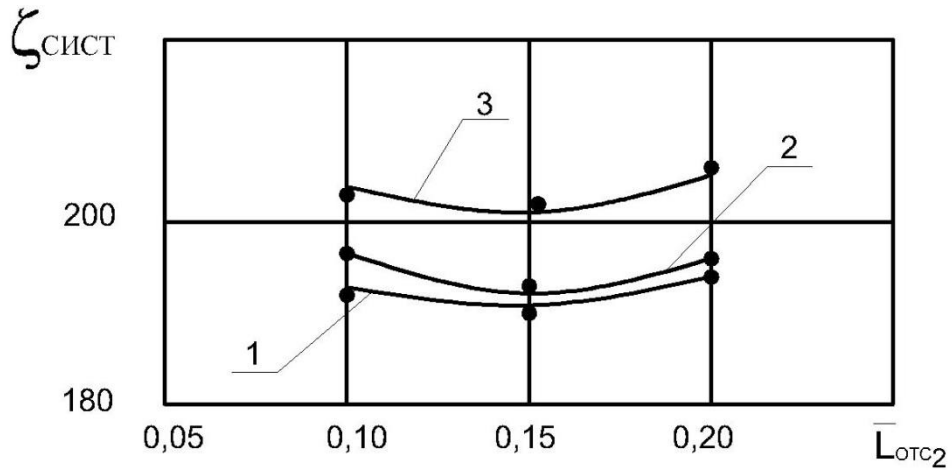


Рисунок 4.29 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от доли расхода пылевоздушной смеси, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени,

при  $\bar{L}_{отс3} = 0,15$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 - 1 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 - 1 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

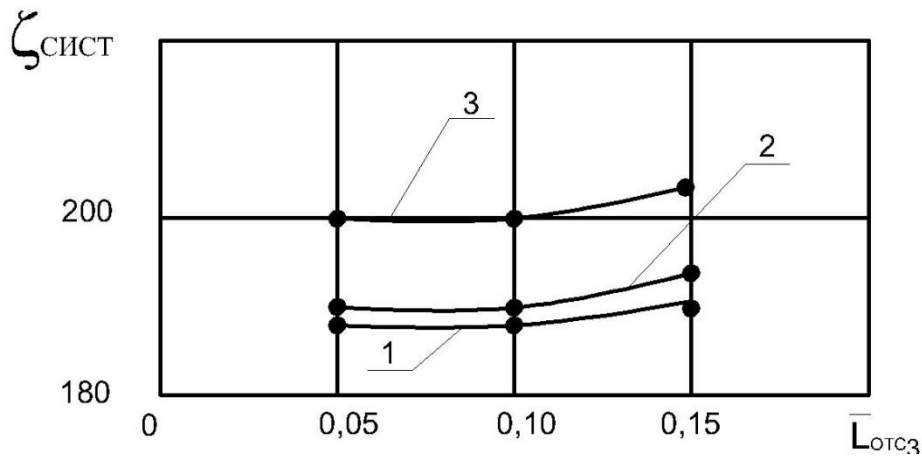


Рисунок 4.30 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от доли расхода пылевоздушной смеси, отсасываемого из бункера дополнительного третьего пылеуловителя, при  $\bar{L}_{отс2} = 0,10$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 - 1 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 - 1 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

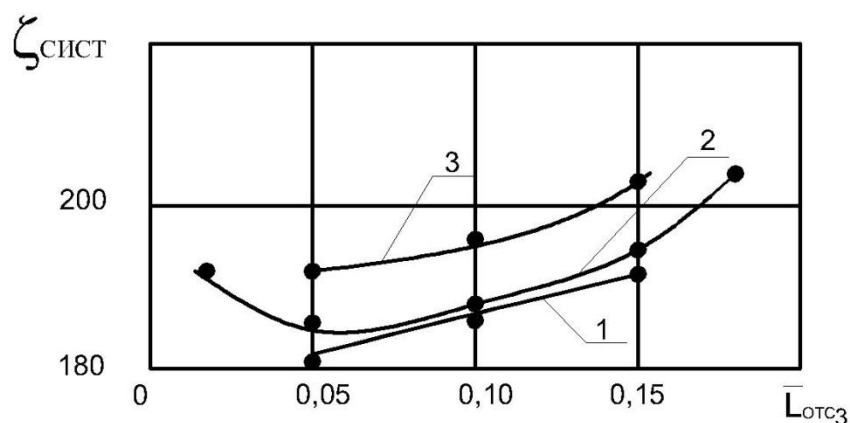


Рисунок 4.31 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от доли расхода пылевоздушной смеси, отсасываемого из бункера дополнительного третьего

пылеуловителя, при  $\bar{L}_{отс2} = 0,15$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 - 1 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 - 1 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

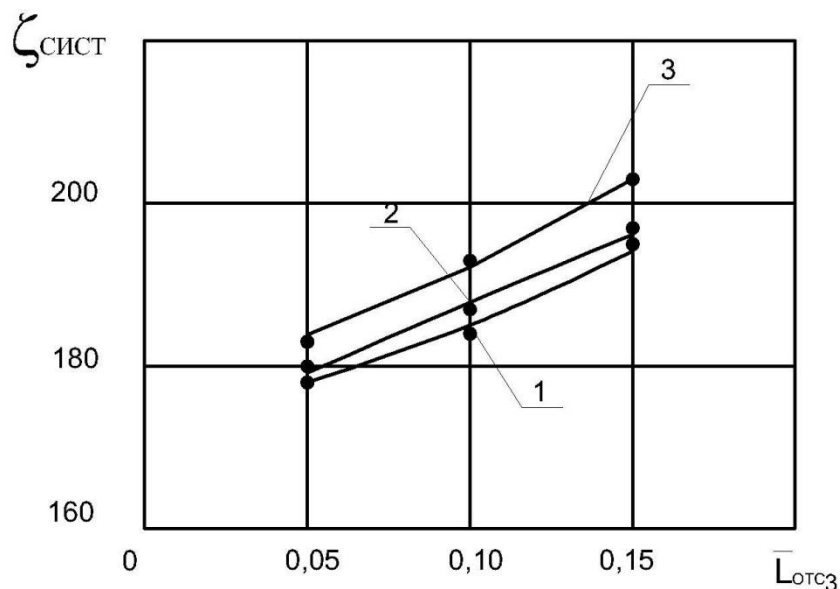


Рисунок 4.32 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от доли расхода пылевоздушной смеси, отсасываемого из бункера дополнительного третьего

пылеуловителя, при  $\bar{L}_{отс2} = 0,20$  и при:

1 -  $\bar{L}_0 = 5,4$ ; 2 - 1 -  $\bar{L}_0 = 7,2$ ; 3 - 1 -  $\bar{L}_0 = 9,0$ .

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

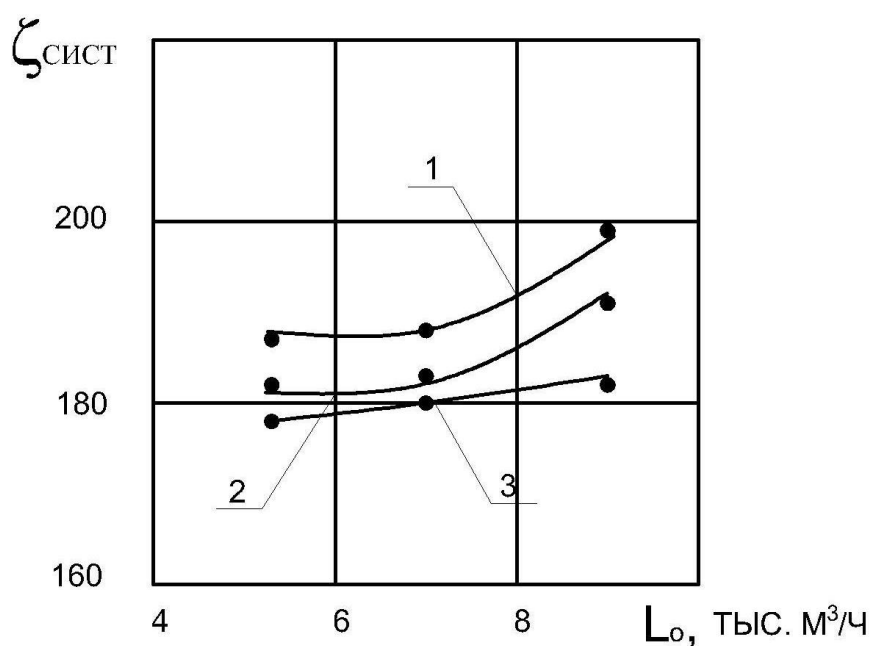


Рисунок 4.33 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при  $\bar{L}_{отс3} = 0,05$  и при:

$$1 - \bar{L}_{отс2} = 0,10; 2 - \bar{L}_{отс2} = 0,15; 3 - \bar{L}_{отс2} = 0,20$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

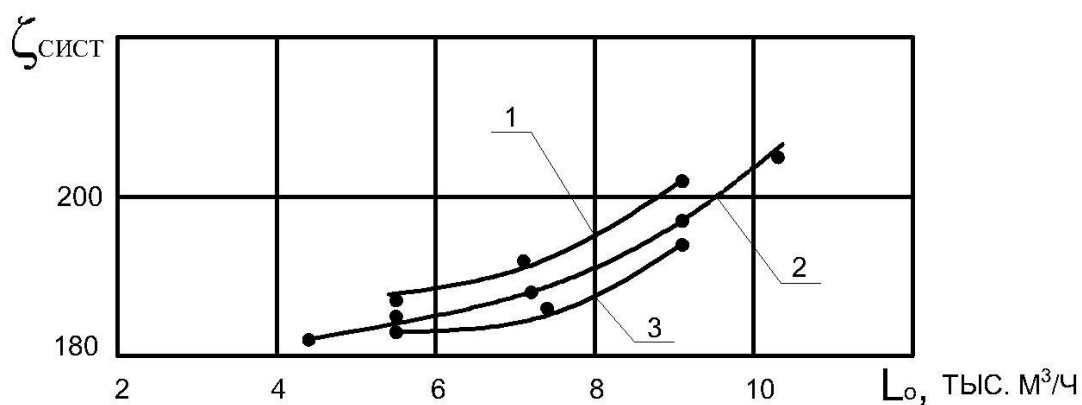


Рисунок 4.34 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при  $\bar{L}_{отс3} = 0,10$  и при:

$$1 - \bar{L}_{отс2} = 0,10; 2 - \bar{L}_{отс2} = 0,15; 3 - \bar{L}_{отс2} = 0,20$$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

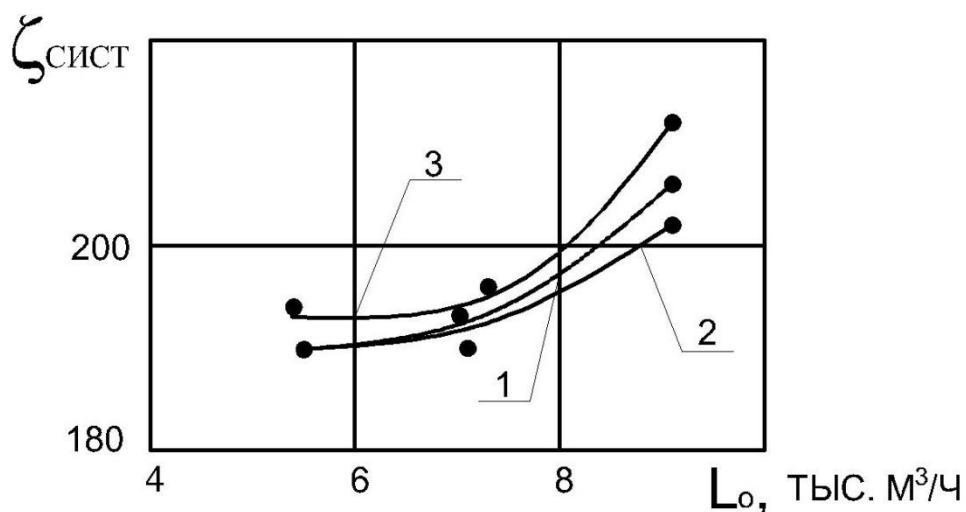


Рисунок 4.35 – Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления системы в зависимости от расхода пылевоздушной смеси, подаваемой в систему обеспыливания, при  $\bar{L}_{отс3} = 0,15$  и при:

1 -  $\bar{L}_{отс2} = 0,10$ ; 2 -  $\bar{L}_{отс2} = 0,15$ ; 3 -  $\bar{L}_{отс2} = 0,20$

• - экспериментальные значения; — - расчетные данные по выражению (4.13)

Таблица 4.7 - Результаты экспериментальной оценки аэродинамического сопротивления установки обеспыливания выбросов, скомпонованной по второму варианту

Значения определяющих факторов			Суммарные потери давления в основных пылеуловителях первой и второй ступени $\Delta P$ , Па	$\zeta_{сист}$
доля расхода, отсасываемого из бункера пылеуловителя второй ступени $\bar{L}_{отс2}$	доля расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя, $\bar{L}_{отс3}$	относительный расход пылевоздушной смеси, подаваемой в систему, $\bar{L}_0$		
1	2	3	4	5
0,10	0,05	5,4	1011	187,2
		7,2	1815	189,1
		9,0	3003	200,2

Окончание таблицы 4.7

1	2	3	4	5
0,10	0,10	5,4	1013	187,5
		7,2	1846	192,3
		9,0	3022	201,5
0,10	0,15	5,4	1024	189,6
		7,2	1858	193,5
		9,0	3057	203,8
0,15	0,05	5,4	983	182
		7,2	994	184
		9,0	2880	192
0,15	0,10	5,4	1001	185,3
		7,2	1800	187,5
		9,0	2975	198,3
0,15	0,15	5,4	1024	189,7
		7,2	1858	193,5
		9,0	3057	203,8
0,20	0,05	5,4	962	178,2
		7,2	1739	181,1
		9,0	2748	183,2
0,20	0,10	5,4	1000	185,2
		7,2	1790	186,5
		9,0	2918	194,5
0,20	0,15	5,4	1049	194,2
		7,2	1884	196,2
		9,0	3084	205,6

при  $5,4 \leq \bar{L}_0 \leq 9$ ;  $0,10 \leq \bar{L}_{отс2} \leq 0,20$ ;  $0,05 \leq \bar{L}_{отс3} \leq 0,15$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что система обеспыливания, сконпонованная по второму варианту, в сравнении с первым вариантом, характеризуется значительными энергозатратами на проведение процессов пылеочистки. С учетом этого, а также с учетом того, что в рассматриваемом случае величина проскока пыли в атмосферу выше, к практическому использованию следует рекомендовать систему очистки выбросов, сконпонованную по первому варианту.

## 4.5 Практическая реализация результатов исследований

### 4.5.1 Результаты эксплуатации опытно-промышленной установки очистки пылевых выбросов

Система обеспыливания выбросов для производства газобетона и газобетонных блоков прошла опытно-промышленные испытания на промышленной базе ОП ООО «Масикс» (приложение Б). Для наладки режимных параметров установки в пределах их рекомендуемых значений, а также контроля работы установки в период эксплуатации проводились замеры давлений и концентраций газопылевого потока в замерных точках, расположение которых показано на рисунке 4.1.

Сопоставим результаты испытаний (таблица 4.8) предложенной и традиционно используемой систем пылеочистки с циклонами.

Таблица 4.8 - Результаты сопоставления характеристик традиционно используемой и предложенной систем пылеочистки

Оцениваемый параметр	Тип системы	
	традиционная	предложенная
Концентрация пыли в потоке на выходе из системы, мг/м <sup>3</sup>	109	12,3
Содержание частиц РМ <sub>10</sub> в выбросе, %	40	24
Содержание частиц РМ <sub>2,5</sub> в выбросе, %	0,5	0,4
Концентрация частиц РМ <sub>10</sub> в потоке на выходе из системы, мг/м <sup>3</sup>	43,6	1,7
Концентрация частиц РМ <sub>2,5</sub> в потоке на выходе из системы, мг/м <sup>3</sup>	0,55	0,2
Проскок системы $\varepsilon_{\text{сист}}$ , %	11,6	5,7
Масса пыли, выбрасываемой в атмосферу, г/ч	796	89,8
Потери давления в системе, Па	1960	1740

Представленные результаты свидетельствуют о том, что использование предложенной системы пылеочистки позволяет снизить выбросы пыли в атмосферу в 8,9 раз. При этом содержание частиц  $PM_{10}$  в потоке, выбрасываемом в атмосферный воздух после системы обеспыливания выбросов сократилось на 40%, содержание частиц  $PM_{2,5}$  – на 20%.

Кроме того, проведенные замеры концентрации пыли в атмосферном воздухе показали, что на территории промплощадки эта величина снизилась с 0,8 мг/м<sup>3</sup> до 0,68 мг/м<sup>3</sup>, на границе санитарно-защитной зоны – с 0,44 мг/м<sup>3</sup> до 0,35 мг/м<sup>3</sup>.

#### 4.5.2 Расчет предотвращенного экологического ущерба

Для укрупненной оценки предотвращенного экологического ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу использована «Временная методика расчета предотвращенного экологического ущерба» (Москва, Министерство природных ресурсов и экологии, 1999 г.), в соответствии которой

$$Y_{\text{пр.г}}^a = Y_{\text{удг}}^a (M_1^a - M_2^a) K_{\text{э}}^a J_d \quad (4.14)$$

где  $Y_{\text{удг}}^a$  – величина экономической оценки удельного ущерба от выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, (показатель удельного ущерба) для  $r$ -го экономического района РФ, руб./усл.т;

$M_1^a, M_2^a$  – приведенная масса выбросов загрязняющих веществ на начало и конец расчетного периода соответственно, усл.т.;

$K_{\text{э}}^a$  – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния атмосферного воздуха территорий

экономических районов России;

$J_d$  - индекс-дефлятор по отраслям промышленности, устанавливаемый Минэкономки России.

При этом

$$M_i = K_i^a m_i \quad (4.15)$$

где  $K_i^a$  - коэффициент относительной эколого-экономической опасности  $i$ -го загрязняющего вещества;

$m_i$  - масса годового выброса примеси данным источником, т/год.

Например, при продолжительности работы дробильной установки 2920 ч/год масса годовых выбросов пыли из обслуживающей ее системы аспирации с установкой циклонов составит

$$m_1 = 2920 \cdot 2,7 \cdot 796 \cdot 10^{-6} = 6,276 \text{ т/год}$$

При оснащении аспирационной системы предложенной системой очистки пылевых выбросов

$$m_2 = 2920 \cdot 2,7 \cdot 89,8 \cdot 10^{-6} = 0,71 \text{ т/год}$$

Таким образом, предотвращенный экологический эффект, достигаемый в результате оснащения только одной системы аспирации, предложенной системой пылеочистки составит

$$U_{\text{пр.г}}^a = 57,2(6,276 - 0,71)29,32 \cdot 2,56 = 23900 \text{ руб./год}$$

#### 4.6 Выводы по четвертой главе

1. По результатам опытно-промышленных исследований получены экспериментальные зависимости, характеризующие степень снижения выбросов пыли в атмосферный воздух и затраты энергии на проведение процесса пылеочистки при изменении определяющих факторов при

компоновке системы обеспыливания выбросов с объединенной подачей рециркуляционного потока в дополнительный аппарат ВЗП.

2. По результатам опытно-промышленных исследований получены экспериментальные зависимости, характеризующие степень снижения выбросов пыли в атмосферный воздух и затраты энергии на проведение процесса пылеочистки при изменении определяющих факторов при компоновке системы обеспыливания выбросов с раздельной подачей рециркуляционных потоков в дополнительный аппарат ВЗП.

3. Экспериментально установлены пределы изменения определяющих факторов (общего расхода пылевоздушной смеси, подаваемой на очистку; доли расхода, отсасываемого из бункера основного пылеуловителя второй ступени; доли расхода, отсасываемого из бункера дополнительного пылеуловителя), при которых обеспечиваются наименьшие проскок пыли в атмосферный воздух и энергозатраты на проведение процессов пылеочистки для обоих вариантов компоновки системы обеспыливания выбросов.

4. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что использование предложенной системы пылеочистки позволяет снизить выбросы пыли в атмосферу 8,9 раз. При этом содержание частиц  $PM_{10}$  в потоке, выбрасываемом в атмосферный воздух после системы обеспыливания выбросов сократилось на 40%, содержание частиц  $PM_{2,5}$  – на 20%.

5. Определен предотвращенный экологический ущерб от выбросов пыли в атмосферу, который при оснащении только одной системы аспирации предложенной системой пылеочистки составит 23900 руб./год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дается решение актуальной задачи по обеспечению защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от негативных воздействий пылевых выбросов, образующихся при производстве газобетона и строительных изделий на его основе.

На основании результатов выполненных исследований можно сделать следующие **основные выводы по работе.**

1. По результатам исследований, проведенных в условиях реально действующего предприятия по производству газобетона и газобетонных блоков, установлено, что при использовании традиционных систем очистки пылевых выбросов с циклонами в атмосферный воздух выбрасывается пыль, до 100 % массы которой приходится на частицы с размерами до 20 мкм. При этом их медианный диаметр равен 12 мкм, доля частиц с размерами менее 10 мкм ( $PM_{10}$ ) составляет 40 %, доля частиц с размерами менее 2,5 мкм ( $PM_{2,5}$ ) - 0,5%. Значения доли частиц в атмосферном воздухе на территории промплощадки летом колеблются: для  $PM_{10}$  - от 12 % до 40 %; для  $PM_{2,5}$  - от 0,3 % до 0,5 %. На границе санитарно-защитной зоны эти значения составляют 80% и 0,5% соответственно.

2. На основе данных, полученных в натурных условиях, отмечено превышение содержания частиц  $PM_{10}$  в атмосферном воздухе на территории промплощадки и на границе санитарно-защитной зоны над ПДК, установленной для таких частиц для воздушной среды населенных пунктов.

3. Для снижения пылепоступлений в атмосферу при производстве газобетона и строительных изделий на его основе предложены два варианта компоновки систем обеспыливания выбросов с двумя последовательно установленными пылеуловителями ВЗП, двумя дополнительными аппаратами с меньшими размерами, с организацией отсоса из бункера основного пылеуловителя второй ступени и из бункера одного из дополнительных

аппаратов. Первый вариант компоновки предполагает объединенную подачу рециркуляционного потока во второй из дополнительных аппаратов. Второй вариант компоновки системы обеспыливания предполагает отдельную подачу рециркуляционных потоков во второй из дополнительных аппаратов.

4. Разработаны методические основы расчетной оценки степени снижения пылевых выбросов в городскую воздушную среду при использовании в промышленности строительных материалов установок пылеочистки с различными схемами компоновки, включающие в себя: систему расчетных уравнений; систематизацию расчетных уравнений по следующим группам – балансовые уравнения; уравнения проскока пыли (уравнения эффективности); уравнения, характеризующие особенности схемы компоновки системы обеспыливания выбросов; блок-схему расчета степени снижения пылепоступлений в атмосферный воздух.

5. По результатам опытно-промышленных исследований установлены зависимости, характеризующие степень снижения выбросов пыли в атмосферу, а также выявлены диапазоны изменения режимно-конструктивных параметров предложенных систем пылеочистки, при которых обеспечиваются наименьшие пылепоступления в окружающую среду и наименьшие энергозатраты на проведение процессов обеспыливания выбросов в производстве газобетона и строительных конструкций на его основе.

6. Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что использование предложенной системы пылеочистки содержание частиц  $PM_{10}$  в потоке, выбрасываемом в атмосферный воздух после системы обеспыливания выбросов сократилось на 40%, содержание частиц  $PM_{2,5}$  – на 20%.

При этом выброс пыли в атмосферу сократился в 8,9 раз.

Предотвращенный экологический ущерб от выбросов пыли в атмосферу при оснащении только одной системы аспирации предложенной системой пылеочистки составил 23900 руб./год.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров, В. Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Опыт внедрения [Текст] / В. Н. Азаров. - Волгоград : РПК «Политехник» ВолгГТУ, 2003. - 136 с.
2. Азаров, В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.01, 03.00.16 / Азаров Валерий Николаевич. – Ростов-на-Дону, 2004. – 40 с.
3. Азаров, В. Н. Системы аспирации дымовых и леточных газов производства карбида кальция [Текст] // В. Н. Азаров, Б. Т. Донченко // Строительные материалы. – 2002. - №11. - С. 20-21.
4. Азаров, В. Н. Анализ дисперсного состава пыли при исследовании пылевой обстановки промышленных предприятий [Текст] / В. Н. Азаров, Т. В. Войтенко // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России : материалы междунар. науч.-практ. конф. - Пенза, 2005. - С. 173-177.
5. 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.
6. 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.
7. Азаров, В. Н. Опыт внедрения малозатратных мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ с использованием пылеуловителей со встречными закрученными потоками [Текст] / В. Н. Азаров, В. Н. Мартьянов // Опыт и практика по итогам российско-американской программы «Управление качеством воздуха» :

- материалы междунар. науч.-практ. конф. - Волгоград, 1998. - С. 70-74.
8. 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.
  9. 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.
  10. Азаров, В. Н. Анализ дисперсного состава пыли в техносфере [Текст] : учеб. пособие / В. Н. Азаров, Е. Ю. Есина, Н. В. Азарова. - Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2008. - 46 с.
  11. Азаров, В. Н. Улавливание мелкодисперсной пыли с использованием вихревых пылеуловителей [Текст] / В. Н. Азаров, С. А. Кошкарёв, О. Т. Кавеева // Процессы и оборудование экологических производств : материалы III межреспубл. научн.-техн. конф. - Волгоград, 1995. - С. 107-108.
  12. 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.
  13. Азаров, В. Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками [Текст] : обзор изобретений / В. Н. Азаров. - Волгоград : ООО «Ассоциация Волгоградэкотехзерно», 1999. - 48 с.
  14. Алиев, Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Текст] / Г. М. Алиев. - Москва : Металлургия, 1986. - 543 с.
  15. Анализ конструктивных элементов аппарата ВЗП в инженерно-

- экологических системах [Текст] / Т. О. Кондратенко [и др.] // Альтернативная энергетика и экология . – 2013. - №12. – С. 62-66.
18. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст] : учеб. пособие / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. - Москва : Высш. шк., 1985. - 327 с.
  17. Баженов, Ю. М. Технология бетона [Текст] / Ю. М. Баженов. – Москва : Изд-во АСВ, 2002.
  18. Балтеренас, П. С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов [Текст] / П. С. Балтеренас. - Москва : Стройиздат, 1990. - 180 с.
  19. Банит, Ф. Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов [Текст] / Ф. Г. Банит. - Москва : Стройиздат, 1979. - 352 с.
  20. Бобровников, Н. А. Охрана воздушной среды от пыли на предприятиях строительной индустрии [Текст] / Н. А. Бобровников. - Москва, 1981. - 99 с.
  21. Богуславский, Е. И. Жизнеобеспечение в окружающей среде [Текст] : учеб. пособие / Е. И. Богуславский. - Ростов-на-Дону : Ростов. гос. акад. стр-ва, 1992. - 111 с.
  22. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии [Текст] : учеб. пособие / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – Киев: Вища школа, 1976. – 184с.
  23. Бретшнайдр, Б. Охрана воздушного бассейна от загрязнений. Технология и контроль [Текст] / Б. Бретшнайдр, И. Курфюрст. - Ленинград : Химия, 1983. - 288 с.
  24. Боровиков, А. В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере [Текст] / А. В. Боровиков. – Санкт-Петербург : Изд. дом «Питер», 2001. - 656 с.
  25. Бронштейн, Л. П. Современные средства измерения загрязнения

- атмосферы [Текст] / Л. П. Бронштейн, И. И. Александров. - Ленинград : Гипрометеоиздат, 1989. - 14 с.
26. Вальдберг, А. Ю. Технология пылеулавливания [Текст] / А. Ю. Вальдберг. - Ленинград : Машиностроение, 1985. - 192 с.
  27. Газобетон: производство газобетонных блоков, свойства газобетона, сравнения [Электронный ресурс]. - <http://www.hebelblok.ru/block/gazobeton.php> (дата обращения 00.00.00).
  28. Газобетон: производство [Электронный ресурс]. - [http:// www.gteh.ru](http://www.gteh.ru) (дата обращения 00.00.00).
  29. Газобетон [Электронный ресурс]. [http:// www. plant.ru/technology](http://www.plant.ru/technology) (дата обращения 00.00.00).
  30. Ганчуков, В. И. Вихревые аппараты со встречными закрученными потоками [Текст] / В. И. Ганчуков, А. В. Екимова. - Череповец : Череповецкий гос. ун-т, 1998. - 33 с.
  31. Гимадеев, М. М. Современные проблемы охраны атмосферного воздуха [Текст] / М. М. Гимадеев, А. И. Щеповских. - Казань, 1997. 368 с.
  32. Горчаков, А. И. Строительные материалы [Текст] / А. И. Горчаков. – Москва : Высш. школа, 1982. – 352 с.
  33. ГОСТ 9179-77. Известь строительная. Технические условия [Текст]. – Москва : Изд-во стандартов, 1978.
  34. 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.
  35. 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.

36. ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ. Методики выполнения измерений [Текст].- Москва : Изд-во стандартов, 2003.
37. ГОСТ Р 50820-95. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков [Текст]. - Москва : Изд-во стандартов, 1997.
38. ГОСТ 31359-2007. Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия [Текст]. – Москва : Изд-во стандартов, 2008.
39. ГОСТ 31360-2007. Изделия стеновые неармированные из ячеистого бетона автоклавного твердения. Технические условия [Текст]. – Москва : Изд-во стандартов, 2008.
40. Градус, Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии [Текст] / Л. Я. Градус. - Москва : Химия, 1979. - 232 с.
41. Двухступенчатый пылеуловитель [Текст] : пат.2137528 Рос. Федерация. МКИ В 01Д 45/12, В 04 С 5/26. – № 98116113/25 (017667). Заявл. 20.08.98; Оpubл. 20.09.99. Бюл. № 26.
42. Дюк, В. Обработка данных на ПК в примерах [Текст] / В. Дюк. - Санкт-Петербург : Питер, 1997. - 240 с.
43. Зажигает, Л. С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента [Текст] / Л. С. Зажигает. - Москва : Атомиздат, 1978.
44. Ицкович, С. М. Заполнители для бетона [Текст] / С. М. Ицкович. – Минск : Вышэйшая школа, 1983. – 232 с.
45. 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.
46. 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.
47. Клименко, А. П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли

- [Текст] / А. П. Клименко. - Москва : Химия, 1978. - 208 с.
48. Комар, А. Г. Строительные материалы и изделия [Текст] / А. Г. Комар. - Москва : Высш. шк., 1988. - 527 с.
  49. Кондратенко, Т. О. Анализ производства газобетона как источника пылевых выделений в атмосферу [Текст] / Т. О. Кондратенко // Строительство-2013 : материалы междунар. науч. практ. конф. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2013. – С. 18-20.
  50. Кондратенко, Т. О. Исследование основных свойств пыли, выделяющейся при производстве газобетона [Текст] / Т. О. Кондратенко // Строительство-2014 : материалы междунар. науч. практ. конф. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2014. – С. 56-58.
  51. Кондратенко, Т. О. Экологические аспекты производства газобетона [Текст] / Т. О. Кондратенко // Проблемы охраны производственной и окружающей среды. – 2015. – Вып. 6. – Волгоград : ПринТерра, 2015. – С. 24-25.
  52. Кондратенко, Т. О. Пути снижения пылевого загрязнения атмосферного воздуха при производстве газобетона [Текст] / Т. О. Кондратенко // Проблемы охраны производственной и окружающей среды. – 2015. – Вып. 6. – Волгоград : ПринТерра, 2015. – С. 28.
  53. Кондратенко, Т. О. Исследование основных свойств пыли при производстве газобетона [Электронный ресурс] / Т. О. Кондратенко // Проблемы и перспективы современной науки : материалы III междунар. науч.-практ. конф. – Ставрополь, 2014. – Режим доступа : [www.центр.логос.рф](http://www.центр.логос.рф).
  54. Кондратенко, Т. О. Схема компоновки системы обеспыливания при производстве газобетона [Электронный ресурс] / Т. О. Кондратенко // Научное обозрение. – 2014. – №11. – Ч. 2. - Режим доступа : [www.sced.ru](http://www.sced.ru).
  55. Кондратенко, Т. О. Методы обеспечения экологической безопасности

- при производстве газобетона [Электронный ресурс] / Т. О. Кондратенко // Научное обозрение. – 2014. – №11. – Ч. 3. – Режим доступа : [www.sced.ru](http://www.sced.ru).
56. Кондратенко, Т. О. Оценка технологических процессов производства газобетона как источников выделения пыли [Текст] / Т. О. Кондратенко, М. А. Назарова // Проблемы охраны производственной и окружающей среды. – 2015. – Вып. 6. – Волгоград : ПринТерра, 2015. – С. 26-28.
  57. Кондратенко, Т. О. Совершенствование систем пылеочистки в производстве газобетонных изделий [Текст] / Т. О. Кондратенко, М. А. Николенко // Современная наука: тенденции развития : материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар, 2014. – С. 206-210.
  58. Кондратенко, Т. О. Повышение экологической безопасности производства газобетонных изделий [Текст] / Т. О. Кондратенко, М. А. Николенко // Приоритетные научные направления: от теории к практике : материалы XIV междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2014. – С. 106-111.
  59. Кондратенко, Т. О. Оценка воздействия строительного производства на окружающую среду [Электронный ресурс] / Т. О. Кондратенко, А. В. Сайбель // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4. – Ч. 2. – Режим доступа : [www.ivdon.ru](http://www.ivdon.ru).
  60. Кондратенко, Т. О. Экологическая оценка при выборе строительных материалов для нового строительства, реконструкции и реставрации [Электронный ресурс] / Т. О. Кондратенко, А. В. Сайбель // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4. – Ч. 2. – Режим доступа : [www.ivdon.ru](http://www.ivdon.ru).
  61. 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.

62. Коузов П. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей [Текст] / П. А. Коузов, Л. Я. Скрыбина. - Ленинград : Химия, 1983. - 138 с.
63. Кутепов, А. М., Вихревые процессы для модификации дисперсных систем [Текст] / А. М. Кутепов, А. С. Латкин. - Москва : Наука, 1999. - 272 с.
64. 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.
65. Латкин, А. С. Вихревые аппараты для технологических процессов [Текст] / А. С. Латкин. - Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. - 248 с.
66. Леончик, Б. И. Измерения в дисперсных потоках [Текст] / Б. И. Леончик, В. П. Маякин. - Москва : Энергия, 1971. - 248 с.
67. Медников, Е. П. Вихревые пылеуловители [Текст] / Е. П. Медников // Промышленная и санитарная очистка газов. - 1975. - Сер. ХМ–14. – С. 44.
68. 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.
69. Методы анализа загрязнений воздуха [Текст] / Ю. С. Другов [и др.]. - Москва : Химия, 1984. - 384 с.
70. Минко, В. А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов [Текст] / В. А. Минко. – Воронеж, 1981. – 175 с.
71. Минко, В. А. Комплексное обеспыливание помещений при производстве цемента [Текст] / А. В. Минко, В. Г. Шаптала // Цемент. - 1990. - № 12. - С. 15-17.

72. Мобильная аспирационная установка для снижения пылевыведения при погрузочно-разгрузочных работах [Текст] / Т. О. Кондратенко [и др.] // Проблемы охраны производственной и окружающей среды. – 2015. – Вып. 6. – Волгоград : ПринТерра, 2015. – С. 45-48.
73. 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.
74. Нейков, О. Д. Аспирация и обеспыливание воздуха при производстве порошков [Текст] / О. Д. Нейков, И. Н. Логачев. – Москва : Металлургия, 1981. -192 с.
75. 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. 402-407.
76. О результатах оценки воздействия на качество атмосферного воздуха и об определении необходимой степени очистки пылевых выбросов асфальтобетонных заводов [Электронный ресурс] / Н. М. Сергина [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №3. – Режим доступа : [www.ivdon.ru](http://www.ivdon.ru).
77. Основные пути совершенствования аппаратов инерционной очистки газов [Текст] / сост. С. С. Янковский, Л. Я. Градус. - Москва : ЦИНТИхимнефтемаш, 1985. - 46 с.
78. Оценка экономической эффективности применения систем пылеулавливания с аппаратами ВЗП [Текст] / Н.М. Сергина [и др.] // Научные проблемы гуманитарных исследований. - Пятигорск : Изд-во РИА-КМВ. - 2012. - Вып.7. - С. 229-234.
79. 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.

80. Перегуд, Е. А. Санитарно-химический контроль воздушной среды : справ. [Текст] / Е. А. Перегуд. - Москва : Химия, 1978. - 336 с.
81. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А. И. Пирумов. - Москва : Стройиздат, 1981. - 207 с.
82. Повышение экологической безопасности производства газобетона [Электронный ресурс] / Т. О. Кондратенко [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №3. – Режим доступа : [www.ivdon.ru](http://www.ivdon.ru).
83. Полушкин, В. И. Пневмотранспорт и очистка воздуха от пыли [Текст] : учеб. пособие / В. И. Полушкин. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГАСУ, 2002. - 49 с.
84. Примак, А. В. Защита окружающей среды на предприятиях стройиндустрии [Текст] / А. В. Примак, П. Б. Балтеренас. – Киев : Будивельник, 1991.
85. 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.
86. Прогрессивные методы пылеулавливания [Текст] / сост. В. М. Товстоухатко. - Киев : УкрНИИНТИ, 1982. - 41 с.
87. Пути снижения выбросов пыли извести в атмосферу при производстве строительных материалов [Текст] / Т. О. Кондратенко [и др.] // Альтернативная энергетика и экология . – 2013. - №11. – С. 53-55.
88. Пылеуловители со встречными закрученными потоками в системах очистки пылевых выбросов в производстве строительных материалов [Электронный ресурс] / Н. М. Сергина, М. С. А. Абдулджалил, Л. М. Абрамова // Инженерный вестник Дона. – 2015. - №3. - Режим доступа : [ivdon.ru](http://ivdon.ru).
89. Расчет и выбор пылеулавливающего оборудования [Текст] / В. А. Горемыкин [и др.]. - Воронеж : ВорГАСА, 2000. - 326 с.

90. Руденко, К. Г. Обеспыливание и пылеулавливание при обработке полезных ископаемых [Текст] / К. Г. Руденко, А. В. Калмыков. – Москва : Недра, 1973. – 193 с.
91. Сажин, Б. С. Вихревые пылеуловители [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим. – Москва : Химия, 1995.
92. Сажин, Б. С. Пылеуловители со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим // Химическая промышленность. - 1985. - № 8. - С. 50-54.
93. Сажин, Б. С. Результаты испытания пылеуловителей со встречными закрученными потоками и циклона ЦН-15 [Текст] / Б. С. Сажин // Химическая промышленность. - 1984. - №5. - С. 43-47.
94. Семенова, Е. А. Совершенствование схем компоновки систем обеспыливания для локализующей вентиляции в производстве извести [Текст] : дис. . . . канд. техн. наук : 05.26.01, 05.23.19 / Семенова Елена Анатольевна. – Волгоград, 2013. – 136 с.
95. Сергина, Н. М. Совершенствование схем компоновки многоступенчатых систем пылеулавливания с вихревыми аппаратами [Текст] : дис. . . . канд. техн. наук ; 05.14.16 / Сергина Наталия Михайловна. - Волгоград, 2000. - 171 с.
96. Сергина, Н. М. Аппараты ВЗП с отсосом из бункерной зоны в производстве строительных материалов [Текст] / Н. М. Сергина // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. - №10. - С. 43-45.
97. 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. 106-119.
98. Система обеспыливания для производства керамзита [Электронный ресурс] / Н. М. Сергина [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2013. – №4. – Режим доступа : [www.ivdon.ru](http://www.ivdon.ru).

99. Системы инерционного пылеулавливания в промышленности строительных материалов [Текст] / Н. М. Сергина [и др.] // Строительные материалы. - 2013. - №2. - С. 86-88.
100. СН 277-80. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона [Текст]. – Москва : Стройиздат, 1981.
101. Совершенствование методов очистки воздуха рабочей зоны от пыли известкового щебня, выделяющейся при разгрузке железнодорожных вагонов [Электронный ресурс] / Н. М. Сергина, Д. П. Боровков, Е. А. Семенова // Инженерный вестник Дона. – 2012. - №4. - Ч.2. – Режим доступа : [ivdon.ru](http://ivdon.ru).
102. Способ и устройство вихревого пылеулавливания [Текст] : пат. 2132750 Рос. Федерация. - № 98104163/25 ; заявл. 05.03.98 ; опубл. 10.07.99, Бюл. № 19.
103. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / общ. ред. А. А. Русанова. – Москва . : Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
104. Страус, В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус. - Москва, 1981. - 616 с.
105. Суслов, А. Д. Вихревые аппараты [Текст] / А. Д. Суслов. – Москва : Машиностроение, 1985. - 256 с.
106. Теверовский, Б. З. Расчеты устройств для очистки промышленных газов от пыли [Текст] : учеб. пособие / Б. З. Теверовский. - Киев : УМКВО, 1991. - 82 с.
107. Успенский, В. А. Промышленная и санитарная очистка газов [Текст] / В. А. Успенский., В. А. Уваров С. Г. Весельман. - Москва : ЦИНТИхимнефтемаш, 1979. - № 2. - С. 11-13.
108. Установка пылеулавливания в системе локализующей вентиляции для промышленности стройматериалов [Текст] / Н. М. Сергина [и др.] // Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях: материалы Всерос.

- науч.-практ. конф. 09.04.2013г. – Ставрополь : Изд-во СКФУ, 2013. - С 93-94.
109. Устройство пылеочистки [Текст] : пат. 155711 12919 Рос. Федерация. - №2015117836/05; заявл. 12.05.15 ; опубл. 20.10.15, Бюл. № 29.
  110. Учаев, В. Н. Совершенствование систем защиты окружающей среды от пылевых выбросов асфальтобетонных заводов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук ; 03.00.16, 05.23.03 / Учаев Владимир Николаевич. Волгоград, 2003. - 136 с.
  111. Швыдкий, В. С. Очистка газов [Текст] : справ. / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладычигев. - Москва : Теплоэнергетик, 2005. - 640 с.
  112. Штокман, Е. А. Очистка воздуха [Текст] : учеб. пособие / Е. А. Штокман. - Москва : Изд-во АСВ, 1999. - 320 с.
  113. Шульга, С. В. Экспериментальные исследования режимов работы пылеуловителя на встречных закрученных потоках в зависимости от длины патрубка вторичного потока [Текст] / С. В. Шульга, Д. В. Азаров, Д. В. Луканин // Современная наука и инновации. - 2013. - Вып. № 2. - С. 21-33.
  114. Экба, С. И. Исследование по оптимизации характеристик верхнего ввода пылеуловителей со встречными закрученными потоками [Электронный ресурс] / С. И. Экба [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. - №11-5. – С. 866-870. - Режим доступа : [www.rae.ru](http://www.rae.ru).
  115. Экба, С. И. Экспериментальные исследования эффективности очистки древесной пыли на предприятиях строительной индустрии пылеуловителями на встречных закрученных потоках [Текст] / С. И. Экба [и др.] // Современная наука и инновации. – 2013. – № 2. – С. 12-18.
  116. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей, туманов [Текст] / Под ред Л. В. Чекалова. – Ярославль :

Русь, 2004. – 424 с.

117. 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](http://www.ivdon.ru).
118. 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.
119. Cortelis, C., Gil, A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separation [Text] / C. Cortelis, A. Gil // Progress in energy and combustion Science. - 2007. - Vol. 33. - No 5. - P. 409-452.
120. 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.
121. Dantherm Filtration New products and industries [Electronic resource] <http://www.danthermfiltration.ru/> (дата обращения 00.00.00)
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. Dantherm Filtration New products and industries [Electronic resource] <http://www.danthermfiltration.ru/> (дата обращения 00.00.00).
124. Latorre Rovirosa Miquel, Tornos Casanovas Mireia. Estudio de dispersion de contaminantes atmosfericos en la planta de Els Monjos de Uniland Cementera [Text] / Latorre Rovirosa Miquel, Tornos Casanovas Mireia. - Cem.-hormigon - 2002. - № 807. - pp. 115 – 128.
125. Strauss, W. Industrial gas cleaning [Text] / W. Strauss. - Pergamon Press, 2006. - 472 p.

126. Kondratenko, T. O. The principles of the layout and evaluation of systems for protection from dust pollution of the air [Electronic resource] / N. Sergina, M. Nikolenko, S. Pushenko, T. Kondratenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. - 2018. - Vol. 692. - P. 710-719. - (19th International scientific conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017; Khabarovsk; Russian Federation; 10-13 April 2017; Код 209159). – URL : DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_75 // [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_75](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_75).
127. Kondratenko, T. O. Problems of protection of urban ambient air pollution from industrial dust emissions [Electronic resource] / V. N. Azarov, N. M. Sergina, T. O. Kondratenko // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. - 106, 07017. - DOI: 10.1051/mateconf/201710607017 // [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/ref/2017/20/mateconf\\_spbw2017\\_07017/mateconf\\_spbw2017\\_07017.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/ref/2017/20/mateconf_spbw2017_07017/mateconf_spbw2017_07017.html).
128. Kondratenko, T. O. On inertial systems, dust cleaning and dust removal equipment, and work areas in the production of aerated concrete from the hopper suction apparatus CSF [Text] / A. N. Bogomolov, N. M. Sergina, T. O. Kondratenko // *Procedia Engineering*. - 2016. - V. 150. - pp. 2036-2041.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 155711

**УСТРОЙСТВО ПЫЛЕОЧИСТКИ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ростовский государственный строительный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015117836

Приоритет полезной модели 12 мая 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 24 сентября 2015 г.

Срок действия патента истекает 12 мая 2025 г.



Заместитель руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

155 711 (13) U1

(51) МПК

B04C 9/00 (2006.01)

B04C 5/26 (2006.01)

B01D 50/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015117836/05, 12.05.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
12.05.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.05.2015

(45) Опубликовано: 20.10.2015 Бюл. № 29

Адрес для переписки:

344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая,  
162, РГСУ, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Сергина Наталия Михайловна (RU),  
Кондратенко Татьяна Олеговна (RU),  
Николенко Максим Александрович (RU),  
Николенко Денис Александрович (RU)

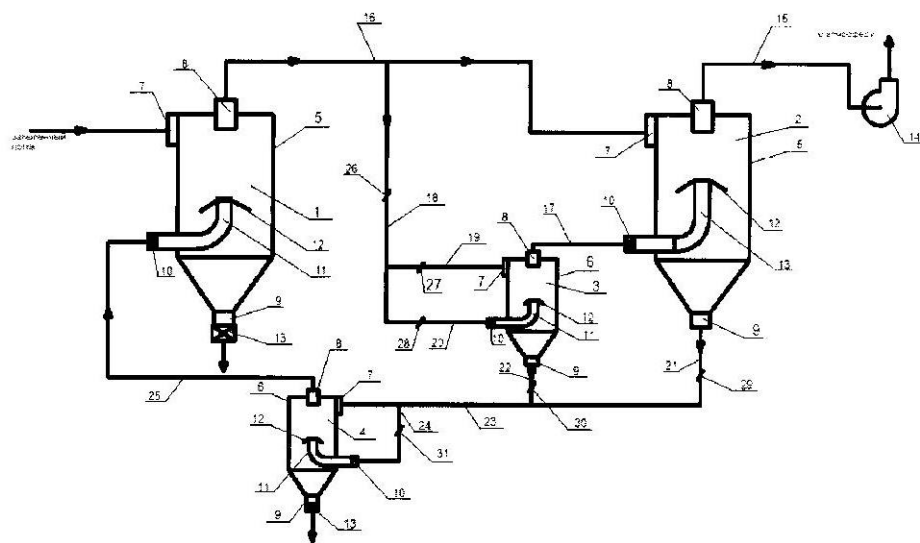
(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Ростовский  
государственный строительный университет"  
(RU)

## (54) УСТРОЙСТВО ПЫЛЕОЧИСТКИ

## (57) Формула полезной модели

Устройство пылеочистки, включающее трубопроводы, первый, второй и третий вихревые пылеуловители, каждый из которых содержит цилиндрический корпус с верхним тангенциальным входным патрубком, завихрителем, соединенным с нижним входным патрубком, снабженным расположенным по оси корпуса пылеотбойной конической шайбой, осевым выходным патрубком и коническим бункером для сбора пыли с пылевывпускным патрубком, снабженные шлюзовыми затворами, и вентилятор, при этом третий пылеуловитель имеет меньшие габариты, чем первый и второй пылеуловители, входные патрубки которого сообщены с выходным патрубком первого пылеуловителя, а осевой выходной патрубок соединен с завихрителем второго пылеуловителя, отличающееся тем, что устройство пылеочистки дополнительно снабжено четвертым вихревым пылеуловителем, также имеющим меньшие габаритные размеры и меньшую производительность, чем первый и второй пылеуловители, входные патрубки которого сообщены с бункерами для сбора пыли с пылевывпускным патрубком второго и третьего пылеуловителей, а осевой выходной патрубок сообщен с нижним входным патрубком первого пылеуловителя, при этом трубопровод подачи исходного газа сообщен с верхним входным патрубком первого пылеуловителя, а вентилятор установлен за выходным патрубком второго пылеуловителя для выброса газа в атмосферу.



RU 1 557 111 U 1

## СПРАВКА

На промышленной базе ОП ООО «Масикс» в период I квартала 2014г. прошла опытно-промышленные испытания установка пылеулавливания с аппаратами ВЗП.

Эффективность улавливания установки составила 94,3%.

Главный инженер  
ОП ООО «Масикс»



М.Ю. Варавин