

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

На правах рукописи

ГУРОВА ОКСАНА СЕРГЕЕВНА



**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
СПОСОБОВ ОРГАНИЗАЦИИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ПЕНОЙ  
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРОЙИНДУСТРИИ**

05.26.01 – Охрана труда (строительство)

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Беспалов Вадим Игоревич

Ростов-на-Дону – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
<b>Введение</b> .....	6
<b>1. Анализ процессов образования и выделения пыли на предприятиях строительной индустрии</b> .....	25
1.1. Основные источники пылевого загрязнения воздушной среды городских территорий, характерные для предприятий строительной индустрии.....	27
1.2. Обоснование выбора теоретического подхода к описанию процессов пылевого загрязнения и обеспыливания воздушной среды.....	28
1.3. Исследование особенностей производственных технологий и состояния воздушной среды в рабочих зонах и на промышленных площадках заводов ЖБИиК.....	38
1.4. Влияние процессов и явлений в пылевых аэрозолях на условия реализации обеспыливания воздуха.....	42
1.5. Построение физической модели процесса загрязнения воздушной среды для ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК.....	54
<b>Выводы</b> .....	65
<b>2. Совершенствование теоретических основ описания процесса обеспыливания технологического сырья и воздушной среды</b> .....	65
2.1. Построение физической модели процесса снижения загрязнения воздушной среды для условий эксплуатации ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК.....	68
2.2. Анализ и систематизация современных средств обеспыливания технологического сырья и воздуха для условий эксплуатации ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК.....	73
2.3. Исследование технологических особенностей получения пены, её основных свойств и условий пенообразования.....	81
<b>Выводы</b> .....	97

<b>3. Совершенствование методики оценки и выбора экологически эффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной.....</b>	<b>99</b>
3.1. Математическое описание процесса обеспыливания пеной на этапах пылезадержания, очистки воздуха от пыли и рассеивания пыли.....	100
3.1.1. Пылезадержание.....	101
3.1.2. Очистка воздуха от пыли.....	117
3.1.3. Рассеивание пыли.....	133
3.2. Разработка алгоритма реализации методики оценки и выбора оптимальных для заданных производственных условий технологий обеспыливания пеной.....	152
3.3. Формирование блока исходных данных.....	156
3.4. Формирование логического блока.....	159
3.5. Описание выходных параметров.....	160
3.6. Анализ результатов теоретических расчетов на основе усовершенствованной методики оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной.....	162
<b>Выводы.....</b>	<b>178</b>
<b>4. Экспериментальные исследования процесса обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха.....</b>	<b>181</b>
4.1. Описание экспериментального стенда.....	181
4.2. Описание методики проведения экспериментов.....	184
4.3. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований.....	187
4.4. Сопоставление результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.....	194
<b>Выводы.....</b>	<b>198</b>
<b>5. Практическая апробация методики оценки и выбора экологически эффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной.....</b>	<b>199</b>
5.1. Совершенствование технологий обеспыливания воздуха пеной	

для условий эксплуатации предприятий строительной индустрии.....	200
5.2. Реализация методики оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной при эксплуатации и реконструкции предприятий строительной индустрии.....	225
5.2.1. Для ленточного транспортёра инертных материалов ПАО «КСМ-10» г. Ростова-на-Дону.....	225
5.2.2. Для бульдозера, загружающего инертные материалы в бункер ленточного транспортёра БСУ ПАО «КСМ-10» г. Ростова-на-Дону.....	227
5.2.3. Для ленточного транспортёра участка приготовления бетонной смеси ООО «Завод строительного оборудования» г.Ростова-на-Дону.....	231
5.2.4. Для аспирационной системы узла загрузки песка и щебня БСУ ООО «Завод строительного оборудования» г.Ростова-на-Дону.....	233
5.2.5. Для ленточного транспортёра участка транспортировки песка и щебня бетоносмесительного отделения ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК г.Батайска Ростовской области.....	235
5.2.6. Для аспирационной системы узла загрузки песка и щебня ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК г.Батайска Ростовской области.....	237
<b>Выводы</b> .....	240
<b>Заключение</b> .....	242
<b>Список литературы</b> .....	245
<b>Приложения</b> .....	268
Приложение А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «GEEPSUOR».....	269
Приложение Б Определение дисперсного состава исследуемых видов пыли....	270
Приложение В Основные физико-химические свойства систем	

пенообразующего раствора и пылевого материала.....	271
Приложение Г Результаты экспериментальных исследований процесса пылезadržания.....	272
Приложение Д Результаты экспериментальных исследований процесса очистки воздуха от пыли.....	276
Приложение Е Копия акта внедрения методики на ПАО «КСМ-10» г. Ростова-на-Дону.....	280
Приложение Ж Копия акта внедрения технологической схемы на ПАО «КСМ-10» г. Ростов-на-Дону.....	281
Приложение З Копия акта внедрения методики на ПАО «Завод строительного оборудования» г. Ростов-на-Дону.....	282
Приложение И Копия акта внедрения устройства на ПАО «Завод строительного оборудования» г. Ростов-на-Дону.....	283
Приложение К Копия акта внедрения методики на ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК.....	284
Приложение Л Копия акта внедрения устройства очистки на ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК.....	285
Приложение М Копия акта внедрения методики на ЗАО «Ростовский Завод Железобетонных Конструкций» г.Ростова-на-Дону.....	286
Приложение Н Копия справки о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	287

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** Интенсивное развитие технологий промышленного производства ставят проблемы охраны труда и обеспечения экологической безопасности в ряд наиболее значимых задач на государственном уровне [1-4], решение которых связано непосредственно с обеспечением комфортных условий жизнедеятельности людей как в производственной, так и в городской среде. Одно из ведущих мест в общем перечне упомянутых задач принадлежит задачам обеспыливания воздуха [5-15].

Пылевые частицы антропогенного происхождения, во-первых, негативно воздействуют на организм работника, во-вторых, ухудшают производственно-технологическую обстановку, приводя к преждевременной порче зданий, сооружений, производственных машин и механизмов, а, попадая в воздушный бассейн городской среды, значительно повышают степень экологической опасности. Обладая в большинстве случаев высокой степенью токсичности, пыль может вызвать широкий круг профессиональных заболеваний, зачастую неизлечимых. На человека, находящегося в запылённом воздухе, может осуществляться как внешнее, так и внутреннее воздействие пылевых частиц. Проникая через поры потовых и сальных желёз, пылинки закупоривают их, затрудняя при этом их функции. Попадание пылевых частиц в глаза приводит к воспалительному процессу слизистой оболочки. При длительном вдыхании пыли работающие подвержены профессиональному заболеванию – пневмокониозу. Наиболее распространённой и тяжёлой формой пневмокониоза является силикоз, который поражает не только лёгкие, но и вызывает функциональные нарушения и изменения ряда важных органов и систем организма человека: нервной и сосудистой системы, кровообращения и других. В структуре заболеваемости с временной потерей трудоспособности почти 70% всех заболеваний приходится на болезни органов дыхания (туберкулёз, фарингит, остро–респираторные заболевания, обострение хронических заболеваний органов дыхания, другие

болезни верхних дыхательных путей) [13, 15].

Современное состояние экологического нормирования промышленных выбросов в России решается на основе введения новых гигиенических нормативов. В соответствии с введёнными в действие [4] установлены ПДК для мелкодисперсных частиц размерами менее 2,5 мкм (PM<sub>2,5</sub>) и менее 10 мкм (PM<sub>10</sub>). В результате введения обязательных стандартов и нормативов накоплен значительный опыт в области мониторинга и оценки содержания PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> [5, 16, 17, 18], которые по мелкодисперсным взвешенным веществам в атмосфере являются необходимыми условиями для эффективного управления качеством воздуха в целях охраны здоровья.

Наибольшей болезнетворностью обладают пылевые частицы PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>. Кроме того, как правило, являясь взрыво-и пожароопасной, пыль наносит ощутимый материальный ущерб различным отраслям народного хозяйства.

При этом сопоставительный анализ технологических особенностей, а также условий образования и выделения пыли предприятий различных отраслей промышленности позволяет заключить, что основной вклад в уровень запыленности воздуха рабочих зон и воздушного бассейна населённых мест вносят также объекты строительства и предприятия по производству строительных материалов [19, 20, 21]. Таким образом, наиболее значимый вклад в загрязнение городской среды вносит строительная отрасль, поскольку создает практически все виды систем жизнеобеспечения и является основой техногенных преобразований города. В условиях современного строительного производства, применение нового, высокопроизводительного оборудования, сопровождается интенсивным пылеобразованием. Анализ инфраструктуры территории современных городов позволяет заключить, что именно строительные объекты и предприятия по производству строительных материалов, в подавляющем большинстве случаев, расположены в черте городов, что обосновано, прежде всего, минимизацией транспортных расходов на доставку строительных материалов и конструкций от мест их производства на строительные площадки [19-23].

Кроме того, в отличие от предприятий смежных отраслей промышленности, предприятия строительного комплекса целесообразно располагать на территориях городских застроек и крупных населённых пунктов, что объясняется следующими основными причинами:

- во-первых, предприятия строительной индустрии следует располагать в местах, доступных для потребителей продукции и имеющих оптимальные транспортные связи, так как отдалённость предприятий от таких районов влечет за собой значительное увеличение капитальных и эксплуатационных затрат;

- во-вторых, необходимо обеспечивать взаимодействие с объектами жизнеобеспечения, например, системами водоснабжения, канализации, электроснабжения и другими инженерными сооружениями и коммуникациями;

- в-третьих, необходимо наличие резервов местной рабочей силы, которая, как правило, сосредоточена в крупных городах и населённых пунктах, что, позволит упростить процедуру комплектования, расселения и бытового обустройства работников.

В результате, наличие предприятий строительной индустрии и объектов строительства на территории городов и крупных населенных пунктов позволит повысить производительность труда и снизить издержки производства.

Следует учесть, что при таком размещении, предприятия строительного комплекса являются источниками негативного воздействия (акустического, вибрационного, теплового, материального) на городскую среду, при этом основная доля принадлежит материальному загрязнению воздушного бассейна. Анализ статистических данных позволяет заключить, что ежегодный выброс загрязняющих веществ в атмосферу предприятиями строительной индустрии составляет более 4 млн. тонн. Он содержит более 80 видов различных компонентов пыли, в том числе 2,4 млн. тонн или 58% пыли неорганической, состоящей из мельчайших твёрдых частиц и оказывающих отрицательное влияние на окружающую городскую среду и ее жителей [20, 21, 22, 24, 25, 26].

В промышленных условиях образование пылевых частиц преимущественно связано с такими технологическими операциями как дробление, размол, просев,

распиловка, пересыпка и другими перемещениями технологического сырья. Значительное количество пыли выделяется при реализации таких технологических операций как дробление и сортировка камня, погрузка и разгрузка цемента, извести, гипса, просеивание песка и шлака.

Производство работ на объектах строительства и предприятиях строительной индустрии сопровождается образованием, выделением и распространением различных видов пыли, приводящих к сверхнормативному уровню запылённости воздуха рабочих зон внутри производственных помещений и за их пределами на территории промышленных площадок [20, 21]. В результате, процессы измельчения, транспортировки, перемешивания технологического сырья с добавками и водой, формования, сушки, обжига характеризуются образованием и выделением пыли [20, 21].

В настоящее время исследование уровня запыленности на строительных предприятиях (заводах железобетонных изделий и конструкций, кирпичных заводах, заводах по изготовлению деревянных конструкций, заводах по изготовлению сухих строительных смесей, заводах по производству тепло- и звукоизоляционных материалов, заводах по изготовлению металлопластиковых конструкций и других) позволяет сделать вывод о том, что загрязнение воздуха является наиболее актуальной проблемой для заводов железобетонных изделий и конструкций (ЖБИиК), для которых характерна повышенная запылённость воздуха рабочих зон внутри производственных помещений и воздушного бассейна прилегающих территорий городских застроек [20, 21]. Наиболее распространенными источниками образования и пылевыведения на заводах ЖБИиК являются узлы перегрузки сыпучих материалов с конвейера на конвейер, либо с конвейера на другое технологическое оборудование, либо непосредственно различные виды конвейеров, относящихся к протяженным линейным источникам. Эксплуатация перечисленных технологических участков сопровождается процессами пылеобразования и пылевыведения, причинами которых является механическое взаимодействие частиц технологического сырья (щебня, песка) между собой, а также их соударение со стенками оборудования [19, 20, 21, 23,

27]. Именно конвейерные линии как источники образования и выделения пыли имеют ряд особенностей, к числу которых относятся их протяженность, динамичность, периодичность работы и другие. Кроме того, технологические операции, связанные с транспортировкой и перегрузкой сыпучих материалов, выделяющие в воздушную среду большое количество пыли, требуют применения таких способов обеспыливания, которые предотвращают переувлажнение транспортируемого технологического сырья.

Таким образом, можно заключить, что наибольшую опасность пылевого загрязнения воздушной среды среди предприятий строительной индустрии представляют заводы ЖБИиК, в эксплуатации которых сопровождается выделением большого количества неорганической пыли с содержанием  $\text{SiO}_2 > 70\%$  в воздух рабочих зон и промышленных площадок [5, 13, 14].

Несмотря на применение современных, достаточно эффективных способов и средств обеспыливания технологического сырья и воздушной среды, концентрация загрязняющих веществ в воздухе рабочих зон и промышленных площадок заводов ЖБИиК превышает соответствующие значения ПДК в десятки, и даже сотни, раз [5, 13, 14]. Именно по этой причине, проблема сведения к минимальному или, хотя бы, к нормативному уровню запыленности воздуха рабочих зон рассматриваемых предприятий требует дальнейшего совершенствования инженерных систем обеспечения качества воздушной среды (обеспыливания воздуха), а также технологий строительства и производства строительных материалов на уровнях санитарно-гигиенических и экологических нормативов.

Решение проблемы снижения запыленности воздуха рабочих зон и воздушного бассейна промышленных площадок заводов ЖБИиК возможно на основе реализации комплекса организационных и технологических мероприятий, в котором особо важное место занимают инженерные технологии обеспыливания сырья и воздуха, среди которых одной из наиболее эффективных является гидрообеспыливание пенным способом, обладающее рядом технических преимуществ и практически не нарушающее регламентируемых

производственно-технологических параметров (в частности, по влажности технологического сырья) на рассматриваемых предприятиях строительной индустрии [28-43].

В современных условиях развития техники и технологии реализации гидрообеспыливания пенным способом многообразие соответствующих технических средств вызывает необходимость выбора оптимального технического решения не только по критерию эффективности обеспыливания, но и по критерию энергетической экономичности его реализации [35, 44-52]. При этом оценку энергетической экономичности реализации процесса гидрообеспыливания технологического сырья и воздуха пенным способом целесообразно выполнить для рассматриваемых производственно-технологических условий заводов ЖБИиК, изучив и определив энергетические параметры пылевого аэрозоля на этапах его образования, выделения и распространения в воздухе, а также пены как дисперсной системы, обеспечивающей подавление пылевого аэрозоля.

Именно поэтому, решение задач, связанных с обеспыливанием технологического сырья, воздуха рабочих зон и промышленных площадок объектов строительной отрасли, в том числе, заводов по изготовлению железобетонных конструкций на основе разработки и внедрения новых, более эффективных и энергетически экономичных инженерных способов и средств, является одной из актуальных проблем в области обеспечения безвредных условий труда и экологической безопасности.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» по теме: «Создать и внедрить инженерные системы обеспечения чистоты воздуха в производственных помещениях и предупреждения загрязнения атмосферы промышленных площадок», по теме: «Разработка и внедрение в практику систем жизнеобеспечения в производственной и окружающей средах» в рамках комплексной научно-технической программы Министерства образования и науки РФ; по теме:

«Совершенствование методических подходов к оценке динамики загрязнения воздушного бассейна территорий городских застроек с учетом региональных природно-климатических, градостроительных особенностей и характеристик источников загрязнения воздуха» в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, № государственной регистрации 5.4244.2011; по теме научно-образовательного проекта «Решение комплексных проблем по разработке методологии выбора комплекса высокоэффективных и экономичных градостроительных, технологических и специальных инженерных мероприятий по обеспечению экологической безопасности территорий городских застроек» в рамках Программы Стратегического развития университета на 2012-2016 гг., № государственной регистрации 01201365848; по теме: «Научное обоснование концепции и разработка методологии оценки, расчета и проектирования экологически эффективных и энергетически экономичных способов и средств снижения загрязнения выбросов предприятий строительной индустрии и объектов городского хозяйства для обеспечения экологической безопасности территорий населенных мест» в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, № государственной регистрации 114041840023.

**Степень разработанности темы.** Исследованию свойств пылевого аэрозоля посвящены труды многих ученых, основополагающими среди которых являются теоретические и экспериментальные работы В. Гиббса, К. Спурного, Х. Грина, В. Лейна, Н.А. Фукса, С. Соу, В. Штрауса, П.А. Ребиндера, П.А. Коузова и других, на основании которых можно заключить, что пылевой аэрозоль следует рассматривать как дисперсную систему.

Изучение пыли в виде дисперсной системы, поведение частиц пыли в условиях действия на них внешних факторов, исследование вопросов, связанных со снижением концентрации пыли в воздухе, совершенствование технических средств пылеподавления отражено в работах Азарова В.Н., Амерханова Р.А., Батаева Д.К.-С., Беспалова В.И., Богуславского Е.И., Глузберга В.Е., Гращенкова Н.Ф., Дьякова В.В., Журавлева В.К., Журавлева В.П., Забурдяева Г.С., Ищука

И.Г., Кирина Б.Ф., Клебанова Ф.С., Кудряшова В.В., Ливчака И.Ф., Логачева И.Н., Логачева К.И., Луговского С.И., Лукьянова А.Б., Менковского М.А., Минко В.А., Никитина В.С., Перцева Н.В., Позднякова Г.А., Саранчука В.И., Сидоренко В.Ф., Страховой Н.А., Хежева Т.А., Цыцуря А.А., Шварцмана Л.А., Штокмана Е.А. и многих других авторов. Исследования этих авторов основаны на использовании основополагающих концепций таких наук как механика многофазных сред, аэродинамика, термодинамика, физическая и коллоидная химия, основных принципах технологий реализации пылеподавления воздушной среды совместно с экспериментальными данными, полученными с помощью высокоточных измерительных приборов.

Не смотря на это, вопросы, связанные с параметрами устойчивости и энергетическими характеристиками пылевого аэрозоля как дисперсной системы в процессе снижения запыленности воздушной среды, полностью до сих пор не выяснены. Кроме того, для рационального управления рабочими параметрами инженерных систем гидрообеспыливания пеной технологического сырья и воздушной среды необходимо знание сущности процессов, организуемых этими системами в отношении пылевого аэрозоля, который образуется и выделяется на рассматриваемых предприятиях строительной индустрии. При этом энергетические параметры пылевого аэрозоля, характеризующие условия его образования, выделения и распространения в рассматриваемых производственно-технологических условиях, а также энергетические параметры пены как внешней дисперсной системы, направленной на подавление пылевого аэрозоля, остаются на сегодняшний день недостаточно изученными.

**Цель и задачи работы.** Целью работы является обеспечение безвредных условий труда в рабочих зонах предприятий строительной отрасли, а также экологически безопасных условий, благоприятных для жизнедеятельности населения городских территорий, на основе совершенствования метода оценки и выбора высокоэффективных и энергетически экономичных инженерных систем обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха.

Достижение поставленной цели может быть обеспечено на основе решения

следующих **задач**:

- выявить основные факторы и источники загрязнения воздушной среды городских территорий, характерные для предприятий строительной индустрии;
- изучить особенности состояния воздушной среды в рабочих зонах заводов по изготовлению железобетонных конструкций;
- определить и описать энергетические характеристики процессов и явлений, наблюдаемых в пылевых аэрозолях, образующихся и выделяющихся в воздушную среду на заводах по изготовлению железобетонных конструкций, а также оценить влияние этих особенностей на условия реализации процесса обеспыливания воздуха;
- выполнить анализ современного состояния теории и практики обеспыливания технологического сырья и воздуха пенным способом как наиболее экономичной технологии борьбы с пылью, включая: теоретические подходы к описанию процесса пылевого загрязнения воздушной среды, систематизацию современных средств обеспыливания технологического сырья и воздуха, технологические особенности получения пены, её основные свойства и условия пенообразования, а также известные методические подходы к оценке и выбору оптимальных для заданных производственных условий технологий обеспыливания пеной;
- разработать алгоритм реализации физико-энергетического подхода к оценке и выбору оптимальных для заданных производственных условий технологий обеспыливания пеной на основе выявления физических особенностей и построения соответствующих блок-схем реализации процессов загрязнения и снижения загрязнения используемого технологического сырья и воздушной среды для основных технологических процессов на заводах по изготовлению железобетонных конструкций;
- получить функциональные зависимости санитарно-гигиенической и экологической эффективности, а также критерия энергетической экономичности процесса обеспыливания пеной воздуха и технологического сырья для условий эксплуатации ленточных транспортёров;
- разработать методические основы оценки и выбора экологически эффективных

и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной, включая: формирование блока исходных данных для оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной, математическое описание процесса обеспыливания пеной на этапах пылезадержания (экранирования), очистки воздуха от пыли и рассеивания пыли, а также формирование логического блока выбора оптимальной технологии обеспыливания пеной;

- на основе разработанной методики выполнить теоретические расчёты и определить области существования значений критериев значений санитарно-гигиенической и экологической эффективности, а также энергетической экономичности различных технологий обеспыливания пеной для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций;

- провести экспериментальные исследования результирующих параметров различных технологий обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций;

- выполнить сопоставление результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными и оценить возможность практического использования разработанной методики;

- выполнить практическую реализацию методики оценки и выбора наиболее эффективных и в максимальной степени энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной при эксплуатации и реконструкции заводов по изготовлению железобетонных конструкций, а также при проведении научных исследований и в учебном процессе.

**Научная новизна** и значимость наиболее существенных результатов работы заключаются в следующем:

- установлены энергетические закономерности процессов образования, распространения и разрушения пены в зависимости от технологии пенообразования и аэродинамических условий распространения пены в двух различных состояниях (пенный аэрозоль и пенный слой), роль и влияние

энергетических параметров пылевого аэрозоля и пены на результат реализации процесса обеспыливания пеной, зависимости их от физико-химических и производственно-технологических характеристик, а также возможность оценки и выбора оптимальной технологии обеспыливания пеной на основе этих параметров;

- изучены особенности процесса обеспыливания пеной на источниках пылевыделения с различными аэродинамическими характеристиками (открытые источники и вентиляционные системы) для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций с применением различных составов пенообразующего раствора, а также выделены граничные значения гидро-аэродинамических параметров и области преимущественного использования различных технологий обеспыливания пеной и составов пенообразующего раствора;

- для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций получены функциональные зависимости, которые описывают основные характеристические параметры пены и пылевого аэрозоля на этапах пылезадержания и очистки воздуха от пылевых частиц на основе определения взаимных связей между энергетическими характеристиками процесса обеспыливания и физико-химическими свойствами пены;

- для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций установлены зависимости, раскрывающие взаимную связь между физико-химическими характеристиками взвешенных в воздухе частиц пыли и пенного аэрозолей (плотностью материала пылевых частиц, их средним медианным диаметром, средним диаметром пенного пузырька, средней толщиной плёнки пенного пузырька, плотностью раствора пенообразователя, критических значений скорости встречи частиц с пузырьками, времени их динамического соприкосновения, упругого взаимодействия, смачивания и других) и параметрами, характеризующими воздушную среду (результатирующей скоростью потока, средней температурой, градиентом температуры, плотностью и динамической вязкостью воздуха) на этапе рассеивания пыли;

- установлены зависимости эффективности обеспыливания пеной от параметров, характеризующих свойства пылевого аэрозоля, пены и воздушного потока, а также особенностей их взаимодействия с учётом условий разрушения пенных пузырьков для производственно-технологических условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций;

- выполнено математическое описание основных характеристик процесса рассеивания пыли в воздухе пенным способом на основе установления функциональных зависимостей экологической эффективности и энергоёмкостного показателя от свойств взвешенных в воздухе пылевых частиц, пенного аэрозоля и воздушной среды в зоне источника выброса пыли в воздушный бассейн городской среды;

- получены зависимости энергоёмкостного показателя процесса обеспыливания пеной от основных технологических параметров получения пены и параметров её взаимодействия с пылью для рассматриваемых производственно-технологических условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций;

- выполнено математическое описание физических процессов обеспыливания пеной, которое позволяет оценивать и прогнозировать работу различных его технологических видов (пенным аэрозолем и пенным слоем), не проводя предварительную их практическую реализацию и подбора оптимальных рабочих параметров опытным путём.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем:

- получены теоретические и эмпирические зависимости эффективности и удельной затраченной энергии реализации процесса обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха на основе теории подобия с учётом наиболее значимых для практики параметров: скорости движения воздуха в зоне источника пылевыделения, поверхностного натяжения раствора пенообразователя и ряда других, которые позволяют выполнять сопоставительную оценку предварительно выбранных вариантов технологий рассматриваемого процесса для заводов по изготовлению железобетонных конструкций;

- на основе получения функциональных зависимостей результирующих параметров процесса пылеподавления разработана методика оценки и выбора высокоэффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной, использующая в качестве критериев оптимизации эффективность и энергоёмкостный показатель, позволяющая также выполнять расчёт рациональных параметров пенного способа для конкретных источников пылевыделения на заводах по изготовлению железобетонных конструкций с учетом обеспечения ПДК пыли в воздухе рабочих зон и приземном слое атмосферы городских территорий;

- в результате проведённых исследований разработаны рекомендации по совершенствованию процесса обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха для заводов по изготовлению железобетонных конструкций с целью достижения максимальной санитарно-гигиенической и экологической эффективности, с максимальной экономичностью обеспечивая нормативные параметры запыленности воздуха рабочих зон и приземного слоя атмосферы прилегающих городских территорий для ситуаций, когда традиционно применяемые инженерные средства не дают возможности достичь оптимальных расчётных параметров рассматриваемого процесса;

- разработаны конструкции: устройства регенерационной очистки загазованного воздуха (патент на изобретение № 2144434), устройства регенерационной очистки воздуха от тонкодисперсной неслипающейся пыли (патент на изобретение № 2156643), устройства очистки воздуха от тонкодисперсной неслипающейся пыли (патент на полезную модель № 137210), устройства для очистки вентиляционного воздуха (патент на полезную модель № 139077), устройства для очистки воздуха от пыли (патент на полезную модель № 145908), аппарата гидродинамической очистки газов (патент на полезную модель № 146368), устройства для улавливания и связывания пыли «ОТУО-2-3» (патент на полезную модель № 154725), устройства для улавливания и связывания пыли (патент на полезную модель № 169050), устройства для улавливания и связывания пыли (патент на полезную модель № 170041), устройства для улавливания и связывания пыли

(патент на полезную модель № 170041), обеспечивающие высокую эффективность пылезадержания (экранирования) и очистки воздуха от пыли на основе пенного способа;

- разработана программа «GEEPSUOR» для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации № 2016613157), позволяющая для заданных условий производства заводов по изготовлению железобетонных конструкций выполнять аналитическое моделирование и расчёт рабочих параметров пенного способа, на основе чего выбирать оптимальную технологию обеспыливания пеной и определять соответствующие ей рабочие параметры для этапов пылезадержания, очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пыли в атмосфере с учётом обеспечения максимальной эффективности (до значений ПДК<sub>рз</sub> и ПДК<sub>мр(сс)</sub>) и энергетической экономичности.

**Методология и методы исследования** базировались на аналитическом обобщении известных научных и технических результатов, физическом и математическом моделировании, обработке экспериментальных данных методами теории подобия и математической статистики, сопоставлении полученных автором результатов экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных условиях, с соответствующими теоретическими результатами, а также с результатами, полученными другими авторами.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- процесс взаимодействия пены с пылевым аэрозолем, включающий три этапа его реализации – пылезадержание, очистку воздуха от пыли и рассеивание пыли в атмосфере, с учетом взаимного действия в качестве основных таких сил как: гидродинамические, аэродинамические, поверхностные и межмолекулярные, а также преобладающей роли энергетических параметров, определяемых влиянием физико-химических свойств взаимодействующих фаз, а также характеристиками производственно-технологических условий;

- свойства пены и аэрозоля, содержащего пылевые частицы, при их взаимодействии определяются технологией пенообразования и условиями пылевыделения, на основании чего установлены зависимости этих параметров

(диаметра пенного пузырька, толщины пленок в пене, плотности пены, критических значений скорости встречи частиц с пузырьками, времени их динамического соприкосновения, упругого взаимодействия, смачивания и других) от комплексного влияния конструктивных и технологических характеристик процесса получения пены, аэродинамической обстановки в зоне пылевыделения, свойств пенообразующего раствора и пылевого материала;

- рассеивание в атмосфере пыли пеной можно однозначно характеризовать оценочным энергоёмкостным показателем, непосредственно связанным с экологической эффективностью и с параметрами, характеризующими состояние воздушной среды, а также технологические и производственные условия заводов по изготовлению железобетонных конструкций; при этом анализ такой функциональной взаимосвязи позволяет для процесса рассеивания в атмосфере пыли пеной определить пути его дальнейшего совершенствования;

- математические зависимости результирующих параметров процесса обеспыливания пеной технологического сырья и воздушной среды, полученные на основе описания энергетических параметров пены и пыли, а также различных условий пылевыделения и пенообразования, позволяют оценивать различные технологии обеспыливания пеной по критериям санитарно-гигиенической и экологической эффективности, а также по критерию энергетической экономичности (энергоёмкостному показателю).

**Степень достоверности и апробация результатов.** Степень достоверности представленных в работе основных научных положений, сформулированных выводов и разработанных рекомендаций обоснована применением фундаментальных основ теории дисперсных систем, механики аэрозолей, теории подобия, а также современных методик проведения научных исследований, сходимостью полученных автором результатов теоретических и экспериментальных исследований в пределах относительной погрешности  $\Delta_C = \pm 13,26\%$  для измерений эффективности и  $\Delta_N = \pm 9,7\%$  для измерений затраченной энергии с доверительной вероятностью 0,95 и получением прогнозируемых результатов в практической реализации.

**Апробация результатов работы.** Основные научные положения, а также теоретические и практические результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на: международной научно–практической конференции «Экология и регион» (г. Ростов-на-Дону, 1995 г.), международной научно-технической конференции «Проблемы охраны производственной и окружающей среды» (г. Волгоград, 1997 г.), международной школе–семинаре «Промышленная экология» (пос. Абрау-Дюрсо, 1998 г.), международной школе-семинаре «Промышленная экология» (г. Ростов-на-Дону, 2000 г.), международной научно-практической конференции «Здоровье города – здоровье человека» (г. Ростов-на-Дону, 2001 г.), международной конференции Департамента по охране окружающей среды Южного региона (г. Ростов-на-Дону, 2001 г.), международной научно–практической конференции «Экология и жизнь» (г. Пенза, 2012 г.), международной научно–практической конференции «Наука и образование в 21 веке» (г. Москва, 2013 г.), международной научно-практической конференция «Фундаментальные проблемы науки» (г. Уфа, 2013 г.), ежегодных международных научно-практических конференциях «Строительство» (г. Ростов-на-Дону, 1997-2014 гг.), всероссийской научно–практической конференции «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности» (г. Санкт-Петербург, 2000 г.), научно-практической конференции «БЖД, XXI век» (г. Волгоград, 2001 г.).

**Основная идея работы** заключается в использовании физико-энергетического подхода к описанию основных характеристик пылевого аэрозоля и воздействующей на него пены для формализации критериев и разработки методики оценки и выбора высокоэффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной.

**Вкладом автора в проведенное исследование** являются:

- непосредственное участие на всех этапах исследования как процесса загрязнения, так и процесса снижения загрязнения воздушной среды применительно к условиям эксплуатации ленточных транспортёров на предприятиях строительной индустрии;
- разработке физических моделей процессов загрязнения и снижения загрязнения

воздушной среды для условий эксплуатации ленточных транспортёров предприятий строительной индустрии;

- получение новых функциональных зависимостей санитарно-гигиенической и экологической эффективности, а также энергоёмкостного показателя этапов пылезадержания, очистки воздуха от пыли и рассеивания пыли в атмосфере как основных составляющих процесса обеспыливания технологического сырья и воздуха на предприятиях строительной индустрии;

- разработка методики оценки и выбора оптимальных для заданных производственных условий технологий обеспыливания пеной, расчёте их оптимальных рабочих параметров, а также создании алгоритма её реализации применительно к условиям эксплуатации ленточных транспортёров на предприятиях строительной индустрии;

- проведение экспериментальных исследований результирующих параметров различных технологий обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций, а также в сопоставлении результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными и оценке возможности практического использования разработанной методики;

- личное участие в практической апробации результатов выполненных исследований;

- подготовка основных публикаций по результатам выполненных исследований.

**Реализацию результатов работы** характеризуют:

- разработанные на основании результатов оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха, проведенных по предложенной автором методике, а также практически применённые рекомендации по улучшению условий труда на рабочих местах, повышению санитарно-гигиенической эффективности, степени экологической безопасности и энергетической экономичности систем пылеподавления для предприятий строительной индустрии;

- внедренные способы организации и технологии обеспыливания пеной

производственного сырья и воздуха на ПАО «Комбинат строительных материалов (КСМ) №10 (г. Ростов-на-Дону), ООО «Завод строительного оборудования» (г. Ростов-на-Дону), ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК (г. Батайск Ростовской области) и ЗАО «Ростовский Завод Железобетонных Конструкций» (г. Ростов-на-Дону);

- использованные Комитетом по охране окружающей среды Администрации г. Ростова-на-Дону результаты исследований при разработке Целевой экологической программы «Оздоровление воздушного бассейна г. Ростова-на-Дону»;

- использованные результаты исследований в учебном процессе кафедрой «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам: «Безопасность жизнедеятельности», «Теоретические основы защиты окружающей среды», «Процессы и аппараты защиты окружающей среды», «Механика многофазных сред», «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности».

**Публикации.** Основные результаты, полученные в результате исследований по теме диссертационной работы, изложены в 75 публикациях, в том числе: в 2 монографиях, 62 научных статьях, в том числе 20 статьях, опубликованных в изданиях, рекомендуемых ВАК России, 7 статьях, индексируемых в научной базе «Scopus», 10 патентах на изобретения и полезные модели, а также в 1 свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ и в научно-технических отчетах.

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа включает введение, пять глав, выводы, список литературы и приложения. Общий объём работы составляет 287 страниц, включая 244 страниц основного машинописного текста, включающего 6 таблиц и 37 рисунка, список литературы, состоящий из 210 наименований и изложенный на 24 страницах, а также 13 приложений, изложенных на 19 страницах.

Автор выражает искреннюю благодарность Лавриненко В.Б., Дорофееву

В.А., Абдулкадирову Ш.А., Каушанскому М.В. за помощь в организации промышленных экспериментов и апробации практических результатов исследований, Шуйскому А.И., Ерёминой Л.В., Томашук Е.А., Пушенко С.Л., Несветаеву Г.В. за ценные советы, сделанные ими при выполнении научных исследований по теме диссертационной работы, а также коллективу кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» за помощь в процессе отладки программы «GEEPSUOR» и ценные практические рекомендации по теме диссертации.

## **1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫДЕЛЕНИЯ ПЫЛИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ**

В современных условиях развития экономики России предприятия строительной индустрии представляют собой крупные промышленные комплексы, обеспечивающие как производство строительных материалов и конструкций, так и строительство объектов (зданий и сооружений) различного назначения [19, 20, 21].

Строительство объектов различного назначения предполагает выполнение следующих основных видов строительно–монтажных работ (подготовительных, транспортных и погрузочно–разгрузочных, земляных, каменных, бетонных и железобетонных, монтажных, отделочных и кровельных) с использованием строительных материалов и конструкций, а также строительной техники, машин и механизмов [19-23]. При этом необходимо отметить, что, как правило, строительство объектов выполняется в границах городских территорий, что связано, прежде всего, с развитием инфраструктуры населенных мест, и сроки строительства достаточно ограничены (исключая долгострой) и являются относительно кратковременными [19-23]. Анализ и обобщение результатов аттестации рабочих мест при выполнении строительно-монтажных работ на различных объектах строительства на территории Российской Федерации за последние 5 лет [7, 8, 9, 13, 14] позволил заключить, что на строительных площадках помимо других негативно воздействующих на работающих и окружающую среду факторов (шум, вибрация, тепловое излучение, электромагнитное излучение, загазованность и др.) образуется пыль с различными свойствами, которая выделяется в воздух рабочих зон, а также в воздушный бассейн городских территорий [5-15].

В свою очередь, к предприятиям по производству строительных материалов и конструкций относят: заводы железобетонных изделий и конструкций; кирпичные заводы по изготовлению различных видов кирпича;

деревообрабатывающие предприятия по производству деревянных конструкций и материалов; цементные заводы; карьеры по добыче нерудных материалов (песка, щебня, строительного камня и т.п.); заводы по изготовлению сухих строительных смесей и строительных материалов; заводы по изготовлению керамической плитки и тротуарной плитки; асфальтобетонные заводы; предприятия по изготовлению металлоконструкций и ряд других [19, 20, 21, 23, 25, 26, 27].

Перечисленные предприятия, как и строительные площадки, также расположены, как правило, в границах городских застроек, что связано с необходимостью минимизации транспортных расходов на доставку строительных материалов к объекту строительства [19-23].

При эксплуатации производственно–технологического оборудования на предприятиях по производству строительных материалов и конструкций происходит переработка и измельчение различных видов технологического сырья, в результате чего порождаются различные фракционные компоненты, в результате чего также образуется пыль [20, 21, 22, 24, 25, 26].

При этом в соответствии с [35, 46, 47] ту часть строительных машин, механизмов, производственно–технологического оборудования, в зоне которой происходит процесс образования пыли, можно считать *«источником пылеобразования»*, а ту часть этих машин, механизмов и оборудования, в зоне которой происходит процесс выхода пыли из объема технологического сырья в воздух рабочей зоны, можно считать *«внутренним источником пылевыделения»*. Переход частиц пыли из воздуха рабочих зон в воздух строительных или промышленных площадок (и, в итоге, городской территории) представляет собой [35, 46, 47] процесс *«внешнего пылевыделения»*.

Для дальнейших исследований, связанных с возможностью управления параметрами и повышением эффективности обеспыливания технологического сырья и воздуха на предприятиях строительной индустрии, необходимо выявить, прежде всего, основные источники пылевого загрязнения воздушной среды городских территорий, характерные для таких предприятий, а также конкретные группы предприятий, вносящих наибольший вклад в такое загрязнение.

## **1.1 Основные источники пылевого загрязнения воздушной среды городских территорий, характерные для предприятий строительной индустрии**

Производство различных видов строительных материалов и конструкций представляет собой сложные технологические процессы, связанные с переводом технологического сырья в различные физические состояния с различными физико–химическими свойствами, а также с использованием разной степени сложности основного технологического оборудования, вспомогательных машин и механизмов. Практически во всех случаях эти технологические процессы сопровождаются выделением большого количества полидисперсной пыли с совершенно разнообразными свойствами, которая становится причиной различных профессиональных заболеваний работников, снижения производительности труда, износа технологического оборудования и, как следствие, снижение рентабельности производства [13, 15].

Анализ технологических особенностей производства, условий образования, выделения и распространения пыли в воздушной среде [19, 20, 21, 23, 25, 26, 27] позволяет заключить, что наибольшую опасность пылевого загрязнения воздушной среды из всего перечня предприятий строительного комплекса представляют заводы по изготовлению железобетонных изделий и конструкций (ЖБИиК), эксплуатация которых приводит к выделению в воздух рабочих зон и промышленных площадок большого количества пыли неорганической с содержанием  $\text{SiO}_2 > 70\%$  [5, 13, 14]. При этом основными источниками образования и выделения пыли на таких заводах являются конвейерные линии, имеющие ряд особенностей, к числу которых относятся их протяженность, динамичность, периодичность работы и другие. Кроме того, технологические операции, связанные с транспортировкой и перегрузкой сыпучих материалов, выделяющие в воздушную среду большое количество пыли, требуют применения таких способов обеспыливания, которые предотвращают переувлажнение

транспортируемого технологического сырья и не требуют под размещение больших площадей.

Обобщенный анализ многолетних наблюдений за состоянием атмосферного воздуха крупных городов Российской Федерации, на территории которых расположены заводы ЖБИиК, по данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации показывает, что доля именно этих предприятий составляет до 75% в общем вкладе стационарных источников в загрязнение воздушного бассейна городов неорганической пылью с содержанием  $\text{SiO}_2 > 70\%$  [53-57].

Для обеспечения возможности управления процессом обеспыливания сырья и воздуха с целью повышения его эффективности и энергетической экономичности, необходимо, в первую очередь, выявить закономерности реализации процесса загрязнения технологического сырья и воздуха, а также процесса обеспыливания воздушной среды для наиболее значимых по вкладу источников пылевого загрязнения заводов ЖБИиК. Исходя из этого, на начальном этапе исследований необходимо установить такие источники, а также предложить наиболее близкий по цели теоретический подход к описанию процессов пылевого загрязнения и обеспыливания воздуха, учитывая условия эксплуатации заводов ЖБИиК.

## **1.2 Обоснование выбора теоретического подхода к описанию процессов пылевого загрязнения и обеспыливания воздушной среды**

В современной практике выбор оптимальных технологий обеспыливания воздушной среды (производственной и внешней) должен базироваться, прежде всего, на теоретическом обосновании и описании процессов загрязнения воздуха пылью и снижения пылевого загрязнения. Таких теоретических подходов в настоящее время существует достаточно большое количество, в связи с чем, на

данном этапе исследований нашей задачей является выбор наиболее приемлемого подхода.

Анализ научных исследований, связанных с выбором оптимальных технологий обеспыливания воздушной среды показал, что особого внимания в рамках упомянутой задачи заслуживают следующие основные теоретические подходы, базирующиеся на использовании различных критериев оптимизации процесса обеспыливания воздуха и предполагающие, что эффективность пылеподавления является основным и определяющим оптимизационным критерием выбираемых технологий (способов и средств) обеспыливания при его устремлении к максимуму.

Один из таких подходов основан на реализации методики, описанной в работе [58], в которой выбор мероприятий, обеспечивающих экологическую безопасность городских территорий, в том числе, мероприятий по обеспыливанию воздуха, основан на использовании совокупности частных оценок загрязнения атмосферного воздуха выбросами стационарных и передвижных источников, причем состояние растительности и орнитофауны учтено в данном случае для оценки воздействия загрязнения атмосферы на живые организмы. При этом с целью объединения частных оценок в комплексную авторы работы [58] предлагают использовать следующую линейную формулу:

$$J_{\text{компл}} = A_1 \cdot J_1 + A_2 \cdot J_2 + \dots + A_n \cdot J_n, \quad (1.1)$$

где  $J_1, J_2, \dots, J_n$  – безразмерные оценочные критерии для рассчитываемого участка территории;  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – соответствующие весовые коэффициенты.

Реализация этого подхода базируется на сравнительной оценке состояния воздушной среды отдельных участков рассматриваемой территории, выявлении причин образования загрязнённых зон и формировании комплекса соответствующих мероприятий по защите воздушной среды.

Однако, по нашему мнению, основным недостатком такого подхода является использование простейшей линейной формулы суммирования при

объединении частных критериев в комплексную оценку, что даёт весьма неточные результаты. Кроме того, отсутствуют рекомендации по повышению степени объективности оценки весовых коэффициентов, определяющих приоритеты частных оценок.

Другим, наиболее широко применяемым на практике, является теоретический подход, в котором выбор способов и средств обеспечения экологической безопасности территорий населённых мест, включая обеспыливание воздуха, основан на бальной пофакторной оценке [59] и предполагает использование шкалы критериев оценки качества воздушной среды (например, пылевой нагрузки). При реализации этого подхода оценивается степень загрязнения воздушного бассейна, а уровень загрязнения (критерий качества воздушной среды) рассматривают либо в натуральных показателях (концентрациях, мг/м<sup>3</sup>), либо в относительных показателях:

- нормированные показатели (кратность превышения ПДК);
- коэффициент концентрации, представляющий собой кратность превышения содержания загрязняющего вещества над его фоновым содержанием в воздушной среде и определяемый по формуле:

$$J_c = \frac{C_i}{C_\phi}, \quad (1.2)$$

где  $C_i$  и  $C_\phi$  – соответственно значения фактической и фоновой концентрации  $i$ -го загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup>;

- коэффициент суммарного загрязнения  $A$ , применяемый при учёте воздействия нескольких загрязняющих веществ, отражающий суммарное воздействие этих веществ и определяемый по формуле:

$$A = \sum_i \frac{C_i}{ПДК_i}, \quad (1.3)$$

где  $ПДК_i$  – предельно допустимая концентрация  $i$ -го вещества в воздушной среде, мг/м<sup>3</sup>.

К преимуществам этого подхода, на наш взгляд, можно отнести:

- использование суммарного показателя, определяющего кратность превышения фактического уровня загрязнения над нормативным (фоновым);
- введение коэффициентов концентрации и суммарного загрязнения как достаточно показательных характеристик, используемых для определения экологического критерия состояния воздушной среды.

Однако, по нашему мнению, этот подход обладает рядом недостатков, к основным из которых можно отнести:

- невысокую точность получаемых результатов при переходе от анализа воздействия отдельных видов загрязняющих веществ к анализу их суммарного воздействия, так как значения, получаемые при расчётах, округляются до целых чисел;
- шкала критериев оценки определена методом экспертных исследований, что носит весьма субъективный характер при оценке состояния воздушной среды;
- результаты оценки имеют приближённый характер, что, в конечном счёте, отражается на неточности выбора оптимальных мероприятий по защите воздушной среды.

Другой подход, связанный с выбором способов и средств обеспечения экологической безопасности территории города, включая обеспыливание воздуха, основан на выделении трёх компонентов оценки качества состояния воздушной среды, для чего использованы стандартное отношение фактической концентрации загрязняющих веществ к ПДК и комплексный показатель, описываемый зависимостью [60]:

$$X = f(X_0, X_1, X_2) \quad , \quad (1.4)$$

где  $X_0$  – критерий стандарта качества (нормативный базовый уровень) воздушной среды, принимаемый равным 1;  $X_1$  – критерий ухудшения качества воздушной среды по отношению к допустимому уровню (величина безусловного превышения базового уровня), определяемый по формуле:

$$X_1 = \sqrt{B(R-1)^2}; \quad (1.5)$$

$X_2$  – критерий допустимого уровня качества воздушной среды, определяемый по формуле:

$$X_2 = \sqrt{BR^2}, \quad (1.6)$$

где  $R$  – индекс ухудшения состояния воздушной среды;  $B$  – весовой коэффициент, рассчитанный по значениям экономического ущерба воздушной среде.

Комплексную оценку качества состояния воздушной среды в рассматриваемом подходе определяют по формуле:

$$X = 1 + \sqrt{B(R-1)^2} - \sqrt{BR^2}. \quad (1.7)$$

К преимуществам этого подхода, на наш взгляд, можно отнести:

- методическое обеспечение процедуры ранжирования и классификации состояния воздушной среды территории города по уровню и степени её загрязнения;
- возможность одновременной оценки и сравнения нескольких вариантов мероприятий по обеспыливанию воздушной среды.

Однако, по нашему мнению, основным недостатком этого подхода является отсутствие возможности учёта экономических показателей при оценке состояния воздушной среды и выборе оптимальных мероприятий по её обеспыливанию.

Также наиболее близким по кругу решаемых задач является подход, описанный авторами работ [61-64], связанный с выбором способов и средств обеспечения экологической безопасности территории города, включая обеспыливание воздуха, и основанный на теории комплексной оценки состояния окружающей среды территории города, учитывающей три показателя: экономический, экологический и социальный.

При реализации этого подхода на территории города выделяют зоны по их функциональному назначению (селитебные, промышленные, рекреационные),

учитывая, что значимость составляющих комплексной оценки меняется в различных районах города и оценивается соответствующими показателями:

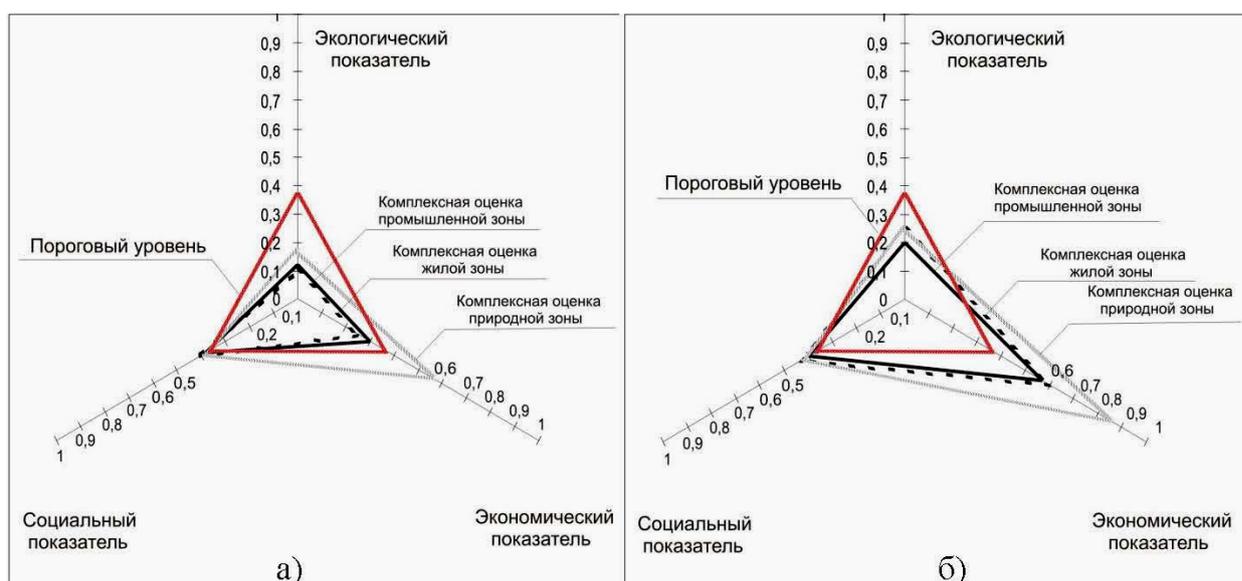
- экологическим, характеризующим как материальное, так и энергетическое загрязнение каждого компонента окружающей среды, включая показатель загрязнения воздушного бассейна;
- экономическим, характеризующим экономическую выгоду от реализации на рассматриваемой территории природоохранных мероприятий, включая воздухоохраные;
- социальным, характеризующим состояние здоровья населения, условия жизнедеятельности, комфортности и благоустроенности рассматриваемой территории города.

Объединение в комплексную оценку вышеперечисленных показателей в рассматриваемом подходе предложено на основе их нормирования с помощью функции Харрингтона в интервале значений от 0 до 1 с последующим построением диаграммы комплексной оценки состояния окружающей среды территории города как без реализации дополнительных природоохранных мероприятий, включая воздухоохраные, так и с учётом их реализации (рисунки 1.1а, 1.1б).

К преимуществам подхода, описанного в работах [61-64], на наш взгляд, можно отнести:

- возможность комплексной оценки качества состояния окружающей среды городских территорий, включая оценку качества состояния воздушного бассейна;
- возможность выбора высокоэффективных природоохранных мероприятий, включая воздухоохраные, на основе анализа диаграммы комплексной оценки качества состояния окружающей среды территории города, включая оценку качества атмосферного воздуха.

Однако, следует отметить, что основным недостатком этого подхода является то, что комплексная оценка качества состояния окружающей среды городских территорий носит весьма субъективный характер, так как каждый показатель (экологический, экономический, социальный), входящий в комплексную оценку,



Желательность	Отметки на шкале желательности
Очень плохо	0,00 – 0,20
Плохо	0,20 – 0,37
Удовлетворительно	0,37 – 0,63
Хорошо	0,63 – 0,80
Очень хорошо	0,80 – 1,00

а) – до реализации дополнительных природоохранных мероприятий; б) – после реализации дополнительных природоохранных мероприятий

Рисунок 1.1 – Диаграмма комплексной оценки качества состояния окружающей среды рассматриваемой территории города

определяется на основе субъективной выборки исходных данных.

Другой подход [65, 66], связанный с выбором способов и средств обеспечения экологической безопасности территории города, включая обеспыливание воздуха, основан на использовании обобщённого критерия  $P$ , зависящего от параметров, которые непосредственно определяют эффективность функционирования технологической системы (способов и средств) пылеподавления, и позволяющий оценить результат применения гидрообеспыливания с учетом статистических характеристик. Однако, по нашему мнению, основным недостатком этого подхода является то, что он учитывает не все физико-химические механизмы процесса обеспыливания диспергированной жидкостью. При этом преимуществом этого подхода является то, что он может

дополнить физико-математическое описание процесса пылеподавления.

Особого внимания по кругу решаемых задач заслуживает также подход, описанный авторами работ [67, 68], связанный с оценкой и сравнением способов гидрообеспыливания по значениям энергии, затраченной на их реализацию, совместно со значениями эффективности пылеподавления. Однако, к недостаткам рассматриваемого подхода можно отнести то, что:

- во-первых, в подходе отсутствует конкретный физический смысл с точки зрения энергетических параметров;
- во-вторых, постоянный рост эффективности пылеподавления и энергетических затрат, при изменяющихся основных параметрах гидрообеспыливания, приводит к стиранию границ оптимальности такой оценки;
- в-третьих, в подходе не раскрывается взаимосвязь физико-механических механизмов рассматриваемого процесса борьбы с пылью и не выделяется степень влияния этих механизмов на эффективность пылеподавления, что не позволит намечать дальнейшие мероприятия по его совершенствованию.

Наиболее близким по кругу решаемых задач, на наш взгляд, является физико-энергетический подход, описанный в работах [35, 44-49, 51, 52], связанный с оценкой и сравнением различных технологий обеспыливания воздуха на основе двух оптимизационных критериев: эффективности снижения концентрации загрязняющих веществ, в том числе, пыли, и энергоёмкостного показателя, характеризующего энергетическую экономичность процесса обеспыливания. При этом, рассматривая эффективность процесса снижения загрязнения воздуха в целом, можно предложить выполнять её формализацию, основываясь на рассмотрении эффективности каждого этапа этого процесса.

Кроме того, отмечается важность энергетических параметров в описании поведения взаимодействующих в процессе снижения загрязнения воздуха дисперсных систем. Эти параметры рассматриваются в качестве связующего звена между параметрами свойств соответствующей дисперсной системы и её устойчивостью.

С учётом математического описания представленной авторами работ [35,

44-49, 51, 52] физической модели процесса снижения загрязнения воздушной среды для эффективности представлена следующая зависимость:

$$E_{эф(СЗ)} = 1 - [1 - (1 - E_{эф-С}) \cdot (1 - E_{эф-З})] \cdot [1 - E_{эф-У} (1 - E_{эф-О}) \cdot (1 - E_{эф-Р})], \quad (1.8)$$

где  $E_{эф-С}$ ,  $E_{эф-З}$ ,  $E_{эф-У}$ ,  $E_{эф-О}$ ,  $E_{эф-Р}$  – соответственно эффективности реализации процессов связывания ЗВ, задержания ЗВ, улавливания ЗВ, очистки воздуха от ЗВ и рассеивания ЗВ.

В рассматриваемом подходе под энергоёмкостным показателем  $E^Э$  (%) понимается отношение удельной энергии  $W$  (Вт), расходуемой на достижение цели процесса снижения загрязнения воздушной среды в целом и отдельных его этапов, к удельной энергии  $N$  (Вт), расходуемой на создание направленных внешних воздействий на загрязняющий аэрозоль (т.е. «дополнительных» дисперсных систем в виде воздушных потоков, пены, пара, диспергированной жидкости, либо физических полей в виде электромагнитного поля, теплового поля и т.п.).

При этом зависимость для энергоёмкостного показателя имеет вид:

$$E^Э = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \cdot 100, \% , \quad (1.9)$$

где  $i$  – соответствующий этап, отражающий особенности взаимодействия «исходной» дисперсной системы с заранее подготовленными по параметрам «дополнительными» дисперсными системами, выступающими в качестве направленных на загрязняющее вещество на рассматриваемом этапе процесса снижения загрязнения воздушной среды.

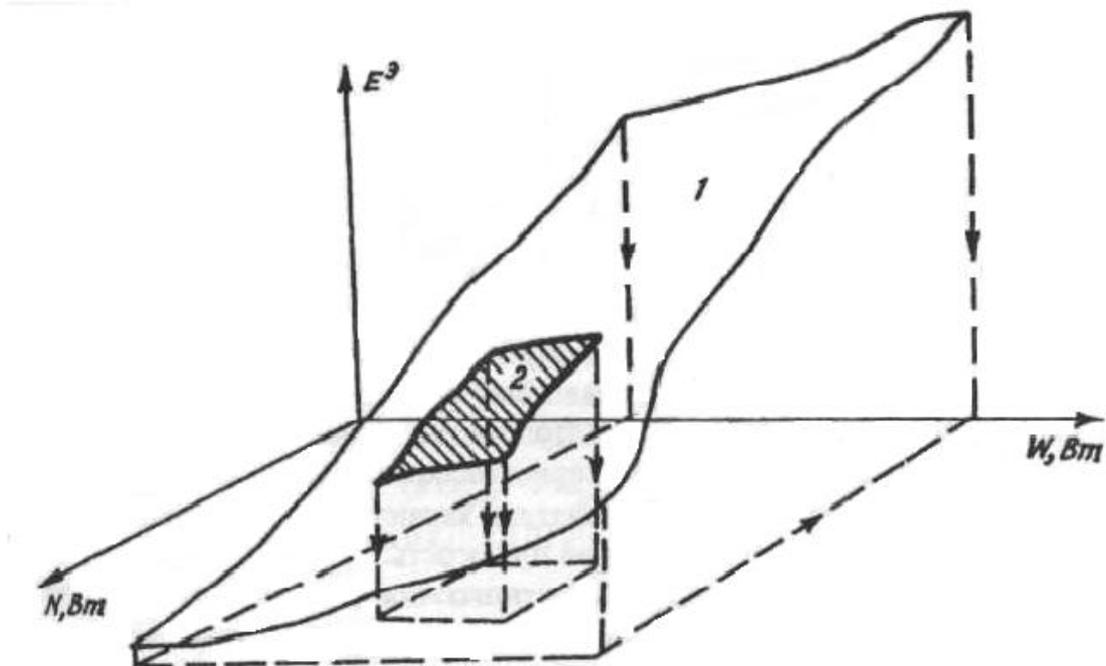
Предварительно оценить экономичность технологий снижения загрязнения воздушной среды предложено на основе использования энергетического критерия

процесса, который определяется по формуле:

$$K_E^{\ominus} = \frac{\delta E^{\ominus}}{mer(s)} = \frac{1}{mer(s)} \int \int_{W', N'}^{W'', N''} \sqrt{1 + \left[ \frac{\partial E^{\ominus}(W, N)}{\partial W} \right]^2 + \left[ \frac{\partial E^{\ominus}(W, N)}{\partial N} \right]^2} + dWdN, \quad (1.10)$$

где  $W$  – удельная полезная энергия рассматриваемого метода, Вт;  $N$  – удельная энергия, вносимая направленным внешним воздействием (соответствующей «дополнительной» системой) в зону активной борьбы с загрязняющими веществами, Вт.

Геометрическая интерпретация энергетического критерия позволяет заключить, что числитель в формуле (1.10) определяет площадь области, занимаемой рассматриваемым методом на геометрической поверхности, определяемой функцией энергоёмкостного показателя процесса снижения загрязнения воздушной среды, а знаменатель характеризует площадь проекции этой области на горизонтальную плоскость (рисунок 1.2).



1–2 – области существования энергоёмкостного показателя в целом и для конкретного способа

Рисунок 1.2 – Геометрическая интерпретация функции энергоёмкостного показателя процесса снижения загрязнения воздуха

Таким образом, выполненный анализ рассмотренных выше теоретических подходов позволяет заключить, что дальнейшее описание свойств и особенностей поведения пылевых частиц при их образовании, выделении и распространении, а также изучение и математическое описание энергетических параметров пылевого аэрозоля с учётом изменения его устойчивости как дисперсной системы, а также совершенствование методики выбора оптимальных технологий обеспыливания должно базироваться на физико–энергетическом подходе, представленном в работах [35, 44-49, 51, 52].

### **1.3 Исследование особенностей производственных технологий и состояния воздушной среды в рабочих зонах и на промышленных площадках заводов ЖБИиК**

Как было отмечено выше, заводы ЖБИиК относятся к предприятиям строительной отрасли и характеризуются значительным уровнем запылённости воздуха рабочих зон внутри производственных помещений и за их пределами. Для выявления наиболее значимых технологических участков, на которых в наибольшей степени наблюдаются процессы образования и выделения пыли, нами выполнен анализ условий реализации производственно-технологического процесса производства железобетонных изделий и конструкций, который предполагает выполнение следующих основных технологических операций: складирование, хранение и транспортировку инертных материалов; складирование, хранение и транспортировку цемента; изготовление и обработку закладных металлических деталей; обработку, правку, раскрой арматурной стальной проволоки и изготовление из неё арматурных каркасов; сварочных работ; изготовление опалубки; приготовления бетонной смеси; формовку, пропарку, смазку и сушку железобетонных изделий и конструкций.

При этом мелкий и крупный заполнители (песок и щебень) доставляются на

склад инертных материалов либо автомобильным, либо железнодорожным транспортом. Со склада заполнители по наклонным ленточным конвейерам, расположенным в галерее, подаются в верхнюю (надбункерную) часть бетоносмесительного узла, откуда при помощи поворотной воронки заполнители направляются в соответствующие бункеры. Одновременно с этим цемент, доставляемый на территорию завода либо автомобильным, либо железнодорожным транспортом, разгружается в складские ёмкости, из которых пневмотранспортом также подаётся в соответствующий бункер бетоносмесительного узла, имеющий весовой автоматический дозатор инертных материалов и цемента.

Дозированные материалы поступают в сборную воронку, откуда через поворотную воронку выгружаются в бетоносмеситель. При этом движение и остановка поворотной воронки в заданном положении осуществляется автоматически. Также в бетоносмеситель подаются вода и химические добавки из соответствующих резервуаров с дозаторами. Готовая бетонная смесь из бетоносмесителя выгружается в раздаточные бункеры с роликовым затвором, откуда загружается в автотранспортные средства.

Для проведения дальнейших исследований необходимо для рассматриваемых предприятий выявить основные факторы негативного воздействия на окружающую среду и степень их воздействия на неё, что наилучшим образом может быть выполнено на основе построения балансовой схемы материальных потоков [69-72], раскрывающей не только движение сырья, полуфабрикатов, вспомогательных материалов и готовой продукции, но также выбросов ЗВ в атмосферу, сбросов сточных вод и промышленных отходов в рассматриваемом технологическом процессе.

Таким образом, пооперационное изучение технологического процесса производства железобетонных изделий и конструкций с точки зрения условий образования, выделения и распространения пыли позволило построить и представить в общем виде балансовую схему материальных потоков (рисунок 1.3), а также на основе выполненного анализа особенностей технологического

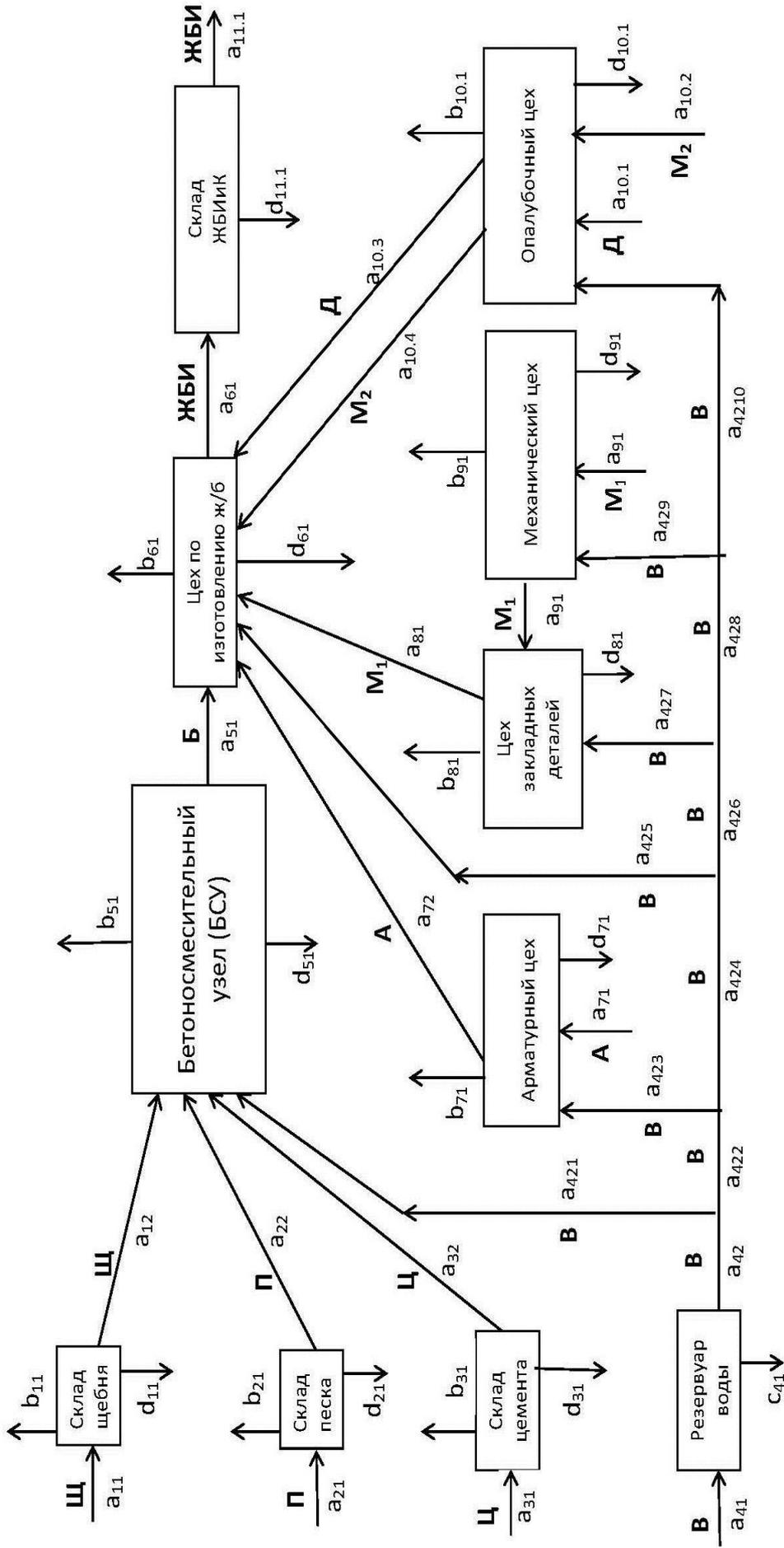
процесса выявить основные источники загрязнения воздуха рабочих зон предприятия и усредненные показатели выделения пыли для этих источников (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Основные источники пылевыведения при производстве ЖБИиК

Цех, участок	Наименование технологического оборудования	Источник пылевыведения	Количество выделяющейся пыли, т/год *		
			в пределах	в среднем по отрасли	
Склад хранения цемента	шнековые транспортёры	узел перегрузки цемента	3-8	5,34	
	пневмотранспорт	приёмный люк	1,5-5	2,60	
Склад хранения инертных материалов	приёмный бункер	неплотности бункера, загрузочное окно бункера	9-18	13,85	
	транспортёры инертных материалов	поверхность ленты транспортёра	20-24	21,92	
Участок приготовления бетонной смеси (бетоносмесительный узел)	расходные бункеры	узел перегрузки песка и щебня с ленточного транспортёра в расходные бункеры	24-28	26,42	
	наклонные ленточные транспортёры	поверхность ленты транспортёра	23-25	24,55	
	бетоносмеситель	неплотности рабочей ёмкости, люк бетоносмесителя	12-22	17,63	

Примечание: \* - данные, взятые за последние 10 лет (в период с 2005 по 2015 г.г.) по материалам томов ПДВ заводов ЖБИиК на территории Российской Федерации.

В свою очередь, анализ представленных балансовой схемы (рисунок 1.3) и



$a_{ij}$  – расход соответствующего вида технологического сырья;  $b_{ij}$  – выброс соответствующего вида ЗВ;  $d_{ij}$  – количество соответствующего вида отходов, образующихся в единицу времени;  $c_{ij}$  – количество соответствующего вида сточных вод;

Рисунок 1.3 - Балансовая схема материальных потоков для типового завода ЖБИИК

данных таблицы 1.1 позволяет заключить, что наиболее значимым технологическим участком по вкладу в загрязнение производственной и внешней воздушной среды является участок приготовления бетонной смеси. При этом исследование особенностей технологии приготовления бетонной смеси позволило выявить, что наиболее значимыми источниками образования и выделения пыли на выделенном технологическом участке являются наклонные ленточные транспортёры и их узлы перегрузки.

Кроме того, результаты, представленные в работах [4, 6, 11, 13, 14, 15], показали, что при транспортировке и перегрузке инертных материалов наклонными ленточными транспортёрами в воздухе рабочих зон операторов наблюдается значительное превышение нормативных значений концентрации неорганической пыли с содержанием  $\text{SiO}_2 > 70\%$  – до 15 ПДК<sub>рз</sub>, в надбункерном помещении – 4,5-5 ПДК<sub>рз</sub>, в отделении дозирования рабочей смеси – 4-8 ПДК<sub>рз</sub>.

Таким образом, в дальнейших исследованиях нами приняты к рассмотрению наиболее значимые по вкладу в загрязнение воздуха рабочих зон на заводах ЖБИиК наклонные ленточные транспортёры инертных материалов (песка и щебня) бетоносмесительных участков (БСУ).

#### **1.4 Влияние процессов и явлений в пылевых аэрозолях на условия реализации обеспыливания воздуха**

В результате анализа построенной нами балансовой схемы материальных потоков для бетоносмесительных участков (БСУ) заводов ЖБИиК установлено наиболее значимое по вкладу в загрязнение воздуха рабочей зоны и промышленной площадки. При этом достижение цели процесса обеспыливания воздуха может быть эффективно обеспечено, прежде всего, на основе изучения свойств и особенностей поведения пылевого аэрозоля как дисперсной системы, участвующей в этом процессе. Анализ и сопоставление свойств, а также

характеристик поведения пыли и пылевого аэрозоля с характеристиками дисперсных систем позволяет отнести первые к грубодисперсным системам типа «твёрдая фаза–газообразная среда» [73].

В реальных условиях существования пылевого аэрозоля в нем протекают следующие процессы и явления [74].

Процесс *броуновского движения*, вызванный столкновениями молекул дисперсной среды (воздуха) со взвешенными в нём частицами дисперсной фазы (пыли), приводит к тому, что частицы хаотически смещаются с линий тока. При этом средний квадрат смещения  $l_x^2$  частицы за промежуток времени  $\tau$  вдоль оси  $x$  определяется по уравнению Эйнштейна [75, 76, 77]:

$$l_x^2 = \frac{2RT}{N_0 \pi \mu_g d_c} \cdot \tau, \quad (1.11)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/°С·моль;  $T$  – температура поверхности пылевой частицы, К;  $N_0$  – число Авогадро, 1/моль;  $\mu_g$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $d_c$  – диаметр пылевой частицы, м.

Наряду с трансляционным броуновским движением крупные частицы пыли совершают беспорядочное вращательное движение, также описываемое следующим уравнением Эйнштейна [75, 76, 77]:

$$l_{ep}^2 = \frac{2RT}{N_0 \pi \mu_g d_c^3} \cdot \tau. \quad (1.12)$$

*Диффузия* представляет собой самопроизвольный процесс распространения дисперсной фазы в объёме пылевого аэрозоля, обусловленный градиентом концентрации фазы в объёме пылевого аэрозоля, приводящий к равномерному заполнению пылевыми частицами рассматриваемого объёма и характеризующийся коэффициентом диффузии, который определяется по формуле [78, 79]:

$$D_{r(u)} = \frac{RT}{N_A 3\pi\mu_\epsilon d_u} \quad (1.13)$$

К *оптическим явлениям*, протекающим в пылевом аэрозоле, относят поглощение, отражение и рассеивание света, проходящего через аэродисперсную систему, описываемым уравнением, полученным Рэлеем [80] для полной интенсивности неполяризованного света, рассеянного во всех направлениях:

$$I = I_0 \frac{24\pi^3 C_{\partial\phi} V_u^2}{\zeta_{1on}^4} \cdot \left( \frac{\zeta_{2on(\partial\phi)}^2 - \zeta_{2on(\partial c)}^2}{\zeta_{2on(\partial\phi)}^2 + 2\zeta_{2on(\partial c)}^2} \right)^2 \quad (1.14)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего света, лм;  $C_{\partial\phi}$  – счётная концентрация аэрозоля,  $1/\text{м}^3$ ;  $V_u$  – средний объём частицы,  $\text{м}^3$ ;  $\zeta_{2on(\partial\phi)}$ ,  $\zeta_{2on(\partial c)}$  – показатели преломления соответственно дисперсной фазы и дисперсионной среды;  $\zeta_{on}$  – длина волны светового потока, м.

Важным следствием оптических явлений в пылевом аэрозоле является *фотофорез*, который заключается в возникновении движения частиц в потоке света. Характер протекания фотофореза зависит, прежде всего, от размера и формы частиц, прозрачности дисперсной фазы и дисперсионной среды для света различной длины волны и разности фаз в падающих, проходящих и отражённых лучах.

*Явление теплопроводности* родственно диффузии, так как оно также обусловлено беспорядочным движением молекул дисперсионной среды, переносящих теплоту из одних областей пылевого аэрозоля в другие. Этот процесс является самопроизвольным и односторонним. Одной из основных характеристик теплопроводности пылевого аэрозоля является скорость передачи теплоты через единицу сечения за единицу времени, которая пропорциональна градиенту температуры:

$$\nu_\lambda = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad , \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{с}, \quad (1.15)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, учитывающий теплофизические свойства дисперсной фазы и дисперсионной среды, Вт/м·°С.

Кроме того, при образовании, выделении и распространении пылевого аэрозоля в нём протекают *электрокинетические явления* в результате приобретения им электрического заряда, который в дальнейшем может изменяться вследствие столкновений и захвата ионов частицами. В случае, когда необходимо учитывать напряжённость электростатического поля в пылевом аэрозоле, следует использовать формулу [78]:

$$P_t = \frac{q_c \cdot e_{эл}}{300} - \left( m_c g + \frac{V_c}{z_c} \right), \quad (1.16)$$

где  $q_c$  – заряд частиц, Кл;  $e_{эл}$  – напряжённость электрического поля, Кл/м<sup>2</sup>;  $z_c$  – средняя подвижность частиц, м/(с·Н).

При движении частиц пылевого аэрозоля в электрическом поле напряжённостью  $e_{эл}$  заряд  $q_c$ , приобретаемый за время  $\tau$  сферической частицей диаметром  $d_c$  с диэлектрической постоянной  $S_n$ , определяется выражением [81]:

$$q_c = e_{эл} \cdot \left( 1 + \frac{2(S_n - 1)}{S_n + 2} \right) \cdot \frac{d_c^2 \cdot \tau}{4 \cdot (\tau + \tau^*)} = n_q \cdot q^*, \quad (1.17)$$

где  $\tau^* = \frac{1}{\pi \cdot z_g^* \cdot \rho_q}$  – время, за которое частица приобретает половину предельного заряда, с;  $n_q$  – число элементарных зарядов  $q^*$  на частице, шт.;  $z_g^*$  – подвижность ионов газа, м/(с·Н);  $\rho_q$  – плотность пространственного заряда, Кл/м<sup>3</sup>.

*Седиментация*, представляющая собой процесс постепенного оседания частиц пылевого аэрозоля в окружающей среде под действием силы тяжести, проявляется в тех случаях, когда концентрация дисперсной фазы высока и плотность аэрозольного облака значительно больше плотности окружающей среды. Оседание твердых частиц в пылевых аэрозолях происходит в одном из трёх режимов (движение по инерции, витание и броуновское движение), определяемых её массой или размером, в соответствии с которым все частицы

пыли можно разбить на три группы:

- частицы размером свыше 100 мкм, оседающие в соответствии с законом Ньютона, то есть с возрастающей скоростью;
- частицы размером от 1 до 100 мкм, оседающие с постоянной скоростью в соответствии с комбинированными законами, включающими элементы кинетики, динамики и молекулярно–кинетической теории;
- частицы размером менее 1 мкм, оседающие в неподвижной воздушной среде и находящиеся в интенсивном броуновском движении.

Процесс седиментации находится в тесной взаимосвязи с диффузией, поэтому математическое описание этих процессов проводится многими авторами на основе этой взаимосвязи. Оседание частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде зависит от вязкости последней. Так как вязкость характеризуется силой сдвига на единицу площади, то, используя закон Стокса, можно получить выражение скорости оседания частиц дисперсной фазы:

$$v_{вит}^n = v_g = \frac{g \cdot d_q^2}{9\mu_g} \cdot (\rho_{\partial\phi} - \rho_{\partial c}) . \quad (1.18)$$

Оседающие аэрозольные частицы быстро достигают такой постоянной скорости  $v_{вит}^n$ , при которой аэродинамическое сопротивление среды становится равным эффективному весу этих частиц с учётом архимедовой силы. Характеристику  $v_{вит}^n$  принято называть скоростью витания, поскольку она равна скорости вертикального восходящего потока воздуха, в котором частица находится во взвешенном состоянии. Эту скорость выражают зависимостью:

$$v_{вит}^n = \frac{d_q^2 \cdot \rho_q \cdot g}{18\mu_g} . \quad (1.19)$$

Немаловажным явлением, определяющим поведение пылевого аэрозоля, является *адсорбция*, характеризуемая адсорбционной способностью, которая зависит от природы и дисперсности частиц, а также от состава дисперсионной

среды (газовой смеси).

Рассматривая параметры, характеризующие процесс адсорбции, можно заключить, что одним из наиболее важных параметров является количество адсорбированного вещества, математическим описанием которого является основное уравнение адсорбции, имеющее вид:

$$Q_{адс} = Q' \cdot \tau_{адс}, \quad (1.20)$$

где  $Q_m = N_A \cdot H_B \cdot (2\pi m_m \cdot RT)^{-0.5}$  – число молекул газа, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени, 1/с;  $\tau_{адс}$  – время адсорбции (пребывания молекул газа на поверхности частиц), с;  $m_m$  – молекулярная масса газа.

Другим значимым параметром является упругость адсорбированного газа, определяемая по формуле:

$$P = \frac{RT}{(V_m - v_1)} - \frac{v_2}{V_m^2}, \text{ Па}, \quad (1.21)$$

где  $v_1$  – мера отталкивания между молекулами;  $v_2$  – мера сил притяжения (сил когезии);  $V_m$  – молярный объём.

Кроме того, в исследованиях многих авторов также широко применяется уравнение Ленгмюра, которое связывает количество адсорбата с равновесным давлением его в газовой фазе:

$$Q_{адс} = Q_{адс}^{\infty} \cdot \frac{\omega_4 \cdot H_B}{1 + \omega_4 \cdot H_B}, \quad (1.22)$$

где  $Q_{адс}^{\infty}$  – количество адсорбата при полном насыщении поверхности адсорбента, кг/м<sup>2</sup>;  $H_B$  – равновесное давление газа, мм рт. ст.;  $\omega_4$  – адсорбционная константа.

Параметром, характеризующим адсорбционный процесс, является время адсорбции, зависимость которого от температуры получена Френкелем и имеет вид:

$$\tau_{адс} = \tau'_{адс} \cdot \exp\left(\frac{\Omega_{МА}}{RT}\right), \quad (1.23)$$

где  $\tau'_{адс}$  – период колебания молекулы адсорбата в направлении, нормальном к поверхности адсорбента, с;  $\Omega_{МА}$  – молярная теплота адсорбции, Дж/моль.

Анализ уравнения Лэнгмюра позволяет заключить, что адсорбционное равновесие может сдвигаться в сторону увеличения или уменьшения адсорбции в зависимости от концентрации молекул газа в пылевом аэрозоле. К такому же выводу приводит анализ эмпирического уравнения Фрейндлиха, иногда используемого в практике для ориентировочных расчетов:

$$Q_{адс} = \omega_5 \cdot C_{МВ}^{\omega_6}, \quad (1.24)$$

где  $\omega_5$ ,  $\omega_6$  – эмпирические коэффициенты, принимаемые в расчётах соответственно изменяющимися от 2 до 25 и от 1,1 до 5,0;  $C_{МВ}$  – концентрация молекул газа в аэрозоле при достижении адсорбционного равновесия,  $1/м^3$ .

Немаловажным для практики обеспыливания свойством пылевых аэрозолей является их *способность* образовывать агрегаты в результате *коагуляции* [82-85]. В результате происходит слипание частиц между собой, с уменьшением их суммарной поверхности при одновременном уменьшении свободной энергии системы. Коагуляция протекает в двух формах: явной и скрытой. При явной коагуляции частицы дисперсной фазы образуют между собой агрегаты, что приводит к увеличению их размеров и массы. Скрытая коагуляция обычно является первой стадией общего процесса коагуляции и проявляется лишь в изменении запаса энергии аэрозоля. Скорость коагуляции является одной из основных характеристик процесса, математическое выражение которой зависит от характера преобладающего процесса, в результате которого происходит коагуляция. Общая и достаточно приближенная математическая зависимость скорости коагуляции, выражаемая посредством скорости убывания числа частиц в

единице объёма аэрозоля, представлена формулой [81]:

$$-\frac{dC_n}{d\tau} = k_k \cdot C_n^2, \quad (1.25)$$

где  $C_n$  – количество частиц, содержащихся в дисперсной фазе в единице объёма пылевого аэрозоля,  $1/\text{м}^3$ ;  $k_k$  – константа коагуляции, которая определяется в зависимости от химического состава частиц.

Если в процессе коагуляции преобладают электрокинетические явления (что свойственно рассматриваемым видам пыли песка и щебня), то скорость коагуляции в этом случае описывается выражением [81]:

$$-\frac{dC_n}{d\tau} = 8\pi \cdot B_A \cdot C_n^2 \cdot \left( \frac{\frac{q_{n1} \cdot q_{n2}}{d_u \cdot K \cdot T}}{\exp\left(\frac{q_{n1} \cdot q_{n2}}{d_u \cdot K \cdot T}\right) - 1} + \frac{q_{n1} \cdot q_{n2}}{d_u \cdot K \cdot T} \right), \quad (1.26)$$

где  $q_{n1}$ ,  $q_{n2}$  – электрические заряды взаимодействующих частиц дисперсной фазы, Кл.

Помимо рассмотренных процессов характер протекания коагуляции зависит также от массы дисперсной фазы в единице объёма аэрозоля, размера частиц пыли, формы этих частиц, гравитационных силы, температуры, давления и вязкости дисперсионной среды, ван-дер-ваальсовых сил, степени турбулизации аэрозоля пыли и ряда других параметров.

Явление *адгезии* сопровождает процесс коагуляции и проявляется в способности взаимодействия между собой частиц дисперсной фазы, с налипанием их к окружающим поверхностям. Это взаимодействие зависит от величин, характеризующих свойства поверхностей, их удельной свободной энергии и силы поверхностного натяжения. Адгезионное взаимодействие, сопровождающее процесс коагуляции характеризуется [86]:

- средней силой адгезии, выражаемая зависимостью:

$$P_{адз}^{cp} = \int_{P_{\min}}^{P_{\max}} \frac{0,43}{Z\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(\lg P_{адз} - \lg \bar{P}_{адз})^2}{2Z^2}\right) \cdot dP_{адз}, \quad (1.27)$$

где  $Z$  – среднее квадратичное отклонение, характеризующее распределение скоагулировавшихся частиц по размерам;  $P_{адз}$  – сила адгезии между двумя взаимодействующими частицами, Н;  $\bar{P}_{адз}$  – медианная сила адгезии, Н;

- числом адгезии, характеризующимся отношением количества частиц  $n_{ПА}$ , которые остались между собой в контакте после воздействия отрывной силы, к количеству частиц, которые изначально подверглись адгезионному взаимодействию:

$$\omega_8 = \frac{n_{ПА}}{n_{ПА}^0} \cdot 100, \quad \% \quad (1.28)$$

В приближенных расчётах, согласно теории, предложенной Б.В.Дерягиным, сила адгезии  $P_{адз}$ , действующая между двумя сферическими частицами одинакового диаметра  $d_c$ , определяется по формуле [82]:

$$P_{адз} = 2\pi\sigma_\phi d_c, \quad (1.29)$$

где  $\sigma_\phi$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий границу раздела фаз, Дж/м<sup>2</sup>.

В пылевых аэрозолях также наблюдаются *гидрокинетические явления*, связанные с присутствием в них жидкой фазы. К таким явлениям, в частности, относится *поверхностное натяжение*, в том числе, жидкости, на границе раздела фаз. Важным параметром, характеризующим поверхностное натяжение является коэффициент пропорциональности  $\sigma_\phi$  в уравнении (1.29). Физическим смыслом этого коэффициента является то, что он выражает собой работу, затраченную на образование единицы поверхности, на которую оказывает влияние природа взаимодействующих фаз и температура. При использовании уравнения Гиббса-

Гельмгольца, можно получить зависимость коэффициента  $\sigma_\phi$ , названного коэффициентом поверхностного натяжения:

$$\sigma_\phi = W'_{ПС} + T \left( \frac{\partial \sigma_\phi}{\partial T} \right)_{V_{АЭ}}, \quad (1.30)$$

где  $V_{АЭ}$  – объём аэродисперсной системы, м<sup>3</sup>;  $W'_{ПС}$  – полная поверхностная энергия на единицу площади поверхностного слоя для однородной поверхности при постоянном объёме аэрозоля (равная 0,118 Дж/м<sup>2</sup> в диапазоне температур от 4 до 1000 °С).

Из уравнения (1.30) видно, что с помощью коэффициента поверхностного натяжения можно характеризовать интенсивность поля молекулярных сил. Для пылевого аэрозоля трактовка величины  $\sigma_\phi$  как межфазного натяжения является затруднительной [81, 89, 90, 91] вследствие необратимости образования новой поверхности. Значения коэффициента поверхностного натяжения в системах «твёрдая фаза–газообразная среда»  $\sigma_{т-г}$  превышают значения этого коэффициента в системах «жидкая фаза–газообразная среда»  $\sigma_{ж-г}$ , вследствие большей интенсивности силового поля в твёрдых телах по сравнению с жидкостями.

Также к гидрокинетическим явлениям, наблюдаемым в пылевых аэрозолях, можно отнести *процесс растекания жидкости* по поверхности пылевых частиц, важной характеристикой которого является коэффициент растекания  $\omega_7$  (критерий Гаркиса), определяемый по формуле:

$$\omega_7 = \sigma_{ж-г} \cdot (\cos \theta - 1), \quad (1.31)$$

где  $\theta$  – краевой угол смачивания, град.

Кроме того, к гидрокинетическим явлениям также относятся *капиллярные явления*, характеризующиеся капиллярным давлением, которое описывается следующей зависимостью:

$$\Delta H_k = H_{k.\partial\phi} - H_{k.\partial c} = \sigma_\phi \cdot \frac{dF_{\text{en}}}{dV_{\partial\phi}}, \quad (1.32)$$

где  $F_{\text{en}}$  – площадь поверхности взаимодействия фаз, м<sup>2</sup>;  $V_{\partial\phi}$  – объём дисперсной фазы, м<sup>3</sup>.

Из уравнения (1.32) следует теоретический вывод о том, что капиллярные явления тесно взаимосвязаны с такими процессами, определяющими состояние аэрозоля пыли как адсорбция, поверхностное натяжение, смачивание, растекание, коагуляция и другие. Именно от капиллярных явлений в совокупности с такими явлениями как поверхностное натяжение на границе раздела фаз в пылевом аэрозоле, смачивание, а также тепловых явлений зависит протекание процессов поглощения, выделения, конденсации и испарения жидкости в аэрозолях.

Также к гидрокинетическим явлениям, наблюдаемым в пылевых аэрозолях, можно отнести *процесс смачивания жидкостью* поверхности твёрдой пылевой частицы. Процесс смачивания характеризуется равновесным краевым углом  $\theta$ , который определяется как угол, образуемый твёрдой поверхностью и касательной в точке соприкосновения твёрдой, жидкой и газообразной фаз. В связи с тем, что это определение подходит для двух углов, общепринятым является отсчитывание  $\theta$  в сторону жидкой фазы. Соответственно, процесс смачивания характеризуется углом  $\theta$  превышающим 90 градусов. Значение коэффициента поверхностного натяжения различных фаз отличается друг от друга, следовательно смачивание, которое характеризуется величиной  $\theta$ , будет зависеть от соотношений значений  $\sigma_\phi$  на границе соприкасающихся фаз.

Закон Юнга, который определяет условия смачивания, имеет следующее математическое выражение:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{m_2} - \sigma_{m_{жс}}}{\sigma_{жс}}, \quad (1.33)$$

где  $\sigma_{m-жс}$  – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела твёрдой и

жидкой фаз.

С помощью метода плёночной флотации определена степень смачиваемости частиц пылевого аэрозоля, позволяющая разделить их на три группы [79]:

- плохо смачиваемые, с долей затонувших частиц менее 30%;
- средне смачиваемые, с долей затонувших частиц от 30% до 80% ;
- хорошо смачиваемые, с долей затонувших частиц превышает 80% от их общего количества.

Согласно теории ряда исследователей [37, 38, 44, 89, 90, 92], результирующим параметром, определяющим поведение и существование аэрозоля пыли как дисперсной системы, то есть параметром её жизнеспособности, является *устойчивость U*.

Чем больше устойчивость системы, тем медленнее происходит изменение её параметров и наоборот. При рассмотрении изменения устойчивости возможны три случая [35]:

- устойчивость системы увеличивается, когда дисперсная система стремится изменить параметры свойств при увеличении значений энергетических параметров:

$$\frac{dU}{d\tau} > 0 ; \quad (1.34)$$

- устойчивость системы остается неизменной, при стремлении дисперсной системы стабилизировать параметры свойств при неизменяющихся значениях энергетических параметров:

$$\frac{dU}{d\tau} = 0 ; \quad (1.35)$$

- устойчивость системы уменьшается, при стремлении дисперсной системы изменить параметры свойств при уменьшении значений энергетических параметров:

$$\frac{dU}{d\tau} < 0 . \quad (1.36)$$

При этом понятия устойчивости пылевого материала и устойчивости пылевого аэрозоля объединять нельзя, что подтверждается следующими явлениями:

- при образовании и выделении пыли устойчивость пылевого материала уменьшается (дисперсная система в этом случае разрушается), а устойчивость пылевого аэрозоля растёт;

- при распространении пылевого аэрозоля его устойчивость уменьшается (дисперсная система разрушается за счёт гравитационного высева твердой фазы), а устойчивость пылевого материала (слоя осевшей пыли) растёт.

### **1.5 Построение физической модели процесса загрязнения воздушной среды для ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК**

В соответствии с выбранным нами за основу исследований физико-энергетическим методологическим подходом [44, 45, 46] для определения основных характеристик процесса обеспыливания воздуха на участках эксплуатации ленточных транспортёров нами предварительно изучены особенности процесса пылевого загрязнения воздушной среды. Применяя для ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК общие принципы построения блок-схемы физической модели процесса загрязнения пылью воздушной среды [47, 49, 51], нами предварительно:

- выявлены и проанализированы основные этапы процесса пылевого загрязнения воздушной среды, при последовательном прохождении которых часть технологического сырья (песка, либо щебня) трансформируется в загрязняющее вещество (пыль песка, либо пыль щебня);

- выделены основные физические объекты, вступающие во взаимодействие с пылевыми частицами на этапах их образования, выделения (внутреннего и внешнего) соответственно в воздух рабочей зоны и приземного слоя атмосферы, а

также распространения (внутреннего и внешнего) соответственно в воздухе рабочей зоны и приземного слоя атмосферы.

В результате, построенная нами блок–схема физической модели процесса пылевого загрязнения воздушной среды для ленточного транспортёра БСУ завода ЖБИиК и представленная на рисунке 1.4, наглядно иллюстрирует структуру и последовательность реализации этого процесса в рассматриваемых производственно–технологических условиях, а также позволяет заключить, что в этом случае процесс загрязнения включает пять основных этапов:

- *образование* пыли ( $ZB_1$ ), которое происходит при взаимодействии между собой технологического оборудования (ленточного транспортёра) и технологического сырья (песка, либо щебня). При этом образование пылевых частиц при движении ленты транспортёра происходит за счет механического взаимодействия (истирания) самих частиц технологического сырья (песка, либо щебня) между собой, а также их ударного взаимодействия с поверхностью ленты при её встряхивании на роликах транспортёра;

- *внутреннее выделение* пыли ( $ZB_2$ ), заключающееся в выходе образовавшихся пылевых частиц из основного потока технологического сырья (песка, либо щебня) во внутренний воздушный объем производственного помещения (галереи транспортёра) и которое происходит при взаимодействии между собой внутреннего источника пылевыведения (поверхность транспортёрной ленты) и технологического сырья (песка, либо щебня) в качестве пылеобразующего материала. При этом на характер внутреннего выделения частиц пыли оказывают влияние параметры воздуха рабочей зоны производственного помещения;

- *внутреннее распространение* пыли ( $ZB_3$ ), заключающееся в пространственном распространении во внутреннем объёме производственного помещения (галереи транспортёра) выделившихся из внутреннего источника пылевых частиц и которое происходит при участии производственного помещения (галереи транспортёра) и воздуха рабочей зоны;

- *внешнее выделение* пыли ( $ZB_4$ ), заключающееся в выходе распространившихся во внутреннем объёме производственного помещения (галереи транспортёра)

пылевых частиц из этого объёма через внешний источник выделения (технологические, оконные, дверные и другие проёмы) во внешнюю воздушную среду. При этом на характер внешнего выделения частиц пыли оказывают влияние параметры воздушной среды промышленной площадки;

- *внешнее распространение* пыли ( $ZB_5$ ), заключающееся в пространственном распространении в воздушном бассейне промышленной площадки выделившихся из внешнего источника пылевых частиц.

Выполненный нами анализ представленных на рисунке 1.4 объектов, участвующих в процессе загрязнения воздушной среды БСУ заводов ЖБИиК, позволил определить характеристики этих объектов, необходимые для дальнейших исследований и расчётов.

В качестве *технологического сырья* для изготовления железобетонных изделий и конструкций в качестве заполнителей применяют песок и щебень, основные характеристики которых приведены в таблице 1.2.

В качестве *технологического оборудования* нами рассматривается типовой ленточный транспортёр марки ЛК–Ж, представляющий собой транспортирующее устройство непрерывного действия, несущим и тяговым органом которого является гибкая бесконечная лента, работающий в среднем 16 часов в сутки и предназначенный для перемещения сыпучих, кусковых и штучных материалов плотностью до  $3500 \text{ кг/м}^3$  (песок, щебень, гравий) в горизонтальном и наклонном (до 30 град) направлениях, характеристики которого представлены в таблице 1.3. Основным объектом, участвующим в процессе загрязнения воздушной среды на всех его этапах, нами рассматривается *загрязняющее вещество*, в качестве которого в исследуемых производственно-технологических условиях выступает пыль песка и пыль щебня, которая находится на этапе образования в состоянии «пылевого материала», а на всех последующих этапах - в состоянии «пылевого аэрозоля», состоящего из дисперсной фазы и дисперсионной среды. В соответствии с методическим подходом, изложенным в работах [35, 44-49, 51, 52], все параметры, характеризующие свойства и поведение этих видов загрязняющих веществ, сгруппируем следующим образом (таблица 1.4). При этом в таблице 1.4

одним из основных параметров является средний медианный диаметр пылевых частиц  $d_{3/4}$ , который вполне может быть использован в предварительных (первичных) расчётах. Однако, в случае необходимости получения более точных оценок состояния пылевого аэрозоля вместо среднего медианного диаметра пылевых частиц  $d_{3/4}$  целесообразно использовать дисперсный состав пыли, который для рассматриваемых видов пыли представлен на рисунке 1.5.

Другим значимым объектом, участвующим в процессе загрязнения воздушной среды, влияющим на характер внутреннего выделения и внутреннего распространения пыли, является *воздух внутренней рабочей зоны*, состояние которого строго регламентируется нормативными документами [86] не только по наличию загрязняющих веществ, но также по следующим параметрам микроклимата:

- относительной влажности, %;
- температуре, °С;
- скорости движения (подвижности) воздуха, м/с.

Учитывая, что рабочие операции, связанные с эксплуатацией и обслуживанием наклонных ленточных транспортёров и их узлов перегрузки участков приготовления бетонной смеси заводов ЖБИиК, характеризуются постоянной ходьбой, перемещением мелких (до 1кг) изделий и предметов в положении стоя, требует определенного физического напряжения, и согласно [86] относятся к категории 2а (средней тяжести) с энергозатратами от 151 до 200 ккал/час (175–232 Вт).

Результаты многолетних наблюдений и аттестации рабочих мест на рассматриваемых технологических участках различных заводов ЖБИиК на территории Российской Федерации позволяют заключить, что фактические значения параметров микроклимата находятся в пределах значений, представленных в таблице 1.5.

Нормирование перечисленных параметров осуществляется по двум уровням значений: оптимальных и допустимых, на величину которых влияют тепловая характеристика производственных помещений, категории работ по степени тяжести с учетом времени года.

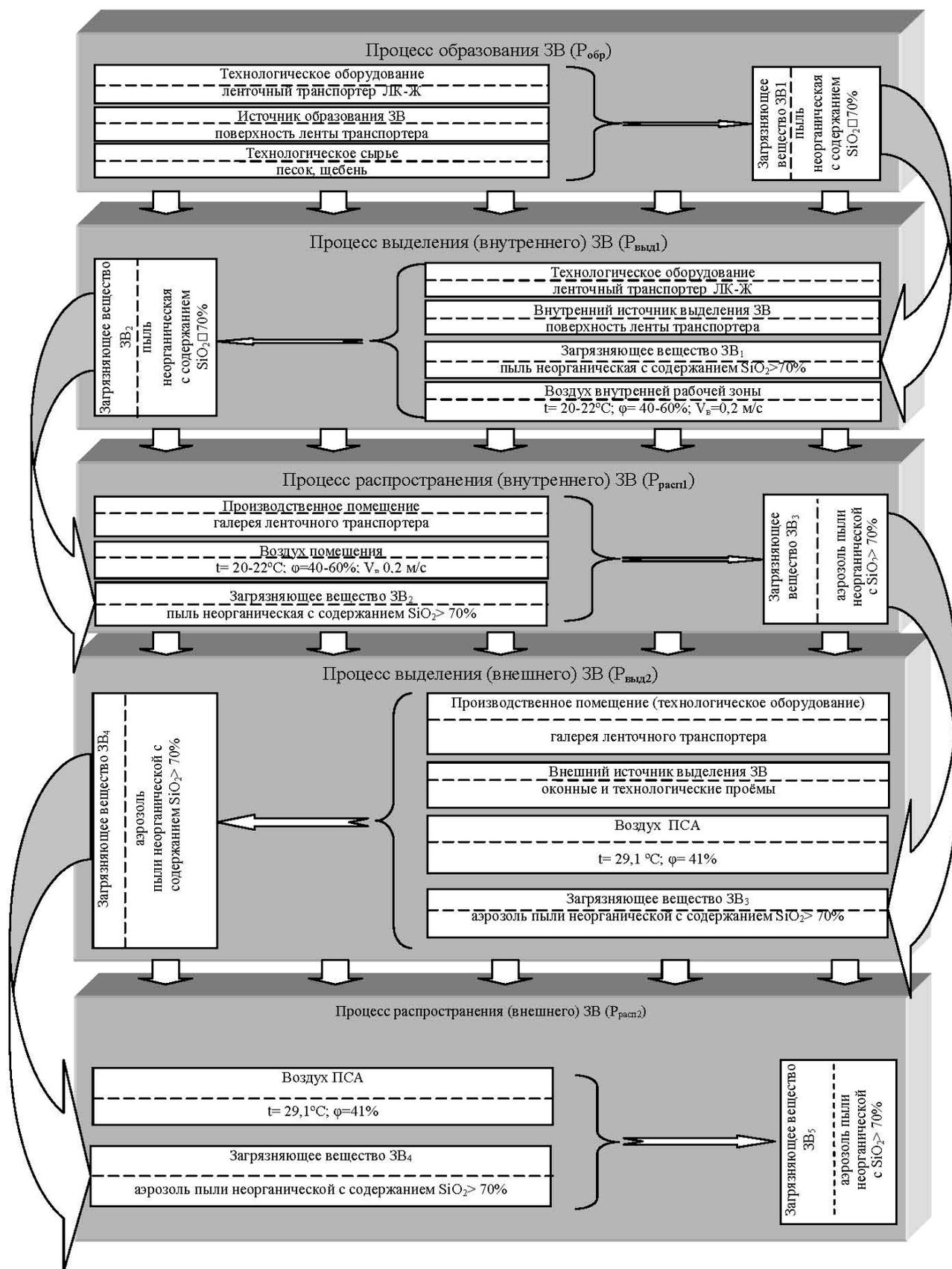


Рисунок 1.4 - Блок-схема физической модели процесса загрязнения воздушной среды для типового ленточного транспортёра марки ЛК-Ж на БСУ заводов ЖБИиК

Таблица 1.2 – Характеристики технологического сырья БСУ

Наименование материала	Размер фракции, мм	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Требуемая влажность, %	Расход, т/год
Щебень	3-20	1 250-1 550	3,5-5,0	10 000-30 000
Песок	1,0-1,15	1 020-1 200	5,0-7,5	5 000-15 000

Таблица 1.3 – Характеристики ленточного транспортёра как технологического оборудования БСУ

Наименование оборудования	Марка	Размеры, мм			Ширина ленты, мм	Скорость ленты, м/с	Производительность, кг/с
		длина	ширина	высота			
ленточный транспортёр	ЛК-Ж	54000	750	650	500	0,8	50-60

В соответствии с [87] установлены (таблица 1.6) с учетом критериев оптимального теплового и функционального состояния человека оптимальные значения микроклиматических параметров производственной среды, которые позволят создать общие и локальные ощущения теплового комфорта на период восьмичасовой смены с минимальным напряжением механизмов терморегуляции организма человека, не вызывая при этом отклонений в состоянии здоровья и создавая предпосылки для высокой работоспособности на рабочих местах.

При этом допустимые параметры микроклимата производственной среды установлены (таблица 1.6) в соответствии с [87] с учетом критериев теплового и функционального состояния человека в течение восьмичасовой рабочей смены, не вызывающие нарушений в состоянии здоровья человека, но при которых могут возникнуть общие и локальные ощущения теплового дискомфорта, напряжения механизмов терморегуляции, ухудшение самочувствия и понижение трудоспособности.

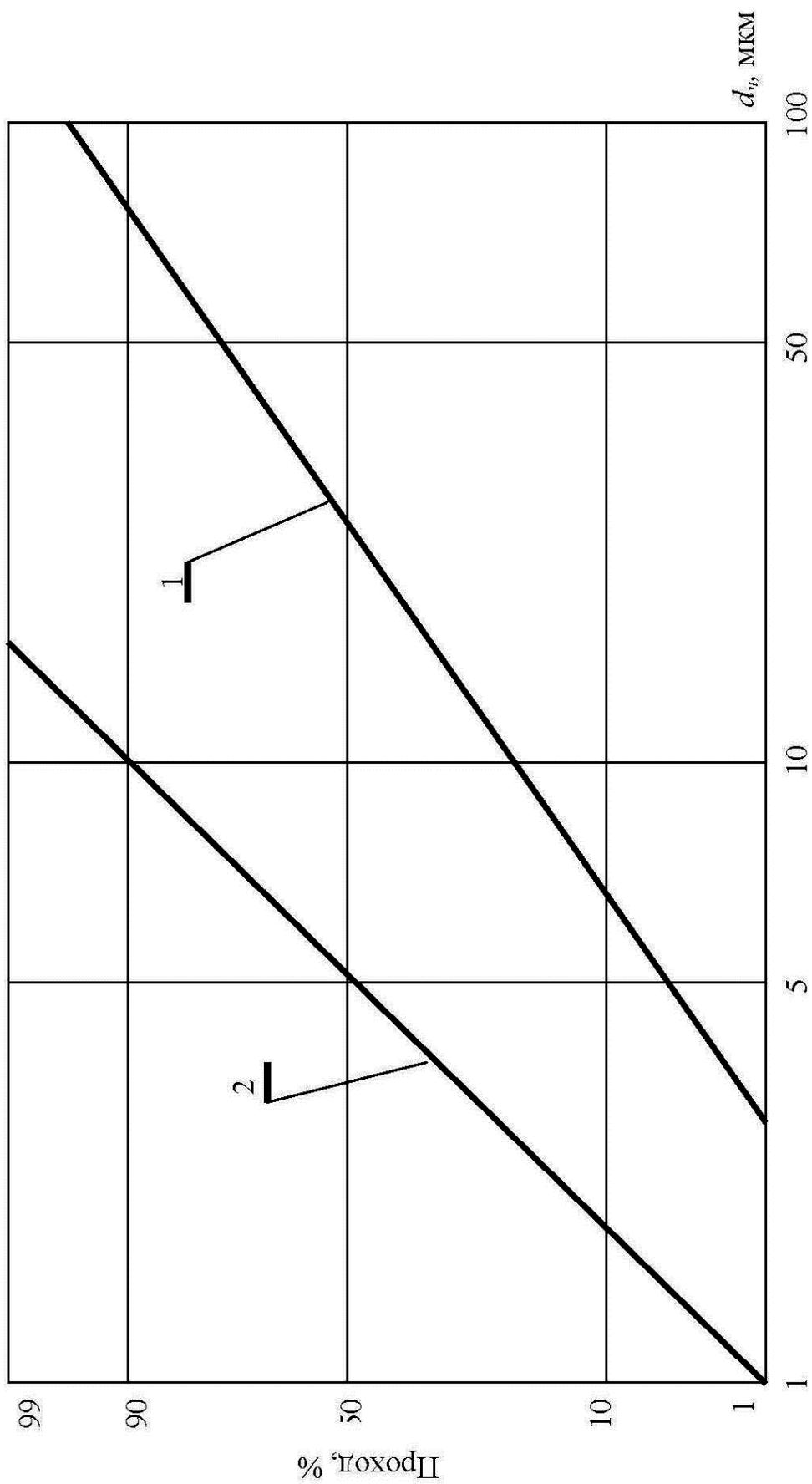
Таким образом, в дальнейших исследованиях процесса обеспыливания для описания и учёта состояния воздуха рабочей зоны необходимо использовать

Таблица 1.4 – Свойства аэрозолей пыли песка и пыли щебня (неорганической пыли с содержанием  $\text{SiO}_2 > 70\%$ )

№ п/п	Группа параметров	Наименование параметра	Обозначение параметра	Размерность	Значение параметра	
					для аэрозоля пыли песка	для аэрозоля пыли щебня
1	2	3	4	5	6	7
Параметры свойств дисперсной фазы (д.ф.) пылевого аэрозоля						
1	Группа геометрических параметров ( $\Pi_{\text{д.ф.}}$ )	- средний медианный диаметр пылевых частиц д.ф.	$d_{3/4(q)}$	м	$(40 \div 50) \cdot 10^{-6}$	$(10 \div 20) \cdot 10^{-6}$
		- длина свободного пробега частиц до их соударения между собой	$l_{r(q)}$	м	$(3,1 \div 5,1) \cdot 10^{-6}$	$(1,4 \div 2,6) \cdot 10^{-6}$
2	Группа физико-химических параметров ( $\Phi \chi \Pi_{\text{д.ф.}}$ )	- плотность частиц д.ф.	$\rho_q$	кг/м <sup>3</sup>	1020÷1200	1250÷1550
		- константа коагуляции	$K_{K(q)}$	м <sup>3</sup> /с	$(0,4 \div 0,9) \cdot 10^{-15}$	$(0,6 \div 1,2) \cdot 10^{-15}$
		- динамический угол естественного откоса	$A_{\delta(q)}$	град	35÷45	25÷35
		- статический угол естественного откоса	$A_{\text{ст}(q)}$	град	55÷65	39÷45
		- коэффициент диффузии частиц	$D_{r(q)}$	м <sup>2</sup> /с	$(2,4 \div 12,8) \cdot 10^{-12}$	$(1,2 \div 9,7) \cdot 10^{-12}$
		- коэффициент адгезии	$n_{\text{ад}(q)}$	Дж/м <sup>2</sup>	$0,18 \cdot 10^{-22}$	$0,25 \cdot 10^{-22}$
		- разрывная прочность (слипаемость)	$P_q$	Па	114÷118	91÷95
		- концентрация частиц в дисперсионной среде	$C_q$	мг/м <sup>3</sup>	10÷100	8÷90

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5	6	7
3	Группа гидродинамических параметров (ГДП <sub>д.ф.</sub> )	- поверхностное натяжение - краевой угол смачивания - влажность д.ф. (относительная)	$\sigma_{т-ж(ч)}$ $\Theta_ч$ $\varphi_ч$	Н/м град %	$0,074 \div 0,078$ $10 \div 15$ $3,5 \div 5,0$	$0,074 \div 0,078$ $3 \div 8$ $5,0 \div 7,5$
4	Группа теплофизических параметров (ТФП <sub>д.ф.</sub> )	- температура	$t_{м(ч)}$	°С	$+5 \div +45$	$+5 \div +45$
5	Группа электромагнитных параметров (ЭП <sub>д.ф.</sub> )	- удельный заряд частиц - удельное электрическое сопротивление	$q(ч)$ $R_{уд(ч)}$	Кл/м <sup>2</sup> Ом·м	$0,5 \cdot 10^{-8}$ $2,9 \cdot 10^5$	$0,9 \cdot 10^{-8}$ $3,1 \cdot 10^6$
Параметры свойств дисперсионной среды (д.с.) пылевого аэрозоля						
1	Группа геометрических параметров (ГП <sub>д.с.</sub> )	- эквивалентный диаметр облака пылевого аэрозоля - длина свободного пробега молекул д.с.	$d_{экв(с)}$ $l_{м(с)}$	м м	$1,5 \div 2,0$ $(4,8 \div 7,1) \cdot 10^{-8}$	$1,5 \div 2,0$ $(4,8 \div 7,1) \cdot 10^{-8}$
2	Группа физико-химических параметров (ФХП <sub>д.с.</sub> )	- плотность д.с.	$\rho_2$	кг/м <sup>3</sup>	$1,271 \div 0,1150$	$1,271 \div 0,1150$
3	Группа гидродинамических параметров (ГДП <sub>д.с.</sub> )	- влажность д.с. (абсолютная или относительная)	$\varphi_2$	%	$40 \div 60$	$40 \div 60$
4	Группа аэродинамических параметров (АДП <sub>д.с.</sub> )	- динамическая вязкость воздуха	$\mu_2$	Па·с	$0,18 \cdot 10^{-5}$	$0,18 \cdot 10^{-5}$
5	Группа теплофизических параметров (ТФП <sub>д.с.</sub> )	- температура воздуха	$t_2$	°С	$+5 \div +45$	$+5 \div +45$



1 -пыль песка; 2- пыль щебня

Рисунок 1.5 – Дисперсный состав пыли песка и пыли щебня (неорганической пыли с содержанием  $\text{SiO}_2 > 70\%$ )

Таблица 1.5 – Фактические значения параметров микроклимата в рабочей зоне наклонных ленточных транспортёров и их узлов перегрузки участков приготовления бетонной смеси заводов ЖБИиК

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	8-18	45-75	0,2-0,4
Теплый	22-28	35-60	0,4-0,6

Таблица 1.6 – Нормативные значения параметров микроклимата в рабочей зоне наклонных ленточных транспортёров и их узлов перегрузки участков приготовления бетонной смеси заводов ЖБИиК

Период года	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
	оптимальные	допустимые	оптимальные	допустимые	оптимальные	допустимые
Холодный	17-19	15-21	40-60	<75	0,2	≤0,4
Теплый	22-23	16-27	40-60	<75	0,3	0,2-0,5

значения допустимых параметров микроклимата, которые являются постоянными и не зависят от погодно-климатических условий и периода года.

Одним из объектов, участвующих в процессе загрязнения воздушной среды, *производственное помещение*, которое в случае рассмотрения заводов ЖБИиК представляет собой галерею транспортёра и характеризуется следующими параметрами:

- геометрией (высотой  $h_n$  помещения, его шириной  $b_n$  и длиной  $l_n$ );
- конструкцией (координатами и отметками характерных точек наружных и внутренних стен, проемов в них, типом и отметками кровли);
- категорией взрывопожароопасности «Д»;
- типом зоны молниезащиты «Б».

*Воздух приземного слоя атмосферы (ПСА)* как объект, участвующий в процессе загрязнения воздушной среды, как и воздух внутренней рабочей зоны,

характеризуется следующими основными параметрами: температурой, влажностью, скоростью движения (подвижностью), а также количеством выпадающих осадков, атмосферным давлением и направлением ветра. Причем значения основных, перечисленных выше параметров являются переменными и зависят от погодно-климатических условий местности, а также от периода года.

Следует отметить, что эти параметры имеют более широкий диапазон значений, которые могут изменяться в течение как короткого (в течение суток), так и длительного (в течение времени года) периода времени. При этом необходимо учитывать, что важнейшими климатообразующими факторами на той или иной территории являются географическая широта, высота над уровнем моря, рельеф и тип земной поверхности, особенности циркуляции воздушных масс, близость к водным объектам. Параметры, характеризующие климат, отражают долгосрочные процессы, поэтому они являются средними статистическими данными.

В дальнейших исследованиях процесса обеспыливания для описания и учета состояния воздуха ПСА необходимо использовать значения таких параметров климата, которые соответствуют наиболее жаркому периоду года, так как процесс пылевого загрязнения в наибольшей степени наблюдается именно в этот период. Так, например, для предприятий, расположенных на территории Ростовской области, в расчётах процесса обеспыливания воздуха целесообразно принимать следующие значения параметров климата, характеризующих воздух ПСА:

- температура  $t_n = +29^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная влажность  $\varphi_n = 41\%$ ;
- скорость движения воздуха (ветра)  $v_n = 4,5 \text{ м/с}$ .

## Выводы

В результате выполненного этапа исследований определены и описаны энергетические характеристики процессов и явлений, наблюдаемых в пылевых аэрозолях, образующихся и выделяющихся в воздушную среду на заводах по изготовлению железобетонных конструкций, а также оценено влияние этих особенностей на условия реализации процесса обеспыливания воздуха.

Выполненный анализ рассмотренных теоретических подходов позволяет заключить, что дальнейшее описание свойств и особенностей поведения пылевых частиц при их образовании, выделении и распространении должно базироваться на физико–энергетическом подходе.

В дальнейших исследованиях нами приняты к рассмотрению наиболее значимые по вкладу в загрязнение воздуха рабочих зон на заводах ЖБИиК наклонные ленточные транспортёры инертных материалов (песка и щебня) бетоносмесительных участков (БСУ) (превышение нормативных значений концентрации неорганической пыли с содержанием  $\text{SiO}_2 > 70\%$  – до 15 ПДК<sub>рз</sub>, в надбункерном помещении – 4,5-5 ПДК<sub>рз</sub>, в отделении дозирования рабочей смеси – 4-8 ПДК<sub>рз</sub>).

Таким образом, построение физической модели процесса загрязнения воздушной среды применительно к условиям эксплуатации типового ленточного транспортёра марки ЛК–Ж на БСУ заводов ЖБИиК обеспечивает возможность исследования взаимосвязи основных объектов, принимающих участие в рассматриваемом процессе и вполне может быть принята за основу при анализе процесса снижения загрязнения воздушной среды и построении соответствующей физической модели процесса для рассматриваемых технологических участков с учетом предварительного исследования влияния процессов и явлений, наблюдаемых в пылевых аэрозолях, на условия реализации обеспыливания воздуха.

## **2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ И ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ**

Развитие теоретических основ описания процесса снижения загрязнения воздушной среды долгое время базировалось на:

- дифференцированном решении внутренней и внешней задач снижения загрязнения воздушной среды;
- описании процессов взаимодействия частиц дисперсной фазы в конкретных конструкциях аппаратов (вытяжных зонтах, бортовых отсосах, циклонах, скрубберах, пылеосадительных камерах, матерчатых фильтрах, электрофильтрах и т.п.).

В последнее время весьма активно проводятся исследования снижения загрязнения воздушной среды как единого поэтапного процесса на основе принципиально новых подходов к созданию общей теории снижения загрязнения.

В рамках таких исследований автором работы [94] предложено научное направление по прогнозу и расчёту эффективности процессов и технических средств снижения загрязнения воздушной среды. В основе этого направления находится вероятностно-статистический подход к описанию процессов движения частиц дисперсной фазы с учётом режимных и конструктивных параметров инженерных систем, свойств потока загрязняющих веществ, более общих граничных условий и стохастических явлений. В результате проведённых исследований [43, 94] построены математические модели процессов образования, выделения, распространения и удаления загрязняющего аэрозоля. Однако основными недостатками в этих исследованиях являются:

- во-первых, недостаточно упорядоченная классификационная схема процессов зарождения и разрушения загрязняющего аэрозоля;
- во-вторых, ограниченное лишь параметрами свойств рассмотрение физических основ процессов взаимодействия частиц между собой и с внешними

воздействиями.

Примером другого направления исследований является разработка физико–химического подхода [37] к решению задач снижения загрязнения. В результате проведенных в этом направлении исследований разработана методология описания процесса, включающая методы расчёта его эффективности. Однако, в этих исследованиях недостаточно раскрыта взаимосвязь параметров загрязняющего аэрозоля с параметрами окружающей среды, и не в полной мере учтены граничные условия, относящихся к этой взаимосвязи. В отличие от вероятностно-статистического подхода в физико-химическом подходе кроме параметров свойств учтены также энергетические параметры загрязняющего аэрозоля. Однако, эти параметры раскрыты лишь относительно внутренней энергетики процесса снижения загрязнения воздуха.

На основе выделенных направлений в настоящее время предложен принципиально новый подход к исследованию процесса [44-52], базирующийся на:

- упорядочении понятий и классификационной схемы процесса;
- рассмотрении загрязняющего аэрозоля как дисперсной системы;
- рассмотрении устойчивости как результирующей характеристики состояния дисперсных систем;
- дифференциации дисперсных систем в процессах образования, выделения, распространения и разрушения аэрозоля.

В области снижения загрязнения воздушной среды в промышленности и на объектах городского хозяйства накоплен обширный теоретический и практический материал, анализ которого позволяет заключить, что:

- по мере развития объектов городского хозяйства и промышленно-технологических комплексов актуальность борьбы с образующимися в технологическом сырье и выделяющимися в воздух загрязняющими веществами становится всё более очевидной;
- реализацией двух основных перечисленных ниже циклов можно добиться эффективного снижения концентрации загрязняющих веществ в воздушной среде:

- снижением загрязнения исходного технологического сырья (либо оборудования), предполагающим либо совершенствование существующего производственно-технологического оборудования, либо разработку нового, совместно с такой организацией производственно-технологических процессов, которые исключают образование и выделение загрязняющих веществ;
- снижением загрязнения воздуха, предусматривающим реализацию в проектируемом или существующем технологическом процессе таких дополнительных инженерно-технических систем (мероприятий), которые обеспечивают локализацию и разрушение загрязняющего аэрозоля как дисперсной системы.

В результате выполненного этапа исследований можно охарактеризовать первый цикл процесса как наиболее рациональный и экономичный, отвечающий современному уровню развития науки и техники, однако часто пока не позволяющий представить конкретные решения. Именно поэтому поддержание параметров воздушной среды на уровне нормативных требований в настоящее время на практике обеспечивается в большинстве случаев использованием второго цикла процесса снижения загрязнения.

## **2.1 Построение физической модели процесса снижения загрязнения воздушной среды для условий эксплуатации ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК**

Построение на предыдущем этапе исследований физической модели процесса загрязнения дало возможность разработать физическую модель процесса снижения загрязнения воздушной среды, иллюстрирующую совокупность последовательных и целенаправленных этапов процесса снижения загрязнения на каждом соответствующем этапе процесса загрязнения (рисунок 2.1).

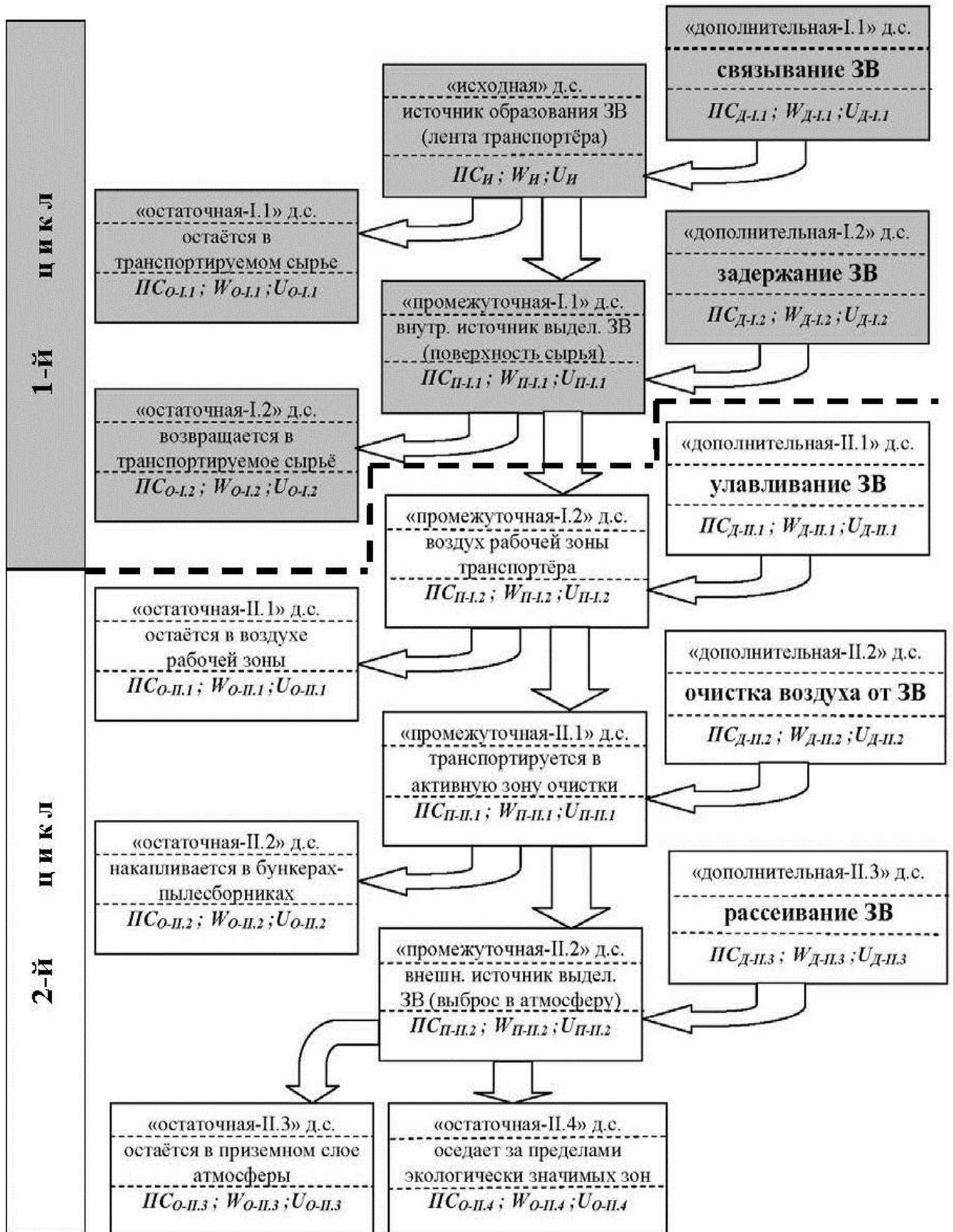


Рисунок 2.1 – Блок-схема физической модели процесса снижения загрязнения воздушной среды для типового ленточного транспортёра марки ЛК-Ж на БСУ заводов ЖБИиК

Математическая интерпретация физической модели снижения загрязнения воздушной среды, учитывающая возможность реализации соответствующих зависимых последовательных событий может быть выражена следующей зависимостью:

$$\chi_{сз} = 1 - (1 - \chi_{OC}) \cdot (1 - \chi_{OB}) = 1 - [1 - (1 - \chi_C)(1 - \chi_3)] \times [1 - \chi_V(1 - \chi_O)(1 - \chi_P)] \quad (2.1)$$

которая характеризует вероятность процесса снижения загрязнения воздуха ( $\chi_{сз}$ ) как совокупность вероятностей протекания двух циклов:

- снижения загрязнения исходного технологического сырья (технологического оборудования) ( $\chi_{OC}$ ), включающего этапы связывания ЗВ ( $\chi_C$ ) и задержания ЗВ ( $\chi_3$ );

- снижения загрязнения воздуха ( $\chi_{OB}$ ), включающего этапы улавливания ЗВ ( $\chi_V$ ), очистки воздуха от ЗВ ( $\chi_O$ ) и рассеивания ЗВ в атмосфере ( $\chi_P$ ).

При этом процесс снижения загрязнения, который включает два основных цикла, следует рассматривать как комплекс последовательного направленного воздействия «дополнительными» дисперсными системами на «исходные» и «промежуточные» системы. Главная цель каждого этапа процесса снижения загрязнения заключается в уменьшении концентрации дисперсной фазы в «исходной», «промежуточных» и «остаточной П-4» дисперсных системах.

В ходе процесса снижения загрязнения воздушной среды на той или иной его стадии включаются те или иные объекты: технологическое оборудование, технологическое сырьё, производственное помещение, воздух помещения, территория промышленной площадки, воздушный бассейн промышленной площадки и др. При этом отдельные этапы процесса снижения загрязнения соответствуют определенным этапам процесса загрязнения воздушной среды:

- процесс связывания организуют на стадии образования ЗВ;
- процесс задержания аэрозоля – на стадии выделения ЗВ;
- процессы улавливания, очистки и рассеивания – на стадии распространения загрязняющего аэрозоля.

Из блок-схемы физической модели (рисунок 2.1) видно, что в процессе воздействия на загрязняющий аэрозоль, обозначенный как «исходная» дисперсная система, внешними заранее приготовленными «дополнительными» системами происходит перераспределение: параметров свойств ( $ПС$ ), энергетических параметров ( $W_a$ ) и устойчивости ( $U$ ) всех взаимодействующих дисперсных систем. Иллюстрация трансформации дисперсных систем и изменения их устойчивости в процессе снижения загрязнения воздушной среды представлена на рисунке 2.2.

Анализ особенностей первого цикла процесса снижения загрязнения исходного (технологического) сырья и его этапов по предложенной схеме (рисунки 2.1, 2.2) позволяет заключить, что максимально эффективная реализация этого процесса предполагает в идеальном случае предотвращение перехода технологического сырья («исходной» системы) в сырьевой материал («промежуточная-I.1» система). Этого можно добиться, прежде всего, совершенствованием технологического оборудования, технологии процесса транспортировки (обработки, либо переработки) исходного сырья или организацией высокоэффективной «дополнительной-I.1» дисперсной системы.

Таким образом, первый цикл процесса предотвращает возникновение загрязняющего аэрозоля, что объясняет рациональность и высокую экономичность мероприятий, реализующих этот цикл. Индикатором достаточности реализации только первого цикла является предельно допустимая концентрация ЗВ в воздухе рабочей зоны производственного оборудования ( $ПДК_{рз}$ ). Однако не в полной мере изученные особенности взаимодействия технологического оборудования, сырья и окружающей среды, а также необходимость взаимоувязанного привлечения специалистов различного профиля при проектировании, реконструкции и эксплуатации производственного оборудования создают трудности широкого практического применения этого цикла процесса. Поэтому в подавляющем большинстве случаев при транспортировке или технологической переработке сырьевой материал переходит в состояние аэрозоля, что объясняет недостаточность реализации первого цикла.

В результате анализа предложенного подхода можно заключить следующее:

- во-первых, реализация процесса снижения загрязнения воздушной среды состоит из двух основных циклов: снижения загрязнения исходного (технологического) сырья (технологического оборудования) и снижения загрязнения воздуха, при поэтапной реализации каждого из них;
- во-вторых, целесообразность применения каждого последующего этапа в процессе снижения загрязнения определяется, в первую очередь, эффективностью применения предыдущего этапа;
- в-третьих, количество реализованных в процессе этапов будет определять его экономичность и количество потребляемой при его реализации энергии;
- в-четвертых, процесс снижения загрязнения характеризуется переходом загрязняющего вещества из одного вида дисперсных систем в другой при принудительном изменении их устойчивости: так аэрозольное состояние дисперсной системы требует максимально сложного управления её параметрами в процессе снижения загрязнения, и наоборот, состояние дисперсной системы, близкое к состоянию исходного сырья, требует значительно меньшей энергии для управления её параметрами.

Такой подход позволяет выделять для изучения и совершенствования любой этап процесса с учётом его внешних связей, не нарушая общей структуры процесса. При этом в качестве результирующих параметров процесса снижения загрязнения воздушной среды предлагаемый подход выделяет эффективность (1.8) и энергоёмкостный показатель (1.9) процесса снижения загрязнения воздушной среды.

Совокупность значений множества параметров свойств (ПС) определяет энергетическую ёмкость (энергетический потенциал) загрязняющего аэрозоля как дисперсной системы через его суммарную поверхностную энергию  $W_a$ . Известно [37, 38, 44, 89, 90, 92], что именно эта энергия является мерой устойчивости загрязняющего аэрозоля как дисперсной системы. В свою очередь, устойчивость общепринята в качестве результирующей характеристики состояния дисперсной системы.

Однако, как было отмечено выше, современные научные знания пока не позволяют говорить об абсолютных значениях устойчивости дисперсных систем, что приводит к необходимости поиска её косвенных характеристик. Именно такой характеристикой может выступать суммарная поверхностная энергия  $W_a$ , так как в процессе снижения загрязнения воздуха происходит приобретение, перераспределение и расход суммарной поверхностной энергии загрязняющим веществом за счет энергетического обмена с воздействующими на него «дополнительными» дисперсными системами.

Таким образом, разработанная физическая модель процесса снижения загрязнения воздушной среды может быть положена в основу систематизации современных средств обеспыливания технологического сырья и воздушной среды.

## **2.2 Анализ и систематизация современных средств обеспыливания технологического сырья и воздуха для условий эксплуатации ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК**

Учитывая, что существующие термины, понятия и определения для систем вентиляции и их классификационные схемы не отражают физической сущности представленного на рисунке 2.1 процесса снижения загрязнения воздушной среды, в работах [37, 38, 44, 89, 90, 92] предложена схема классификации систем обеспечения нормативных параметров воздушной среды (СОНПВС), на наш взгляд, наиболее полно отражающая физические особенности направленных внешних воздействий, названных «дополнительными» дисперсными системами, при их взаимодействии с загрязняющим веществом, выступающим в качестве сначала «исходной», а затем в качестве «промежуточных» дисперсных систем на каждом этапе реализации процесса обеспыливания воздушной среды (рисунки 2.1, 2.2).

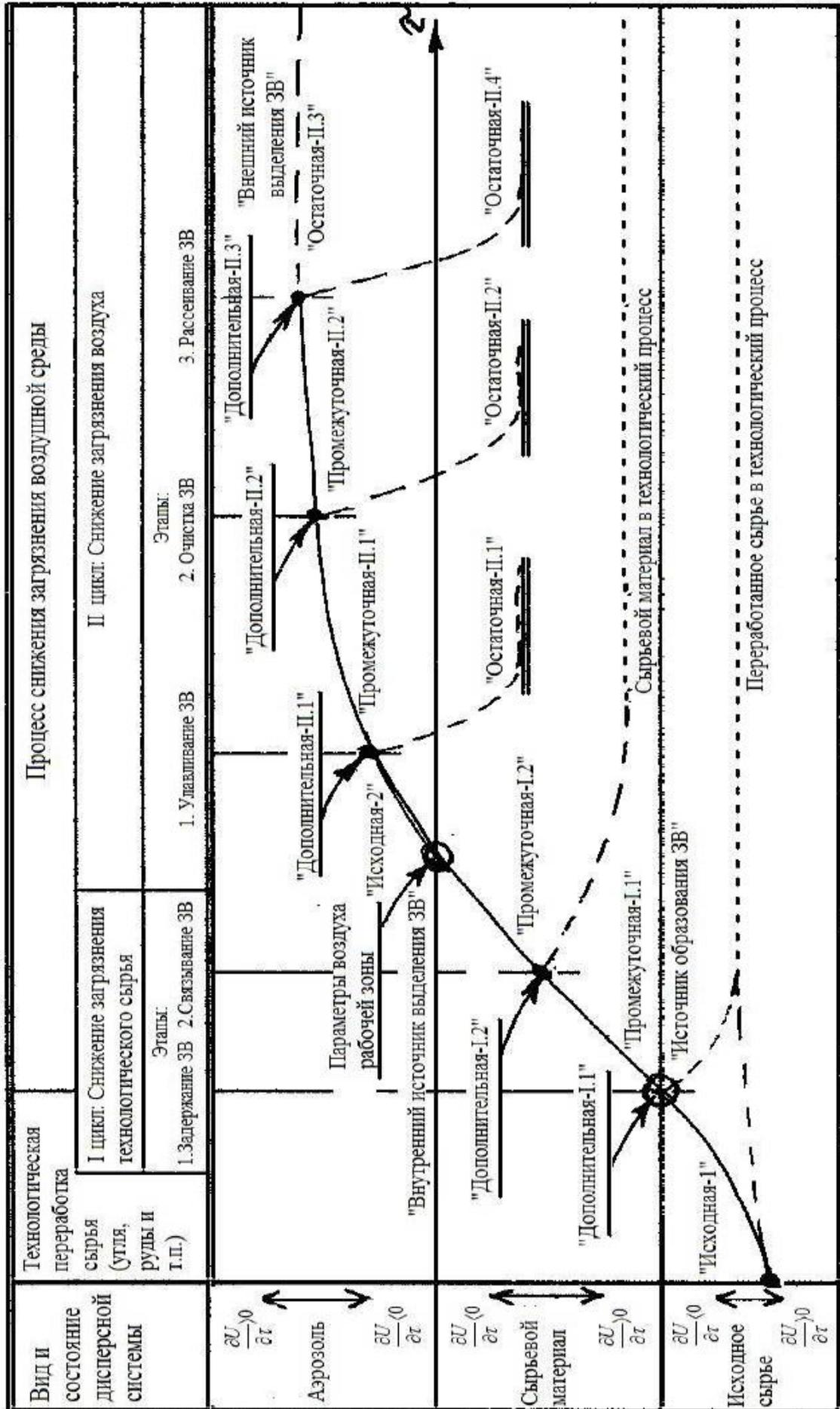


Рисунок 2.2 - Схема трансформации дисперсных систем в процессе снижения загрязнения воздушной среды

предназначенная для управления параметрами, характеризующими состояние воздуха рабочих зон и рабочих мест;

обеспечения нормативных параметров воздушной среды (СОНПВС), в состав которой входят следующие основные инженерные системы:

- система борьбы с загрязняющими веществами (СБЗВ), представляющая собой взаимосвязанную последовательность специального инженерного оборудования, которое предназначено для обеспыливания воздуха рабочей зоны на основе управления энергетическими характеристиками и агрегативной устойчивостью дисперсных систем, представленных пылевым и жидкостным аэрозолями, либо газообразными загрязняющими веществами;

- система обеспечения нормативных параметров микроклимата (СОНПМ),

- система вспомогательной защиты (СВЗ), которая предполагает использование ограждений, знаков безопасности, сигналов оповещений различных типов и позволяет эффективно и безопасно эксплуатировать перечисленные выше два вида систем.

Дальнейшее иерархическое деление СБЗВ предполагает наличие в структуре системы борьбы с промышленной пылью (СБПП), которая предназначена для целенаправленного изменения параметров, характеризующих свойства пылевого аэрозоля как дисперсной системы, его энергетическое состояние и агрегативную устойчивость. Согласно представленной на рисунке 2.3 схеме в общем случае СБПП может быть реализована пятью основными *функциональными элементами*, одноимёнными и соответствующими этапам процесса снижения загрязнения воздушной среды: связыванием ЗВ, задержанием ЗВ, улавливанием ЗВ, очисткой воздуха от ЗВ и рассеиванием ЗВ в атмосфере, которые характеризуются физико-химическими особенностями взаимодействующих с загрязняющим веществом направленных внешних воздействий на том или ином этапе реализации процесса обеспыливания воздушной среды.

Дальнейшая классификация по схеме, представленной на рисунке 2.3, предполагает реализацию каждого метода различными *способами*,



характеризующимися физической формой направленных на загрязняющее вещество внешних воздействий, (например, гидродинамический метод – орошением (жидкость в форме капель), пенным способом (жидкость в форме пузырьков пены), тумана (жидкость в форме капель, близких к размерам молекул) и др.). Каждый способ может быть реализован различными *видами реализации*, характеризующимися технологией подготовки направленных на загрязняющий аэрозоль внешних воздействий, (например, орошение гидродинамическим методом может быть низконапорным (НО), высоконапорным (ВО), пневмогидроорошением (ПГО) и др.). И, наконец, каждый вид реализации может быть осуществлён различными *техническими средствами* снижения загрязнения воздуха.

В основе формирования схемы СБПП (рисунок 2.3) находится принцип достижения каждым её функциональным элементом предельно допустимой концентрации (ПДК) соответствующих загрязняющих веществ как во внутреннем объёме производственного помещения (в воздухе рабочей зоны), так и в воздушном бассейне промышленной площадки и прилегающей территории (в приземном слое атмосферы) при максимально экономичной реализации процесса снижения загрязнения воздуха.

Проведя анализ условий и особенностей эксплуатации ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК, а также технологические требования, предъявляемые к транспортируемым инертным материалам (песку и щебню), можно выделить следующие основные характеристики:

- относительную влажность песка и щебня, которая строго ограничена (от 3,5% до 7,5%) и не допускает переувлажнения сырья;
- геометрические параметры помещений галерей с размещенными в них ленточными транспортёрами БСУ, а также категории взрывопожароопасности;
- повышенные требования электробезопасности, характеризующие источники электрического тока, электрооборудование, электропроводку, металлические конструкции основных элементов галерей, а также сами ленточные транспортёры;
- параметры, характеризующие повышенную влажность в условиях

эксплуатации металлических конструкций основных элементов галерей, а также самих ленточных транспортёров, которые могут быть подвержены активному воздействию коррозии;

- пространственные характеристики конвейерных галерей, определяющие степень ограниченности объема помещений с целью выявления возможности применения дополнительного, достаточно громоздкого оборудования, такого как вытяжные зонты, воздухопроводы, вентиляторы, сдуво-всасывающие насадки различной конфигурации, насосы, компрессоры, различные ёмкости для рабочей жидкости и т.п.);

- особенности и параметры источника пылевыделения, в качестве которого рассматриваются ленточные транспортёры БСУ, представляющие собой достаточно протяжённые источники, для которых процесс выделения пыли можно наблюдать над всей поверхностью ленты.

Среди различных методов, разработанных и нашедших в настоящее время широкое применение в целях пылеподавления для участков ленточных транспортёров на предприятиях стройиндустрии, наибольшими значениями санитарно-гигиенической и экологической эффективности отличается гидродинамический метод, реализация которого основана на следующих способах [37, 74, 112]:

- предварительном безнапорном увлажнении;
- низконапорном орошении в диапазоне значений давления орошающей жидкости от 0,2 до 2,0 МПа;
- высоконапорном орошении в диапазоне значений давления орошающей жидкости от 7,0 до 15,0 МПа;
- пневмогидроорошении при совместном использовании жидкости и сжатого воздуха;
- применением пены;
- применением тумана.

Гидрообеспыливание является сложным процессом видоизменения, внутреннего и внешнего взаимодействия и преобразования трехфазной среды

«пыль–жидкость–воздух», на характер протекания которого оказывают влияние не только гидродинамические, химические и физические, но и аэродинамический и пылевой факторы [37, 74, 112].

В качестве основных, наиболее часто применяемых на практике, способов гидрообеспыливания наибольшее распространение получили орошение и предварительное увлажнение. Однако эффективность этих способов в условиях интенсивной эксплуатации ленточных транспортёров недостаточна и остаточная запылённость воздуха рабочих зон и воздушного бассейна городских территорий значительно превышает ПДК<sub>рз</sub> или ПДК<sub>сс</sub> (ПДК<sub>мп</sub>). Кроме того, для достижения высокой эффективности обеспыливания приходится расходовать достаточно большое количество жидкости (более  $4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup> жидкости / кг сырья), что ухудшает санитарно-гигиенические условия труда за счёт увеличения влажности воздуха рабочих зон и не всегда возможно по технологическим условиям (ограничения располагаемого расхода воды).

Реализация известных способов гидрообеспыливания на практике в большинстве случаев их применения сопровождается значительным переувлажнением технологического сырья, подвергаемого обеспыливанию, что часто крайне недопустимо по технологическим регламентам. Необходимо также учитывать, что при транспортировке сыпучих материалов, являющейся одним из основных видов технологических операций, выделяется значительный объём пылевых частиц. При этом, введены определенные ограничения по влажности транспортируемого сырья, что предполагает весьма ограниченные возможности применения жидкости, либо ее применение с минимальным расходом на единицу объёма этого сырья. Таким образом, эксплуатация ленточных транспортёров связана с интенсивным пылеобразованием и пылевыделением. А в таких условиях для эффективного обеспыливания воздушной среды целесообразно применение гидродинамического метода, но при ограничении упомянутого расхода жидкости. Такими особенностями среди основных способов обладают [37, 95, 105, 107] пневмогидроорошение и пенный способ борьбы с пылью, которые характеризуются наименьшим расходом жидкости, обеспечивая максимальная

степень диспергирования жидкости.

Анализ упомянутых выше двух способов показал, что минимальный расход жидкости присущ пенному способу обеспыливания, когда обеспечивается максимальная поверхность межфазного взаимодействия жидкости и пылевых частиц при минимальном расходе жидкости. Существенное повышение санитарно-гигиенической и экологической эффективности обеспыливания, сопровождающееся значительным снижением расхода орошающей жидкости на единицу объёма транспортируемого сырья, вызвано увеличением этой поверхности, а также времени взаимодействия пены с пылевыми частицами. Этот фактор можно с уверенностью отнести к основным преимуществам пенного способа обеспыливания. Также к преимуществам этого способа следует отнести возможность его применения при отрицательных значениях температуры воздуха. Помимо перечисленных, ряд преимуществ пенного способа перечислен в работах [74, 95, 105], где на основании результатов экспериментальных исследований представлены сравнительные данные с другими способами гидрообеспыливания:

- расход воды значительно (в 15 - 50 раз) меньше, по сравнению с орошением;
- повышение влажности воздушной среды и технологического сырья (пылящей поверхности) незначительно;
- эффективность пылеподавления, особенно мелкодисперсных фракций пыли, наиболее пневмокониозоопасных, весьма высокая.

Однако практическая реализация перечисленных преимуществ пенного способа пылеподавления может быть эффективна только в том случае, когда будут обеспечиваться его оптимальные технологические (рабочие) параметры. При этом на санитарно-гигиеническую и экологическую эффективность процесса обеспыливания воздухом пеной значительное влияние оказывают следующие основные характеристики: тип источника пылеобразования, его геометрические характеристики, интенсивность пылевыделения и другие, а также технологические характеристики пеногенераторных установок (в частности, производительности по пене), принятой схемы борьбы с пылью и свойств получаемой пены [116].

Сопоставив перечисленные выше производственно–технологические требования, особенности эксплуатации ленточных транспортёров с возможностями и соответствующими особенностями эксплуатации различных технологий реализации СБПП (в соответствии с классификационной схемой, представленной на рисунке 2.3), нами сделан вывод о том, что для обеспечения максимальной степени обеспыливания воздуха рабочих зон ленточных транспортёров и воздушного бассейна городских территорий, прилегающих к предприятиям строительной индустрии, наиболее приемлемой является технология реализации СБПП, которая основана на применении гидродинамического метода с использованием пены (пенный способ) [49].

Именно поэтому рассмотрим более подробно особенности организации и реализации технологии обеспыливания сырья и воздуха на основе применения пены.

### **2.3 Исследование технологических особенностей получения пены, её основных свойств и условий пенообразования**

Процесс гетерокоагуляции частицы пыли элементарным пузырьком либо слоя пены, либо пенного аэрозоля, по своей динамике почти аналогичен гетерокоагуляции пылинки капель. Захват частицы пыли пузырьком пены также можно рассматривать как многостадийный процесс. Однако стадия проникновения частицы пыли внутрь пузырька пены приводит к разрушению пенного аэрозоля. Поэтому максимальная эффективность обеспыливания пеной проявляется при налипании пылевых частиц на поверхность пузырьков пены без их разрушения. Авторами работы [74] указаны граничные условия эффективности улавливания пыли пузырьком пены, которые сводятся к следующему. При налипании частиц пыли на пузырек пены они должны иметь минимальный запас кинетической энергии, позволяющий частице сблизиться с поверхностью

пузырька до расстояний действия межмолекулярных сил (момента начала проявления адгезии). Эти граничные условия связаны с существованием минимальной ( $v_{min}$ ) и максимальной ( $v_{max}$ ) скоростей встречи пылинки и пузырька:

$$v_{max} = -\sqrt{-\frac{6W_p}{\rho_q r_q}}, \text{ м/с ;} \quad (2.2)$$

$$v_{min} = -\sqrt{\frac{6W_a}{\rho_q r_q}}, \text{ м/с ,} \quad (2.3)$$

где  $W_p$  – параметр, характеризующий энергию растекания, Н/м;  $W_a$  – работа сил адгезии, Н/м;  $\rho_q$  – плотность материала частицы пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $r_q$  – средний радиус частицы пыли, м.

Наличие максимальной и минимальной скоростей встречи пылинки и пузырька указывает на то, что лишь частицы с определённой кинетической энергией могут быть захвачены пузырьком пены. При скоростях, меньших  $v_{min}$ , частицы пыли обтекают пузырек пены, а при скоростях больших  $v_{max}$ , наблюдается механический разрыв плёнки пузырька пены летящей частицей пыли. Если  $v_e \approx v_{max}$ , в процессе захвата пылевой частицы преобладает инерционная составляющая, а когда  $v_e \approx v_{min}$  – адгезионная.

При процессе пылеподавления не отдельным (элементарным) пузырьком, а слоем пены, кинетическая энергия пылевых частиц расходуется на их движение по инерции в слое пены и на преодоление сопротивления плёнок пены.

Определяющим фактором в экранирующем действии пены целесообразно считать адгезионное взаимодействие. Согласно уравнению (1.29) экранирующее пылеподавление пенами возможно лишь для пылевых частиц, имеющих низкоэнергетические поверхности ( $W_p < 0$ ), а для пылевых частиц с высокоэнергетической поверхностью ( $W_p > 0$ ) формула (1.29) теряет смысл, так как молекулярные силы пузырька пены не противодействуют отталкиванию пылевой частицы от пузырька пены. Именно потому любое воздействие пылевых частиц, обладающих кинетической энергией, нежелательно. Каждая гидрофильная

пылевая частица в этом случае способна разрушать несколько плёнок пены, и высота столба пены не будет влиять на эффективность захвата.

Для установления влияния свойств пыли на экранирующую способность пены авторами работы [29] исследована зависимость устойчивости пены от степени смачиваемости пылевых частиц. Результаты этих исследований показали, что пена наиболее устойчива к действию плохо смачиваемой пыли.

При взаимодействии пылевого аэрозоля с пеной естественный заряд пылевых частиц и пузырьков пены не оказывает значительного влияния на захват этих частиц [66]. Однако при искусственной электроподзарядке (электризации) в процессе образования пенного аэрозоля или слоя (потока) пены электрические силы, возникающие между пылевыми частицами и пузырьками пены, играют существенную роль, и их необходимо учитывать при описании процесса обеспыливания воздуха. В ряде работ [37, 46, 47, 95, 96, 97] показана возможность повышения эффективности пылеподавления, особенно, мелких фракций пылевых частиц, за счёт электризации пены.

Для дальнейшего исследования значимости различных факторов, влияющих на процесс пылеподавления, необходимо предварительно изучить особенности строения, свойства и устойчивость плёнок пены, непосредственно определяющих характер процессов образования, существования и разрушения пены.

Согласно основным положениям теории дисперсных систем пена представляет собой грубодисперсную коллоидную систему, содержащую в качестве дисперсной фазы газ (воздух), а в качестве дисперсионной среды – жидкость (раствор пенообразователя) [98, 99, 100]. Основными параметрами, характеризующими свойства пены, являются кратность и стойкость.

Кратность пены  $K$  представляет собой отношение объёма пены  $V_n$  к объёму жидкости  $V_{ж}$ , пошедшей на её образование [98]:

$$K = \frac{V_n}{V_{ж}} . \quad (2.4)$$

По кратности пену разделяют на:

- низкократную ( $K \leq 50$ );
- среднекратную ( $50 < K < 300$ );
- высокократную ( $K \geq 300$ ).

Кратность пены зависит от основных параметров пенообразования (технологического режима получения пены, конструктивных характеристик пеногенератора), природы и концентрации пенообразователя, свойств воды, а также условий внешней среды. Кратность пены находится во взаимной зависимости с другой важной характеристикой пены – стойкостью, характеризующей способность пены сохранять общий объем и препятствовать истечению жидкости – синерезису.

Стойкость пены характеризуется временем существования отдельных пузырьков или определенного объема пены и зависит, главным образом, от природы пенообразующего вещества и его концентрации. При увеличении концентрации поверхностно-активного вещества (ПАВ) в растворе устойчивость пены, как правило, повышается, достигая максимального значения при критической концентрации мицеллообразования (ККМ), а затем снижается [101]. Однако, в зависимости от природы пенообразующего вещества стойкость пен может достигать максимального значения при некоторой другой концентрации пенообразователя, после чего снижается почти до нуля. Это характерно для низкомолекулярных соединений. Пенообразователи, типа мыл такого максимума не дают, стойкость пен, полученных на их основе, с увеличением концентрации повышается [98]. Результаты исследований, представленные в работе [103], подтверждают предположение о том, что максимальная устойчивость пены наблюдается при концентрациях ПАВ более низких, чем те, при которых достигаются насыщенные адсорбционные слои. Данные, представленные в работе [89] подтверждают, что только при насыщенном адсорбционном слое наблюдается высокая устойчивость пены. Такой вывод сделан при сравнении зависимостей стойкости пены от изменения поверхностного натяжения и других параметров.

К факторам, обеспечивающим стойкость пены, относят эффект Марангони

(структурно-механический) и эффект Гиббса (термодинамический).

Эффект Марангони повышает стойкость пены, проявляясь в способности тонких плёнок пузырьков пены реагировать на локальное изменение толщины, то есть к «залечиванию» слабого участка за счет поверхностного течения раствора из области низких значений поверхностного натяжения в область более высоких. Следовательно, скорость процесса восстановления плёнки пузырька пены тем выше, чем большая поверхностная активность у ПАВ и чем больше разность концентраций в утончённом и «здоровых» участках плёнки.

Эффект Гиббса проявляется в тех случаях, когда под влиянием тепловых воздействий, вызывающих растяжение плёнки пузырька пены, возникают локальные разности значений поверхностного натяжения, которые обуславливают переход молекул ПАВ в адсорбционном слое в сторону более низкой концентрации, т.е. к растянутой части плёнки. Основой теории Гиббса является предположение об упругости плёнки: при низких концентрациях ПАВ упругость пленок не проявляется, так как уменьшение поверхностного натяжения очень незначительно.

При повышении прочности адсорбционного слоя максимум стабильности пузырьков сдвигается в сторону больших концентраций ПАВ. Таким образом, устойчивость пены определяется механическими свойствами адсорбционного слоя наряду с поверхностной активностью ПАВ. Стойкость пены обуславливается наличием сил сцепления между отдельными молекулами адсорбционного слоя, а также подвижностью этих молекул, которая обеспечивает быстрое восстановление деформаций, возникающих при истечении жидкости из плёнки пузырьков пены в зависимости от свойств пенообразователя.

В теории коагуляции и устойчивости дисперсных систем, предложенной Дерягиным Б.В., расклинивающее давление рассматривается как фактор повышения стойкости пены. Расклинивающее давление в данном случае характеризуется избыточным давлением предельно тонкого слоя жидкости, которое препятствует дальнейшему утончению слоя под влиянием внешних воздействующих сил [98].

Известно [89, 90, 91, 92], что пену, как и любую дисперсную систему, можно характеризовать агрегативной неустойчивостью. В этом случае нестабильная пена проявляет наличие избытка поверхностной энергии, которая пропорциональна поверхности раздела фаз «жидкость–газ». Результаты работ [89, 90, 91, 92] позволяют также определить замкнутую систему как обладающую избытком внутренней энергии и находящуюся в неустойчивом равновесии, вследствие чего наблюдается уменьшение энергии такой системы. Продолжительность этого процесса определяется моментом достижения минимального энергетического запаса, при котором система переходит в состояние равновесия. В случае, когда такая система включает различные фазы, например, жидкость и газ, что свойственно пенам, внутренняя энергия становится минимальной, что приводит также к уменьшению поверхности раздела фаз, а, в конечном счёте, к разрушению пены. Самопроизвольное разрушение пены происходит в результате протекания следующих процессов: синерезиса, диффузии газа между пузырьками, разрыва плёнок пены. Преобладание того или иного из этих процессов при разрушении пены зависит от многих факторов.

Анализ результатов исследования процессов образования и разрушения пены, используемой для борьбы с пылью [37, 74, 98], показывает, что основные параметры свойств пены, а именно, кратность и стойкость, не всегда дают однозначную информацию о процессе пенообразования. При этом кратность пены может служить сравнительной характеристикой процесса пенообразования лишь для идентичных технологических условий получения пены, а стойкость – для случаев, когда кратность остаётся постоянной. Однако, на практике поддержание постоянной кратности пены невозможно при большинстве технологий её получения. Всё это затрудняет подбор эффективных пенообразователей для борьбы с пылью.

Кроме описанных выше кратности и стойкости как основных параметров пены, весьма важными её характеристиками также являются: плотность пены, её дисперсность, теплопроводность, электропроводность, ряд структурно-механических характеристик, оптические параметры и другие.

Плотность пены зависит от количественного соотношения жидкой и газообразной фаз и может колебаться в пределах от  $0,5\rho_{ж}$  ( $\rho_{ж}$  – плотность жидкой фазы) до значений, близких к нулю.

Дисперсность пены оценивают средним диаметром пузырьков  $D_{nn}$ , удельной поверхностью раздела раствор-воздух или распределением пузырьков по размерам [98]. Обычно размеры пузырьков технологической пены изменяются в широком диапазоне – от 0,00001 до 0,01 м. Лишь в особых случаях можно получить моодисперсную пену, используя специальные пенообразующие устройства. Поэтому использование среднего диаметра пузырьков  $d_{nn}$  для оценки дисперсности пены не вполне правомерно, хотя и допустимо. На дисперсность пены существенное влияние оказывают физико-химические свойства раствора (поверхностное натяжение, вязкость, концентрация ПАВ и другие), а также способ перемешивания фаз, конструкция пеногенератора, а также режим технологического процесса пенообразования [38, 98, 103]. Для описания распределения пузырьков в объёме пены по размерам используют закон Пуассона. Процесс изменения дисперсного состава пены протекает таким образом, что при её разрушении сохраняется некоторая область значений критического размера пузырьков, доля которых остаётся постоянной во времени. Применимость закона Пуассона для описания распределения пузырьков по размерам ограничена для пузырьков больших размеров, если их общее число невелико, а также для пены, подвергшейся значительному разрушению [103].

Передача теплоты в пене происходит через пузырьки газа и через жидкие или твёрдые прослойки между этими пузырьками. Поскольку теплопроводность пены довольно мала из-за наличия газовой фазы, её теплоизолирующие свойства широко используются на практике. Уравнение для определения коэффициента теплопроводности пены имеет вид [103]:

$$\lambda = \frac{2}{3}(\alpha \cdot \lambda_{ж}) + (1 - \alpha) \cdot \lambda_{г}, \text{ кДж/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{град)}, \quad (2.5)$$

где  $\lambda_{ж}$ ,  $\lambda_{г}$  – соответственно коэффициенты теплопроводности жидкой фазы и

воздуха, кДж/(м·с·град);  $\alpha$  – степень заполнения пены жидкой фазой.

Немаловажной характеристикой, определяющей основные свойства пены, является её электропроводность. Количественное выражение для электропроводности пены имеет вид [103]:

$$\beta_{жс} / \beta_n = 3/2 K, \quad (2.6)$$

где  $\beta_{жс}$ ,  $\beta_n$  – соответственно удельная электропроводность внутрипленочной жидкости и пены, Кл/м;  $K$  – кратность пены.

Для оценки процесса пенообразования безразмерными параметрами в практике применения пены для пылеподавления введены два основных критерия:

- критерий Дьяконова  $D_1$ , характеризующий соотношения стойкости пены в статических и динамических условиях, показывающий насколько конкретная пена пригодна к применению для тех или иных целей и определяемый по формуле [104]:

$$D_1 = \tau_{ст} / \tau_{дин}, \quad (2.7)$$

где  $\tau_{ст}$ ,  $\tau_{дин}$  – соответственно статическая и динамическая стойкости пены, с.

Чем ближе значение критерия Дьяконова  $D_1$  к единице, тем шире область применения пены для технических целей;

- критерий Журавлёва  $D_2$ , показывающий возможность безразмерной оценки процесса пенообразования в статических условиях, позволяющий выбирать оптимальные параметры пенообразователя при инвариантности остальных параметров, рассчитывать пеногенераторные установки и определяемый по формуле [97, 104]:

$$D_2 = K \cdot \tau. \quad (2.8)$$

Учитывая, что кратность пены  $K$  описывает процесс пенообразования, а стойкость  $\tau$  – кинетику разрушения пены, можно заключить, что именно эти два

параметра описывают состояние пены как дисперсной системы. Чем больше кратность пены при постоянной концентрации раствора пенообразователя, тем ниже её стойкость, то есть выполняется условие:  $D_2 = const$ .

В качестве пенообразователей могут служить поверхностно-активные вещества ПАВ (положительная адсорбция) и поверхностно–инактивные вещества ПИВ (отрицательная адсорбция). Молекулы ПИВ имеют малые размеры, и пена, полученная из этих веществ, обладает меньшей стойкостью, чем из растворов ПАВ, которые преимущественно и применяют в качестве пенообразователей [38, 67, 101, 102, 104, 105, 106].

По адсорбционной активности и поверхностно–активным свойствам все ПАВ делятся на две большие группы: растворимые в воде и коллоидные. Результаты экспериментов, представленные в работе [74], показали, что пена, полученная из растворов коллоидных ПАВ, обладает большей устойчивостью к воздействию пыли, чем пена, полученная из растворов растворимых в воде (истинных) ПАВ, которая, в свою очередь, менее устойчива, но обладает лучшей смачивающей способностью.

Перечисленные свойства растворов коллоидных и истинных ПАВ необходимо учитывать при использовании пены в реализации соответствующих функциональных элементов СБПП (рисунок 2.3). Так, при организации процесса пылеулавливания, целесообразно использовать коллоидные ПАВ, пена из которых обладает высокой стойкостью и низкой смачивающей способностью. При организации же процесса очистки воздуха от пыли необходимо, чтобы пена обладала ярко выраженной смачивающей способностью, чего можно добиться, применяя истинные растворы ПАВ.

Немаловажное значение для обеспечения высокой эффективности пылеподавления пеной в условиях эксплуатации ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК имеют максимально объективная оценка процесса пенообразования, выбор оптимальных параметров пенообразователя и расчёт пеногенераторной установки. Именно поэтому более подробно рассмотрим процесс пенообразования (генерирования пены).

Пену, как и другие дисперсные системы, можно получить двумя основными способами: диспергационным и конденсационным. Для борьбы с пылью применяют диспергационный способ получения пены, когда обеспечивается интенсивное совместное диспергирование пенообразующего раствора и воздуха на основе применения различных технологий:

- продавливание раствора пенообразователя через сетку путем эжектирования воздуха струёй раствора или принудительной подачи последнего;
- барботирование воздуха через раствор пенообразователя;
- механическое перемешивание раствора пенообразователя;
- взбалтывание раствора пенообразователя;
- распыливание раствора пенообразователя через форсунку и другие.

При этом технические средства получения воздушно-механической пены включают: решетчатые и барботажные пеногенераторы; воздушно-пенные стволы, работающие по принципу соударения струй раствора; сетчатые пеногенераторы; распыливающие форсунки различных типов и пневмогидрооросители.

При пенообразовании на сетке, барботаже и в воздушно-пенных стволах образуется пена, состоящая из связанных между собой пузырьков (когда расстояние  $I_n$  между соседними пузырьками пены равно 0), в результате чего получают *пенный слой* или объём пены.

При распыливании раствора пенообразователя с помощью форсунки образуется пена, представляющая собой поток дискретных пузырьков (когда расстояние  $I_n$  между соседними пузырьками пены больше 0), в результате чего получают *пенный аэрозоль*. Отличия в состояниях получаемой пены обуславливают в общей структуре СБПП (рисунок 2.3) наличие двух технологических видов пенного способа борьбы с пылью:

- обеспыливание пенным слоем;
- обеспыливание пенным аэрозолем.

В настоящее время наиболее широкое применение получила технология получения пены вспениванием на сетке [37, 98], когда процесс образования

пузырьков протекает упорядоченно при сравнительно равномерной подаче воздуха. В сетчатых пеногенераторах пенообразующий раствор под давлением поступает на сетку через распылитель. Поток воздуха, эжектируемый струёй раствора или подаваемый принудительно с помощью вентилятора, предварительно перемешивается с распыленным раствором перед сеткой и выдувает на сетке пузырьки пены, кратность которой может достигать 1000 и более, и в основном, она определяется размерами ячеек сетки, степенью дробления струи раствора, а также параметрами воздушного потока. Образование пены на сетке происходит только при определенном интервале значений скорости потока воздуха  $v_{Bmin} \leq v_B \leq v_{Bmax}$ , предельные значения которого зависят от свойств и концентрации пенообразователя, размеров ячеек сетки и определяются по зависимости [98, 103]:

$$v_{Bmin} = 0,71 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_g \cdot d_j}}, \text{ м/с}, \quad (2.9)$$

$$v_{Bmax} = \frac{v_p}{2 \cdot \pi \cdot d_j}, \text{ м/с}, \quad (2.10)$$

$$v_{Bopt} = 0,25 \cdot v_p / \pi \cdot d_j, \text{ м/с}, \quad (2.11)$$

где  $v_{opt}$  – оптимальная скорость выхода пены из горловины сетчатого пеногенератора, м/с;  $\sigma$  – поверхностное натяжение раствора пенообразователя, Н/м;  $\rho_g$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $v_p$  – кинематическая вязкость раствора пенообразователя, м<sup>2</sup>/с;  $d_j$  – размер ячейки сетки пеногенератора, м.

При значении скорости набегающего потока  $v_B$  меньше значения минимальной  $v_{Bmin}$ , пенообразование прекращается, а при значении скорости  $v_B$  выше максимальной  $v_{Bmax}$ , от сетки начинают отрываться отдельные группы пузырьков пены в виде хлопьев, и сплошность потока пены нарушается [103]. Анализ механизма пенообразования на сетке, а также оптимальных технологических режимов подачи на неё воздуха и раствора пенообразователя показывает [98, 103, 104], что кратность пены с увеличением давления подачи

раствора пенообразователя линейно возрастает. Это обусловлено тем, что с увеличением скорости подачи жидкости на сетку повышается также эжектирующая способность потока жидкости. Результаты исследований влияния размера «живого сечения» сетки  $F_c$  на кратность пены  $K$  показывают, что существует определенное значение  $F_c$ , которому соответствует максимальная кратность пены. Это можно объяснить тем, что при небольших значениях  $F_c$  сопротивление сетки слишком велико и, соответственно, количество эжектируемого воздуха незначительно. При больших же значениях  $F_c$  часть воздуха может свободно проходить через ячейки сетки, не участвуя в пенообразовании. Таким образом, влияние давления подачи раствора пенообразователя на кратность получаемой пены неоднозначно и в значительной степени определяется как свойствами пенообразователя, так и конструктивными особенностями пеногенератора [98].

Производительность пеногенератора определяют по формуле [104]:

$$Q_{nz} = Q_p \cdot K, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.12)$$

где  $Q_p$  – расход раствора пенообразователя через пеногенератор,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

При этом необходимо учитывать, что при генерировании в объёме пены одновременно протекают два конкурирующих процесса: образование пены и её разрушение, причём объём пены  $V_\tau$  в данный момент времени  $\tau$  равен разности объёмов сгенерированной пены  $V_o$  и разрушенной  $V_p$ :

$$V_\tau = V_o - V_p, \text{ м}^3. \quad (2.13)$$

Объём разрушенной пены  $V_p$  можно определить на основе рассмотрения процесса её разрушения, протекающего во времени с определенным ускорением:

$$V_p = Q_v \cdot K \cdot \tau, \text{ м}^3, \quad (2.14)$$

где  $Q_V$  – расход раствора пенообразователя в данный момент времени, м<sup>3</sup>/с.

Если процесс образования пены во времени равномерен, а процесс её разрушения происходит с ускорением (а такое условие выполняется практически для любой пеногенерирующей установки), то объем существующей пены можно определить по уравнению:

$$V_\tau = (Q_p - 0,5Q_V) \cdot K \cdot \tau, \text{ м}^3. \quad (2.15)$$

Из уравнения (2.14) следует, что при генерировании пены возможны три случая:

- преобладание процесса образования пены над процессом её разрушения ( $Q_V > Q_p$ ), когда объем существующей пены постоянно возрастает;
- преобладание процесса разрушения пены над процессом её образования ( $Q_V < Q_p$ ), когда объем существующей пены уменьшается;
- скорость процесса образования пены и скорость её разрушения равны, когда объем пены остается постоянным.

Анализ зависимостей (рисунок 2.4), представленных в работе [107], показывает, что для жизненного цикла пены можно с достаточной определенностью выделить три временных интервала, имеющих вполне четкий физический смысл:

- интервал времени от 0 до  $\tau_1$  характеризуется преобладанием процесса пенообразования над разрушением пены ( $Q_V > Q_p$ );
- для интервала времени от  $\tau_2$  до  $\tau_3$  характерно равномерно течение обоих процессов ( $Q_V = Q_p$ );
- в интервале времени от  $\tau_3$  до  $\tau_4$  происходит разрушение образовавшейся пены, а процесса пенообразования не наблюдается.

В момент времени  $\tau_1$  скорость пенообразования максимальна, а в момент времени  $\tau_4$  максимальна скорость разрушения пены. Таким образом, интервалы времени от 0 до  $\tau_1$  и от  $\tau_3$  до  $\tau_4$  позволяют оценить кинетику соответственно пенообразования и разрушения пены, а также приняты за стойкость пены  $\tau_{1/2}$ .

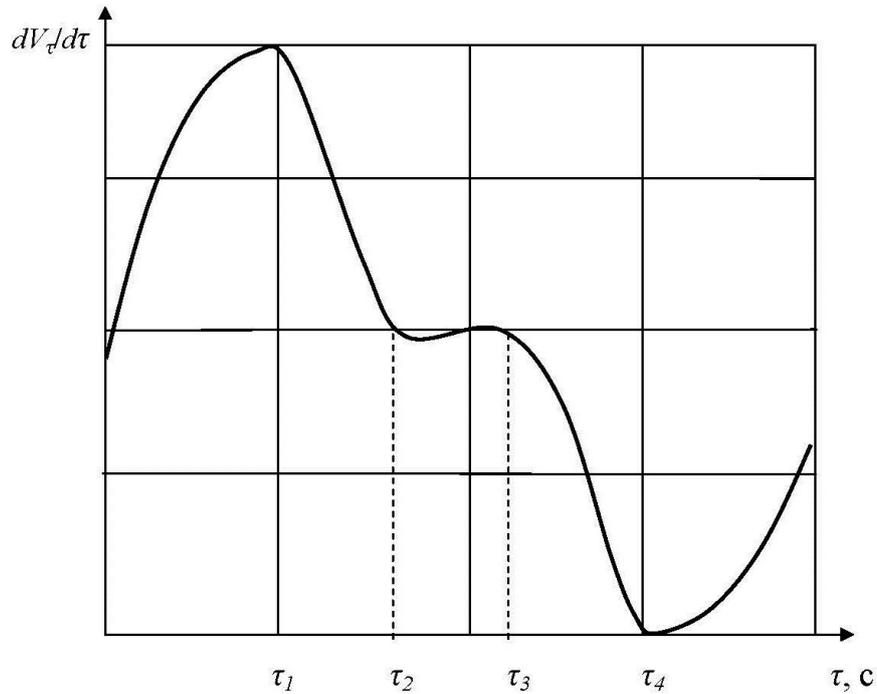


Рисунок 2.4 – Изменение скорости пенообразования во времени

Для случая установившегося процесса генерирования пены её объём можно рассчитать по уравнению:

$$V_{\tau_2} = Q_p \cdot K \cdot \tau_{1/2}, \text{ м}^3. \quad (2.16)$$

Уравнения (2.14) и (2.15) позволяют определить количество существующей пены по параметрам процессов её образования и разрушения. Из уравнения (2.15) следует, что количество пены в момент времени  $\tau$  зависит от скорости подачи раствора пенообразователя на сетку пеногенератора и параметра  $D_2$ .

Для накопления определенного количества пены на поверхности транспортируемого сырья необходимо, чтобы кроме требуемой производительности пеногенератора скорость воздушного потока в зоне ленточного транспортёра не превышала скорости выхода пены из горловины пеногенератора ( $v_n \geq v_{en}$ ). В этом случае пена, выходящая из горловины пеногенератора, распространяется в виде сплошного потока длиной  $l_c$  и накапливается до определенного количества на поверхности транспортируемого

сырья. Величину  $l_c$  можно найти по формуле:

$$l_c = \begin{cases} (v_n + v_{en}) \cdot \tau_n, & \text{для спутного движения пены и воздушного потока;} \\ (v_n - v_{en}) \cdot \tau_n, & \text{для встречного движения пены и воздушного потока,} \end{cases} \quad (2.17)$$

где  $v_n$  – скорость выхода пены из горловины пеногенератора, м/с;  $v_{en}$  – скорость воздушного потока в зоне распространения и накопления пены, м/с;  $\tau_n$  – время нахождения пены в окружающем воздушном потоке, обладающим скоростью  $v_{en}$ , с.

Величина  $\tau_n$  определяется по формуле:

$$\tau_n = \begin{cases} \tau_{1/2}, & \text{при } \tau < \tau_{nn}; \\ \tau_{nn}, & \text{при } \tau \geq \tau_{nn}, \end{cases} \quad (2.18)$$

где  $\tau_{nn}$  – время, в течение которого пузырёк пены, вышедший из горловины пеногенератора, находится в окружающем воздушном потоке, обладающим скоростью  $v_{en}$  (от сетки пеногенератора до места накопления), с.

Величину  $\tau_{nn}$  можно определить по формуле, представленной в работе [23]:

$$\tau_{nn} = \frac{0,7 \cdot h_1}{\sqrt{\delta \cdot g \cdot \rho_{жс} / \rho_{в}}}, \quad \text{с}, \quad (2.19)$$

где  $h_1$  – высота расположения пеногенератора над поверхностью транспортируемого сырья, м;  $\delta_{пп}$  – средняя толщина плёнки пузырька пены, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Если выполняется условие  $v_n < v_{en}$ , то поток пены под действием воздушного потока распадается на хлопья или отдельные пузырьки в зависимости от значений  $v_{en}$ . Анализ работ, посвященных изучению физико-химических свойств пены [37, 108, 109] и адгезионных связей в пене [82, 110, 111], позволил оценить силы,

связывающие пенные пузырьки друг с другом. Зная давление воздушного потока в горловине пеногенератора, можно определить критическую скорость  $v_a$ , при которой связи между пузырьками в объеме пены нарушаются, в результате чего может сформироваться пенный аэрозоль:

$$v_a = 3,96 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{d_{nn} \cdot \rho_g}}, \text{ м/с.} \quad (2.20)$$

Однако известно, что состояние пенных пузырьков в воздушном потоке определяется критерием Вебера  $We$  [83, 112, 113, 114], критическое значение которого определяется по формуле:

$$We = \frac{\rho_g \cdot v^2 \cdot d_{nn}}{2 \cdot \sigma}. \quad (2.21)$$

Из формулы (2.21) можно определить критическое значение скорости воздушного потока, при котором наступает распад пенных пузырьков:

$$v_{dp} = 1,77 \cdot \left( \frac{\sigma}{d_{nn} \cdot \rho_g} \right), \text{ м/с.} \quad (2.22)$$

При  $v_{en} \geq v_{dp}$  пузырьки пены разрушаются, не образовав пенный аэрозоль.

Из вышесказанного следует, что при условии  $v_{en} > v_a$  целесообразно использовать оборудование, генерирующее пену в виде пенного аэрозоля, т.е. дискретных пенных пузырьков, например, форсунки, что подтверждает выводы, приведенные в работах [37, 38, 82, 95, 104, 107, 112, 115].

Для получения пенного аэрозоля при распыливании раствора пенообразователя различными типами форсунок создают давление  $0,2 \div 0,3$  МПа, когда формируется весьма стабильный факел со средней скоростью вылета пузырьков около 30 м/с. Наиболее эффективный факел пенного аэрозоля, характеризуемый высокой степенью диспергирования раствора пенообразователя и большой плотностью, получаемый при малом давлении раствора и сжатого воздуха, создают с помощью оросителей пневмогидроорошения типа ВВК.

Процесс распространения пенного аэрозоля аналогичен процессу распространения капельного аэрозоля, а роль пузырька пены в процессе обеспыливания воздуха определяется следующими основными факторами: скоростью его полета  $v_{nn}$ , размерами  $d_{nn}$ , толщиной плёнки пузырька пены  $\delta_{nn}$  и поверхностным натяжением на границе раздела фаз  $\sigma_{ж-г}$ . Однако при одинаковом расходе жидкости плотность факела пенного аэрозоля значительно выше плотности факела капельного аэрозоля, что обеспечивает более высокую эффективность пылеподавления пенным аэрозолем.

### **Выводы**

Таким образом, в результате выполненного этапа исследований выявлены основные факторы и источники загрязнения воздушной среды городских территорий, характерные для предприятий строительной индустрии, изучены особенности состояния воздушной среды в рабочих зонах заводов по изготовлению железобетонных конструкций, определены и описаны энергетические характеристики процессов и явлений, наблюдаемых в пылевых аэрозолях, образующихся и выделяющихся в воздушную среду на заводах по изготовлению железобетонных конструкций, а также оценено влияние этих особенностей на условия реализации процесса обеспыливания воздуха. Выполненный анализ современного состояния теории и практики обеспыливания технологического сырья и воздуха в рабочей зоне ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК, включая теоретические подходы к описанию процесса пылевого загрязнения воздушной среды, систематизацию современных средств обеспыливания технологического сырья и воздуха, технологические особенности получения пены, её основные свойства и условия пенообразования, позволил выделить пенный способ как наиболее экономичную технологию борьбы с пылью в рассматриваемых производственно–технологических условиях.

Полученные результаты позволяют перейти к разработке алгоритма реализации физико–энергетического подхода к оценке и совершенствованию методики выбора оптимальных для заданных производственных условий технологий обеспыливания пеной. Дальнейшие исследования проведём на примере ленточных транспортёров ЖБИиК.

### **3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ И ВЫБОРА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭКОНОМИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ПЕНОЙ**

С целью использования построенных и описанных в п.п.1.5 и 2.1 физических моделей процесса загрязнения и процесса снижения загрязнения для выбора оптимальной из условий обеспечения требуемой эффективности и максимальной энергетической экономичности технологии обеспыливания пеной, а также для расчёта рабочих параметров этой технологии при проектировании, реконструкции и эксплуатации предприятий по изготовлению железобетонных изделий и конструкций, необходимо предложить такую методику, которая позволяла бы кроме ряда производственно–технологических параметров и физико–химических характеристик производственного процесса также учитывать условия обеспечения ПДК в рабочей зоне производственных помещений ленточных транспортёров и в воздушном бассейне промышленных площадок предприятий стройиндустрии.

Такая методика может быть построена, в частности, на аналитико–логической схеме, включающей большой объём оперативной и нормативно–справочной информации, расчётные параметрические зависимости эффективности и критерия энергетической экономичности (например, энергоёмкостного показателя [44, 45, 47, 51]) процесса обеспыливания, а также ряд краевых условий.

Именно поэтому основной задачей следующего этапа исследований является математическое описание процесса обеспыливания пеной воздуха и технологического сырья для условий эксплуатации ленточных транспортёров на основе получения параметрических зависимостей эффективности и критерия энергетической экономичности.

### **3.1 Математическое описание основных этапов процесса обеспыливания пеной**

В соответствии с рассмотренными в п.2.2 положениями обеспыливание пенным способом может быть применено:

- на этапе пылезадержания, когда используют пену в виде слоя, расположенного непосредственно вблизи потока транспортируемого сырья и препятствующего выходу из этого потока пылевых частиц за счёт экранирующих свойств;

- на этапе очистки аспирируемого (вентиляционного) воздуха от пылевых частиц, когда используют пену либо в состоянии аэрозоля, либо в виде слоя, обеспечивающую в активной зоне процесса очистки отделение пылевых частиц от воздушного потока с последующим выбросом очищенного воздуха в приземный слой атмосферы;

- на этапе принудительного рассеивания пылевых частиц в приземном слое атмосферы, когда используют пену в состоянии аэрозоля, обеспечивающего интенсивное разудаление пылевых частиц в случае, когда на этапе очистки не обеспечивается полное отделение всех пылевых частиц от воздушного потока с последующим их выводом в приземный слой атмосферы.

Причем, пылезадержание (экранирование) выделяющихся из потока транспортируемого пылеобразующего сырья (песка, щебня и др.) реализуют на открытых источниках выделения пылевых частиц, к которым относятся ленточные транспортёры, при относительно малых скоростях окружающих воздушных потоков (до 1,5 м/с), а очистку воздуха от пылевых частиц и их принудительное рассеивание в приземном слое атмосферы – при относительно больших скоростях газоздушных потоков (свыше 2,5 м/с).

Таким образом, математическое описание процесса обеспыливания пеной выполним последовательно для следующих основных его этапов: пылезадержания, очистки аспирируемого воздуха от пыли и её принудительного рассеивания при эксплуатации ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК.

### 3.1.1 Пылезадержание

Математическое описание процесса пылезадержания для условий эксплуатации ленточных транспортёров БСУ заводов ЖБИиК, сущность которого заключается в использовании слоя пены, выполняющего функции экрана, препятствующего выходу пылевых частиц из потока транспортируемого технологического сырья, выполнено нами с учётом упругих свойств пузырьков пены, а также параметров возврата в это сырьё пылевых частиц за счёт различных физических механизмов их захвата. Кроме того параметрические зависимости эффективности обеспыливания и энергоемкостного показателя как результирующих параметров пенного способа пылезадержания обеспечат возможность прогнозного расчёта их значений для рассматриваемого этапа процесса обеспыливания воздуха с учётом особенностей взаимодействия пылевого аэрозоля со слоем пены.

Результатом реализации процесса пылезадержания пенным способом является его эффективность, для определения которой применяются различные зависимости [37, 67, 81, 98, 104, 115, 117]. Однако, эти зависимости привязаны к конкретным видам пеногенерирующего оборудования и недостаточно полно отражают все стадии процесса взаимодействия пылевого аэрозоля со слоем пены.

Расчет эффективности реализации процесса пылезадержания основан на учёте вероятностной реализации последовательных взаимозависимых физических механизмов взаимодействия пылевых частиц с отдельными пузырьками слоя пены, что по аналогии с формулой, представленной в работах [118-123], может быть описано следующей зависимостью:

$$E_{эф-нз} = 1 - (1 - E_{эф(1)-нз}) \cdot (1 - E_{эф(2)-нз}) \cdot (1 - E_{эф(3)-нз}) , \quad (3.1)$$

где  $E_{эф(1)-нз}$  – эффективность захвата и возврата пылевых частиц пенным слоем в поток технологического сырья под действием инерционных сил;  $E_{эф(2)-нз}$  –

эффективность упругого взаимодействия (отталкивания) пылевых частиц с пузырьками пены;  $E_{эф(3)-нз}$  – эффективность захвата пылевых частиц пузырьками пены под действием электрических сил.

Эффективность  $E_{эф(1)-нз}$  характеризует, таким образом, захват и возврат пылевых частиц пенным слоем (при  $I_n = 0$ ) в поток технологического сырья на первой стадии взаимодействия под действием инерционных сил, зависит от коэффициента инерционного осаждения  $K_{ин}$  и определяется по формуле:

$$E_{эф(1)-нз} = 1 - K_{ин} . \quad (3.2)$$

Коэффициент  $K_{ин}$  определяется [124, 125]:

- при условии, когда скорость пузырьков  $v_n$  меньше скорости, при которой пузырьки дробятся  $v_{др}$ , то есть  $v_n < v_{др}$ , по формуле:

$$K_{ин} = \frac{Stk}{Stk + A_1^1} , \quad (3.3)$$

- если же  $v_n \geq v_{др}$ , тогда процесс дробления пузырьков носит массовый характер и  $E_{эф(1)-нз} = 0$ .

Число Стокса  $Stk$  определяется по формуле [82]:

$$Stk = \frac{d_q \cdot v \cdot \rho_q}{18 \cdot \mu_g \cdot l_1} , \quad (3.4)$$

где  $d_q$  – диаметр частиц, м;  $v_{gn}$  – скорость невозмущённого воздушного потока, набегающего на препятствие в виде слоя пены, м/с;  $\rho_q$  – плотность пылевого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_g$  – коэффициент динамической вязкости воздуха, равный  $1,82 \cdot 10^{-5}$  Па·с;  $l_1$  – характерный размер обтекаемого препятствия в виде слоя пены, м, который для пенного слоя (при  $I_n = 0$ ) принимает значение  $l$ .

В оценке значений коэффициента  $A_1^1$  у различных авторов [37, 119, 125] наблюдаются определённые расхождения, которые можно объяснить зависимостью этого коэффициента от размеров частиц, скорости их движения,

скорости пузырьков и ряда других факторов. Применительно к пенному способу реализации процесса пылезадержания можно выделить пылевые частицы размером  $d_{кр}$ , которые не могут достичь пенного слоя, так как их движение настолько замедляется, что они теряют инерцию и под влиянием составляющих скорости, перпендикулярных направлению движения основного потока пылевых частиц, сносятся параллельно внутренней поверхности слоя пены. С учетом экспериментальных данных и методики, представленных в работе [126], применительно к пенному способу получена зависимость коэффициента  $A_1^1$  от соотношения фактических размеров  $d_u$  пылевых частиц и их критического размера  $d_{кр}$ :

$$A_1^1 = 2 \cdot 10^{n_1^1}, \quad (3.5)$$

где  $n_1^1$  – коэффициент, учитывающий соотношение фактических размеров пылевых частиц  $d_u$  и их критического размера  $d_{кр}$ , определяемый следующим образом:

$$n_1^1 = \begin{cases} -1, & \text{при } d_u > d_{кр}, \\ 0, & \text{при } d_u = d_{кр}, \\ 1, & \text{при } d_u < d_{кр}. \end{cases} \quad (3.6)$$

Значения  $d_{кр}$  определяются критическими значениями числа  $Stk$  по формуле [126]:

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu_v \cdot Stk_{кр} \cdot d_u}{v \cdot \rho_u}}. \quad (3.7)$$

Значение  $Stk_{кр}$  зависит от формы объёма пены, расположенной в виде слоя над источником пылевыведения [127]. Кроме того, конфигурация самого источника пылевыведения также влияет на значение  $Stk_{кр}$ . Считая инерционное осаждение частиц на пенном слое аналогичным осаждению на пластине, принимаем для процесса пылезадержания:

-  $Stk_{кр} = 0,28$  на источнике пылевыведения прямоугольного сечения (что характерно поверхности ленты транспортёра);

-  $Stk_{кр} = 0,1$  на источнике пылевыведения квадратного или круглого сечения (что характерно загрузочным, либо разгрузочным отверстиям узлов перегрузки).

Скорость встречи пылевых частиц с пузырьками пенного слоя определяется скоростью  $v_u$ , которая зависит от скорости витания  $v_s$  пылевых частиц и скорости перемещения источника пылевыведения  $v_u$  (для открытых источников) [128]:

$$v_u = \begin{cases} v_u, & \text{при } v_s > v_{en}, \\ \sqrt{v_u^2 + v_s^2}, & \text{при } v_s \leq v_{en}. \end{cases} \quad (3.8)$$

Скорость витания пылевой частицы  $v_s$  зависит от плотности её материала, её размеров, а также вязкости воздушной среды, и определяется по формуле [82]:

$$v_s = \begin{cases} \frac{d_u \cdot \rho_u \cdot g}{18 \cdot \mu_u}, & \text{при } d_u \leq 60 \text{ мкм}, \\ 31,468 \cdot \rho_u \cdot d_u, & \text{при } d_u > 60 \text{ мкм}. \end{cases} \quad (3.9)$$

Анализ основных параметров процесса пенообразования [129] при скоростях воздушного потока  $v_{en} < 1 \text{ м/с}$ , что характеризует открытые источники пылевыведения (к которым относятся рассматриваемые ленточные транспортёры), позволил получить для пенного слоя следующие зависимости среднего диаметра пузырьков пены  $d_{nn}$ :

- при получении слоя пены сетчатыми пеногенераторами:

$$d_{nn} = \begin{cases} 10 \cdot (d_{я} + l_{я}) \cdot \sqrt{\frac{K \cdot Q_p}{\pi \cdot d_c}}, & \text{при } v_c = v_{min}, \\ 10(d_{я} + l_{я}) \cdot \sqrt{K \cdot Q_p \cdot d_{я} \cdot d_c / (\pi \cdot V_p)}, & \text{при } v_{min} < v_c < v_{max}, \\ 5(d_{я} + l_{я}) \cdot \sqrt{K \cdot Q_p \cdot d_{я} \cdot d_c / (\pi \cdot V_p)}; & \text{при } v_c = v_{max}; \end{cases} \quad (3.10)$$

- при получении слоя пены барботажными пеногенераторами:

$$d_{nn} = \begin{cases} 4 \cdot r_{\delta} \cdot \sigma_p / (v_{nprn} \cdot \mu_p), & \text{при } Re \leq 1, \\ r_{\delta} \cdot \sigma_p \cdot g / (28 \cdot v_{nprn} \cdot \mu_p), & \text{при } 1 < Re \leq 800, \\ 1,28 \cdot \sigma_p \cdot \sqrt[3]{r_{\delta} / (v_{nprn} \cdot \rho_p \cdot \mu_p \cdot \rho_s)}, & \text{при } Re > 800, \end{cases} \quad (3.11)$$

где  $d_{я}$  – эквивалентный диаметр ячейки сетки пеногенератора, м;  $d_c$  – диаметр сопла форсунки сетчатого пеногенератора, м;  $l_{я}$  – расстояние между центрами ячеек в сетке, м;  $\eta_p$  – кинематическая вязкость раствора пенообразователя, м<sup>2</sup>/с;  $r_{\delta}$  – радиус барботёра, м;  $\mu_p$  – динамическая вязкость раствора пенообразователя, Па·с;  $v_{nprn}$  – скорость пузырька в растворе пенообразователя, м/с;  $\sigma_p$  – поверхностное натяжение раствора пенообразователя, н/м.

Скорость  $v_c$  выхода потока пены через сетку пеногенератора определена по формуле с учётом уравнения неразрывности потока:

$$v_c = 4 \cdot Q_{\delta} / \pi \cdot d_c^2 = 0,25 \cdot v_p / \pi \cdot d_{я}, \quad \text{м/с}. \quad (3.12)$$

Скорости  $v_{min}$  и  $v_{max}$  определяются соответственно по формулам [129]:

$$v_{min} = 0,71 \sqrt{\sigma_p / \rho_s \cdot d_{я}}, \quad \text{м/с}, \quad (3.13)$$

$$v_{max} = v_p / 2 \cdot \pi \cdot d_{я}, \quad \text{м/с}. \quad (3.14)$$

Если  $v_c < v_{min}$ , то раствор пенообразователя проскакивает через сетку в виде капель, не образуя пузырьки пены, а при  $v_c > v_{max}$  образующиеся на сетке пузырьки пены мгновенно разрушаются под воздействием воздушного потока, проходящего через сетку [130].

Скорость пузырька  $v_{nprn}$  в растворе пенообразователя для барботажного пеногенератора определяется по формуле [51, 129]:

$$v_{npi} = \begin{cases} g \cdot d_{nn} \cdot \rho_p / 3\mu_p, & \text{при } Re < 1, \\ \pi d_{nn} \cdot g^2 / 336V_p, & \text{при } 1 < Re \leq 800, \\ 2 \cdot (4 \cdot \sigma_\phi g / 3 \cdot \rho_p \cdot \mu_p)^{1/5} / 3, & \text{м/с, при } Re > 800. \end{cases} \quad (3.15)$$

С учетом зависимости (2.4) кратность пены определяется по формуле:

$$K = Q_n / Q_p = 0,78 \cdot d_{nz} \cdot V_c / Q_p, \quad (3.16)$$

где  $Q_n$  – расход пены, м<sup>3</sup>/с;  $d_{nz}$  – диаметр ствола пеногенератора, м;  $V_c$  – объём слоя пены, м<sup>3</sup>.

Расход раствора пенообразователя  $Q_p$  определяется по формуле:

- при получении слоя пены сетчатыми пеногенераторами:

$$Q_p = 5,23 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_c \sqrt{H_p}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (3.17)$$

где  $\alpha_c$  – коэффициент расхода сопла оросителя, принимаемый равным  $5 \cdot 10^{-5} d_c$ ;

- при получении слоя пены барботажными пеногенераторами:

$$Q_p = h_n \cdot F_n / K \cdot \tau, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (3.18)$$

где  $h_n$  – высота слоя пены в полости корпуса пеногенератора, м;  $F_n$  – площадь сечения корпуса пеногенератора, м<sup>2</sup>.

Высота слоя пены в полости корпуса пеногенератора  $h_n$  определяется по формуле:

$$h_n = 2,74 \cdot 10^{-3} \cdot h_0 \sqrt{U_{en}} / \sigma^{1,3} (V_p)^{1/4}, \quad \text{м}. \quad (3.19)$$

Площадь сечения корпуса пеногенератора  $F_n$  находится в зависимости от конструктивных параметров аппарата и определяется по формуле:

$$F_n = 2\pi R^2, \text{ м}^2. \quad (3.20)$$

Плотность пены  $\rho_n$  определяется следующим образом:

$$\rho_n = 100 \cdot \rho_p \cdot \rho_e / c_{mp} \cdot (\rho_e - \rho_p) + 100 \cdot \rho_p, \text{ кг/м}^3, \quad (3.21)$$

где  $c_{mp}$  – массовая концентрация пенообразователя в растворе, %, которая определяется по формуле:

$$c_{mp} = 100 \cdot Q_p \rho_p / (Q_e \cdot \rho_e + Q_p \cdot \rho_p), \%. \quad (3.22)$$

Плотность раствора пенообразователя можно определить, зная значения плотности самого пенообразователя и воды, в соответствии с законом сохранения массы:

$$Q_p \cdot \rho_p = Q_{вод} \cdot \rho_{вод} + Q_{но} \cdot \rho_{но}, \quad (3.23)$$

$$\rho_p = (Q_{вод} \cdot \rho_{вод} + Q_{но} \cdot \rho_{но}) / Q_p, \text{ кг/м}^3. \quad (3.24)$$

Процесс экранирования пылевых частиц слоем пены характеризуется эффективностью  $E_{эф(2)-нз}$ , величина которой зависит, главным образом, от свойств пены и скорости встречи пылевых частиц с пузырьками пены. С учетом результатов экспериментальных и теоретических исследований, представленных в работах [37, 131, 132], применительно к пенному слою величина  $E_{эф(2)-нз}$  определяется по формуле:

$$E_{эф(2)-нз} = 1 - \exp \left[ -0,693 \cdot \left( \frac{v_{кр}^3}{v} \right)^2 \right], \quad (3.25)$$

где  $v_{кр}^3$  – критическая скорость пылевой частицы, при которой пузырек пены может разрушиться при экранирующем (упругом) взаимодействии, м/с.

Значение  $v_{кр}^э$  можно определить на основе [130, 131] с учётом упругих свойств плёнки пузырька:

$$v_{кр}^э = \sqrt{2\pi \cdot \sigma \cdot d_q / m_q \cdot [\delta / \delta_{кр} \cdot (1 + d_q / d_n \cdot (d_q + \delta_{кр}))] - 1}, \quad (3.26)$$

где  $\delta$ ,  $\delta_{кр}$  – соответственно средняя и критическая толщина плёнок в пенных пузырьках, м;  $m_q$  – масса пылевой частицы, кг.

Известно, что толщина плёнок в пенных пузырьках меняется во времени за счет испарения, истечения раствора из плёнки, уноса раствора воздушным потоком и др., что величина  $\delta$  зависит от длины волны прогиба плёнки, поверхностного натяжения и других факторов, что пузырек не разрушается до и в период появления интерференционных полос и разрушается после их исчезновения, то есть при толщине плёнки до  $7,6 \cdot 10^{-7}$  м, а также до  $4 \cdot 10^{-7}$  м [131, 132].

В связи с этим для дальнейших расчетов в наших исследованиях принимаем среднее значение толщины плёнки пузырька в пенном слое  $\delta = 7,6 \cdot 10^{-7}$  м, а критическое значение  $\delta_{кр} = 4 \cdot 10^{-7}$  м.

Масса пылевой частицы  $m_q$ , значение которой зависит от плотности её материала и размеров, можно определить по формуле:

$$m_q = \pi \cdot d_q^3 \cdot \rho_q / 6, \text{ кг.} \quad (3.27)$$

Захват частиц пыли пеной под действием электрических сил [114, 133, 134] характеризуется эффективностью  $E_{эф(3)-нз}$ . Анализ экспериментальных данных [134] позволил получить зависимость эффективности захвата пылевых частиц под действием электрических сил, которую используем в расчётах применительно к пенному способу при использовании пенного слоя ( $I_n = 0$ ):

$$E_{эф(3)-нз} = 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot q_0^{0,65}, \quad (3.28)$$

где  $q_0$  – удельный электрический заряд пены, Кл/м.

Необходимо отметить, что при искусственной электризации пены величина удельного заряда  $q_0$  зависит от способа подзарядки пены и величины потенциала [134].

С учетом уравнений (3.2)-(3.28) зависимость (3.1) эффективности пылезadržания пенным способом с применением пенного слоя ( $I_n = 0$ ) принимает вид:

$$E_{эф-нз} = 1 - d_q^2 \cdot v \cdot \rho_q / (d_q^2 \cdot v \cdot \rho_q + 360 \cdot \mu_g \cdot l) \cdot \exp \left[ -7,48 \sigma / v^2 \cdot \rho_q \cdot \left( 1/d_q + 2,1 d_q / d_n \cdot (d_q + 4 \cdot 10^{-7}) \right) \right] \cdot (1 - 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot q^{0,65}). \quad (3.29)$$

Наряду с параметрической зависимостью эффективности пылезadržания (3.29) для повышения степени объективности выбора технологических параметров пылезadržания пеной необходимо получить параметрическую зависимость энергоёмкостного показателя этого процесса.

Для получения такой зависимости с учетом параметрической зависимости эффективности (3.29) необходимо определить энергетические параметры, связывающие между собой физико–химические и технологические характеристики процесса [46, 47].

С этой целью нами выявлены и исследованы энергетические параметры, характеризующие:

- энергию, реализуемую на захват частиц пыли пузырьками слоя пены;
- энергию, которой обладают пузырьки пены и частицы пылевого аэрозоля в активной зоне пылезadržания.

Процесс взаимодействия пузырьков слоя пены с частицами пыли на этапе пылезadržания можно разделить на несколько стадий.

*На первой стадии* происходит сближение частиц пыли с пенным слоем до расстояния действия молекулярных сил под действием их кинетической энергии. При этом полезной, с точки зрения эффективности процесса пылезadržания, считаем кинетическую энергию только тех пылевых частиц, которые вступили в

контакт с пузырьками пенного слоя.

Энергетический параметр  $W_1$ , учитывающий кинетическую энергию летящих к пенному слою ( $I_n = 0$ ) частиц, может быть описан:

$$W_1 = 0,5 \cdot m_q \cdot v_q^2 \cdot n' \cdot V_a / \tau_k, \text{ Вт}, \quad (3.30)$$

где  $m_q$  – масса пылевой частицы, кг;  $n'$  – количество пылевых частиц, соприкоснувшихся с пузырьками пенного слоя в единице его объема,  $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$ ;  $\tau_k$  – время движения пылевых частиц, отделившихся от массы транспортируемого сырьевого материала, до границы слоя пены, с;  $V_a$  – объем активной зоны пылезадержания слоем пены,  $\text{м}^3$ .

В число пылевых частиц, соприкоснувшихся с пенным слоем в единице объема, входят частицы, которые под действием инерционных сил вступили в контакт со слоем пены. Так как скорость движения и масса частиц различны, не все пылевые частицы, отделившиеся от сырьевого материала, достигнут слоя пены. Число пенных пузырьков, столкнувшихся с пылинками в единице объема, определено с учетом направления и величины скорости воздушного потока  $v_{en}$  для пенного слоя ( $I_n = 0$ ):

$$n' = n_0 \cdot E_{эф(1)-нз}, \quad (3.31)$$

где  $n_0$  – количество отделившихся частиц,  $1/\text{м}^3$ , которое определяется по формуле:

$$n_0 = \frac{c_q}{m_q} = \frac{6c_q}{\pi \cdot d_q^3 \cdot \rho_q}, \text{ } 1/\text{м}^3, \quad (3.32)$$

где  $c_q$  – концентрация частиц пыли, отделившихся от массы транспортируемого сырьевого материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Время движения пылевых частиц  $\tau_k$  от источника пылевыделения до границы слоя пены определяется по формуле:

$$\tau_k = \frac{h_a}{V_q}, \text{ с}, \quad (3.33)$$

где  $h_a$  – среднее расстояние между пылевыми частицами и пузырьками пены в активной зоне пылезadržания, м, для большинства типов ленточных транспортёров  $h_a = 0,025$  м.

На второй стадии процесса взаимодействия пылевого аэрозоля с пеной, когда частицы пыли и пузырьки находятся на расстоянии действия молекулярных сил, и частицы преодолевают расклинивающее давление, основным видом энергии, участвующим в захвате частиц является адгезионная энергия, так как именно этот вид энергии связан с поверхностными явлениями. Энергетический параметр  $W_2$ , учитывающий этот вид энергии, описывается уравнением [37, 47, 128, 129, 130]:

$$W_2 = 0,6 \cdot W_d \cdot F_a \cdot V_a / \pi \cdot h_a^2 \cdot \tau_m, \text{ Вт}, \quad (3.34)$$

где  $W_d$  – энергия дисперсионного взаимодействия, Дж, равная  $\sim 10^{-28}$ ;  $F_a$  – суммарная площадь поверхности межмолекулярного взаимодействия частиц с пеной в единице объёма,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $\tau_m$  – время, в течение которого пылинка и пузырёк находятся в динамическом соприкосновении, с.

Суммарная площадь поверхности адгезионного взаимодействия пузырьков с частицами пыли  $F_a$  в единице объёма для пенного слоя ( $I_n = 0$ ) в соответствии с [86, 128, 129] определяется по формуле:

$$F_a = 0,3 \cdot \pi \cdot d_q^2 \cdot n'', \text{ м}^2, \quad (3.35)$$

где  $n''$  – количество частиц, упруго провзаимодействовавших с пузырьками и оттолкнувшихся от неразрушившихся пузырьков, в единице объёма,  $1/\text{м}^3$ ;  $n_n$  – количество пузырьков, упруго провзаимодействовавших с частицами, при этом не разрушившихся, в единице объёма,  $1/\text{м}^3$ ;

Для пенного слоя ( $I_n = 0$ ) величина  $n''$  определяется аналогично  $n'$ :

$$n'' = n' \cdot E_{\text{эф}(2)-nz} = n_0 \cdot E_{\text{эф}(1)-nz} \cdot E_{\text{эф}(2) \rightarrow n3} 1/\text{м}^3. \quad (3.36)$$

При барботажном пенообразовании и на сетке объём активной зоны взаимодействия пыли с пеной  $V_A$  определяют по формуле:

$$V_A = h_A \cdot S_u, \text{ м}^3, \quad (3.37)$$

где  $S_u$  – площадь источника пылевыведения, м.

Время динамического соприкосновения пылевой частицы с пенным пузырьком  $\tau_m$  соответствует времени преодоления воздушного слоя между пузырьком и пылинкой, которое можно определить по формуле:

$$\tau_m = 3f_a^2 \cdot \mu_g / 4\pi \cdot P_c \cdot r^2, \text{ с}, \quad (3.38)$$

где  $r$  – расстояние действия межмолекулярных сил, м;  $P_c$  – сила, сталкивающая пылевые частицы с пузырьками пены, Н;  $f_a$  – площадь межмолекулярного взаимодействия пылевой частицы с пузырьком пены, м<sup>2</sup>, определяемая по формуле:

$$f_a = 0,3 \cdot \pi \cdot d_v^2, \text{ м}^2. \quad (3.39)$$

Сила  $P_c$  зависит от расклинивающего давления между пылевой частицей и пузырьком пены при их взаимодействии и для пенного слоя ( $I_n = 0$ ) определяется по формуле:

$$P_c = \rho_{nn} \cdot v_{nn} \cdot f_a / 2, \text{ Н}, \quad (3.40)$$

где  $\rho_{nn} = m_{nn} / V_{nn}$  – плотность пенного пузырька, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{nn} = \pi \cdot d_{nn}^3 / 6$  – объём пузырька пены, м<sup>3</sup>.

*Третья стадия* процесса пылезадержания начинается в момент возникновения непосредственного контакта между частицей пыли и пузырьком пены. При этом полезно расходуемой можно считать энергию противодействия слоя пены пылевому потоку и можно выделить два основных взаимосвязанных

физических механизма: экранирование пыли и смачивание её пеной. При реализации процесса пылезадержания главная роль принадлежит экранирующему механизму взаимодействия пылевой частицы с пузырьком пены, который заключается в том, что пылевая частица, соприкоснувшись с пенным пузырьком, растягивает его поверхность в месте контакта, образуя углубление.

Исходя из этого, энергетический параметр  $W_3$ , характеризующий энергию упругого взаимодействия пылевой частицы с пузырьком пены, описывается в зависимости от давления, оказываемого пылевой частицей на плёнку пузырька пены:

$$W_3 = \pi \cdot \sigma_{m-ж} \cdot d_q^2 \cdot \nu \cdot n'' \cdot V_A / d_{nn}, \text{ Вт.} \quad (3.41)$$

Энергия электрических сил, возникающих при взаимодействии пылевого аэрозоля со слоем пены учитывается с помощью энергетического параметра  $W_4$ , который проявляется в заметной степени при искусственной электрической подзарядке пены [133, 134]. При пылезадержании электростатически заряженной пеной в течение всего процесса взаимодействия участвуют следующие виды электрических сил:

- кулоновская сила, действующая между пылевой частицей и поверхностью пузырька пены  $P_1$ , определяемая по формуле:

$$P_1 = q_q \cdot q_{nn} / d_{nn} / 4\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot h_A, \text{ Н,} \quad (3.42)$$

где  $q_q$  – заряд пылевых частиц, Кл;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $q_{nn}$  – заряд пены, Кл;

- сила индукции между зарядом на пене и индуцированным зарядом (противоположным по знаку) на пылевой частице  $P_2$ :

$$P_2 = (\varepsilon - 1) \cdot d_q^3 \cdot q_{nn} / (\varepsilon + 2) \cdot 16\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot h_A^5, \text{ Н,} \quad (3.43)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость частиц;  $q_{nn}$  – заряд пены, который в зависимости от свойств пены и внешних условий для пенного слоя ( $I_n = 0$ ) определяют по формуле [133, 134]:

$$q_{nn} = q_0 \cdot S_u, \text{ Кл.} \quad (3.44)$$

- сила индукции между зарядом на пылевой частице и индуцированным зарядом на пене  $P_3$ :

$$P_3 = q_u \cdot d_{nn} / 8\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot h_A - 2q_u \cdot d_u \cdot h_A / \pi \varepsilon_0 \cdot (4h_A - d_{nn}), \text{ Н.} \quad (3.45)$$

Таким образом, энергетический параметр  $W_4$ , характеризующий энергию действия всех видов электрических сил для пенного слоя ( $I_n = 0$ ), описывается уравнением:

$$W_4 = \sum_{\kappa=1}^3 (P_{\kappa}) \cdot n_0 \cdot E_{эф(4)-нз} \cdot F_a \cdot h_a, \text{ Вт.} \quad (3.46)$$

При этом на реализацию пылезадержания пенным слоем расходуется энергия, которой обладает пена в активной зоне реализации процесса обеспыливания непосредственно перед взаимодействием с пылевым аэрозолем. Эта энергия частично включает энергетические затраты технических средств на пенообразование и организацию воздушного потока. Для количественной оценки энергии, которую приобретает пена в процессе её приготовления, нами определены энергетические параметры, характеризующие:

- энергию жидкостного потока  $N_1$  перед пеногенератором, которая определяется по формуле:

$$N_1 = H_p \cdot Q_p \cdot t, \text{ Вт,} \quad (3.47)$$

где  $H_p$  – давление раствора пенообразователя, Па;  $t$  – коэффициент, характеризующий минимальное количество пеногенераторов, необходимых для

реализации процесса пылезадержания в конкретных производственных условиях.

Давление раствора  $H_p$  в формуле (3.47) рассматривается как гидродинамическая характеристика процесса и определяется по формуле:

$$H_p = \rho \cdot g \cdot h_0, \text{ Па} . \quad (3.48)$$

Расход раствора пенообразователя  $Q_p$  определяется в зависимости от условий пенообразования по формуле:

- при барботажном пенообразовании:

$$Q_p = h_n \cdot F / K \cdot \tau, \text{ м}^3/\text{с} ; \quad (3.49)$$

- при пенообразовании на сетке:

$$Q_p = \mu \cdot v_{opt} \cdot F_0, \text{ м}^3/\text{с} , \quad (3.50)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода сопла пеногенератора;  $v_{opt}$  – оптимальная скорость выхода пены, м/с;  $F_0$  – живое сечение сетки пеногенератора, м<sup>2</sup>.

Таким образом, уравнение (3.47) для гидростатических условий принимает вид:

$$N_1 = \rho_p \cdot g \cdot h_0 \cdot h_n \cdot F_n \cdot t / K \cdot \tau , \text{ Вт} ; \quad (3.51)$$

- энергию потока сжатого воздуха  $N_2$  в случае его принудительной подачи в пеногенератор для получения слоя пены можно определить по формуле:

$$N_2 = H_e \cdot Q_e \cdot t , \text{ Вт} , \quad (3.52)$$

где  $H_e$  – давление сжатого воздуха, Па;  $Q_e$  – расход сжатого воздуха, м<sup>3</sup>/с, определяемый по техническим характеристикам компрессора. Если принудительная подача воздуха не осуществляется ( $H_e = 0$ ), то происходит

эжектирование воздуха раствором и параметр  $Q_6$  можно определить по формуле, полученной на основе экспериментальных данных и представленной в работе [135]:

$$Q_6 = 8,889 \cdot 10^6 \cdot Q_p, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.53)$$

Энергетические параметры  $N_1$  и  $N_2$ , характеризующие энергию жидкости и воздуха перед активной зоной пенообразования в пеногенераторе, определяются с учетом параметра  $t$ , показывающего, какое количество пеногенераторов необходимо для создания такого объёма пены, который способен перекрыть расчётную зону обеспыливания.

Для пенного слоя ( $I_n = 0$ ) параметр  $t$  принимает целые положительные значения и определяется:

$$t=1, \text{ если } V_n / S_u \cdot h_{\min} \geq 1, \quad (3.54)$$

где  $V_n$  – объём образованной пены, м;  $h_{\min}$  – минимальная толщина слоя пены, м. При  $V_{en} \leq 1$  м/с, то есть на открытых источниках пылевыделения, к которым относятся ленточные транспортёры при пенообразовании на сетке или барботажем величина  $t$  определяется из того условия, что слой пены должен покрывать всю площадь источника пылевыделения.

Величина  $h_{\min}$  определяется по формуле:

$$h_{\min} = (d_{nn} \cdot v_{kp})^2 \cdot \rho_{nn} / 24 \cdot \sigma_{m-ж} \cdot \cos \theta. \quad (3.55)$$

Объём пены  $V_n$  определяется по формуле:

$$V_n = Q_p \cdot K \cdot \tau, \text{ м}^3. \quad (3.56)$$

- энергию, затраченную на электрическую подзарядку пены  $N_4$  в случае её искусственной электризации, принимаем равной электрической мощности

источника тока, обеспечивающего дополнительный заряд на поверхности пузырьков пены:

$$N_4 = N_{un} . \quad (3.57)$$

где  $N_{un}$  – мощность источника электрического тока, Вт.

Подставив формулы (3.30)–(3.57) в (1.9), получим параметрическую зависимость энергоёмкостного показателя пенного способа пылезадержания пенным слоем ( $I_n = 0$ ) от энергетических параметров процесса:

$$E_{nz}^9 = \frac{\left[ v^2 \cdot c_q \cdot E_{\text{эф}(1)-nz} \cdot V_A \cdot (0,5v + 1,2 \cdot 10^{-28} \cdot E_{\text{эф}(2)-nz} \cdot r^2 / \pi \cdot h_A \cdot \mu_6 \cdot d_q) / h_A + \right. \\ \left. + c_q \cdot v \cdot V_A / d_q \cdot \rho_q \cdot (6 \cdot \sigma_{m-ж} \cdot E_{\text{эф}(1)-nz} \cdot E_{\text{эф}(2)-nz} / d_{nn}) + \sum_{k=1}^3 (P_k) \cdot E_{\text{эф}(4)-nz} / \pi \cdot d_q \right]}{\left[ (H_p \cdot Q_p + H_6 \cdot Q_6) \cdot t + N_{un} \right]} \quad (3.58)$$

Таким образом, нами получены параметрические зависимости эффективности (3.29) и энергоёмкостного показателя (3.58) для процесса пылезадержания пенным способом на основе применения пенного слоя как его результирующих параметров, позволяющих более объективно оценивать результат реализации этого процесса.

### 3.1.2 Очистка воздуха от пыли

Другим важным этапом процесса обеспыливания воздуха, обеспечивающим экологическую эффективность, а, следовательно, соблюдение экологических нормативов запылённости воздуха прилегающих к предприятиям строительной индустрии территорий, является очистка воздуха от пылевых частиц.

Технологии очистки воздуха пеной можно разделить на два основных вида:

- очистка воздуха от пыли пенным аэрозолем (дискретными пузырьками пены, когда расстояние между соседними пузырьками  $I_n > 0$ );

- очистка воздуха от пыли слоем пены (сплошным потоком пенных пузырьков, когда расстояние между ними  $I_n = 0$ ).

Рассмотрим первый вид технологии очистки воздуха пеной на основе применения пенного аэрозоля.

При этом физическую сущность процесса очистки можно представить как целенаправленное воздействие на запыленный (пылегазовый) поток заранее подготовленной по параметрам «дополнительной-П.2» дисперсной системой, которая представлена пенным аэрозолем, с последующим разделением дисперсной фазы (частиц пыли) и дисперсионной среды (воздуха или газа).

Анализ механизмов взаимодействия пылевых частиц с дискретными пузырьками пены в вентиляционном потоке воздуха (при скоростях  $v_{en} > 1 \text{ м/с}$ ) позволил выполнить математическое описание и получить для процесса очистки воздуха пенным аэрозолем параметрические зависимости эффективности и энергоёмкостного показателя от основных параметров производственно-технологического процесса, свойств пенного аэрозоля и других факторов, влияющих на характер протекания процесса.

Выполненное нами математическое описание гидродинамического метода очистки вентиляционного воздуха и отходящих газов от загрязняющих веществ (токсичных компонентов) пенным способом с применением пенного аэрозоля, получаемого с помощью форсунки, также сводилось к получению параметрических зависимостей эффективности и энергоёмкостного показателя рассматриваемого процесса очистки.

В результате исследований, проведенных аналогично процессу пылезадержания (п.3.1.1) нами получена параметрическая зависимость эффективности процесса очистки пенным способом с применением пенного аэрозоля, которая имеет вид:

$$E_{\text{эф-о-аэп}} = 1 - \left( 1 - \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot v_{\text{ч}}}{18\mu_{\text{г}} \cdot d_{\text{пн}} \cdot \left( \frac{\rho_{\text{ч}} \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot v_{\text{ч}}}{18\mu_{\text{г}} \cdot d_{\text{пн}}} + 10^{n_3 \cdot A_7} \right)} \right) \cdot \left( 1 - 0,032q \sqrt{\frac{d_{\text{пн}} \cdot \rho_{\text{п}}}{Q_{\text{п}} \cdot d_{\text{ч}} \cdot \mu_{\text{г}} \cdot v_{\text{ч}}}} \right), \quad (3.59)$$

где  $d_{mn}$  – средний медианный диаметр пузырьков пены, м;  $n_3$  – коэффициент, который характеризует отношение фактической и критической скоростей движения частиц пыли и пенных пузырьков;  $A_7$  – коэффициент, характеризующий полноту перекрытия поперечного сечения активной зоны очистки с помощью пенного аэрозоля;  $\rho_p$  – плотность пенообразующего раствора, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_p$  – расход пенообразующего раствора перед выходом из оросителя, м<sup>3</sup>/с.

При определении энергетических параметров, которые характеризуют энергию, расходуемую на очистку воздушного потока пенным аэрозолем (т.е. захват и удаление пылевых частиц из вентиляционного потока), рассмотрим постадийно и проанализируем соответствующие каждой стадии основные механизмы взаимодействия пылевых частиц с дискретными пузырьками пенного аэрозоля.

На первой стадии происходит сближение пылевых частиц с пузырьками пены до расстояния действия молекулярных сил благодаря их кинетической энергии. Энергетический параметр, учитывающий кинетическую энергию пузырьков пенного аэрозоля, летящих к пылевым частицам, определяется по формуле:

$$W_K = 0,5 \cdot m_{nn} \cdot v^2 \cdot n'_{nn} \cdot V_A, \text{ Вт}, \quad (3.60)$$

где  $m_n$  – масса пенного пузырька, кг;  $v$  – относительная скорость встречи пылевой частицы и пузырька пены, м/с;  $n'_{nn}$  – количество пенных пузырьков, соприкоснувшихся с пылевыми частицами в единице объёма в единицу времени, 1/м<sup>3</sup>·с;  $V_A$  – объём активной зоны очистки воздуха от пылевых частиц, м<sup>3</sup>.

Масса пенного пузырька определяется из уравнения закона сохранения массы:

$$m_{nn} = m_p + m_g = V_p \cdot \rho_p + V_g \cdot \rho_g, \text{ кг}, \quad (3.61)$$

где  $m_p$  – масса раствора, содержащегося в одном пузырьке, кг;  $m_g$  – масса воздуха, заключённого в одном пузырьке, кг;  $V_p$  – объём раствора, содержащегося в одном

пузырьке, м<sup>3</sup>;  $V_в$  – объём воздуха, содержащегося в одном пузырьке, м<sup>3</sup>.

Объёмы  $V_p$  и  $V_в$  находят по соответствующим формулам:

$$V_p = \frac{\pi}{6} \cdot [d_{nn} - (d_{nn} - 2\delta)^3] = \frac{\pi}{6} \cdot \delta \cdot (3d_{nn} - 6d_{nn} \cdot \delta + 4\delta^2), \text{ м}^3, \quad (3.62)$$

$$V_в = \frac{\pi}{6} \cdot (d_{nn} - 2\delta)^3 = \frac{\pi}{6} \cdot (d_{nn} - 6d_{nn}\delta + 12d_{nn}\delta^2 - 8\delta^3), \text{ м}^3. \quad (3.63)$$

Для пенного аэрозоля, полученного с помощью форсунки, значение толщины плёнки пенного пузырька  $\delta$ , главным образом, зависит от концентрации раствора пенообразователя  $C_{но}$ , а следовательно, от поверхностного натяжения раствора  $\sigma_p$ , значение которой с учетом экспериментальных данных, представленных в работах [136, 137, 138] определяется по формуле:

$$\delta = 0,5 \cdot \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_{вод}} \right)^{13,35 + \ln d_{nn}}, \text{ м}, \quad (3.64)$$

где  $\sigma_{вод}$  – поверхностное натяжение воды, равное  $7,6 \cdot 10^{-2}$  Н/м.

Число пенных пузырьков  $n'_{nn}$ , соприкоснувшихся с пылевыми частицами в единице объёма активной зоны очистки воздуха в единицу времени, можно определить с учетом направления и величины скорости воздушного потока по формуле [139, 140]:

$$n'_{nn} = n_{онн} \cdot E_{эф(1)-о} \cdot B_1, \text{ 1/м}^3 \cdot \text{с}, \quad (3.65)$$

где  $B_1$  – коэффициент, учитывающий величину скорости запылённого воздушного потока и направление взаимного движения пылевых частиц и пузырьков пены (спутное, встречное и перекрёстное);  $E_{эф(1)-о}$  – эффективность реализации первой стадии процесса очистки;  $n_{онн}$  – число пенных пузырьков, находящихся в единице объёма факела пенного аэрозоля в единицу времени,  $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$ , определяемое по формуле [139, 140]:

$$n_{онн} = Q_p / V_n \cdot V_A, \text{ 1/м}^3 \cdot \text{с}, \quad (3.66)$$

где  $V_n$  – объём пузырьков пены в активной зоне процесса очистки воздуха от пыли (зоне взаимодействия пылевых частиц с пузырьками пенного аэрозоля), м<sup>3</sup>;  $V_A$  – объём активной зоны процесса очистки воздуха от пыли, м<sup>3</sup>.

При распыливании раствора пенообразователя через форсунку величина  $V_A$  равна объёму активной зоны факела орошения и может быть определена по формуле:

$$V_A = \pi \cdot h_A \cdot \sin(\alpha/2), \text{ м}^3, \quad (3.67)$$

где  $\alpha$  – корневой угол раскрытия факела пенного аэрозоля, град, определяемый по техническим характеристикам оросителя.

Длина активной зоны факела пенного аэрозоля  $h_A$ , главным образом, зависит от времени существования пенных пузырьков, которое определяется соотношением значений критической (при которой наступает разрыв пузырька) и фактической скоростей движения пузырьков пены:

$$h_A = 0,48 \left( v_{кр} / v_{nn} \right)^{2/3}, \text{ м}. \quad (3.68)$$

На второй стадии процесса очистки воздуха от пылевых частиц пенным аэрозолем, когда частицы пыли и пузырьки пены уже находятся на расстоянии действия молекулярных сил и преодолевают расклинивающее давление [136, 137, 138], основным видом энергии, участвующим в захвате пузырьками пены пылевых частиц является энергия адгезионного взаимодействия, связанная с поверхностными явлениями на границе раздела фаз. Энергетический параметр  $W_2$ , учитывающий этот вид энергии, описывается уравнением [139, 141]:

$$W_2 = 0,6 \cdot W_d \cdot V_A / \pi \cdot F_a \cdot h_A \cdot \tau_m, \text{ Вт}, \quad (3.69)$$

где  $W_d$  – энергия дисперсионного взаимодействия, в соответствии с [37] равная  $\sim 10^{-28}$  Дж;  $F_a$  – суммарная площадь поверхности адгезионного взаимодействия пылевых частиц с пузырьками пены в активной зоне очистки, м<sup>2</sup>;  $\tau_m$  – время, в

течение которого пылевая частица и пузырёк пены находятся в динамическом соприкосновении [136, 137, 138], с.

Суммарная площадь поверхности адгезионного взаимодействия пузырьков пены с пылевыми частицами  $F_m$  в единице объёма активной зоны очистки определяется по формуле [37]:

$$F_A = 0,3 \cdot \pi \cdot D_A \cdot n_{nn}, \text{ м}^2, \quad (3.70)$$

где  $n_{nn}$  – количество пузырьков пены в единице объёма активной зоны очистки, упруго провзаимодействовавших с пылевыми частицами и не разрушившихся при этом,  $1/\text{м}^3$ ;  $D_A$  – эквивалентный диаметр поперечного сечения активной зоны очистки,  $\text{м}^2$ .

Время, в течение которого пылевая частица и пузырёк пены находятся в динамическом соприкосновении, можно определить по формуле [86, 98]:

$$\tau_m = 3 \cdot f_a \cdot \mu_g / 4 \cdot \pi \cdot P_c \cdot r^2, \text{ с}, \quad (3.71)$$

где  $f_a$  – площадь адгезионного взаимодействия пылевой частицы с пузырьком пены, м;  $r$  – расстояние действия межмолекулярных сил, м;  $P_c$  – сила, сталкивающая пылевые частицы с пузырьками пены, Н.

Сила  $P_c$  зависит от давления между пылевой частицей и пузырьком пены при их взаимодействии [86, 142]:

$$P_c = \rho_{nn} \cdot v \cdot f_a / 2, \quad \text{Н}, \quad (3.72)$$

где  $\rho_{nn}$  – плотность пенного пузырька,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , определяемая по формуле:

$$\rho_{nn} = m_{nn} / V_{nn}, \quad \text{кг}/\text{м}^3, \quad (3.73)$$

где  $V_{nn}$  – объём пенного пузырька,  $\text{м}^3$ , определяемый по формуле:

$$V_{nn} = \pi \cdot d_{nn} / 6, \text{ м}^3. \quad (3.74)$$

*Третья стадия* процесса очистки воздуха от пылевых частиц пенным аэрозодем начинается в момент возникновения непосредственного контакта между пылевой частицей и пузырьком пены. В качестве основного механизма в этом случае можно считать смачивание пылевых частиц пузырьками пены с последующим движением пылевых частиц или образовавшихся агрегатов в активную зону очистки. Исходя из этого, энергетический параметр  $W_3$ , характеризующий энергию упругого взаимодействия пылевой частицы с пенным пузырьком, описывается в зависимости от давления, оказываемого плёнкой пузырька пены на частицу пыли:

$$W_3 = \frac{\pi \cdot \sigma_{m-жс} \cdot d_{ч} \cdot \nu_{ч} \cdot n'' \cdot V_A}{d_{nn}}, \text{ Вт}, \quad (3.75)$$

где  $n''$  – количество пылевых частиц в единице объёма активной зоны очистки, упруго провзаимодействовавших с пузырьками пены и оттолкнувшихся от неразрушившихся пузырьков пены,  $1/\text{м}^3$ .

Энергия электрических сил, возникающих при взаимодействии пылевых частиц с пузырьком пены, учитывается энергетическим параметром  $W_4$ , который имеет значение при искусственной зарядке пены и описывается уравнением [134, 138]:

$$W_4 = \left( \sum_{\kappa=1}^3 P_{\kappa} \right) \cdot n_{o-nn} \cdot E_{эф(4)-o} \cdot V_A \cdot h_A / \tau_a, \text{ Вт}, \quad (3.76)$$

где  $\tau_a$  – время, в течение которого действуют электрические силы в процессе взаимодействия пылевой частицы с пузырьком пенного аэрозоля, с.

В зависимости от свойств пенного аэрозоля и внешних условий удельный заряд пузырьков пены  $q_n$  равен:

$$q_n = q_0 \cdot Q_p \cdot \rho_p \cdot h_A / V_A \text{ Кл/м}^2. \quad (3.77)$$

Подставив формулы (3.60)–(3.77) в (1.9), получим параметрическую зависимость энергоёмкостного показателя пенного способа очистки воздуха от пылевых частиц пенным аэрозолем ( $I_n > 0$ ) от энергетических параметров процесса:

$$E_{o-azp}^3 = \left[ \frac{Q_p \cdot h_A \cdot E_{эф-о-азп} \cdot B_1 \cdot (0,5 \cdot \rho_n \cdot v + 3,5 \cdot 10^{-29} / d_n \cdot v \cdot h_A \cdot \tau_m + 12 \cdot \sigma_{m-ж} \cdot d_c \cdot (1 - \cos \theta))}{d_n \cdot v \cdot \tau_p + 1,91 \cdot \sum_{i=1}^k (P_k) / d_n \cdot h_A} \right] / \left[ 0,35 \cdot \pi \cdot (\mu \cdot d_c \cdot (H_p / \rho_p))^{0,5} + 0,91 \cdot \pi \cdot (H_{en} - H_{nm})^{3/2} \cdot d_c + Q_e \cdot H_e + N_{un} \right] \quad (3.78)$$

где  $\tau_m$  – продолжительность динамического соприкосновения частицы пыли с пенным пузырьком, с;  $\tau_p$  – продолжительность процесса смачивания частицы пыли пузырьком пены, с;  $P_k$  – силы электрического взаимодействия (кулоновская, индукционная), которые обеспечивают взаимодействие частицы пыли и пенного пузырька, Н;  $H_{en}$  – полное давление в сечении нагнетающего (всасывающего) патрубка побудителя тяги, Па;  $H_{nm}$  – потери полного давления в трубопроводе от сечения нагнетающего (всасывающего) патрубка побудителя тяги до активной зоны очистки, Па;  $Q_e$  – расход сжатого воздуха, который подается к оросителю, м<sup>3</sup>/с;  $H_e$  – давление сжатого воздуха перед оросителем, Па;  $N_{un}$  – мощность источника искусственной электризации пены, Вт.

В результате, нами получены параметрические зависимости эффективности (3.59) и энергоёмкостного показателя (3.78) для процесса очистки воздуха от пыли пенным способом на основе применения пенного аэрозоля как его результирующих параметров, позволяющих также более объективно оценивать результат реализации этого процесса.

Рассмотрим второй вид технологии очистки воздуха пеной на основе применения слоя пены.

Физическую сущность процесса очистки можно представить как целенаправленное воздействие на запыленный (пылегазовый) поток заранее подготовленной по параметрам «дополнительной-П.2» дисперсной системой,

которая представлена пенным слоем, с последующим разделением дисперсной фазы (частиц пыли) и дисперсионной среды (воздуха или газа).

Решения задачи, связанной с оценкой эффективности и энергетической экономичности технологии очистки воздуха, основанной на применении пены в виде сплошного слоя, становится возможным при предварительном выполнении математического описания процесса очистки этой технологией, которое сводится к получению параметрических зависимостей эффективности и энергоёмкостного показателя [44, 45, 47, 50, 51, 116, 120, 123] рассматриваемого процесса, изучив при этом физические особенности его протекания, основные свойства частиц пыли, которые образуются и выделяются в результате производственной деятельности предприятий строительного комплекса, а также свойства пенного слоя (пенного фильтра) и ряд других факторов, которые влияют на характер протекания процесса очистки.

В результате проведённых исследований [143, 144, 145] нами получена параметрическая зависимость эффективности процесса очистки воздуха слоем пены, полученной с помощью барботажного или сетчатого пеногенератора:

$$E_{эф-о-сл} = 1 - \frac{\rho_ч \cdot d_ч^2 \cdot v_ч}{9\mu_г \cdot l_a \cdot \left( \frac{\rho_ч \cdot d_ч^2 \cdot v_ч}{9\mu_г \cdot l_a} + 2 \cdot 10^{n_2} \right)} \cdot \left( 1 - \exp \left( - \frac{5,77 \cdot 10^{-2} \cdot d_ч \cdot \rho_ч \cdot v_ч^2}{\sigma_{жсг} \cdot \left( \frac{\delta}{\delta_{кр}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{d_ч^2}{d_{nn} \cdot (d_ч + \delta_{кр})} \right)} \right) \right) \cdot \left( 1 - \exp \left( - \frac{5,77 \cdot 10^{-2} \cdot d_{nn} \cdot \rho_{nn} \cdot v_{nn}^2}{\sigma_{жсг} \cdot (1 - \cos \theta)} \right) \right) \cdot (1 - 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot q_0^{0,65}), \quad (3.79)$$

где  $l_a$  – длина активной зоны очистки, м;  $n_2$  – коэффициент, характеризующий соотношение фактического и критического для пенных пузырьков размеров пылевых частиц;  $\delta$ ,  $\delta_{кр}$  – соответственно средняя фактическая и критическая толщина плёнки пузырьков пены, м;  $q_0$  – удельный электрический заряд пены, Кл/кг;

Для определения энергетических параметров, характеризующих энергию, расходуемую на захват пылевых частиц пенным слоем, нами выделены основные физические механизмы взаимодействия этих частиц с пузырьками пены и процесс очистки воздуха пенным слоем разделён на два основных этапа, характеризующихся одной или несколькими стадиями взаимодействия пылевых частиц с пузырьками пенного слоя.

На *первом этапе* нами выделены и рассмотрены две стадии:

- движение потока пылевых частиц навстречу пенному слою;
- сближение пылевых частиц с пузырьками пенного слоя на расстояние действия межмолекулярных сил.

В качестве основного вида энергии, позволяющего достичь цель процесса очистки воздуха, на *первой стадии*, выступает кинетическая энергия пылевых частиц, движущихся к слою пены. Энергетический параметр, который учитывает данный вид энергии, определяется по формуле [47]:

$$W_K = 0,5 \cdot m_q \cdot v_q^2 \cdot n' \cdot V_A / \tau_k, \text{ Вт}, \quad (3.80)$$

где  $m_q$  – масса пылевой частицы, кг, которая определяется по её среднему медианному диаметру  $d_q$  по формуле:

$$m_q = 0,17 \cdot d_q^3 \cdot \rho_q, \text{ кг}, \quad (3.81)$$

где  $\rho_q$  – плотность материала пылевых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $n'$  – число пылевых частиц в единице объёма активной зоны очистки, которые вступают в контакт с пенным слоем, 1/м<sup>3</sup>.

Значение  $n'$  рассчитывают по формуле [47, 129]:

$$n' = n_0 \cdot k_{ин} = c_q \cdot k_{ин} / m_q, \text{ 1/м}^3, \quad (3.82)$$

где  $n_0$  – общее количество пылевых частиц, направленных в активную зону очистки, в единице её объёма, 1/м<sup>3</sup>;  $c_q$  – концентрация пылевых частиц во

входном сечении активной зоны очистки,  $\text{кг/м}^3$ ;  $k_{ин}$  – коэффициент инерционного захвата пылевых частиц пенным слоем.

Коэффициент инерционного захвата частиц пыли слоем пены определяем условно приняв, что процесс захвата частиц пыли слоем пены аналогичен процессу оседания частиц на плоской пластине [146]:

$$k_{ин} = \frac{Stk}{Stk + A}, \quad (3.83)$$

где  $A$  – безразмерный коэффициент, в оценке которого наблюдаются значительные расхождения, которые можно объяснить его зависимостью от размеров пылевых частиц и относительной скорости их движения.

Критерий Стокса для пенного слоя определяют по формуле [147]:

$$Stk = d_q^2 \cdot v_q \cdot \rho_q / 9 \cdot \mu_g \cdot l, \quad (3.84)$$

где  $\mu_g$  – динамическая вязкость воздуха, равная  $1,82 \cdot 10^{-5}$  Па·с.

На скорость пылевых частиц  $v_q$  во входном сечении в активную зону очистки оказывает влияние скорость движения основного пылевоздушного (вентиляционного) потока.

Подставив зависимости (3.80)-(3.83) в формулу (3.79) и выполнив соответствующие математические преобразования, получим [148-153]:

$$W_k = \frac{0,5 \cdot v_q^4 \cdot c_q \cdot \rho_q \cdot S_u}{v_q \cdot \rho_q + 2,668 \cdot 10^8 \cdot h \cdot \mu_g \cdot d_q^{0,404}}, \text{ Вт.} \quad (3.85)$$

На *второй стадии*, когда пылевые частицы сближаются с пузырьками пенного слоя на расстояние действия межмолекулярных сил, их движению препятствует расклинивающее давление, которое возникает между частицами и пузырьками и связано с возникновением адсорбционных оболочек воздуха на частицах и пузырьках и особенностями их взаимодействия на границе раздела

фаз. Эту стадию первого этапа процесса очистки можно характеризовать энергетическим параметром  $W_M$ , который учитывает работу адгезионных сил, связанных с поверхностными явлениями, и описываемым формулой [148, 152-156]:

$$W_M = \frac{0,6 \cdot W_d \cdot f_a \cdot V_A}{\pi \cdot h^2 \cdot \tau_m}, \text{ Вт}, \quad (3.86)$$

где  $W_d \sim 10^{-28}$  – энергия дисперсионного взаимодействия, характеризующая силы притяжения между пылевой частицей и пенным пузырьком, Дж;  $f_a$  – площадь поверхности адгезионного взаимодействия пылевой частицы и пузырька пены, определяемая по формуле:

$$f_a = 0,3 \cdot \pi \cdot d_q^2, \text{ м}^2, \quad (3.87)$$

где  $V_A$  – активная зона очистки воздуха пенным слоем, определяемая по формуле:

$$V_A = 0,5 \cdot d_{nn} \cdot S_u, \text{ м}^3, \quad (3.88)$$

где  $\tau_m$  – время адгезионного взаимодействия пылевой частицы с пенным пузырьком, определяемое по формуле [148, 152-156]:

$$\tau_m = 3 \cdot f_a \cdot \mu_g / (4 \cdot P_c \cdot r^2 \cdot \pi), \text{ с}, \quad (3.89)$$

где  $P_c$  – сила, сталкивающая пылевые частицы с пузырьками пены, которая определяется, главным образом, кинетической энергией пылевых частиц, расходуемой на преодоление расстояния действия адгезионных сил [153-157]:

$$P_c = 0,26 \cdot v_r^2 \cdot \rho_q \cdot d_q^3 \cdot r, \text{ Н}, \quad (3.90)$$

где  $r$  – расстояние действия адгезионных сил, м.

Подставив (3.87) - (3.90) в (3.86), получим [153-157]:

$$W_{M^=} = \frac{3,66 \cdot 10^{-32} \cdot c_u \cdot v_u^3 \cdot S_u \cdot \rho_u}{d_u \cdot h_n^2 \cdot \pi \cdot (v_u \cdot \rho_u + 2,668 \cdot 10^8 \cdot h_n \cdot \mu_g \cdot d_u^{-0,404})} \text{ , Вт.} \quad (3.91)$$

*Начало второго этапа* процесса очистки воздуха слоем пены соответствует моменту возникновения непосредственного контакта между пылевой частицей и пузырьком пенного слоя. При этом энергию противодействия пены запыленному потоку следует считать полезно расходуемой. Этот этап характеризуется двумя основными, взаимосвязанными физическими механизмами и соответствующими им двумя стадиями:

- упруго–эластичное взаимодействие пылевых частиц и пенных пузырьков;
- смачивание пылевых частиц слоем пены.

Каждый из перечисленных выше механизмов проявляется в различной степени в зависимости от свойств полученной пены и захватываемых пылевых частиц

Параметр, характеризующий энергию упруго–эластичного взаимодействия слоя пены и пылевых частиц, можно представить в виде суммы двух параметров  $W_9$  и  $W_{см}$ , описывающих полезно расходуемую энергию соответственно при эластичном и смачивающем механизмах взаимодействия.

Механизм упруго–эластичного взаимодействия пылевой частицы с пенным пузырьком состоит в том, что частица, которая соприкоснулась с пузырьком, растягивает его поверхность в месте контакта, образуя углубление. Исходя из этого, энергетический параметр  $W_9$  можно определить в зависимости от давления внутри пенного пузырька, а также площади поверхности взаимодействия пылевой частицы с пузырьком пены [153-159]:

$$W_9 = 2 \cdot \pi \cdot \sigma_{m-ж} \cdot d_u^2 \cdot v_u \cdot n' \cdot k_3 \cdot F_a \cdot \beta_9 / d_{nn} \text{ , Вт,} \quad (3.92)$$

где  $\sigma_{m-ж}$  – поверхностное натяжение раствора пенообразователя, Дж/м<sup>2</sup>;  $k_3$  – коэффициент захвата пылевых частиц пузырьками пены при их упруго-эластичном механизме взаимодействия;  $\beta_9$  – коэффициент, характеризующий

долю упруго-эластичного механизма взаимодействия пылевых частиц с пузырьками пены при очистке воздуха от пыли пенным слоем.

Согласно [68, 73], величина коэффициента захвата частиц пыли пузырьком пены имеет экспоненциальную зависимость от основных характеристик движения этих частиц, поэтому упруго-эластичный механизм взаимодействия слоя пены и частиц пыли может быть описан уравнением:

$$k_3 = \exp\left(-0,2 \cdot V_{\text{ч}} \cdot \sqrt{\frac{d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}}}{\sigma_{\text{м-жс}} \cdot \psi}}\right), \quad (3.93)$$

где  $\psi$  – коэффициент упруго-эластичного взаимодействия, который определяется зависимостью [68, 73]:

$$\psi = \frac{\delta}{\delta_{\text{кр}}} \cdot \left(1 + \frac{d_{\text{ч}}^2}{d_{\text{нн}} \cdot (d_{\text{ч}} + \delta_{\text{кр}})}\right) - 1. \quad (3.94)$$

Коэффициент  $\beta_3$  зависит от краевого угла смачивания частиц  $\theta$ , поверхностного натяжения раствора  $\sigma_{\text{м-жс}}$  и рассчитывается по формуле [68, 73]:

$$\beta_3 = 76,5 \cdot \theta^{0,815} \cdot \sigma_{\text{м-жс}}^{3,261}. \quad (3.95)$$

Подставив (3.92)-(3.94) в (3.91), получим выражение [153-159]:

$$W_3 = \frac{291,98 \cdot \pi \cdot \sigma_{\text{м-жс}} \cdot V_{\text{ч}}^2 \cdot c_{\text{ч}} \cdot \theta^{0,815} \cdot \sigma_{\text{м-жс}}^{3,61} \cdot \exp\left(-0,2 \cdot V_{\text{ч}} \sqrt{\frac{d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}}}{\sigma_{\text{м-жс}} \cdot \psi}}\right)}{d_{\text{ч}} \cdot d_{\text{нн}} \cdot (V_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}} + 2,668 \cdot 10^8 \cdot h \cdot \mu_{\text{г}} \cdot d_{\text{ч}}^{-0,464})}, \text{ Вт.} \quad (3.96)$$

Энергетический параметр, характеризующий энергию смачивающих сил, можно определить по формуле [153-159]:

$$W_{\text{см}} = 0,5 \cdot \sigma_{\text{м-жс}} \cdot (1 - \cos \theta) \cdot \pi \cdot d_{\text{ч}}^2 \cdot n' \cdot k_{31} \cdot (1 - \beta) / \tau_p, \text{ Вт,} \quad (3.97)$$

где  $k_{31}$  – коэффициент захвата пылевых частиц пузырьками пены при смачивающем механизме, определяемый по формуле [68, 73]:

$$k_{31} = \exp\left(-0,2 \cdot v_q \cdot \sqrt{\frac{\rho_{nn} \cdot d_{nn}}{\sigma_{m-жс} \cdot (1 - \cos \theta)}}\right), \quad (3.98)$$

где  $\rho_n$  – плотность слоя пены, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau_p$  – время растекания раствора пенообразователя по поверхности пылевой частицы, с.

Значение  $\tau_p$  определяют по формуле, полученной в результате обработки экспериментальных данных [68, 73]:

$$\tau_p = 10^{-6} \cdot \sigma_{m-жс}^{1,76} \cdot \theta^{0,44} \cdot d_{nn}^{-1,5}, \text{ с.} \quad (3.99)$$

Тогда формула (3.96) может быть приведена к виду:

$$W_{см} = \frac{291,98 \cdot \pi \cdot \sigma_{m-жс} \cdot v_q^2 \cdot c_q \cdot \theta^{0,815} \cdot \sigma_{m-жс}^{3,261} \cdot \exp\left(-0,2 \cdot v_q \sqrt{\frac{d_q \cdot \rho_q}{\sigma_{m-жс} \cdot \psi}}\right)}{d_q \cdot d_{nn} \cdot (v_q \cdot \rho_q + 2,668 \cdot 10^8 \cdot h \cdot \mu_g \cdot d_q^{-0,464})}, \text{ Вт.} \quad (3.100)$$

Экспериментальные и теоретические исследования установили [133, 134, 138], что в результате применения электрoзаряженной пены существенно повышается эффективность процесса очистки воздуха, при действии на всех его этапах электрических сил. Параметр, который учитывает энергию электрических сил, можно определить по формуле [153-159]:

$$W_{эл} = \frac{3,25 \cdot 10^3 \cdot (W_{кул} + W_{инд.n} + W_{инд.ч} - W_{вз}) \cdot c_n \cdot q_{nn}^{0,65} \cdot (V_g + V_a)}{\tau_0 \cdot d_q^3 \cdot \rho_q}, \text{ Вт,} \quad (3.101)$$

где  $W_{кул}$ ,  $W_{инд.n}$ ,  $W_{инд.ч}$ ,  $W_{вз}$  – параметры, учитывающие соответственно действие кулоновской силы, сил индукции между зарядом на пене и индуцированным зарядом на частице пыли, сил индукции между зарядом на частице пыли и

индуцированным зарядом на пене, сил взаимодействия между пылевыми частицами.

Параметры, которые учитывают затраченную энергию на организацию в корпусе пеногенератора потока воздуха для получения пены, на подачу в пеногенератор под давлением пенообразующего раствора, а также на искусственную электрическую подзарядку пены определяют по следующим формулам:

- подача воздуха в пеногенератор с целью образования пены с учетом уравнения неразрывности потока:

$$N_e = 0,32 \cdot \mu_1 \cdot \pi \cdot d_e^2 \cdot H_e^{1,5} \cdot t \quad , \text{Вт}; \quad (3.102)$$

- подача к пеногенератору раствора пенообразователя:

$$N_e = 3,54 \cdot \mu_2 \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot H_p^{1,5} \cdot (c_{no} \cdot (\rho_{no} - 998) + 8,76 \cdot 10^4)^{0,5} \cdot t \quad , \text{Вт}, \quad (3.103)$$

где  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – коэффициенты расхода выходных отверстий для воздуха и раствора пеногенератора;  $d_e$ ,  $d_p$  – диаметры сечений подводящих патрубков пеногенератора для подачи воздуха и раствора пенообразователя, м;  $\rho_{no}$  – плотность пенообразователя, кг/м<sup>3</sup>;  $H_e$ ,  $H_p$  – соответственно давление воздуха и раствора пенообразователя на входе в пеногенератор, Па;  $t$  – количество пеногенераторов, которое необходимо для создания слоя пены, перекрывающего всё поперечное сечение активной зоны очистки воздуха.

Энергетический параметр  $N_{эл}$ , характеризующий искусственную электроподзарядку пены равен по величине мощности источника электрического тока, обеспечивающего дополнительный электрический заряд на поверхности пузырьков пены.

В результате выполненного этапа исследований [155-165] нами также получена параметрическая зависимость энергоёмкостного показателя процесса очистки воздуха от пыли пенным слоем:

$$E_{o-cl}^3 = \left( 0,5 \cdot v_n^3 + \frac{1,83 \cdot 10^{-28} \cdot v_q \cdot R^2}{d_q^3 \cdot h_A \cdot \mu_g} + \frac{6 \cdot \sigma_{ж-г} \cdot v_q \cdot n' \cdot h_A}{\rho_q \cdot d_q \cdot d_{nn}} + \frac{12 \cdot \sigma_{ж-г} (1 - \cos \theta) \cdot n'' \cdot h_A}{\rho_n \cdot \tau_p \cdot d_{nn}} + \frac{1,91 \left( \sum_{k=1}^3 P_k \right) n_0 n''' F_n h_A}{d_q^3 \cdot \rho_q} \right) \cdot \frac{E_{эф-o-cl} \cdot F_n}{Q_{en} (H_{en} - H_{nm}) + (H_p Q_p + H_g Q_g) \cdot i + N_{un}}, \quad (3.104)$$

где  $F_n$  – площадь сечения пенообразования (подачи пены),  $m^2$ ;  $i$  – количество однотипных пеногенераторов, необходимое для полного перекрытия поперечного сечения активной зоны очистки, шт;  $R$  – среднее расстояние между пузырьками пены и пылевыми частицами в активной зоне очистки, м;  $n_0$  – удельное количество пылевых частиц, входящих в активную зону очистки,  $1/m^3$ ;  $n'$  – удельное количество пылевых частиц, столкнувшихся с пузырьками пены и вступивших в межмолекулярное взаимодействие,  $1/m^3$ ;  $n''$  – удельное количество пылевых частиц, на поверхности которых происходит процесс смачивания пенными пузырьками,  $1/m^3$ ;  $n'''$  – удельное количество пылевых частиц, которые задерживаются на поверхности пузырьков пены за счёт действия электрических сил,  $1/m^3$ .

Таким образом, нами получены параметрические зависимости эффективности (3.79) и энергоёмкостного показателя (3.104) для процесса очистки воздуха от пыли пенным способом на основе применения слоя пены как его результирующих параметров, позволяющих также более объективно оценивать результат реализации этого процесса.

### 3.1.3 Рассеивание пыли

Принудительное рассеивание пыли как функциональный элемент системы борьбы с пылью [166-169] может быть применен только в тех случаях, когда

эффективность процессов пылезадержания и очистки воздуха от пыли не обеспечивает нормативных экологических требований, предъявляемых к выбрасываемому в атмосферу вентиляционному воздуху источниками, находящимися на территориях промышленных площадок предприятий строительного комплекса и, в частности, заводов ЖБИиК.

Физическую сущность процесса принудительного рассеивания пыли характеризует интенсивное увеличение степени разудаления частиц пыли, выбрасываемых в приземный слой атмосферы, ускорение их высева из окружающей воздушной среды и прочное их связывание с переходом в состояние пылевого материала. Следствием этого должно являться уменьшение концентрации частиц пыли в экологически значимых точках (зонах) промышленной площадки.

Процесс рассеивания пенным способом необходимо реализовать непосредственно на источнике выброса пылевого аэрозоля после пылеочистки в воздух над территорией промышленной площадки, что обеспечивает минимальные энергетические затраты на создание компактной «дополнительной- П.3» дисперсной системы, в качестве которой в данном случае выступает пенный слой или пенный аэрозоль. Она воздействует на «промежуточную- П.2» систему, которая представляет собой пенный аэрозоль.

Особое, преимущественное место среди наиболее широко применяемых технологий принудительного рассеивания выбросов пылевых частиц в атмосферу занимает пенный способ с применением пенного аэрозоля, который заключается в создании потока дискретных пузырьков пены, их подаче в остаточный запылённый воздушный поток непосредственно перед выхлопным сечением источника выброса (вентиляционной трубы или шахты) с последующим разудалением в факеле выброса захваченных пузырьками пены пылевых частиц за счёт значительного увеличения их парусности [166-169].

При реализации процесса принудительного рассеивания пылевых частиц пузырьками пены превышение скорости движения пузырьков пены над скоростью движения остаточного количества частиц пыли в активной зоне рассеивания

обеспечивает увеличение импульса и кинетической энергии пылевых частиц за счёт образования агрегатов «частица–пузырёк».

При исследовании физического механизма процесса принудительного рассеивания пылевых частиц нами рассмотрены характерные для него процессы взаимодействия дисперсионной среды, в качестве которой выступает воздух выбрасываемой струи, и дисперсной фазы, в качестве которой выступают оставшиеся после процесса очистки пылевые частицы.

*На первом этапе*, в момент истечения пылевоздушной струи из источника выброса она испытывает воздействие различных сил, соотношение между которыми может достаточно быстро меняться. Так, на начальном участке факела выброса преобладает влияние кинетической энергии за счёт силы тяги в источнике и силы плавучести струи. Часть начального участка подъёма, обусловленная скоростью истечения, определяет её кинематический подъём. Таким образом, на начальном участке определяющими для распространения пылевых частиц в атмосфере являются силы, вызывающие подъём струи. Поперечные турбулентные пульсации скорости в струе еще незначительно расширяют ствол факела и последний ведет себя аналогично твёрдому телу.

Для определения высоты подъёма факела выброса воспользуемся формулой Дэвидсона–Брайанша [170], которая имеет вид:

$$\Delta h = D_{0u} \cdot (v_{выбр} / U_{ветр})^{1/4} \cdot (1 + \Delta T / T_{выбр}), \quad (3.105)$$

где  $D_{0u}$  – диаметр устья источника выброса пыли в атмосферу, м;  $v_{выбр}$  – скорость выброса, м/с;  $T_{выбр}$  – температура факела выброса, град;  $\Delta T$  – разность температур окружающего атмосферного воздуха и факела выброса, град.;  $U_{ветр}$  – скорость ветра в активной зоне принудительного рассеивания пылевых частиц, м/с.

*На втором этапе* развития факела выброса на содержащиеся в нём пылевые частицы решающее влияние оказывают силы, вызванные турбулентными пульсациями и циркуляцией атмосферных потоков. Из-за большой длительности протекающих на втором этапе процессов достаточно выраженными становятся

гравитационное осаждение пылевых частиц и адгезионные эффекты. Для начального участка второго этапа характерно наличие изгиба факела выброса, а с развитием второго этапа на факел выброса пыли действуют атмосферные пульсации и регулярные воздушные течения. При этом наблюдаются стабильное осаждение пылевых частиц на подстилающие поверхности на территории промышленной площадки, а также равномерное расширение факела выброса, форма которого теперь определяется термодинамическим состоянием атмосферного воздуха и приземными потоками воздушных масс.

Таким образом, на характер протекания процесса рассеивания пылевых частиц в приземном слое атмосферы городской территории оказывает влияние совокупность различного рода независимых факторов, которые можно отнести к четырём основным группам:

- к первой группе относятся факторы, характеризующие свойства источника выброса:  $x, y, z$  – координаты устья источника выброса пылевых частиц, м;  $D_{0и}$  – эквивалентный диаметр устья источника, м;  $v_{выбр}$  – скорость выброса, м/с;  $T_{выбр}$  – температура факела выброса, град;

- ко второй группе относятся факторы, характеризующие свойства пыли:  $\rho_{ч}$  – плотность материала пылевых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $d_{ч}$  – средний медианный диаметр пылевых частиц, м;  $k_{ф}$  – коэффициент формы;  $C_{выбр}$  – концентрация пылевых частиц в сечении устья источника выброса, мг/м<sup>3</sup>;  $S_n$  – коэффициент диэлектрической проницаемости материала пылевых частиц;

- третью группу образуют факторы, характеризующие свойства воздушной среды:  $U_{ветр}, v_{ветр}, W_{ветр}$  – составляющие скорости ветра соответственно по осям  $x, y,$  и  $z,$  м/с;  $A_{атм}$  – индекс состояния атмосферы;  $T_{возд}$  – температура окружающего атмосферного воздуха, град;

- четвертая группа определяет геометрию и свойства подстилающей поверхности:  $f(x,y,z)$  – уравнение линии тока, огибающей препятствия, м;  $T_{нов}$  – температура подстилающей поверхности, град.

В процессе принудительного рассеивания пыли в приземном слое атмосферы (рисунки 2.1, 2.2) при воздействии «дополнительной-П.3» системы на

«промежуточную-П.2» систему в активной зоне процесса происходит образование «остаточной-П.3» дисперсной системы, представленной пылевым аэрозолем с остаточным количеством пылевых частиц, с неизменной или незначительно увеличивающейся устойчивостью, продолжающей находиться в атмосфере, а также «остаточной-П.4» системы с резко уменьшающейся устойчивостью в состоянии «аэрозоля», склонной к переходу в состояние «пылевого материала» и оседающей на подстилающие поверхности. При этом «остаточная-П.3» дисперсная система формирует в воздушном бассейне промышленной площадки и прилегающей территории остаточную запылённость, которая должна быть строго ориентирована на ПДК<sub>мр</sub> или ПДК<sub>сс</sub>.

Изменение параметров и устойчивости «промежуточной-П.2» дисперсной системы в процессе принудительного рассеивания обуславливается, в конечном счете, перераспределением энергетических потенциалов этой и «дополнительной-П.3» дисперсных систем. При этом создание «дополнительной-П.3» системы требует определённых энергетических затрат, в результате чего она приобретает суммарную свободную поверхностную энергию  $W_{s(Д-П.3)}$ , вносимую затем в активную зону реализации процесса принудительного рассеивания пылевых частиц. Именно эту энергию можно считать затраченной на реализацию процесса, так как она обеспечивает, в конечном счете, снижение концентрации пылевых частиц в воздушном бассейне промышленной площадки и прилегающей территории.

Проанализировав энергетические параметры дисперсных систем, которые участвуют и образуются в ходе процесса принудительного рассеивания, а также схемы перераспределения этих параметров (рисунок 2.2) можно заключить, что в качестве полезной энергии (то есть пошедшей на достижение цели принудительного рассеивания – увеличение степени разудаления пылевых частиц, ускорение их осаждения в воздушной среде и прочное связывание с подстилающей поверхностью) в данном случае выступает энергия, которая определяется как разность между суммарными свободными поверхностными энергиями «промежуточной-П.2»  $W_{s(П-П.2)}$  и «остаточной-П.4»  $W_{s(О-П.4)}$  дисперсных

систем.

Рассмотрим эффективность реализации процесса принудительного рассеивания пыли пенным способом как его результирующую характеристику, которая с учётом его многостадийности аналогично процессам пылезадержания и очистки воздуха от пыли может быть определена по формуле:

$$E_{эф-рп-аэр} = 1 - (1 - E_{эф(1)-рп}) \cdot (1 - E_{эф(2)-рп}) \cdot (1 - E_{эф(3)-рп}) . \quad (3.106)$$

Параметр  $E_{эф(1)-рп}$  характеризует вероятность захвата пылевых частиц пузырьками пены под действием инерционных сил *на первой стадии* процесса принудительного рассеивания пыли, когда поступательное движение пылевых частиц осуществляется за счёт кинетической энергии совместно пылевого и пенного аэрозолей, а эффекты, приводящие к столкновению и захвату (налипанию) частиц пыли пузырьками пены носят инерционный характер, описываемый критерием Стокса.

Количество (концентрация) частиц пыли  $n_{рп}$ , которые вступили в контакт с пузырьками пены под действием данного механизма определяется по формуле:

$$n_{рп} = n_{0-рп} \cdot E_{эф(1)-рп} , 1/м^3 . \quad (3.107)$$

Количество (концентрация) пылевых частиц в выбрасываемом в атмосферу воздушном (газовом) вентиляционном потоке  $n_{0-рп}$  определяется по формуле:

$$n_{0-рп} = c_u / m_u , 1/м^3 . \quad (3.108)$$

Тогда параметр  $E_{эф(1)-рп}$  для процесса принудительного рассеивания пенным аэрозолем ( $I_n > 0$ ) аналогично процессам пылезадержания и пылеочистки описывается коэффициентом инерционного осаждения  $K_{ин}$  и определяется по формуле:

$$E_{эф(1)-рп} = K_{ин} . \quad (3.109)$$

*Вторая стадия* процесса принудительного рассеивания пылевых частиц в атмосфере включает соприкосновение пылевой частицы с пузырьком пены до возникновения прочного контакта между ними. В противном случае, пылинка за счет эффекта аэродинамического и молекулярного обтекания, оторвется от пузырька. На прочность контакта между пылевой частицей и пузырьком пены влияют адгезионные силы, а параметр  $E_{эф(2)-pn}$  характеризует вероятность захвата пылевых частиц под действием адгезионного механизма. Причём, в динамических условиях при сближении пылевой частицы с пузырьком пены кроме аэродинамического обтекания, может происходить молекулярное, что зависит от состава, свойств и состояния частиц пыли и пузырьков пены [86, 171].

Молекулярное обтекание, так как оно связано с поверхностными явлениями, можно оценить энергией адгезии, которую необходимо затратить на отрыв пылинки от пузырька пены и которая определяется по формуле [86, 171]:

$$W_{ад} = \sigma_{m-ж} \cdot (1 + \cos \theta) \cdot S_{ад} \quad , \text{ Вт} \quad , \quad (3.110)$$

где  $S_{ад}$  – площадь адгезионного взаимодействия пылевых частиц с пузырьками пены в активной зоне реализации процесса принудительного рассеивания пыли, которая определяется по формуле:

$$S_{ад} = 2 \cdot \pi \cdot r_q \cdot (1 + \cos \theta) \quad , \quad \text{ м}^2. \quad (3.111)$$

Подставив выражение (3.111) в формулу (3.110), получим:

$$W_{ад.} = 2 \cdot \pi \cdot r_q \cdot \sigma_{ж-з} \cdot (1 + \cos \theta)^2, \text{ Вт} \quad , \quad (3.112)$$

Радиус периметра смачивания  $r_{см}$  пылевых частиц пузырьками пены определим по формуле:

$$r_{см} = r_q \cdot \sin \theta \quad , \quad \text{ м}. \quad (3.113)$$

Предельный максимальный диаметр  $d_{q-2(max)}$  пылевых частиц, удерживаемых

на поверхности пузырьков пены при заданных условиях рассеивания пыли можно определить по формуле:

$$d_{q-2(\max)} = \begin{cases} 0,106 \cdot \text{Re} \cdot \sigma_{m-\text{жс}} \cdot (1 + \cos \theta)^2 / \rho_q \cdot (v_n + v_{\text{ен}})^2 \cdot \sin \theta \cdot (1 - \cos) \\ 0,106 \cdot \text{Re}^{0,7} \cdot \sigma_{m-\text{жс}} \cdot (1 + \cos \theta)^2 / \rho_q \cdot (v_n + v_{\text{ен}})^2 \cdot \sin \theta \cdot (1 - \cos \theta) \end{cases}, \text{ м.} \quad (3.114)$$

При этом минимальный диаметр  $d_{q-2(\min)}$  пылевых частиц, удерживаемых пузырьками пены за счёт сил адгезии можно определить по формуле:

$$d_{q-2(\min)} = 12 \cdot \sigma_{m-\text{жс}} \cdot (1 - \cos \theta) / \rho_q \cdot (v_n + v_{\text{ен}})^2, \text{ м.} \quad (3.115)$$

Зная максимальный диаметр  $d_{q-2(\max)}$  пылевых частиц, удерживаемых адгезионными силами при заданных скоростях движения пузырьков пены и воздушного потока в факеле выброса, можно определить эффективность соприкосновения  $E_{\text{эф}(2)-\text{pn}}$  пылевых частиц с пузырьками пены только за счёт сил адгезии:

$$E_{\text{эф}(2)-\text{pn}} = \sum_{i=1}^k d_{q-2(\max)} \cdot n_i / \sum_{j=1}^m d_q \cdot n_j, \quad (3.116)$$

где  $i$  – количество пылевых частиц с максимальным диаметром  $d_{q-2(\max)}$ ;  $j$  – количество пылевых частиц с фактическим диаметром  $d_q$ .

*Третья стадия* процесса принудительного рассеивания пыли пеной определяется оседанием (выпадением из воздушного потока) скоагулировавших конгломератов «частица–пенный пузырёк» под действием гравитационной силы.

Основным условием осаждения связанной пенным пузырьком пылевой частицы является достаточно большая для проявления гравитационной силы суммарная масса пузырька пены и пылевой частицы при определённой скорости воздушного потока. Другим условием осаждения является то, что время гравитационного осаждения конгломерата «частица–пенный пузырёк» должно быть меньше динамической стойкости (времени «жизни») пузырька пены.

Тогда эффективность  $E_{эф(3)-pn}$  реализации третьей стадии процесса принудительного рассеивания пыли, характеризуемая вероятностью осаждения конгломератов «частица–пенный пузырек» за счёт сил гравитации может быть определена по формуле:

$$E_{эф(3)-pn} = \sum_{l=1}^p d_{ч-3(\min)} \cdot n_l / \sum_{j=1}^m d_{ч} \cdot n_j, \quad (3.117)$$

где  $d_{ч-3(\min)}$  – минимальный диаметр пузырьков, успевших осесть на площади  $f_{\tau}$ , м;  $l$  – количество пылевых частиц с минимальным диаметром  $d_{ч-3(\min)}$ , определяемым по формуле:

$$d_{ч-3(\min)} \geq (18 \cdot v_n \cdot H \cdot \mu_g / l_{\tau} \cdot g \cdot \rho_p)^{0,5}, \quad (3.118)$$

где  $l_{\tau}$  – расстояние от источника выброса до места оседания пузырьков, м;  $H$  – высота на уровне дыхания, равная 1,5 м.

Расстояние  $l_{\tau}$  должно быть меньше некоторого критического значения  $l_{кр}$ , которое определяется динамической стойкостью пенных пузырьков по формуле:

$$l_{\tau} \leq v_n \cdot \tau_{дин}. \quad (3.119)$$

Таким образом, подставив формулы (3.109), (3.116) и (3.117) в формулу (3.106), получим расчётную зависимость эффективности для процесса принудительного рассеивания пылевых частиц пенным аэрозолем:

$$E_{эф-pn} = 1 - (1 - K_{ун}) \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^k d_{ч-2(\max)} \cdot n_i / \sum_{j=1}^m d_{ч} \cdot n_j\right) \cdot \left(1 - \sum_{l=1}^p d_{ч-3(\min)} \cdot n_l / \sum_{j=1}^m d_{ч} \cdot n_j\right). \quad (3.120)$$

Теоретические и экспериментальные исследования процесса рассеивания позволяют выявить резервы его эффективности и указать проектировщикам

способы их реализации, освободиться от эмпирического подбора оптимальных параметров рассеивания и получить возможность их аналитического прогнозирования и выбора.

Анализ работ по исследованию распространения пылевого аэрозоля в приземном слое атмосферы (в частности, в воздушном бассейне промышленных площадок и прилегающих территорий) показал, что до настоящего времени не исследованы в полной мере энергетические характеристики процесса принудительного рассеивания в атмосфере частиц пыли пузырьками пены, определяющая роль которых доказана применительно к процессам пылезадержания и очистки воздуха от пыли. Принудительное рассеивание частиц пыли как завершающий этап процесса обеспыливания воздуха также требует исследования возможности использования энергетических параметров для математического описания энергоёмкостного показателя аналогично тому, как это сделано для предыдущих, упомянутых выше этапов. Необходимость такого исследования подтверждается тем, что энергия, затрачиваемая на реализацию процесса принудительного рассеивания, является обобщенной энергией, затрачиваемой на снижение удельной массы и удельного объёма пылевого аэрозоля как «остаточной-II.3» дисперсной системы [172].

Применительно к процессу принудительного рассеивания пыли в атмосфере полезная энергия определяется как энергия, расходуемая непосредственно на увеличение расстояния между пылевыми частицами после их выброса в атмосферу, их дисперсности и скорости оседания. При этом затраченная энергия определяется как суммарная энергия, необходимая для реализации процесса принудительного рассеивания. Таким образом, энергоёмкостный показатель в данном случае позволяет оценить степень полезного использования затрачиваемой энергии с точки зрения достижения цели процесса принудительного рассеивания пылевых частиц в атмосфере – снижения концентрации и удельной массы витающих частиц пыли как дисперсного материала.

Рассмотрим каждый из выделенных ранее физических механизмов,

соответствующих каждой стадии реализации процесса принудительного рассеивания, и оценим их полезные виды энергии [172, 173].

*На первой стадии*, когда наблюдается значительное влияние источника выброса, в качестве полезной рассматривается кинетическая энергия его струи, а также энергия адгезионного взаимодействия.

Для реализации процесса принудительного рассеивания пыли в воздушном бассейне промышленной площадки и прилегающей территории необходимо, чтобы выбрасываемые частицы пыли обладали определенным запасом кинетической энергии. В этом случае кинетика направленного движения струи обязательно будет сопровождаться кинетикой турбулентного перемешивания, приводящей к расширению струи выброса. В результате, кинетическая энергия пылевых частиц является положительной с точки зрения реализации цели процесса рассеивания, так как обеспечивает возможность перехода определённой доли этих частиц к следующей стадии. Параметр, учитывающий этот вид энергии частиц пыли, прошедших первую стадию процесса принудительного рассеивания и образующих концентрацию в начальный момент второй стадии, имеет вид [172, 173]:

$$W_1^{кин} = 0,5 \cdot m_c \cdot v^2 \cdot F_\phi \cdot n_{pn}^{аэп}, \text{ Вт}, \quad (3.121)$$

где  $v$  – скорость встречи частицы и пузырька на первой стадии процесса рассеивания, м/с;  $F_\phi$  – площадь поперечного сечения факела выброса в точке перехода от первого этапа рассеивания ко второму, м<sup>2</sup>;  $n_{pn}^{аэп}$  – количество пенных пузырьков, соприкоснувшихся с пылевыми частицами, проходящих через  $F_\phi$  в единицу времени, 1/м<sup>2</sup>·с.

Скорость частицы пыли не должна превышать некоторую критическую, при которой она, попав на пузырек, разрушит его [172, 173]:

$$v \leq v_{кр} = \sqrt{12 \cdot \sigma \cdot (1 - \cos \theta) / d_n \cdot \rho_n}, \text{ м/с}. \quad (3.122)$$

Значения  $W_I^{кин}$  для любого сечения факела выброса на протяжении всей первой стадии процесса принудительного рассеивания определяется заменой параметра  $F_\phi$  на его текущее значение  $F$ :

$$F = \begin{cases} 0,5 \cdot \pi \cdot d_{уст}^2 & , \text{ при } F_\phi = F_0 ; \\ 0,25 \cdot \pi \cdot [(\Delta h + d_{уст} / \operatorname{tg}(0,5 \cdot \gamma)) / \operatorname{tg}(0,5 \cdot \gamma)]^2 & , \text{ при } F_\phi = F . \end{cases} \quad (3.123)$$

Параметр  $\gamma$  учитывает энергию турбулентного расширения конуса факела выброса, зависящую от термодинамического состояния воздуха. После выполненной нами статистической обработки результатов исследований, представленных в работах [170, 174], величина  $\gamma$  может быть определена по формуле:

$$\gamma = 0,17 \cdot \psi^{0,75} , \quad (3.124)$$

где  $\psi$  – индекс термодинамического состояния атмосферы, принимающий значения от 1 до 6 при смене типов состояния от умеренной устойчивости до сильной неустойчивости в соответствии с [175, 176].

Учитывая небольшую вертикальную протяженность приземного слоя толщиной 50-100 м, можно говорить о равновесной (безразличной) стратификации атмосферы, когда вертикальный поток тепла равен 0, а изменение температуры воздуха с высотой происходит по адиабатическому закону, или когда температура воздуха незначительно изменяется с высотой, то есть  $\psi = 4$  (для безразличной стратификации), а  $\gamma = 0,48$ .

Высота конуса струи  $\Delta h$  на первой стадии может быть определена по формуле [166, 175, 176]:

$$\Delta h = 0,13 \cdot v_0 \cdot (v_{S(nn+\gamma)} \cdot d_{уст})^{-0,51} , \text{ М} , \quad (3.125)$$

где  $v_{0(nn+\gamma)}$  – начальная скорость пузырька пены с частицей пыли в выхлопном сечении источника выброса, м/с;  $v_{S(nn+\gamma)}$  – скорость витания пузырька с пылинкой,

м/с, которая определяется по формуле:

$$v_{S(nn+u)} = 0,056 \cdot d_n^2 \cdot g \cdot \rho_n / \mu_6, \text{ м/с} . \quad (3.126)$$

При этом начальная скорость выброса  $v_0$  определяется по формуле:

$$v_0 = 4 \cdot Q_p / \pi \cdot d_{уст}^2 . \quad (3.127)$$

Количество пенных пузырьков  $n_{pn}^{aep}$ , проходящих через сечение  $F_\phi$  в единицу времени, является функцией эффективности  $E_{\phi(1)-pn}$  первой стадии процесса принудительного рассеивания пыли в атмосфере и определяется по формуле:

$$n_{pn}^{aep} = n_{0n} \cdot E_{\phi(1)-pn} \cdot B_1, 1/\text{м}^2 \cdot \text{с} . \quad (3.128)$$

Энергетический параметр, при помощи которого учитывается энергия адгезионного взаимодействия  $W_1^{ad\phi}$ , описывается уравнением, в котором наряду с геометрическими характеристиками активной зоны реализации процесса принудительного рассеивания пыли учитывается величина площади поперечного сечения факела выброса  $F_\phi$ :

$$W_1^{ad\phi} = 0,6 \cdot W_d \cdot F_A \cdot F_\phi / h_A \cdot \tau_m, \text{ Вт} . \quad (3.129)$$

Продолжительность первой стадии определяется временем до начала свободного гравитационного осаждения пузырька пены с захваченной им частицей. В том сечении факела выброса, где скорость  $v$  совпадает со скоростью  $v_{S(nn+u)}$ , заканчивается активное действие самого факела выброса, поскольку уже не наблюдается направленного движения пылепенного аэрозоля за счёт кинетической энергии факела выброса.

*Вторая стадия* процесса принудительного рассеивания пыли в атмосфере

характеризуется пренебрежимо малым влиянием параметров источника выброса на поведение факела выброса. При этом на второй стадии проявляются эффекты, связанные с турбулентностью окружающих воздушных масс, и в качестве полезной целесообразно рассматривать энергию коагуляционного взаимодействия частиц пыли между собой и с пузырьками пенного аэрозоля, а также энергию их гравитационного высева и энергию турбулентного перемешивания. Витание пенных пузырьков с захваченными пылевыми частицами может быть вызвано как направленным переносом, осуществляемым с помощью крупномасштабных вихревых потоков и ламинарных течений, так и хаотическими пульсациями скорости ветра.

Параметр  $W_2$ , оценивающий энергию турбулентного перемешивания, может быть определён по формуле:

$$W_2 = W_T^{prod} + W_T^{noner} + W_T^{верт} , \quad (3.130)$$

где  $W_T^{prod}$ ,  $W_T^{noner}$ ,  $W_T^{верт}$  – параметры, оценивающие удельную энергию турбулентного перемешивания пузырьков пены с пылевыми частицами соответственно по их продольной, поперечной и вертикальной случайных составляющих скорости, Вт.

Используя понятие удельной энергии  $\omega$  пузырька пены с захваченной им пылевой частицей для всех составляющих скорости  $v$ , для описания  $W_2$  можно предложить зависимость:

$$W_2 = (\omega_u + \omega_v + \omega_w) \cdot m_n \cdot F_{турб} \cdot n''_{nn+ч} , \quad \text{Вт} , \quad (3.131)$$

где  $F_{турб}$  – площадь поперечного сечения области турбулентного перемешивания на уровне дыхания человека (примерно от 1,5 до 2,0 м от поверхности земли), м;  $n''_{pn}$  – количество пенных пузырьков с пылевыми частицами, проходящих через сечение  $F$  в единицу времени,  $1/(m^2 \cdot c)$ .

При переходе от первой стадии процесса принудительного рассеивания ко

второй пузырьки пены с захваченными пылевыми частицами в количестве  $n_{nn+q}$  поступают в область реализации второй стадии процесса принудительного рассеивания. В результате ненаправленного турбулентного обмена на рассматриваемой поверхности  $F_{nn}$  образуется пылепенная система, количество которой определяется параметром  $n''_{nn+q}$ . При этом параметр  $n''_{nn+q}$  определяется как функция эффективности второй стадии взаимодействия пузырька пены с пылевой частицей:

$$n''_{pn} = n'_{pn} \cdot E_{эф(1)-pn}, 1/(M^2 \cdot c). \quad (3.132)$$

Параметр  $F_{nn}$  определяется как часть площади заданной экологически значимой зоны (ЭЗЗ), в пределах которой наблюдается концентрация пылепенных агрегатов  $n''_{nn+q}$ . Для возможности использования в практических расчётах формулы (3.131) величина  $F_{nn}$  используется в нормируемом виде [169], принимая значения от 0 до 1.

Влияние вязкости воздуха на структуру турбулентных зон практически отсутствует [167, 177], поэтому удельную энергию для всех составляющих скорости  $v$  определяют по формулам:

$$\omega_u = 0,5 \cdot \xi^{2/3} \cdot k^{-5/3}, \text{ м/с}; \quad (3.133)$$

$$\omega_v = 15 \cdot f \cdot U'^2 / n \cdot (1 + 9,5 \cdot f)^{5/3}, \text{ м/с}; \quad (3.134)$$

$$\omega_w = 3,36 \cdot f \cdot U'^2 / n \cdot (1 + 10 \cdot f)^{5/3}, \text{ м/с}; \quad (3.135)$$

где  $\xi$  – промежуточный параметр,  $m^2/c^3$ ;  $k$  – волновое число,  $1/m$ ;  $f$  – безразмерная частота;  $U'$  – скорость трения,  $m/c$ ;  $n$  – частота пульсаций,  $1/c$ .

Макропульсации, вызываемые однородной турбулентностью воздушной среды, носят периодический характер, причем величина этого периода зависит от их интенсивности в каждой рассматриваемой точке области. Проявляющаяся периодичность адекватна вихревому воздействию.

Выражение для баланса кинетической энергии получается, исходя из предположения о том, что время затухания вихря при ликвидации источника энергии является более продолжительным, чем время периода вихрей в интервале рассматриваемых волновых чисел, следовательно, энергию таких вихрей можно считать постоянной. Промежуточный параметр, введенный на основе применения теории подобия, определяется [166, 177] по формуле:

$$\xi = (U')^2 / k_k \cdot Z , \quad (3.136)$$

где  $k_k$  – константа Кармана, равная 0,4;  $Z$  – высота над поверхностью земли, м.

Скорость трения  $U'$  существенно зависит от состояния устойчивости приземного слоя воздуха, скорости ветра  $U(Z)$ , параметра шероховатости  $Z_0$ . Для случая безразличной стратификации скорость трения  $U'$  определяется [166] по формуле:

$$U' = k_k \cdot U(Z) / \ln(Z' + Z' / Z_0) , \text{ м/с} , \quad (3.137)$$

где  $Z'$  - усредненная высота области второй стадии процесса рассеивания, м.

Безразмерная частота  $f$  находится по формуле [166, 177]:

$$f = n \cdot Z / U(Z) . \quad (3.138)$$

Продолжительность второй стадии процесса принудительного рассеивания пыли определяется временем жизни пузырька пены, закрепившись на котором пылевая частица перемещается в воздухе, то есть динамической стойкостью пенных пузырьков. Путь  $L_m$ , который пузырек с частицей проходит от источника выброса до момента его разрушения определяется по формуле:

$$L = \tau_{дин} \cdot v_{nn} , \text{ м} . \quad (3.139)$$

Скорость пылепенного потока  $v_{nn}$  на второй стадии процесса

принудительного рассеивания определяется скоростью ветра:

$$U_{nn} = U_{вет} , \text{ м/с.} \quad (3.140)$$

Третья стадия процесса принудительного рассеивания характеризуется гравитационным осаждением пылевых частиц на подстилающие поверхности. Соответствующий энергетический параметр  $W_3$  , характеризующий полезную энергию третьей стадии, определяется по формуле:

$$W_3 = (m_{nn} + m_q) \cdot g \cdot Z \cdot F \cdot n'''_{pn} , \text{ Вт.} \quad (3.141)$$

Количество пылепенного аэрозоля  $n'''_{pn}$  на третьем этапе процесса определяется:

$$n'''_{pn} = n''_{pn} \cdot E_{эф(3)-pn} , 1/\text{м}^3 \cdot \text{с} . \quad (3.142)$$

Для реализации процесса принудительного рассеивания пылевых частиц в атмосфере пенным способом необходимо использовать технические средства, позволяющие достичь соответствующих технологических параметров способа и требующие при эксплуатации определенных энергетических затрат.

Так, на первой стадии процесса принудительного рассеивания к такого рода затратам относится энергия потока раствора пенообразователя непосредственно перед оросителем, которую можно описать энергетическим параметром  $N_1$  , определяемым по формуле:

$$N_1 = H_p \cdot Q_p \cdot t , \text{ Вт.} \quad (3.143)$$

Энергетический параметр  $N_2$  побудителя тяги, обеспечивающего выброс в атмосферу вентиляционных потоков, характеризует энергию воздушного потока в сечении нагнетающего патрубка побудителя тяги и описывается уравнением:

$$N_2 = 9,8 \cdot (H_{en} - H_{nm}) \cdot Q_{en} , \text{ Вт} . \quad (3.144)$$

Используя понятие эквивалентного диаметра  $D_{on}$  выхлопного сечения источника выброса, формулу (3.143) можно преобразовать к виду:

$$N_2 = 7,7 \cdot (0,5 \cdot v_{nm}^2 \cdot \rho_v - H_{nm}) \cdot D_{on}^2 \cdot v_{nm} , \text{ Вт} . \quad (3.145)$$

На второй стадии в качестве затраченной рассматривается энергия ветрового потока, для оценки которой используется энергетический параметр  $N_3$ , определяемый по формуле:

$$N_3 = 9,8 \cdot H_{вет} \cdot Q_v , \text{ Вт} , \quad (3.146)$$

где  $H_{вет}$  – давление ветрового потока в сечении факела выброса, Па;  $Q_v$  – расход воздуха, проходящего через сечение  $F_1$  факела, м<sup>3</sup>/с.

Давление ветрового потока  $H_{вет}$  определяется по формуле:

$$H_{вет} = 0,5 \cdot v_{вет}^2 \cdot \rho_v , \text{ Па} , \quad (3.147)$$

где  $v_{вет}$  – скорость ветра, усреднённая по сечению факела, м/с, определяемая по формуле:

$$v_{вет} = 0,5 \cdot (v_{вет}^H + v_{вет}^B) , \text{ м/с} , \quad (3.148)$$

где  $v_{вет}^H$ ,  $v_{вет}^B$  – скорость ветра в нижней и верхней плоскостях сечения  $F_1$ .

Расход воздуха  $Q_v$  можно определить по формуле:

$$Q_v = F_1 \cdot v_{вет} , \text{ м}^3/\text{с} . \quad (3.149)$$

При этом сечение  $F_1$  факела выброса определяется по формуле [166, 177]:

$$F_1 = \left[ 0,5 \cdot \operatorname{tg}(0,08 \cdot \psi^{0,75}) \cdot (\Delta h + D_0 / \operatorname{tg}(0,08 \cdot \psi^{0,75}))^2 - D_0 / \operatorname{tg}(0,08 \cdot \psi^{0,75}) \right] + F_2, \quad \text{м}^2, \quad (3.150)$$

где  $F_2$  – площадь поперечного ветру сечения факела выброса на его горизонтальном участке,  $\text{м}^2$ .

Подставив формулы (3.121)–(3.145) в выражение (1.9) и проведя несложные математические преобразования, получим параметрическую зависимость энергоёмкостного показателя  $E_{pn-аэp}^э$  для процесса принудительного рассеивания пылевых частиц пенным способом:

$$E_{pn-аэp}^э = \frac{\left[ \begin{aligned} &(0,2 \cdot d_n \cdot \rho_n \cdot v^2 \cdot (0,004 \cdot \Delta h + d_{ucm})^2 \cdot n'_{pn} + 4 \cdot \pi \cdot n''_{pn} \cdot (0,004 \cdot \Delta h + d_{ucm})^2 \cdot \\ &\cdot m_n \cdot v / 10^{-28} \tau_m) \cdot ((U' \cdot (19,8 / Z^{2/3} \cdot \lambda^{5/3} + 15 \cdot Z / U(Z) \cdot \\ &\cdot (1 + 3,8 \cdot Z / 2 \cdot \pi)^{5/3} + 3,36 \cdot Z / U(Z) \cdot (1 + 2 \cdot Z / \pi)^{5/3} \cdot \\ &\cdot (m_n + m_q) \cdot n'''_{nn+q} \cdot F_{мурб}) + ((m_n + m_q) \cdot g \cdot Z \cdot F_{мурб} \cdot n'''_{nn+q})) \end{aligned} \right]}{\left[ H_p \cdot Q_p \cdot t + 7,7 \cdot (0,5 \cdot v_{nm}^2 \cdot \rho_v - H_{nm}) \cdot D_{on}^2 \cdot v_{nm} + 9,8 \cdot H_{вет} \cdot Q_v \right]}. \quad (3.151)$$

Таким образом, в результате выполненного этапа теоретических исследований нами получены параметрические зависимости санитарно-гигиенической и экологической эффективности, а также энергоёмкостного показателя как результирующих характеристик соответственно этапов пылезадерхания, очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пылевых частиц в атмосфере, которые использованы нами в качестве основы математического описания перечисленных процессов для условий эксплуатации ленточных транспортёров на предприятиях строительной индустрии, и, прежде всего, заводов ЖБИиК. Хотя вполне понятно, что с учетом принятых допущений представленные математические зависимости не отражают абсолютно всех особенностей взаимодействия пылевых частиц и пузырьков пены, однако структура математического описания полученных параметрических зависимостей результирующих параметров процесса пылеподавления позволяет по мере

уточнения этих особенностей и получения количественных оценок, их характеризующих, его дополнять и совершенствовать эти зависимости.

Проведённый анализ физических механизмов реализации процессов пылевого загрязнения воздуха рабочих зон и промышленных площадок заводов ЖБИиК, а также снижения этого загрязнения позволит, осуществляя математическое прогнозирование рабочих параметров необходимых технических средств, эффективнее использовать эти механизмы для определения направлений совершенствования способов организации и технологий пылеподавления пеной [178-185].

### **3.2 Разработка алгоритма реализации методики принятия решения выбора оптимальных для заданных производственных условий технологий обеспыливания пеной**

Выполненное нами математическое описание физических особенностей и результирующих параметров процессов пылезадержания, очистки воздуха от пыли и рассеивания пыли как основных этапов реализации пылеподавления пеной позволяет оценивать и прогнозировать эффективность, энергетическую экономичность (энергоёмкостный показатель), а также рассчитывать оптимальные рабочие параметры систем борьбы с промышленной пылью (СБПП) на основе применения пены в условиях эксплуатации ленточных транспортёров заводов ЖБИиК.

С целью использования комплекса полученных зависимостей, описывающих особенности реализации процесса пылеподавления пеной, а также параметрических зависимостей эффективности и энергоёмкостного показателя как результирующих параметров этого процесса для выбора функциональных элементов СБПП, соответствующих этапам реализации рассматриваемого процесса пылеподавления, а также способов его организации и технологий, а, в

конечном счете, – формирования СБПП на основе применения пены при проектировании, реконструкции и эксплуатации линий транспортировки инертных материалов для предприятий строительной индустрии, в частности, заводов ЖБИиК, нами разработана методика [187, 188, 189], позволяющая кроме ряда характеристик производственно-технологического процесса учитывать также условия обеспечения взрыво- пожаробезопасности и  $ПДК_{pz}$  в рабочей зоне производственных помещений и  $ПДК_{mp(cc)}$  в приземном слое атмосферы.

Таким образом, алгоритм реализации предложенной нами методики формирования СБПП, заключающейся в выборе оптимальных по эффективности и энергетической экономичности способов организации и технологий пылеподавления пеной, состоит из следующих основных этапов:

1. Сбор информации о реально возможных в условиях конкретного рассматриваемого предприятия диапазонах технологических параметров реализации пенным способом каждого функционального элемента СБПП – пылезадержания, очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пыли в атмосфере (технические характеристики вентиляторов, насосов, компрессоров; типы и характеристики оросителей, пеногенераторов и т.д.), исходя из наличия на предприятии соответствующего оборудования или существует возможность его приобретения.

2. Формирование для каждого функционального элемента СБПП (пылезадержания, очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пыли в атмосфере) вариантов способов организации и технологий пылеподавления пеной («метод–способ–вид реализации», согласно п.2.2, рисунок 2.3) на основе заданного по п.1 данной методики вспомогательного оборудования и соответствующих ему диапазонов технических характеристик (рабочих параметров).

3. Сопоставление технологических особенностей и параметров подобранных вариантов способов организации и технологий пылеподавления пеной с реальными технологическими условиями рассматриваемого предприятия и особенностями территории его расположения (недопустимость переувлажнения

сырья и воздуха, превышения температуры, подвижности воздуха, взрывопожаробезопасность, электробезопасность и т.д.). Отбор только тех функциональных элементов СБПП и соответствующих им вариантов способов и технологий пылеподавления пеной, которые отвечают выполнению требуемых условий.

4. В рамках каждого, отобранного по п.3 данной методики функционального элемента, по каждому варианту способов организации и технологий пылеподавления пеной, расчет эффективности  $E_{эф}$  снижения загрязнения и отбор только тех вариантов, которые обеспечивают соблюдение ПДК (для функционального элемента пылезадержания – в рабочей зоне помещения ( $ПДК_{pz}$ ), а для функциональных элементов очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пыли – в приземном слое атмосферы ( $ПДК_{mp(cc)}$ )).

4.1. Если условие соблюдения ПДК выполняется только для одного из рассматриваемых вариантов, то именно этот вариант окончательно выбирается для реализации.

4.2. Если условие соблюдения ПДК не выполняется ни для какого из рассматриваемых вариантов, то осуществляется выбор (для каждого рассматриваемого функционального элемента) только того варианта, у которого эффективность максимальна, но с последующим совершенствованием технологии этого варианта до обеспечения им требуемой эффективности [181, 190].

4.3. Если условие соблюдения ПДК выполняется для нескольких рассматриваемых вариантов, то осуществляется предварительная оценка каждого из них по энергетическому критерию  $K_E^э$ . При этом:

4.4. Для условия, когда только одному варианту технологии соответствует максимальное значение  $K_E^э$ , именно этот вариант подлежит расчету технологических параметров, с последующим проектированием на основе предварительного подбора соответствующих технических средств и, в конечном счёте, практической реализацией;

4.5. Для условия, когда нескольким вариантам технологии соответствуют

максимальные, но одинаковые, значения  $K_E^{\text{э}}$ , применительно ко всем этим вариантам проводится дальнейший анализ с последующим расчетом энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$  и определением его максимального значения.

5. В рамках каждого функционального элемента СБПП осуществляется выбор только того варианта способов организации и технологий пылеподавления пеной, для которого энергоёмкостный показатель  $E^{\text{э}}$  максимален. При этом:

5.1. Если в рамках одного функционального элемента только один из рассматриваемых вариантов обладает максимальным значением энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$ , то именно этот вариант окончательно выбирается для реализации.

5.2. Если в рамках одного функционального элемента для нескольких рассматриваемых вариантов значения энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$  окажутся равными, то окончательный выбор оптимального варианта осуществляют по минимальному из соответствующих значений затраченной энергии  $N$ .

6. Формирование СБПП (по функциональным элементам) с оптимальными рабочими параметрами, соответствующими максимальным значениям эффективности  $E_{\text{эф}}$  и энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$ , для заданных внутренних (производственных) и внешних (территориальных) условий. Решение обратной задачи, связанной с определением значений оптимальных рабочих параметров, соответствующих максимальным значениям эффективности  $E_{\text{эф}}$  и энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$ .

7. Окончательный подбор соответствующего вспомогательного оборудования (технических средств) для реализации каждого функционального элемента и обвязка системы трубопроводами, воздухопроводами и т.п.

Таким образом, предложенная методика принятия решения по выбору оптимальных по эффективности и энергетической экономичности для заданных производственных условий технологий пылеподавления пеной базируется на элементарных последовательностях выбора функциональных элементов, технических способов и средств (устройств) их реализации, а также способов и технологических узлов их реализации (вентиляторов, насосов, компрессоров, форсунок и т.д.) [191, 192].

Для практической реализации при проектировании, реконструкции и эксплуатации систем пылеподавления пеной на предприятиях строительной индустрии методика обеспечена программой «GEEPSUOR» (приложение А) для аналитического моделирования и расчета рабочих параметров пенного способа в различных производственных условиях, блок-схема которой представлена на рисунке 3.1. Структура программы полностью соответствует структуре методики [141, 143, 144, 188, 193] и включает четыре основных блока: блок исходных данных; расчётный блок; логический блок и блок вывода результата.

### 3.3 Формирование блока исходных данных

Блок исходных данных программы «GEEPSUOR» предполагает их ввод по следующим группам:

- *характеристики производственных условий*: наименование предприятия и выпускаемой им продукции; вид, тип и марка производственно-технологического оборудования; вид источника образования и источника выделения пыли; характеристики сырья (вид, морфологический состав, плотность, фракционность, расход, допустимая влажность и др.); наличие у источника выделения пыли аспирационного устройства и его геометрические и аэродинамические характеристики; площадь источника выброса пыли в атмосферу; эквивалентный диаметр устья источника выброса пыли в атмосферу; расстояние от поверхности земли до устья источника выброса пыли в атмосферу; расстояние от оси горизонтальной части факела выброса пыли в атмосферу до поверхности земли;

- *характеристики пыли*: вид пыли; дисперсный состав (либо средний медианный диаметр частиц пыли); краевой угол смачивания; плотность пылевого материала; относительная диэлектрическая проницаемость пылевого материала; удельный естественный электрический заряд пылевых частиц; коэффициент формы частиц; класс опасности;  $ПДК_{рз}$ ;  $ПДК_{сс}$ ;  $ПДК_{мп}$ ; фактическая (либо расчётная)

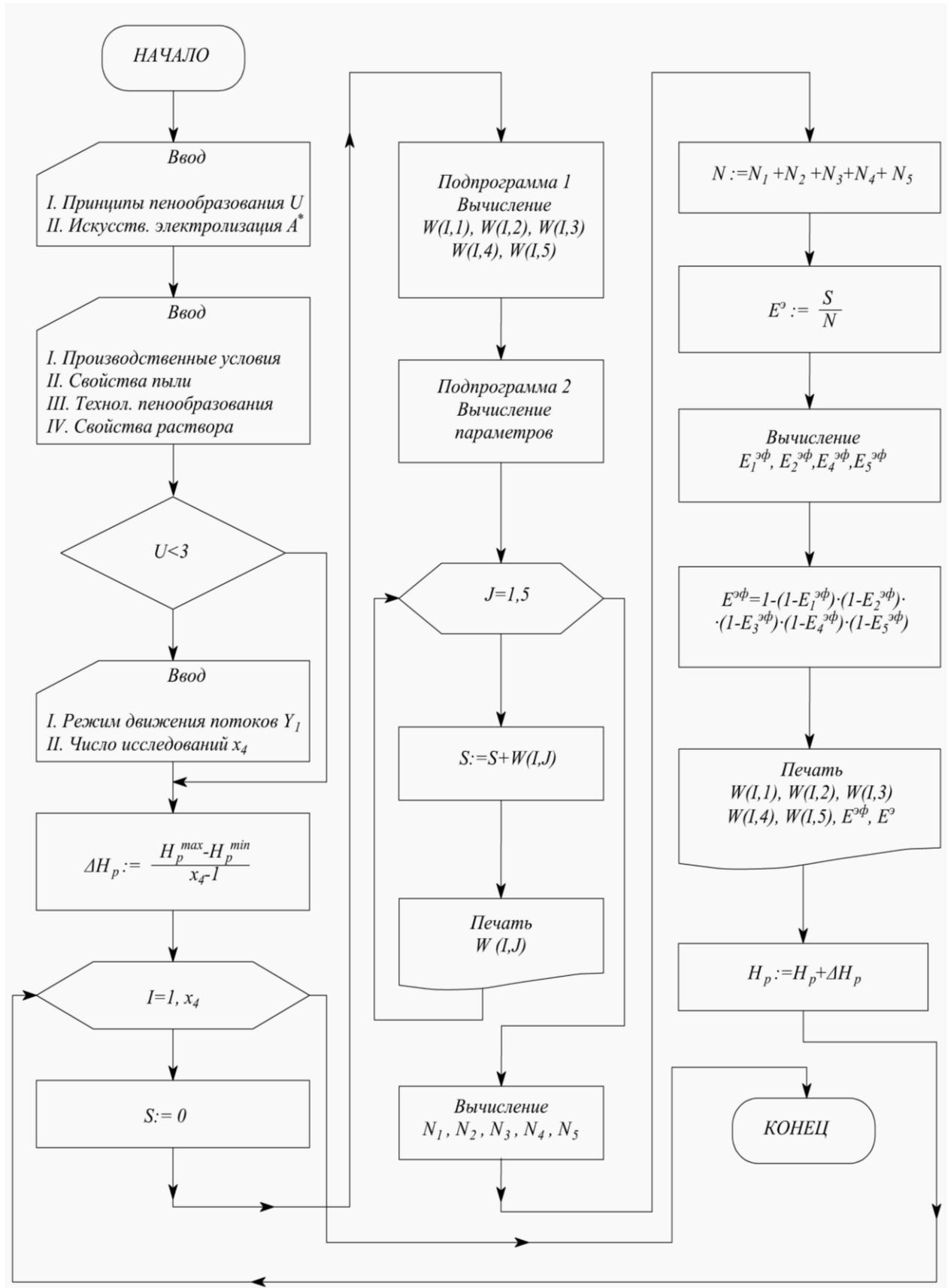


Рисунок 3.1 – Блок-схема программы «GEPSUOR» для аналитического моделирования и расчета рабочих параметров пенного способа в различных производственных условиях

концентрация в воздухе рабочей зоны и в воздушном бассейне промышленной площадки на границе предприятия;

- *характеристики возможных к применению вспомогательного технологического оборудования и пенообразователя*: диапазон напорно-расходных характеристик вентиляторов, насосов и компрессоров; потери давления по тракту воздухопроводов (газоходов) от аспирационного устройства до активной зоны реализации процесса очистки воздуха от пыли; потери давления по тракту воздухопроводов (газоходов) от активной зоны реализации процесса очистки воздуха от пыли до активной зоны реализации процесса принудительного рассеивания пыли в атмосфере (до устья источника выброса пыли); эквивалентный диаметр воздухопроводов (газоходов); вид и технические характеристики пеногенераторов; наличие гигиенического сертификата пенообразователя; диапазон возможных значений концентрации пенообразователя в водном растворе; диапазон возможных значений плотности раствора пенообразователя; диапазон возможных значений поверхностного натяжения раствора пенообразователя; давление пенообразующего раствора; диаметр сечения образования пены в сетчатом пеногенераторе; диаметр ячейки сетки сетчатого пеногенератора; расстояние между ячейками сетки сетчатого пеногенератора; высота исходного слоя жидкости в барботажном пеногенераторе; эквивалентный диаметр (радиус) барботера; коэффициент расхода сопла оросителя (форсунки); диаметр сопла оросителя; количество сопел в оросителе; корневой угол раскрытия факела орошения; при наличии искусственной электризации пены вводятся мощность источника питания  $N_{ин}$ ;

- *характеристики воздуха рабочей зоны*: температура; влажность; подвижность (скорость движения); плотность; динамическая вязкость;

- *характеристики воздуха приземного слоя атмосферы в наиболее жаркий период (как наихудшие условия рассеивания пыли)*: индекс состояния атмосферы; температура; влажность; подвижность (скорость ветра и её составляющие); плотность;

- *константы*: ускорение свободного падения; электрическая постоянная; расстояние действия молекулярных сил и другие.

### 3.4 Формирование логического блока

Логический блок программы «GEEPSUOR» предназначен для принятия однозначных решений при возникновении альтернативных расчётных ситуаций в следующих случаях:

- при расчёте эффективности  $E_{эф}$  снижения загрязнения в рамках каждого функционального элемента по каждому варианту способов организации и технологий пылеподавления пеной необходимо отобрать только те варианты, которые обеспечивают соблюдение ПДК (для функционального элемента пылезадержания – в рабочей зоне помещения ( $ПДК_{рз}$ ), а для функциональных элементов очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пыли – в приземном слое атмосферы ( $ПДК_{мр(сс)}$ )). При этом:

- если условие соблюдения ПДК выполняется только для одного из рассматриваемых вариантов, то именно этот вариант пылеподавления пеной окончательно выбирается для реализации;

- если условие соблюдения ПДК не выполняется ни для какого из рассматриваемых вариантов, то осуществляется выбор только того варианта, у которого эффективность максимальна, но с последующим совершенствованием технологии этого варианта до обеспечения им требуемой эффективности;

- если условие соблюдения ПДК выполняется для нескольких рассматриваемых вариантов, то осуществляется предварительная оценка каждого из них по рассчитываемому энергетическому критерию  $K_E^э$ . При этом:

- если максимальным значением  $K_E^э$  обладает только один вариант технологии пылеподавления пеной, то для него выполняются расчёт технологических параметров, проектирование и реализация с подбором соответствующих технических средств;

- если максимальным, но одинаковым, значением  $K_E^э$  обладают несколько вариантов технологии пылеподавления пеной, то именно эти варианты принимаются для дальнейшего рассмотрения с последующим расчётом

энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$  и определением его максимального значения.

- при расчёте энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$  в рамках каждого функционального элемента по каждому варианту способов организации и технологий пылеподавления пеной необходимо отобрать только те единственные варианты, которые обладают максимальными значениями энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$ . При этом:

- если в рамках одного функционального элемента только один из рассматриваемых вариантов обладает максимальным значением энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$ , то именно этот вариант окончательно выбирается для реализации;

- если в рамках одного функционального элемента для нескольких рассматриваемых вариантов значения энергоёмкостного показателя  $E^{\text{э}}$  окажутся равными, то окончательный выбор оптимального варианта осуществляют по минимальному из соответствующих значений затраченной энергии  $N$ .

Рассмотренные условия положены в основу формирования логического блока программы «GEEPSUOR» поиска наилучшего варианта технологии обеспыливания технологического сырья и воздуха на основе применения пены.

### **3.5. Описание выходных параметров**

Алгоритм программы «GEEPSUOR» разработан с учётом следующих основных требований:

- минимум затрат ручного труда на сбор исходных данных и формирование их базы;

- минимум использования оперативной памяти ЭВМ, требуемой для хранения информации;

- контроль за всеми этапами выполняемого анализа;

- возможность расширения в алгоритме операций, связанных с обработкой уже

известных и формированием новых уравнений, дополняющих математическое описание рассматриваемого процесса обеспыливания воздуха.

Таким образом, кроме блока формирования исходных данных и логического блока программа «GEEPSUOR» включает расчётный блок, состоящий из двух основных разделов:

- первый раздел включает зависимости, связанные с расчётом отдельных (промежуточных) параметров, характеризующих особенности реализации процесса пылеподавления воздуха рабочих зон и воздушного бассейна промышленных площадок для условий эксплуатации ленточных транспортёров на заводах ЖБИиК (расход раствора пенообразователя; диаметр пузырьков пены; толщина пенного слоя; объём пены, получаемой в единицу времени; скорость движения пузырьков пены в активной зоне реализации соответствующего этапа процесса пылеподавления пеной и др.);

- второй раздел включает параметрические зависимости эффективности пылеподавления и энергоёмкостного показателя каждого этапа реализации процесса обеспыливания воздуха (пылезадержания, очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пыли в атмосфере).

В программе «GEEPSUOR» возможно задавать любое число пошаговых расчётов для каждого параметра, который изменяется в заранее определенном диапазоне. Таким образом, при введении всех исходных данных, задавая число пошаговых расчётов (например,  $x = 6$ ), а также пошагово варьируемый параметр (например,  $H_p$ ) и его минимальное и максимальное значения, на выходе получаем одновременно шесть значений результирующих (выходных) параметров  $E_{эф}$  и  $E^o$  для шести значений  $H_p$ . Количество шагов заложено в программу в зависимости от требуемого числа расчётов  $x$  и предельных значений  $H_p$ .

Кроме того, программой также предусмотрен расчет энергетических параметров, энергоёмкостного показателя, постадийных составляющих эффективности и суммарной эффективности в рамках каждого функционального элемента СБП для каждого отобранного к рассмотрению варианта способов организации и технологий пылеподавления пеной.

Блок вывода результата обеспечивает окончательный вывод на печать максимальных значений эффективности пылеподавления и энергоёмкостного показателя для оптимального варианта способов организации и технологий пылеподавления пеной по каждому этапу реализации процесса обеспыливания воздуха (пылезадержания, очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пыли в атмосфере).

### **3.6 Анализ результатов теоретических расчетов на основе методики принятия решения по выбору оптимальных технологий обеспыливания пеной**

С помощью программы «GEEPSUOR» нами выполнено математическое моделирование процесса обеспыливания воздуха пеной для условий эксплуатации ленточных транспортёров (пыль песка и пыль щебня). При этом рассчитаны гидроаэродинамические и технологические характеристики процесса обеспыливания воздуха для рассматриваемых производственных условий различными способами организации и технологиями, включая технологии получения пены: пенообразование на сетке, барботажем, распыливанием раствора через ороситель (форсунку). В результате нами получены области существования значений энергоёмкостного показателя с учётом значений эффективности пылеподавления пеной для разных этапов процесса обеспыливания воздуха [123].

Так для процесса пылезадержания рассчитаны значения эффективности и энергоёмкостного показателя для всего диапазона реально возможных параметров реализации этого этапа процесса пылеподавления для различных условий эксплуатации открытых источников пылевыделения при получении пены в сетчатом и барботажном пеногенераторах. В качестве примера на рисунках 3.2, 3.3 (а, б) представлены графические зависимости эффективности пылезадержания от поверхностного натяжения  $\sigma_{\text{по}}$  раствора пенообразователя и высоты  $h_{\text{п}}$  пенного

слоя, а также энергоёмкостного показателя этого этапа процесса пылеподавления от энергетических параметров, характеризующих соответственно полезную  $W$  и затраченную  $N$  энергию для пыли щебня и песка.

Для процесса пылеочистки также рассчитаны значения эффективности и энергоёмкостного показателя для всего диапазона реально возможных параметров реализации этого этапа процесса пылеподавления в активной зоне очистки с учетом взаимонаправленности движения частиц пыли и пузырьков пены (спутное и встречное движение) для различных условий эксплуатации производственного оборудования, выделяющего пыль песка и щебня, оснащенного аспирационными устройствами.

В качестве примера на рисунках 3.4 (а,б), 3.5 (а,б), 3.6 и 3.7 представлены зависимости эффективности пылеочистки от давления  $P_p$  раствора пенообразователя перед оросителем, поверхностного натяжения  $\sigma_{по}$  раствора пенообразователя и скорости пылевоздушного потока  $v_{вп}$ , а также энергоёмкостного показателя этого этапа процесса пылеподавления от энергетических параметров, характеризующих соответственно затраченную  $N$  и полезную энергию  $W$ , скорости пылевоздушного потока  $v_{вп}$  в активной зоне очистки для пыли щебня и песка.

Также были рассчитаны значения эффективности и энергоёмкостного показателя процесса принудительного рассеивания пыли в атмосфере для всего диапазона реально возможных параметров реализации этого этапа процесса пылеподавления в приземном слое атмосферы для остаточного количества пыли песка и щебня.

В качестве примера на рисунках 3.8-3.12 представлены зависимости эффективности принудительного рассеивания пыли песка и щебня от скорости пылевоздушного потока  $v_{выбр}$  в устье источника выброса и скорости ветрового потока  $v_{вет}$  в зоне выброса, а также энергоёмкостного показателя от энергетических параметров, характеризующих соответственно затраченную  $N$  и полезную энергию  $W$  и скорости ветра  $U_v$ .

Кроме расчёта основных характеристик процесса обеспыливания воздуха

пенной нами также выполнены расчёты характеристик раствора пенообразователя и пены, применяемой в процессе (рисунки 3.13 - 3.14).

Анализ представленных на рисунках 3.2 - 3.14 примеров графических зависимостей позволяет на основе выполненных теоретических исследований процесса обеспыливания воздуха на основе применения пены подтвердить тот факт, что на открытых источниках образования и выделения пылевых частиц при скоростях воздушного потока менее 1,0 м/с (в частности, именно к таким условиям относится реализация процесса пылезадержания пеной на ленточных транспортёрах) наиболее эффективным является использование экранирующего пенного слоя за счёт подачи потока пены в активную зону обеспыливания.

Подтверждается также положение о том, что использование барботажных пеногенераторов целесообразно лишь при значительных объемах образования и выделения пылевых частиц, причём, следует отметить, что при этом значительный рост затраченной энергии сопровождается менее интенсивным ростом полезной энергии, что крайне нерационально.

Наиболее рациональным является применение сетчатого пеногенератора с эжекционным патрубком без принудительной подачи воздуха. При этом значительно экономичнее с точки зрения энергетических затрат осуществляется пылезадержание гидрофобной пыли (пыль щебня), нежели гидрофильной (пыль песка). При задержании (экранировании) гидрофобной пыли энергоёмкостный показатель достигает максимального значения до 2,5% при концентрации «Сампо» 3%.

Дальнейшее увеличение концентрации не приводит к положительным изменениям энергетических параметров процесса. Причём, для гидрофильной пыли (пыль песка) значения энергоёмкостного показателя увеличиваются при снижении концентрации пенообразователя в растворе и достигают наибольшей величины при концентрации 0,8%.

При использовании сетчатых пеногенераторов с принудительной подачей воздуха или барботажных пеногенераторов за счет значительного увеличения затрачиваемой на образование пены энергии, значения энергоёмкостного

показателя уменьшаются от 0,001 до 0,01% для гидрофобной пыли и до  $2 \cdot 10^{-4}\%$  для гидрофильной, что говорит о нецелесообразности применения рассматриваемых технологий получения пены для реализации пылезадержания пенным способом.

Для процесса очистки воздуха от пыли проведенный анализ полученных зависимостей энергоёмкостного показателя от аэродинамических характеристик воздушной среды (примеры которых представлены на рисунках 3.6, 3.7) показывает, что при скоростях пылевоздушного потока в активной зоне реализации процесса менее 1,0 м/с взаимонаправленность движения пенного аэрозоля и пылевоздушного потока не имеет значения, хотя при скоростях от 1,0 м/с до 10 м/с значения энергоёмкостного показателя при встречном и спутном движениях значительно отличаются друг от друга. Причём, в этом диапазоне скоростей с точки зрения энергетической экономичности процесса обеспыливания наиболее целесообразно организовывать спутное движение

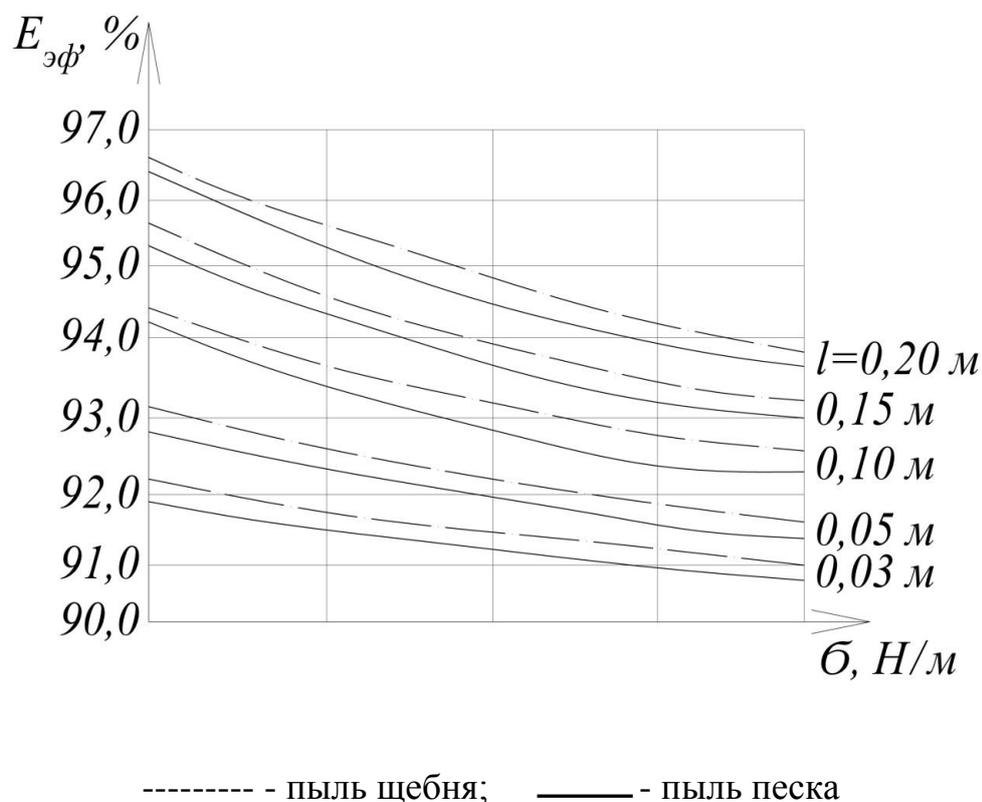
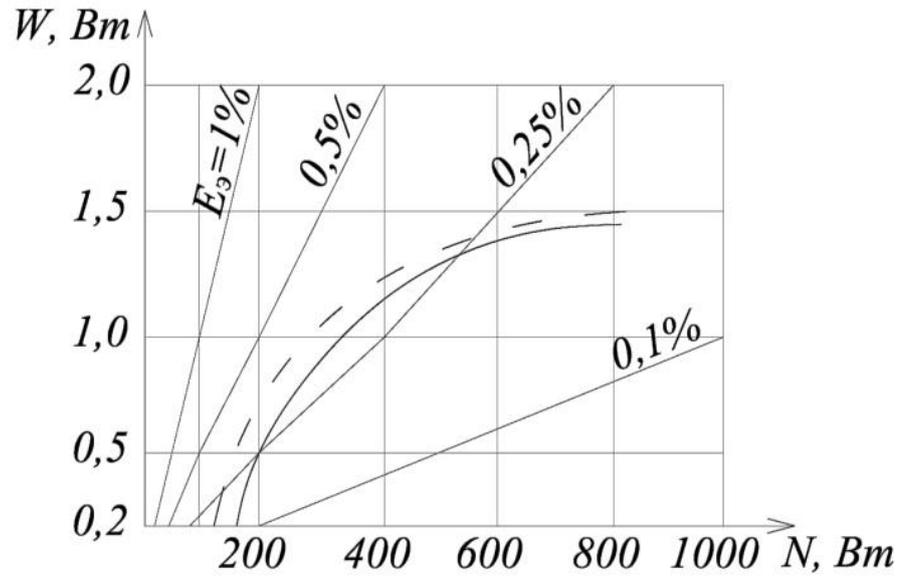
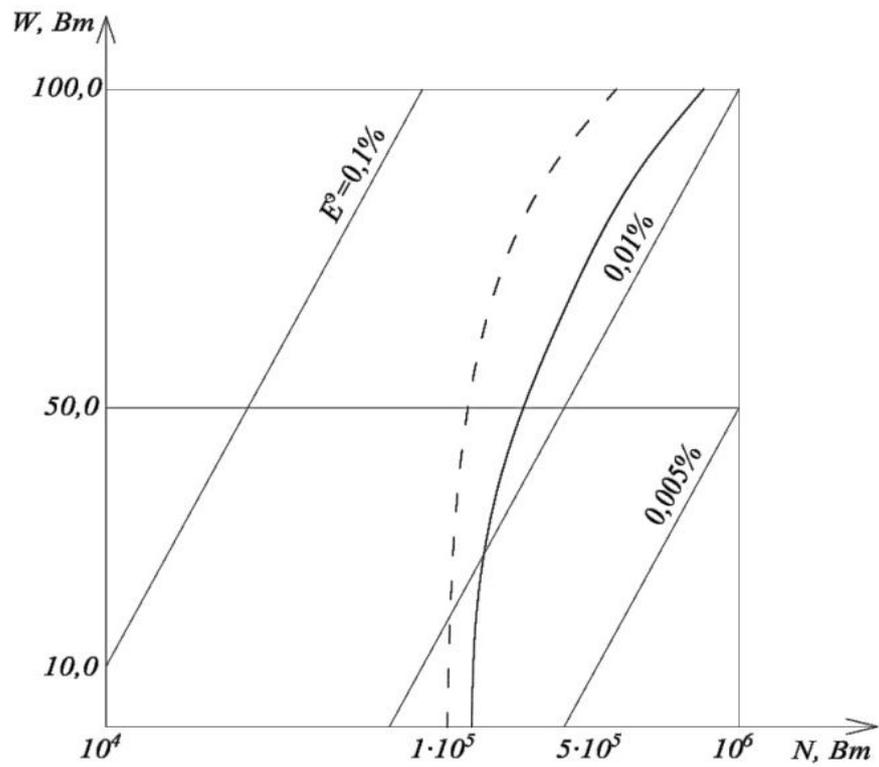


Рисунок 3.2 – Расчётные значения эффективности процесса пылезадержания пенным слоем для ленточного транспортера



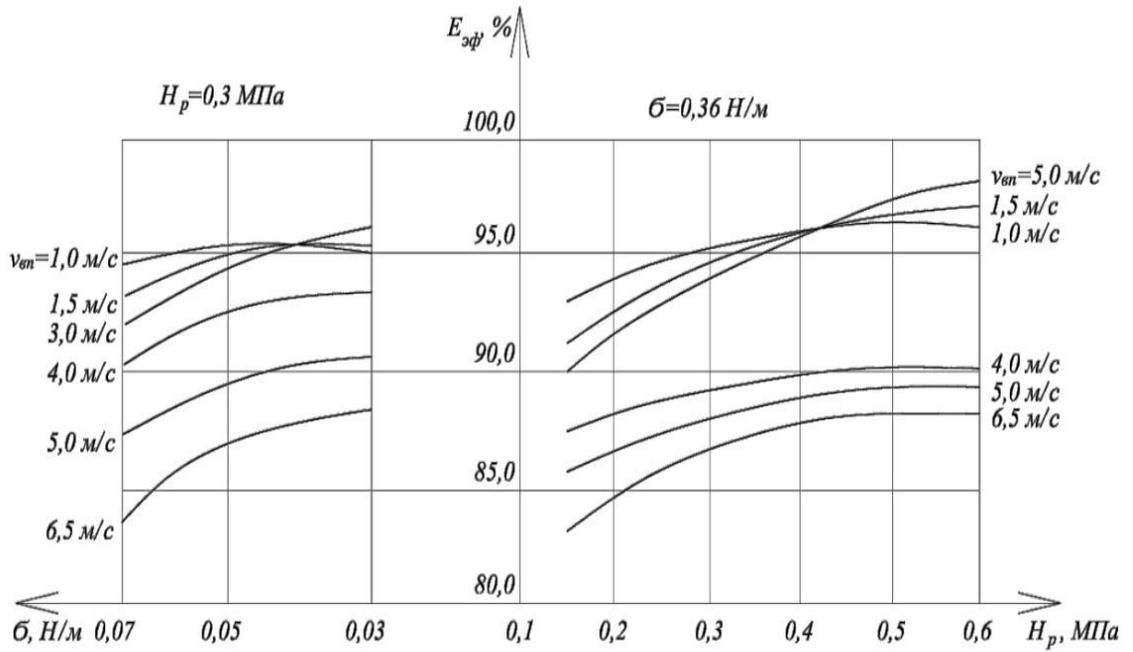
а)



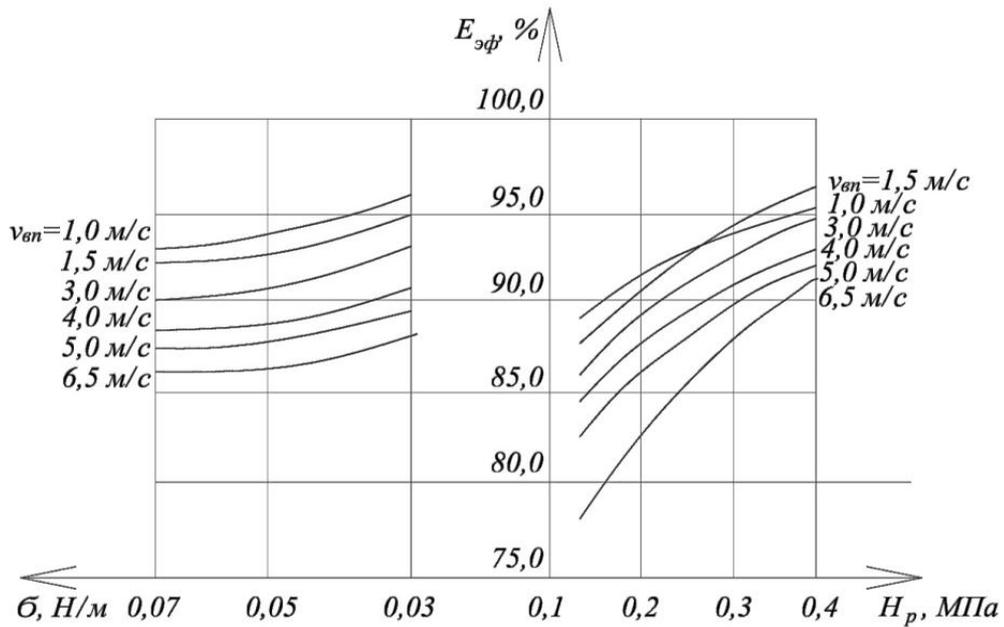
б)

а) – сетчатый пеногенератор; б) – барботажный пеногенератор

Рисунок 3.3 – Расчётные значения энергоёмкостного показателя процесса пылезадержания пенным слоем для ленточного транспортёра



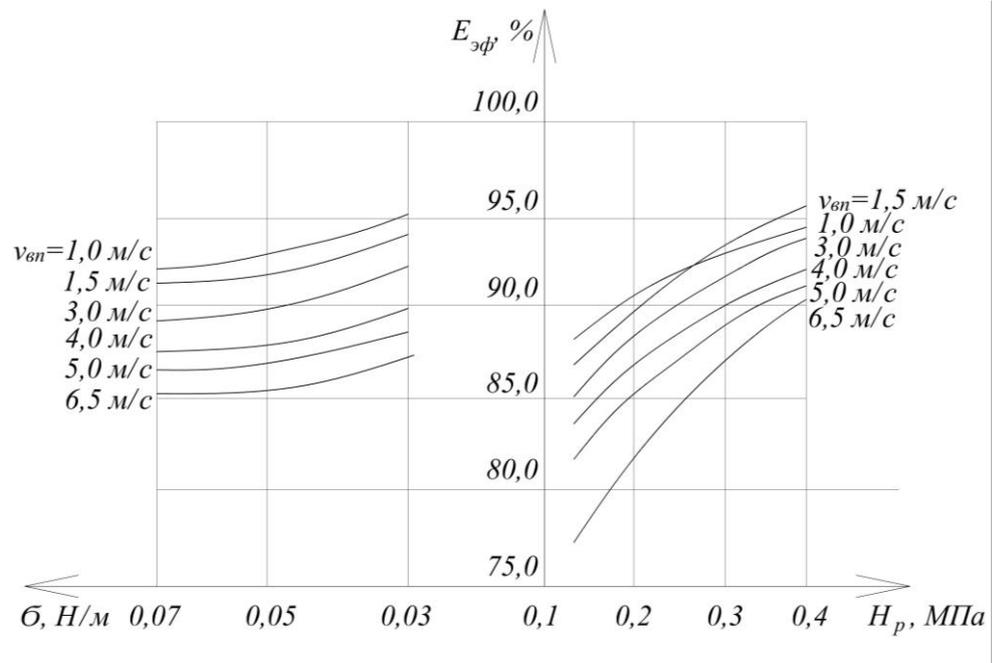
а)



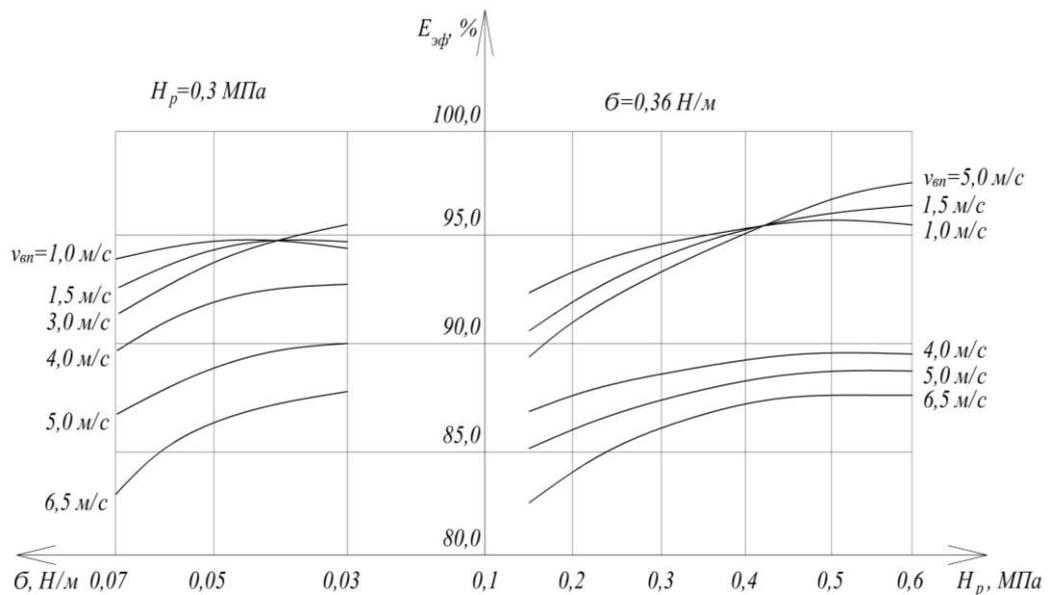
б)

а) – спутное движение; б) – встречное движение

Рисунок 3.4 – Расчётные значения эффективности процесса очистки воздуха от пылевых частиц пенным аэрозолем с учетом взаимонаправленности движения частиц пыли и пузырьков пены в активной зоне очистки аспирационной сети ленточного транспортера (пыль щебня)



а)



б)

а) – спутное движение; б) – встречное движение

Рисунок 3.5 – Расчётные значения эффективности процесса очистки воздуха от пылевых частиц пенным аэрозолем с учетом взаимонаправленности движения частиц пыли и пузырьков пены в активной зоне очистки аспирационной сети ленточного транспортёра (пыль песка)

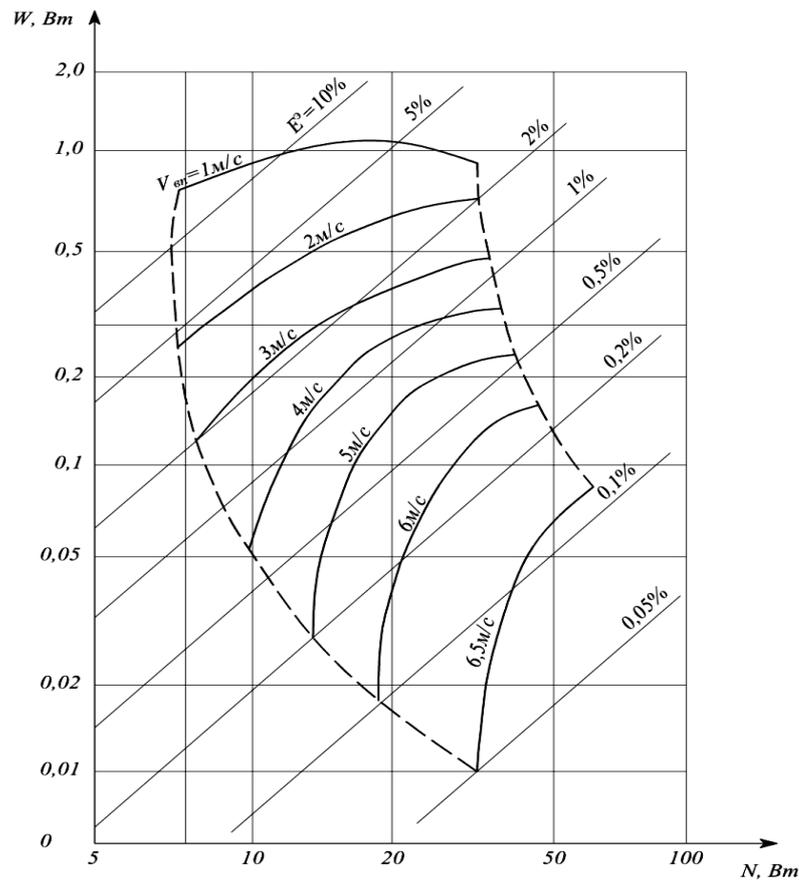


Рисунок 3.6 – Расчётные зависимости энергоёмкостного показателя процесса очистки воздуха от пылевых частиц пенным аэрозодем при их встречном движении в активной зоне очистки аспирационной сети ленточного транспортёра (пыль щебня)

пылевых частиц и пузырьков пены, хотя при относительной скорости их движения, превышающей 6,5 м/с, значения энергоёмкостного показателя резко уменьшаются, и энергетическая экономичность организации такого вида движения становится достаточно низкой. При этом необходимо отметить, что значения энергоёмкостного показателя при очистке воздуха от гидрофобной пыли (пыли щебня) значительно выше, чем от гидрофильной (пыли песка).

Рассчитанные для процесса принудительного рассеивания в атмосфере пылевых частиц пенным способом значения энергоёмкостного показателя и эффективности показали, что использование пенного слоя в данном случае не имеет смысла, так как не обеспечивает достижение эффекта рассеивания

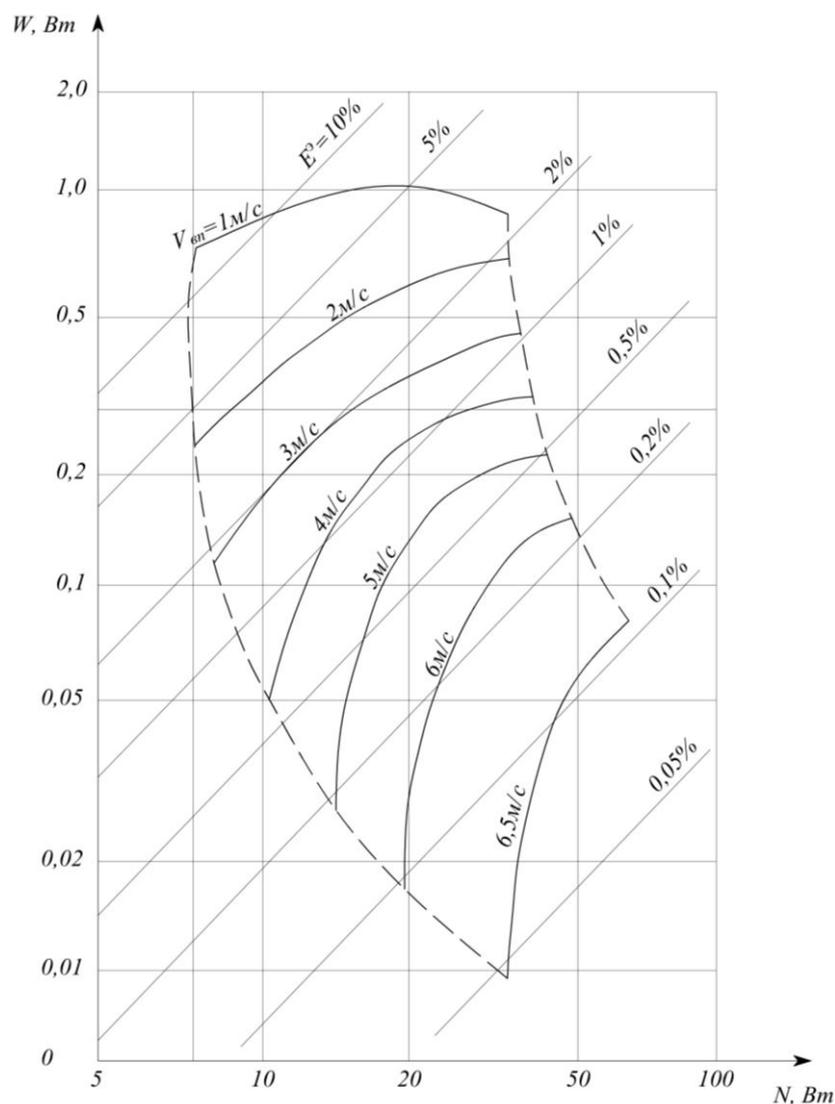


Рисунок 3.7 – Расчётные зависимости энергоёмкостного показателя процесса очистки воздуха от пылевых частиц пенным аэрозолем при их встречном движении в активной зоне очистки аспирационной сети ленточного транспортёра (пыль песка)

частиц пыли из-за того, что непосредственно в сечении устья источника выброса пылевых частиц происходит практически полное разрушение пенного слоя под воздействием факела выброса.

При этом вполне оправдывает себя с позиций обеспечения экологической эффективности применение пенного аэрозоля, подаваемого спутно пылевоздушному потоку, выбрасываемому из устья источника выброса.

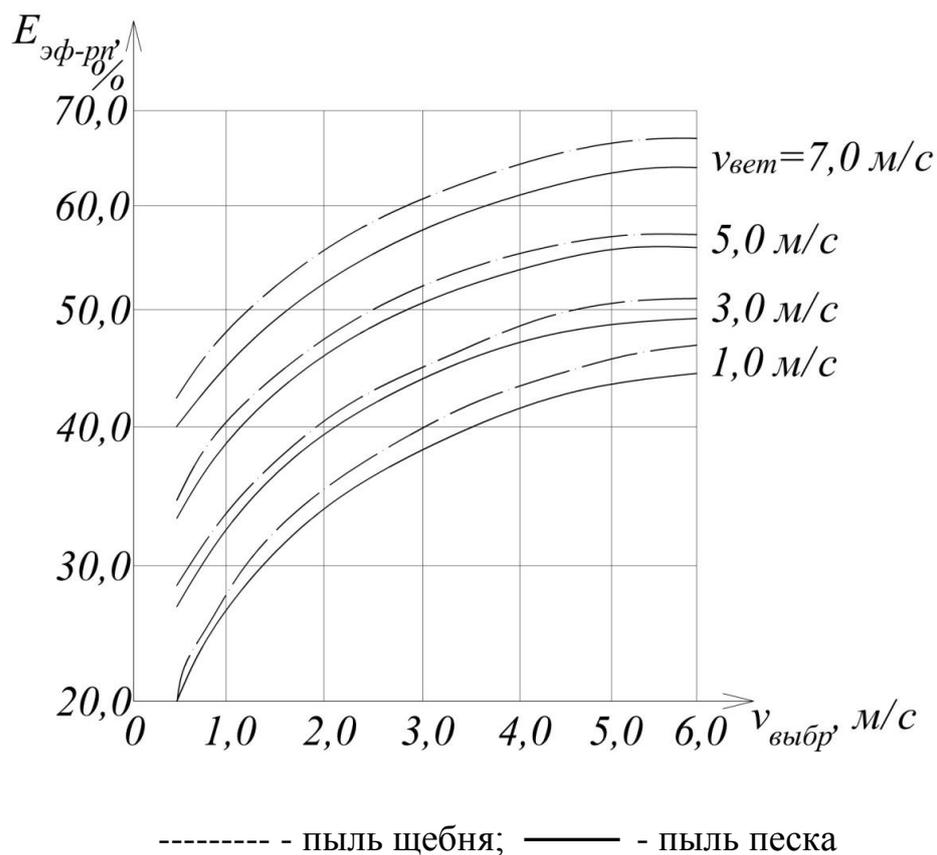
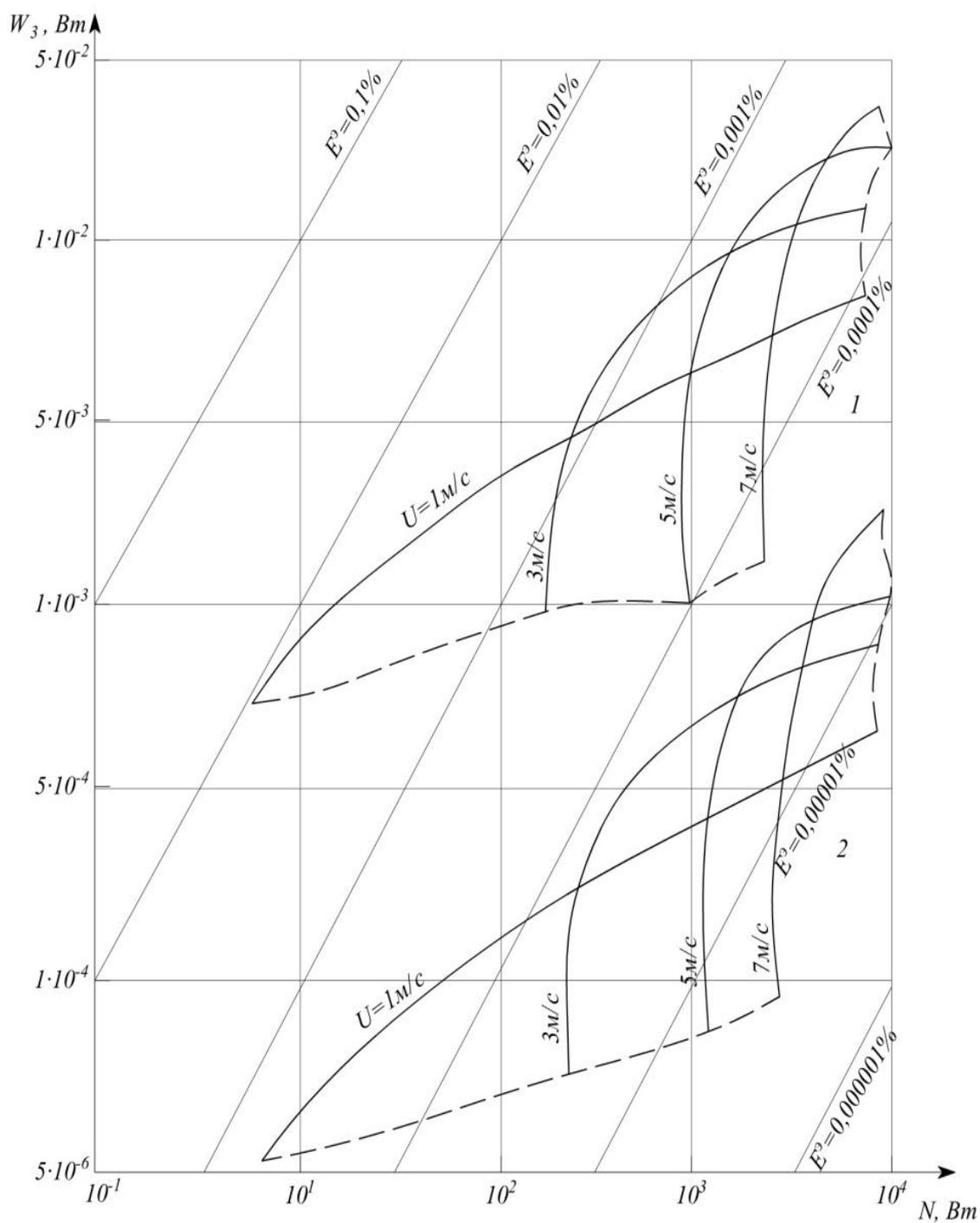


Рисунок 3.8 – Расчётные значения эффективности процесса принудительного рассеивания пыли пенным аэрозолем в приземном слое атмосферы от источника выброса высотой 12 м, диаметром устья 315 мм

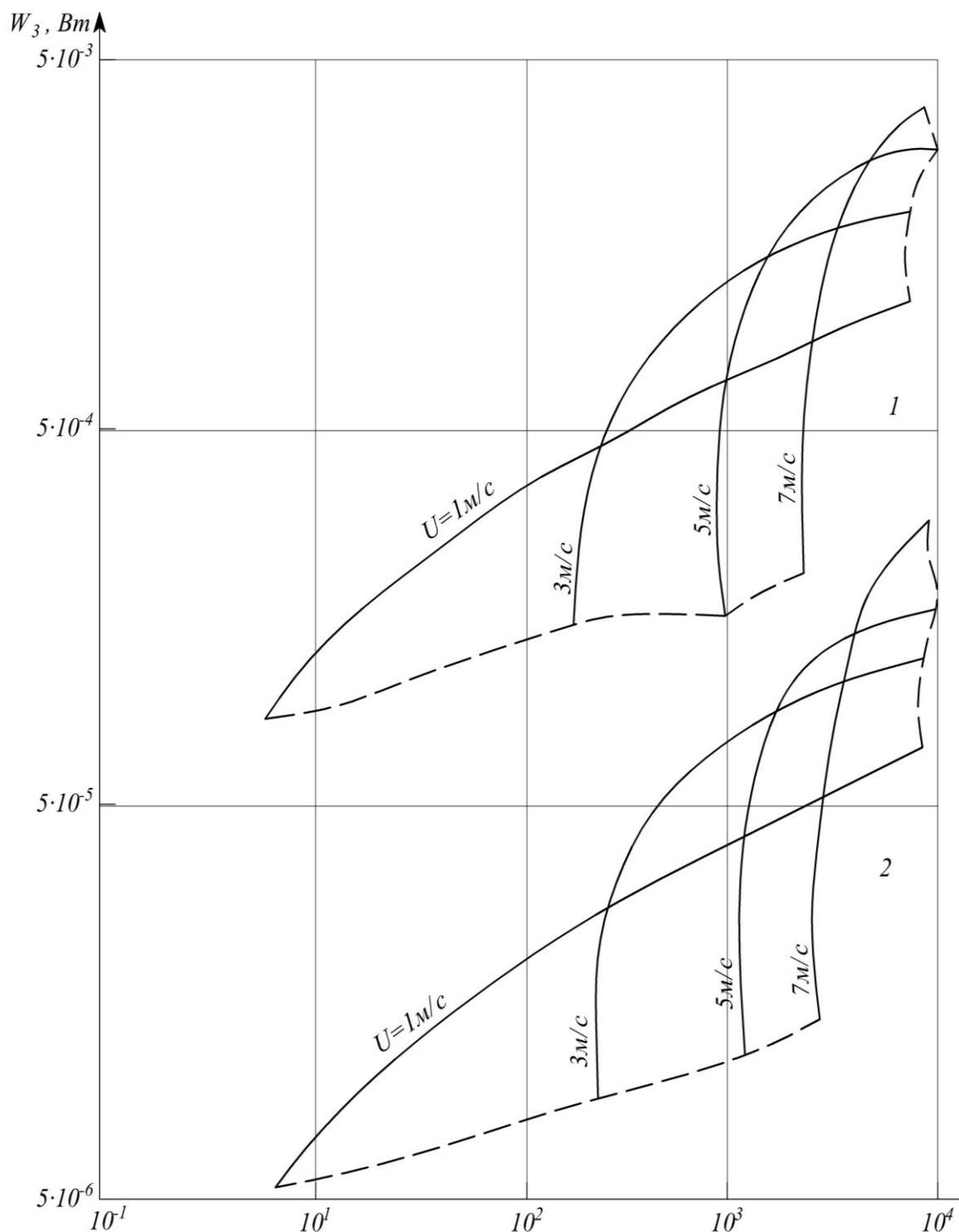
Зависимость эффективности принудительного рассеивания пыли от начальной скорости выброса может быть объяснена непосредственным увеличением кинетической энергии пенных пузырьков, что обеспечивает ускоренное удаление пылепенного аэрозоля от источника выброса.

Увеличение среднего диаметра пузырьков пены, а, следовательно, их средней массы приводит к возникновению на первой стадии реализации процесса принудительного рассеивания двух эффектов: с одной стороны, увеличению плавучести агрегата (пузырька с захваченной частицей), когда реализуется дополнительный запас кинетической энергии, способствующий интенсификации удаления частиц пыли от источника выброса на первой стадии процесса рассеивания, и, с другой стороны, увеличению эффекта торможения за счет возрастания сил лобового сопротивления.



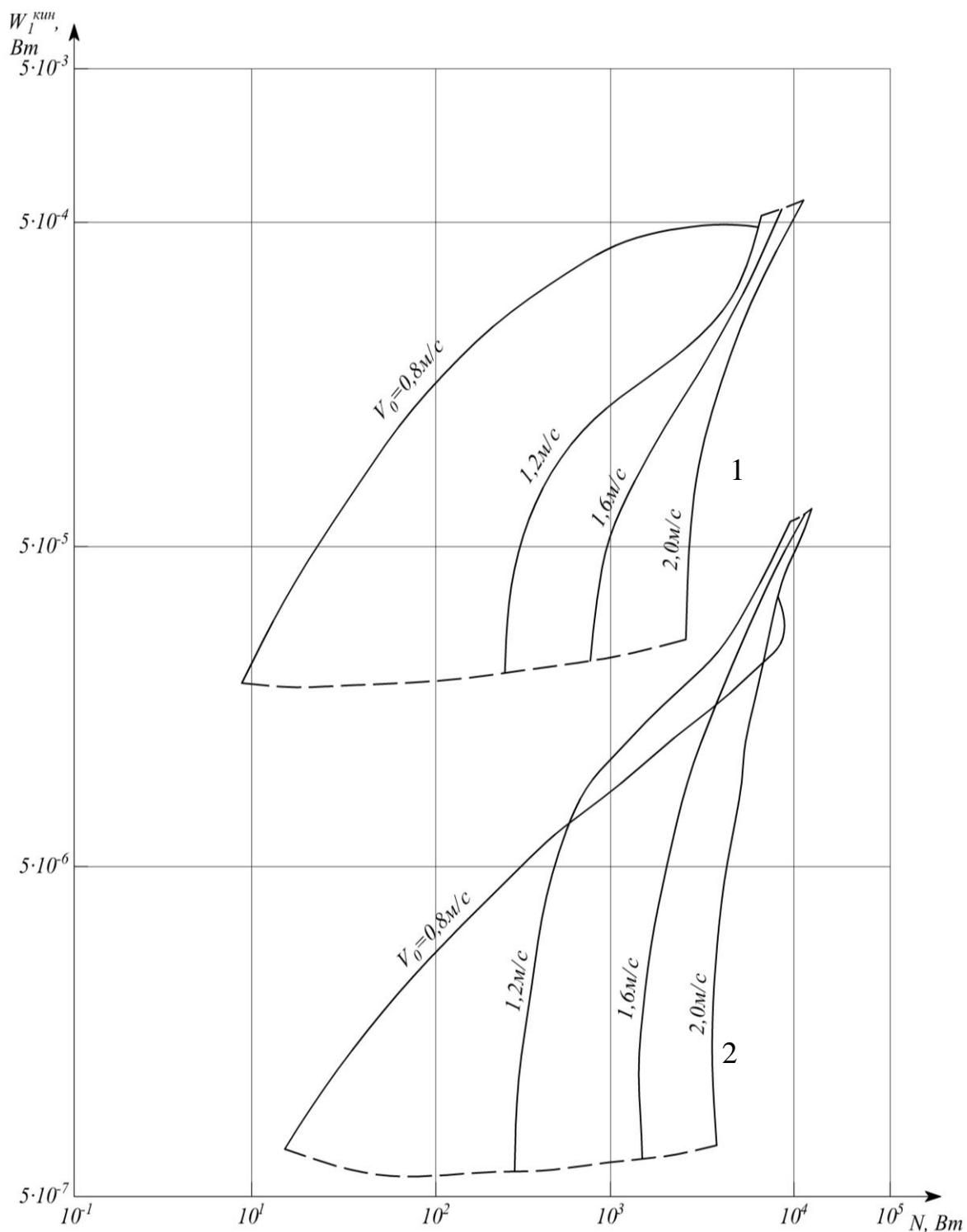
1-пыль песка, 2 - пыль щебня

Рисунок 3.9 – Расчётные зависимости энергоёмкостного показателя процесса принудительного рассеивания пыли пенным аэрозолем в приземном слое атмосферы от источника выброса высотой 12 м, диаметром устья 315 мм



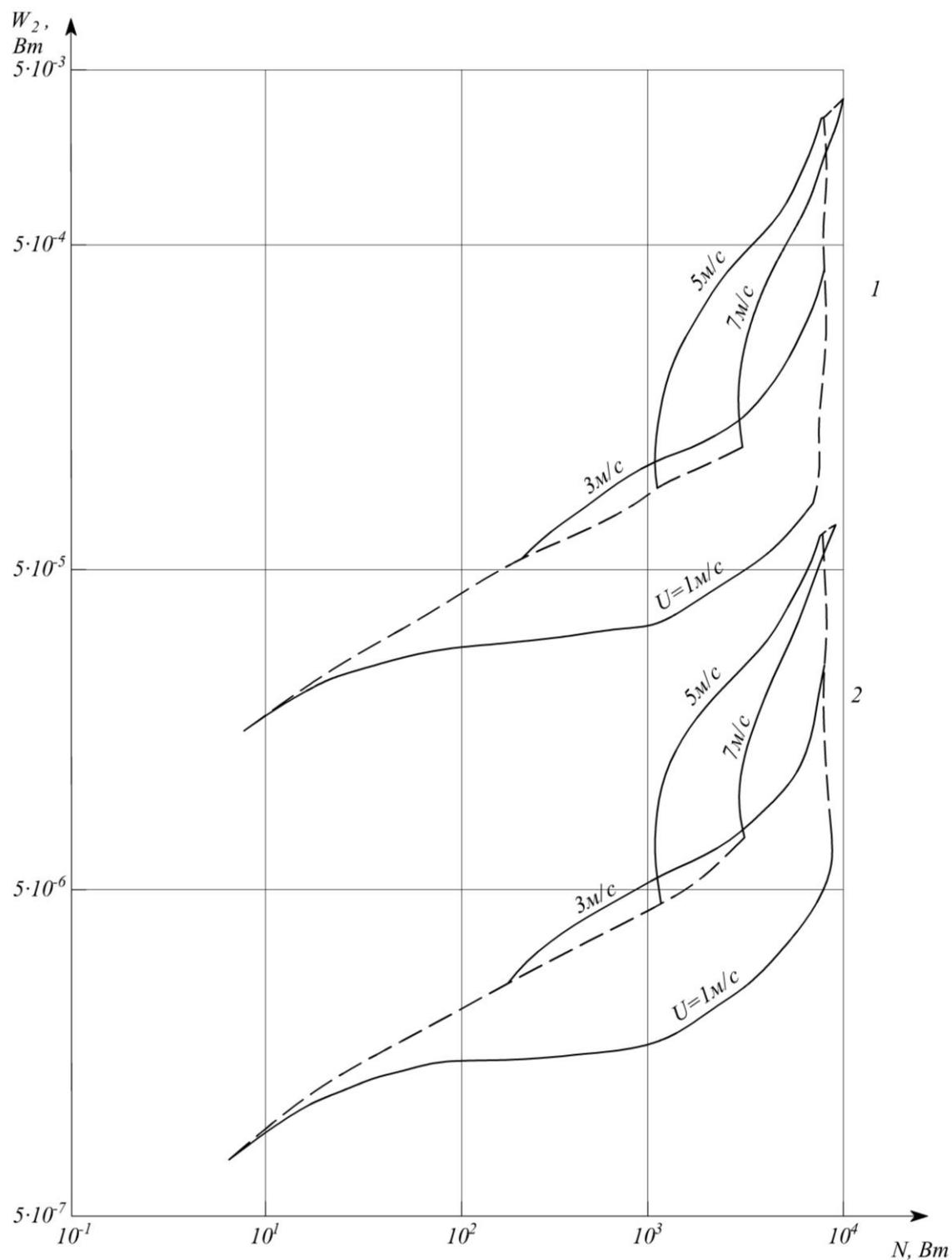
1 – пыль щебня; 2 – пыль песка

Рисунок 3.10 – Расчётные значения энергоёмкостного показателя процесса принудительного рассеивания пыли пенным аэрозолем в приземном слое атмосферы от источника выброса высотой 12 м, диаметром устья 315 мм в зависимости от энергии гравитационного осаждения пылевых частиц



1 – пыль щебня; 2 – пыль песка

Рисунок 3.11 - Расчётные значения энергоёмкостного показателя процесса принудительного рассеивания пыли пенным аэрозолем в приземном слое атмосферы от источника выброса высотой 12 м, диаметром устья 315 мм в зависимости от кинетической энергии пылевых частиц



1 – пыль щебня; 2 – пыль песка

Рисунок 3.12 – Расчётные значения энергоёмкостного показателя процесса принудительного рассеивания пыли пенным аэрозолем в приземном слое атмосферы от источника выброса высотой 12 м, диаметром устья 315 мм в зависимости от энергии турбулентного перемешивания

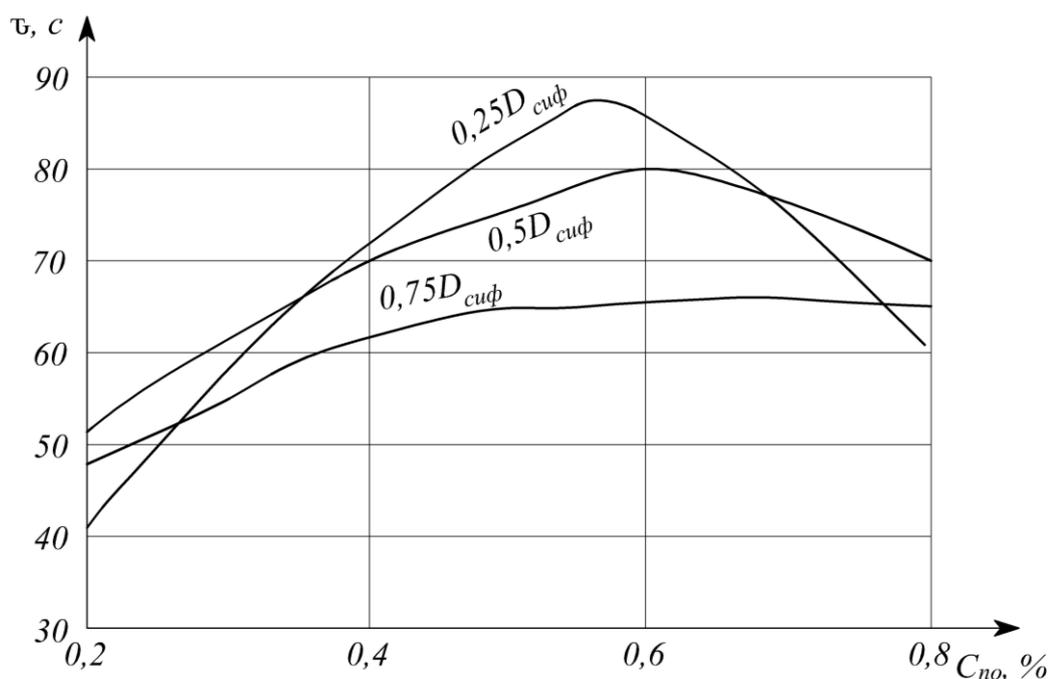


Рисунок 3.13 – Зависимость стойкости пены от концентрации раствора пенообразователя и соотношения диаметров горловины и сифонной части сетчатого пеногенератора

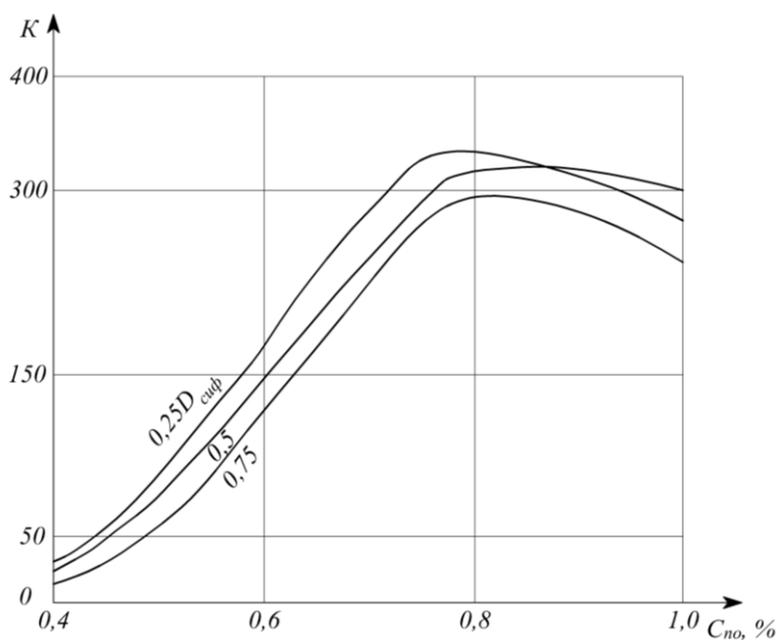


Рисунок 3.14 – Зависимость кратности пены от концентрации раствора пенообразователя и соотношения диаметров горловины и сифонной части сетчатого пеногенератора

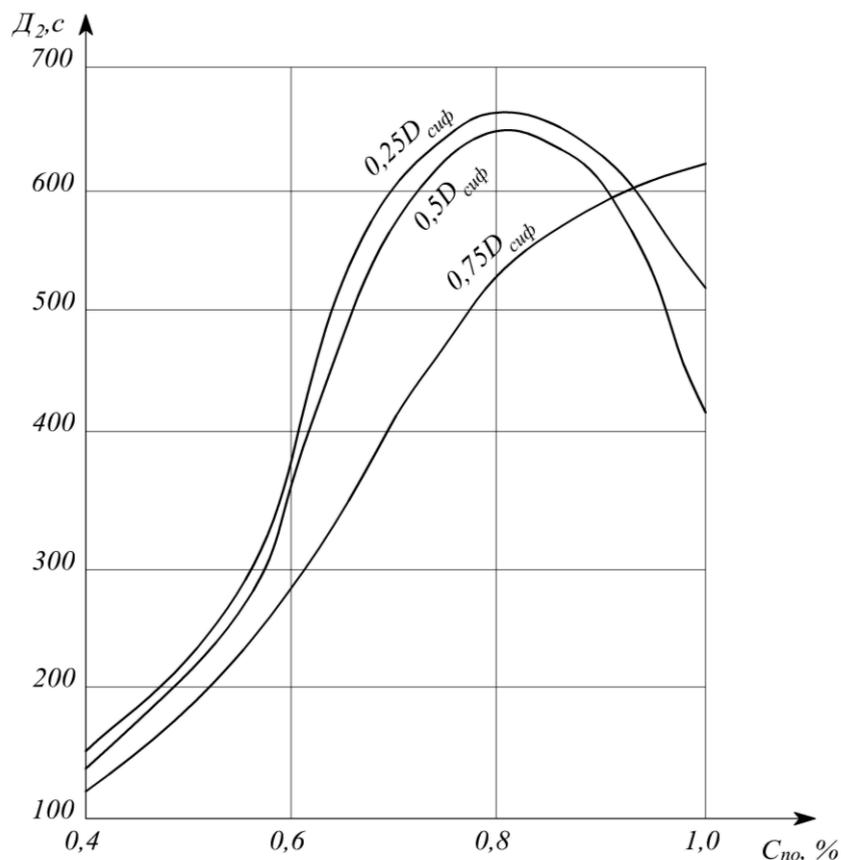


Рисунок 3.15 – Зависимость второго критерия пенообразования от концентрации раствора пенообразователя и соотношения диаметров горловины и сифонной части сетчатого пеногенератора

Кроме того, увеличение среднего диаметра пузырьков пены способствует на второй стадии реализации процесса принудительного рассеивания пылевых частиц увеличению энергетической экономичности процесса принудительного рассеивания за счет проявления в большей степени коагуляционных эффектов и уменьшения удельных энергетических затрат на коагуляцию пылевых частиц и пузырьков пены. А увеличение среднего диаметра пузырьков пены приводит на третьей стадии реализации процесса принудительного рассеивания пылевых частиц в атмосфере к ускорению гравитационного осаждения пылевых частиц.

## Выводы

В результате выполненного этапа исследований для производственных условий заводов ЖБИиК:

- для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций получены функциональные зависимости, которые описывают основные характеристические параметры пены и пылевого аэрозоля на этапах пылезадержания и очистки воздуха от пылевых частиц на основе определения взаимных связей между энергетическими характеристиками процесса обеспыливания и физико-химическими свойствами пены;

- для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций установлены зависимости, раскрывающие взаимную связь между физико-химическими характеристиками взвешенных в воздухе частиц пыли и пенного аэрозолей (плотностью материала пылевых частиц, их средним медианным диаметром, средним диаметром пенного пузырька, средней толщиной плёнки пенного пузырька, плотностью раствора пенообразователя, критических значений скорости встречи частиц с пузырьками, времени их динамического соприкосновения, упругого взаимодействия, смачивания и других) и параметрами, характеризующими воздушную среду (результатирующей скоростью потока, средней температурой, градиентом температуры, плотностью и динамической вязкостью воздуха) на этапе рассеивания пыли;

- установлены зависимости эффективности обеспыливания пеной от параметров, характеризующих свойства пылевого аэрозоля, пены и воздушного потока, а также особенностей их взаимодействия с учетом условий разрушения пены;

- выполнено математическое описание основных характеристик процесса рассеивания пыли в воздухе пенным способом на основе установления функциональных зависимостей экологической эффективности и энергоёмкостного показателя от свойств взвешенных в воздухе пылевых частиц,

пенного аэрозоля и воздушной среды в зоне источника выброса пыли в воздушный бассейн городской среды;

- получены зависимости энергоёмкостного показателя процесса обеспыливания пеной от основных технологических параметров получения пены и параметров её взаимодействия с пылью для рассматриваемых производственно-технологических условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций;

- на основе получения функциональных зависимостей результирующих параметров процесса пылеподавления разработана методика оценки и выбора высокоэффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной, использующая в качестве критериев оптимизации эффективность и энергоёмкостный показатель, позволяющая также выполнять расчёт рациональных параметров пенного способа для конкретных источников пылевыделения на заводах по изготовлению железобетонных конструкций с учетом обеспечения ПДК пыли в воздухе рабочих зон и приземном слое атмосферы городских территорий;

- разработаны программа «GEEPSUOR» для ЭВМ и соответствующий алгоритм для практической реализации методики принятия решения по выбору высокоэффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной;

- анализ полученных с помощью программы «GEEPSUOR» результатов математического моделирования каждого этапа (пылезадержания, очистки воздуха от пыли и принудительного рассеивания пыли в атмосфере) процесса обеспыливания воздуха для различного пылеобразующего и пылевыделяющего производственного оборудования предприятий строительной индустрии подтверждает вывод о том, что выбор оптимальных по эффективности и энергетической экономичности способа организации и технологии обеспыливания пеной непосредственно связан и определяется характеристиками источника образования и выделения пыли, свойствами пылевого материала и пылевых частиц, характеристиками воздуха рабочей зоны и воздушного бассейна промышленной площадки, а также свойствами пенообразователя и раствора на

его основе, и характеристиками технологии применения пены.

Оценка возможности практического использования разработанной на основе математического описания методики принятия решения по выбору высокоэффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной может быть выполнена на основе проведения экспериментальных исследований, с последующим сопоставлением результатов экспериментов и приведённых выше теоретических результатов, полученных на основе расчётов.

## **4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ПЕНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СЫРЬЯ И ВОЗДУХА**

Целью выполненных нами экспериментальных исследований являлась практическая проверка результатов теоретических исследований и оценка возможности использования разработанных нами теоретических положений, а также математического описания и методики принятия решения по выбору высокоэффективных и энергетически экономичных технологий пылеподавления пеной в практических расчётах, осуществляя проектирование, реконструкцию и эксплуатацию систем борьбы с промышленной пылью предприятий строительной отрасли, в том числе заводов ЖБИиК [150, 152, 154, 155, 156, 158].

### **4.1 Описание экспериментального стенда**

Экспериментальные исследования проводились нами на разработанном и смонтированном в лаборатории кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» экспериментальном стенде (рисунок 4.1).

Стенд состоит (рисунок 4.2) из узла перегрузки сыпучих материалов, включающего подающий ленточный транспортёр 1, принимающий ленточный транспортёр 2, загрузочный бункер 3, разгрузочный бункер 4, пеногенератор 5, соединённый посредством воздуховода 6 с воздуходувкой 7, расходный бак с раствором пенообразователя 8, насосную установку 9, трубопровод 10 подачи раствора пенообразователя к пеногенератору 5 с принудительной подачей воздуха, аспирационное укрытие 11 с аспирационным патрубком 12, активную зону 13 протекания процесса очистки воздуха от пылевых частиц, трубопровод 14, подающий раствор пенообразователя в активную зону очистки, шламосборник



Рисунок 4.1 – Общий вид экспериментального стенда

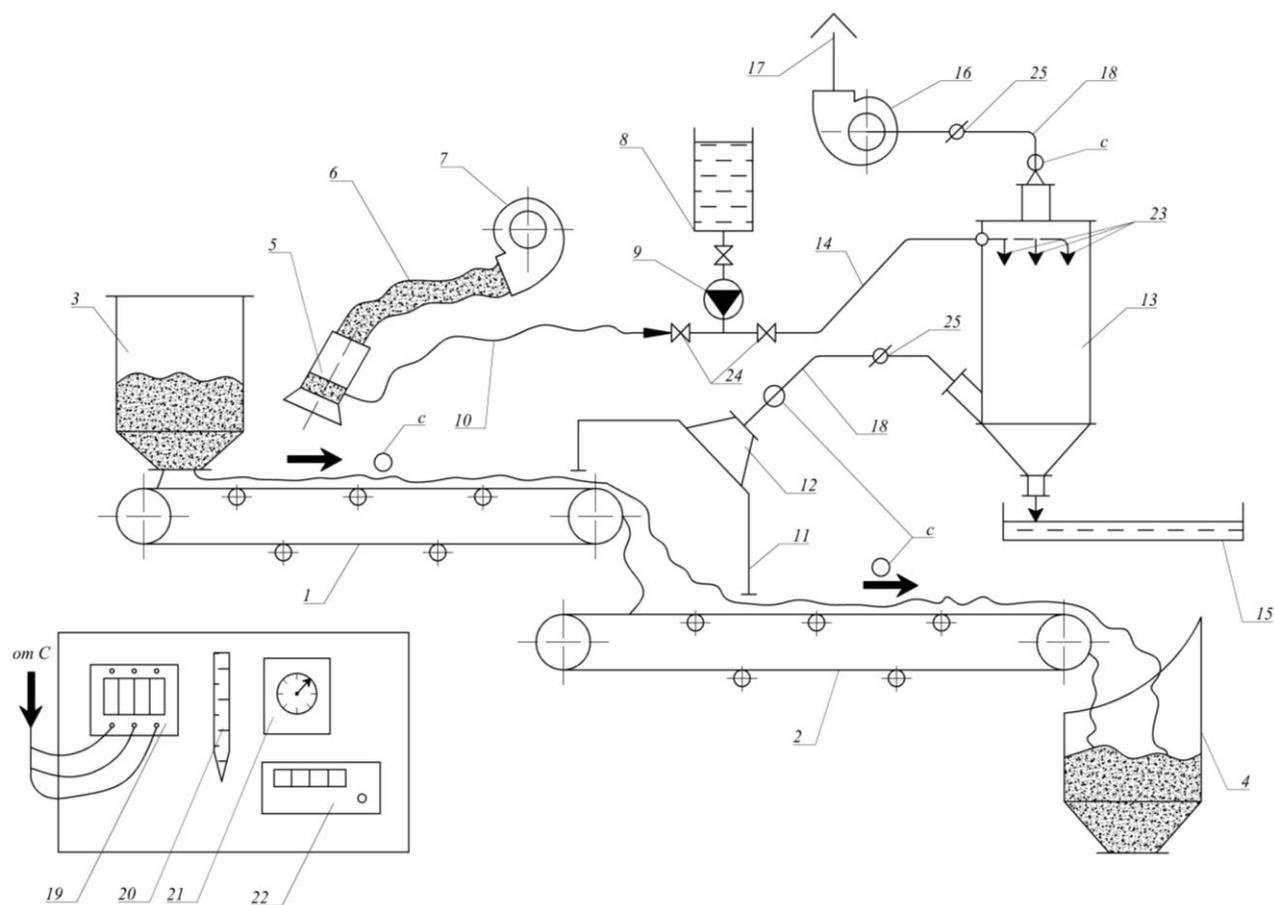


Рисунок 4.2 – Схема экспериментального стенда

15, вентилятор 16 высокого давления, выхлопной патрубок 17 с зонтом-обтекателем, воздуховоды 18, а также приборный блок, состоящий из электроасpirатора 19, термометра 20, барометра-анероида 21, электронного секундомера 22, и вспомогательные устройства: оросители 23, а также запорно-регулирующую арматуру 24 и 25. Точки замеров концентрации пыли (места установки аллонжей открытого или закрытого типа с фильтрами АФА-10) обозначены на схеме как С.

Узел перегрузки сыпучих материалов, в качестве которых нами использованы песок, щебень, керамзит и перлит, выполнен в виде геометрической модели работающих подающего ленточного транспортёра 1 и принимающего ленточного транспортёра 2 соответственно длиной 1,55 м и 1,38 м, каждый с шириной ленты 0,25 м. Благодаря конструкции стенда обеспечивается возможность изменения скоростей движения ленты транспортёров в диапазоне от 0,1 до 0,4 м/с, осуществляя при этом регулирование перепада высот между транспортёрами путём отклонения транспортёра 1 от горизонтального положения на угол от 0 град до 20 град, а также за счет перемещения транспортёра 2 по вертикальным направляющим (стойкам).

Сетчатым пеногенератором 5 с принудительной подачей воздуха обеспечивалось получение пены на стенде и её поступление в любые зоны транспортёров. Самотеком или при помощи насосной установки 9 пенообразующий раствор из расходного бака 8 подавался на сетку пеногенератора 5.

С помощью аспирационного укрытия 11 с аспирационным патрубком 12, установленным непосредственно на узле перегрузки перемещаемого материала, происходит поступление запыленного воздуха в активную зону 13 осуществления процесса пылеочистки.

Для осуществления отбора проб запыленного воздушного потока в выбранных точках использовали аллонжи, в которые устанавливали фильтры АФА-10 и ротаметры, встроенные в электроасpirатор 19 (модель 822). Кроме этого измерения производились с использованием следующих контрольно-

измерительных средств и приборов: термометра 20, барометра-анероида 21, электронного секундомера 22, дифференциального манометра ММ-15, гравиметрических весов 2-го класса точности WA-33, микроскопа МИН-8.

#### 4.2. Описание методики проведения экспериментов

Экспериментальные исследования состояли из двух этапов: предварительного и основного.

Цель предварительного этапа исследований состояла в определении основных параметров образуемой пены (кратности, стойкости) и дисперсного состава пылевого материала.

Для проведения эксперимента нами выбраны наиболее пневмокониозоопасные виды пыли, образующейся на предприятиях строительной отрасли: пыль песка, щебня, керамзита и перлита.

С целью определения дисперсного состава пылевых материалов нами использованы методы ситового анализа, которые основаны на применении аппарата, определяющего гранулометрический состав и микроскопировании по методике [79] на основе приготовления образцов путём обработки ксилолом аналитических фильтров АФА-10. Микроскоп МИН-8 использовали для определения размеров частиц по полусумме длины и ширины частиц. После чего, полученный счётным методом дисперсный состав пыли, пересчитывался на соотношение фракций по массе частиц (приложение Б).

Пену получали из растворов пенообразователей «Сампо», ОП-7 и ПО-12. Величину кратности и стойкости пены определяли на установке Арбузова-Гребенщикова по методике [194], используя растворы пенообразователя с концентрацией от 0,1% до 5,0%. Основные физико-химические свойства получаемого раствора пенообразователя приведены в приложении В.

Целью основного эксперимента являлась практическая проверка результатов теоретических исследований и оценка возможности практического

использования разработанных нами теоретических положений, а также математического описания и методики принятия решения по выбору высокоэффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пенным способом.

Концентрацию пылевых частиц в воздушной среде определяли при помощи гравиметрического метода, используя аспирационный способ отбора проб [88], используя весы WA-33 2-го класса точности. При замерах аэродинамических характеристик использовался микроанометр в соответствии с требованиями [195].

Концентрацию пыли в воздухе  $C_n$ , мг/м<sup>3</sup>, рассчитывали по формуле:

$$C_{n(k)} = (m_2 - m_1) / Q_{асп} \cdot \tau_{изм}, \text{ мг/м}^3, \quad (4.1)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – соответственно масса фильтра чистого (до замера) и фильтра запылённого (после замера), мг;  $Q_{асп}$  – расход аспирируемого воздуха, задаваемый в опытах равным  $3,33 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с;  $\tau_{изм}$  – время замера, задаваемое в опытах равным 60 с.

Эффективность процессов пылезадержания и очистки воздуха от пыли рассчитывали по формуле:

$$E_{эф} = (C_n - C_k) \cdot 100 / C_n, \quad (4.2)$$

где  $C_n$ ,  $C_k$  – концентрация пыли в заданной точке воздушной среды (рабочей зоны) соответственно до и после реализации процесса пылезадержания, либо очистки воздуха от пыли, мг/м<sup>3</sup>.

Удельную энергию, затрачиваемую на создание пенного слоя и реализацию пенного способа, определяли соответственно по формулам:

- для процесса пылезадержания:

$$N_{nz} = 9,8 \cdot (H_{в-nz} \cdot Q_{в-nz} + H_{p-nz} \cdot Q_{p-nz}), \text{ Вт}; \quad (4.3)$$

- для процесса очистки воздуха от пыли:

$$N_{из} = 9,8 \cdot (H_{en} - H_{nm}) \cdot Q_{в-о} + H_{p-о} \cdot Q_{p-о} \text{ , Вт .} \quad (4.4)$$

При проведении эксперимента производился запуск системы транспортёров 1 и 2, одновременно из бункера 3 обеспечивали равномерную и непрерывную подачу сыпучего пылеобразующего и пылевывделяющего материала. Пену, заранее полученную при помощи сетчатого пеногенератора 5 из растворов пенообразователей «Сампо», ОП-7 и ПО-12 с известной и фиксированной концентрацией, которая была выбрана в ходе проведения предварительных экспериментальных исследований, подавали на пылящую поверхность перемещаемого материала на начальный участок подающего транспортёра 1, осуществляя процесс ее задержания.

Проведение основного этапа эксперимента с целью определения эффективности и энергетических затрат процесса пылездержания заключался в установлении и измерении следующих характеристик для соответствующих диапазонов значений:

- скорость движения ленты транспортёров  $v_{mp} = 0,1-0,4$  м/с;
- концентрацию раствора пенообразователя  $C_{но} = 0,1-5,0$  % ;
- высоту слоя пены, покрывающей поверхность транспортируемого пылеобразующего и пылевывделяющего материала  $h_{nc} = 0,08-0,15$  м;
- перепад высот между транспортёрами на узле перегрузки  $H_{nep} = 0,3-0,8$  м;
- кратность пены  $K_n = 150-350$ ;
- стойкость пены  $\tau_n = 700-2400$  с;
- массу фильтров до и после измерения  $m_{\phi} = (20-1000)$  мг.

Результаты измерений и расчетных значений эффективности, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований процесса пылездержания, выборочно представлены в приложении Г.

При проведении экспериментальных исследований эффективности и энергетических затрат процесса очистки воздуха от пыли устанавливали и

измеряли следующие характеристики в соответствующих диапазонах значений:

- среднюю скорость пылевоздушного потока в активной зоне очистки  $v_{вп-о} = 2,0-10,5$  м/с;
- концентрацию пенообразователя в растворе  $C_{но} = 0,1-5,0$  %;
- массу фильтров до и после измерения  $m_{ф} = (20-1000)$  мг;
- кратность пены  $K_n = 150-350$ ;
- стойкость пены  $\tau_n = 600-2400$  с.

Некоторые примеры результатов измерений и расчётных значений эффективности, полученных в ходе экспериментальных исследований процесса очистки воздуха от пыли, представлены в приложении Д.

### 4.3 Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований

Подробный анализ полученных экспериментальных данных позволил заключить, что они явились качественным подтверждением выполненных теоретических исследований и математического описания пенного способа обеспыливания воздуха, отражающего взаимосвязь физико-химических, гидро- и аэродинамических факторов.

Для количественного подтверждения результатов теоретических исследований необходимо выявить взаимосвязи между исследуемыми параметрами, подлежащими непосредственному определению. При исследовании процесса обеспыливания воздуха пеной с условием обеспечения инвариантности его динамических, статических и геометрических параметров, его описание возможно с помощью теории подобия [196].

Получение эмпирических функциональных зависимостей между основными параметрами пенного способа на основе применения аппарата теории подобия позволяет одновременно выполнить статистическую обработку полученных экспериментальных данных и однозначно оценить результаты экспериментов,

выделив и установив степень влияния основных факторов процесса на его выходные (результатирующие) характеристики с учётом их взаимосвязи.

Известно, для практического применения теории подобия в экспериментальных исследованиях различных процессов используется три теоремы подобия [196]:

- теорема Ньютона-Бертрана, основанная на применении индикатора подобия, который показывает, что процедура выбора констант подобия ограничена тем, что при выполнении условия подобия двух систем можно менять только три величины;
- теорема Бекингема-Федермана, отвечающая на вопрос, каким образом производить обработку полученных в ходе эксперимента данных или в какой форме может быть получено решение системы дифференциальных уравнений, которые описывают рассматриваемый процесс, применяя методы теории подобия;
- теорема Кирпичёва-Гухмана, позволяющая сформулировать необходимые и достаточные условия для подобия процессов или явлений.

Возможно представление в общем виде зависимости между физическими величинами и геометрическими параметрами, характеризующими процесс. Вид этой зависимости определяют, проведя анализ размерностей основных физических величин, которые определяют характер протекания рассматриваемого процесса. Метод основан на применении  $\pi$ -теоремы [196], которая является частным случаем теоремы подобия Бекингема-Федермана.

Следует отметить, что с помощью  $\pi$ -теоремы, или метода анализа размерностей, возможно нахождение связи не между отдельными переменными, а между некоторыми их безразмерными соотношениями ( $\pi$ -комплексами), которые составлены из физических величин с определённой, выраженной с помощью основных единиц измерения, размерностью.

Результаты проделанных нами теоретических и экспериментальных исследований позволили заключить, что значения эффективности процесса и его энергоёмкостного показателя достаточно в полной мере характеризуют процесс пылеподавления на основе применения гидродинамического метода пенным

способом. Таким образом, с целью полного определения процесса пылеподавления пеной зададим:

- геометрические характеристики дисперсных систем, участвующих в рассматриваемом процессе;
- статические параметры пены в виде слоя, либо аэрозоля;
- динамическую обстановку организации процесса.

При этом делаем допущение, что процесс является установившимся и относится к изотермической системе.

Для того, чтобы установить связь между линейными характеристиками процесса необходимо задать в качестве независимой переменной, определяющей геометрические свойства системы, один характерный линейный размер [197].

Так, например, для процесса пылезadržания задаем высоту пенного слоя над источником образования и выделения пыли  $h_{nn}=h_a$ . Диаметр пузырьков пены  $d_{nn}$  в качестве независимой переменной не вводим, так как он вполне определяется условиями гидродинамического подобия образования и отделения пузырьков от поверхности.

Динамическая обстановка процесса определяется равновесием четырех сил: внешнего давления, подъёмных сил, а также сил инерции и трения. Из этих четырех сил, находящихся в равновесии, достаточно задать три [197]. Задаём динамическую обстановку через трение, инерцию и подъёмные силы:

- силы трения определяются величинами коэффициента внутреннего трения (вязкости)  $\mu_v$  и скорости воздушного потока  $v_v$ , отнесенной к любой точке рассматриваемой аэро- гидродинамической системы;
- силы инерции, отнесённые к жидкой фазе, определяются величиной плотности раствора пенообразователя  $\rho_p$  и соответствующей величиной скорости  $v_{en}$ ;
- подъёмные силы также зависят от плотности раствора  $\rho_p$ , скорости воздушного потока  $v_{en}$ , ускорения силы тяжести  $g$ .

Статические характеристики системы представляют собой параметры, определяющие физико-химические свойства раствора пенообразователя, к которым в качестве независимых переменных можно отнести концентрацию  $C_{no}$

пенообразователя в водном растворе и поверхностное натяжение  $\sigma_{m-жс}$ . Однако использование этих параметров в описании процесса будет неправомерным [197] в связи со сложностью и разнообразием природы пенообразующих растворов, что означало бы изучение отдельных, индивидуальных случаев и невозможность использования данных, полученных в результате эксперимента в более широком спектре. Кроме этого, учет поверхностного натяжения, вязкости и плотности раствора является недостаточным, так как они не исчерчивают пенообразующих свойств раствора, учёт же всех физико–химических факторов, определяющих свойства раствора, практически невозможен. Эти независимые параметры оказывают совокупное влияние на величину стойкости пены  $\tau_n$ .

Так как искомой переменной является эффективность обеспыливания, то стойкость пены  $\tau_n$  зависит ещё и от свойств пылевого аэрозоля, в частности, от диаметра пылевых частиц  $d_q$ . Стойкость пены, также как и вязкость, и поверхностное натяжение, зависит от природы пенообразователя, но наиболее полно характеризует пенообразующие свойства раствора. Этим объясняется целесообразность использования стойкости как физико-химической характеристики раствора пенообразователя.

Таким образом, задаем стойкость пены  $\tau_n$ , являющуюся функцией нескольких переменных ( $C_{но}$ ,  $\sigma_{m-жс}$ ,  $d_q$  и др.), в качестве статической характеристики исследуемого процесса.

Эффективность пылеподавления, как одна из искомых выходных безразмерных характеристик процесса, может быть представлена разностью концентраций пыли в воздухе до  $C_n$  и после  $C_k$  активной зоны реализации процесса пылеподавления, отнесённой к начальной концентрации  $C_{н-пр} = 1000$  мг/м<sup>3</sup>.

Тогда, неявная зависимость между выбранными выше параметрами может быть выражена уравнением:

$$\Delta C_q = f(v_{en}, h_{nn}, \rho_p, \mu_p, \tau_n, g) \quad (4.5)$$

Так как каждую функцию можно представить в виде произведения степеней независимых переменных, то:

$$\Delta C_u = f(v_{en}^{a_1}, h_{nn}^{a_2}, \rho_p^{a_3}, \mu_p^{a_4}, \tau_n^{a_5}, g^{a_6}) \quad (4.6)$$

Выражение (4.6) представляет собой размерно однородную систему, состоящую из размерных величин, которую можно заменить безразмерной системой вида:

$$\pi = f_2(\Delta C_u, v_{en}, h_{nn}, \rho_p, \mu_p, \tau_n, g) \quad (4.7)$$

или

$$\pi = G \cdot (\Delta C_u^{x_1} v_{en}^{x_2}, h_{nn}^{x_3}, \rho_p^{x_4}, \mu_p^{x_5}, \tau_n^{x_6}, g^{x_7}), \quad (4.8)$$

где  $G$  – безразмерный коэффициент;  $x_1, x_2, \dots, x_7$  – показатели степени.

Выражая размерность всех независимых переменных, входящих в уравнение (4.8), с помощью трёх основных переменных, характеризующих массу, размер и время, объединяя показатели степени в матрицу размерностей и получая матрицу решений, составим четыре безразмерных комплекса:

$$\pi_1 = \frac{C_u}{\rho_p}; \quad \pi_2 = \left( \frac{v_{en} \cdot \rho_p \cdot h_{nn}}{\mu_p} \right)^{-1}; \quad \pi_3 = \frac{v_{en} \cdot \tau_n}{h_{nn}}; \quad \pi_4 = \frac{h_{nn} \cdot g}{v_{en}^2}.$$

Полученные безразмерные комплексы представляют собой:

- критерий Рейнольдса  $Re$  ( $\pi_2$ ), определяющий соотношение между силами инерции и силами трения в растворе пенообразователя;
- критерий  $\pi_3$ , непосредственно связанный с процессом пенообразования, являющийся по своему физическому смыслу отношением динамической и статической стойкости пены и называемый  $D_I$  первым критерием пенообразования (критерием Дьяконова);

- критерий Фруда  $Fr$  ( $\pi_4$ ), характеризующий подобие процессов, протекающих под действием силы тяжести, и выражающий соотношение сил тяжести и сил инерции в рассматриваемом процессе.

Таким образом, зависимость (4.6) в критериальной форме имеет вид:

$$\frac{\Delta C_u}{\rho_p} = f_3 \left( \frac{v_{en} \cdot h_{nn} \cdot \rho_p}{\mu_p}, \frac{v_{en} \cdot \tau_n}{h_{nn}}, \frac{h_{nn} \cdot g}{v_{en}} \right) \quad (4.9)$$

а в конечном виде может быть представлена следующим образом:

$$\frac{\Delta C_u}{\rho_p} = G_1 \cdot Re^{y_1} \cdot D_1^{y_2} \cdot Fr^{y_3} \quad (4.10)$$

Численные значения константы  $G_1$  и показателей степени  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$  в формуле (4.10) определяли путём подстановки полученных нами результатов экспериментальных исследований по методике, представленной в [198]. В результате для эффективности процесса пылезadržания получена следующая эмпирическая зависимость в безразмерной форме:

$$\frac{\Delta C_u}{\rho_p} = 0,128 \cdot Re^{0,153} \cdot D_1^{0,234} \cdot Fr^{-0,184} \quad (4.11)$$

Применяя метод анализа размерностей к описанию удельной затраченной энергии при реализации процесса пылезadržания, нами получена соответствующая эмпирическая зависимость в безразмерной форме:

$$\frac{N_{nz}}{\rho_p \cdot v_{en}^3 \cdot d_{a-nz}^2} = 2,346 \cdot We^{-0,301} \cdot Fr^{-0,164} \cdot \left( \frac{h_{nn}}{d_{a-nz}} \right)^{0,6} \quad (4.12)$$

Учитывая, что безразмерный комплекс  $(N_{nz} / \rho_p \cdot v_{en}^3 \cdot d_{a-nz}^2)$  в формуле (4.11) представляет собой критерий мощности или критерий Эйлера  $K_N$  для процессов перемешивания, окончательно для удельной затраченной энергии при реализации пылезadržания получим эмпирическую зависимость в безразмерной форме:

$$K_N = 2,346 \cdot We^{-0,301} \cdot Fr^{-0,164} \cdot \left( \frac{h_{nn}}{d_{a-nz}} \right)^{0,6} \quad (4.13)$$

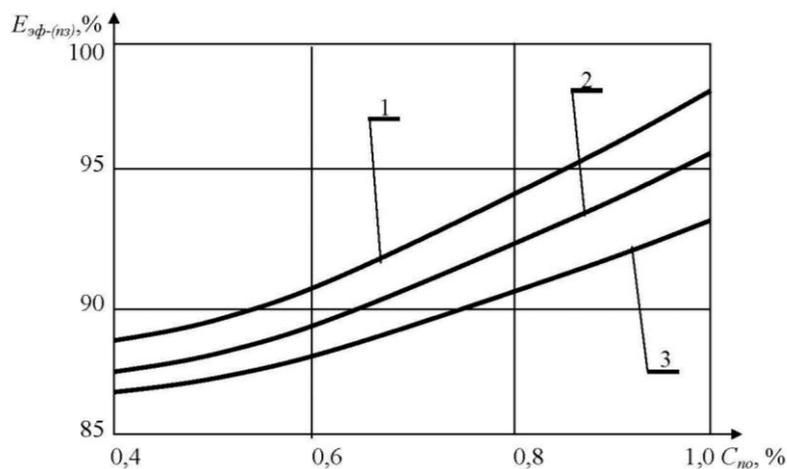
На основе использования описанного выше подхода нами получены эмпирические зависимости эффективности и удельной затраченной энергии для процесса очистки воздуха от пыли:

$$\frac{\Delta C_u}{\rho_p} = 1,482 \cdot Re^{2,714} \cdot D_1^{0,851} \cdot Fr^{-0,112} \quad (4.14)$$

и

$$K_N = 2,346 \cdot We^{-0,715} \cdot Fr^{-1,357} \cdot \left( \frac{l_a}{d_{a-o}} \right)^{1,214} \quad (4.15)$$

Таким образом, полученные обработкой экспериментальных данных методом теории подобия критериальные эмпирические зависимости (4.11), (4.13), (4.14) и (4.15) как качественно, так и количественно подтверждают взаимосвязь физико–химических и аэро- гидродинамических параметров процесса взаимодействия пены с пылевоздушным потоком, а также вполне приемлемы для сопоставления с результатами теоретических исследований и оценки степени их достоверности. В качестве примера на рисунке 4.3 представлены эмпирические зависимости эффективности пылезадержания от концентрации раствора пенообразователя  $C_{no}$  и высоты пенного слоя  $h_{nc}$ .



1 – высота пенного слоя  $h_{nc} = 0,15$  м; 2 – высота пенного слоя  $h_{nc} = 0,10$  м; 3 – высота пенного слоя  $h_{nc} = 0,08$  м;

Рисунок 4.3 – Зависимость эффективности пылезадержания от концентрации раствора пенообразователя  $C_{no}$  и высоты пенного слоя  $h_{nc}$

#### 4.4 Сопоставление результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными

Оценку степени достоверности результатов теоретических исследований и возможности их практического использования для выбора оптимальной технологии обеспыливания воздуха с применением пены путём графического сопоставления теоретических и эмпирических зависимостей с учётом погрешности проводимых измерений (доверительного интервала).

Для измерений концентрации пыли в воздухе оценку погрешности выполняли в следующей последовательности:

- оценка суммарной неисключённой систематической погрешности выполнена на основе погрешностей измерений используемых средств измерений (для электроасpirатора  $\theta_A = \pm 7\%$ ; для электронного секундомера  $\theta_C = \pm 1\%$ ; для взвешивания навески пыли на весах аналитических 2-го класса точности  $\theta_H = \pm 7,1\%$ ) по формуле:

$$\theta_{\Sigma} = \sqrt{\theta_A^2 + \theta_C^2 + \theta_H^2} = \sqrt{49 + 1 + 50,41} = 10,04 \% ; \quad (4.16)$$

- оценка случайной составляющей погрешности выполнена с учётом среднеквадратичного отклонения результата наблюдений ( $S=3,4$ ), среднеквадратичного отклонения результата измерений ( $S_{\bar{c}}=1,63$ ), доверительной вероятности среднеквадратичного отклонения результата наблюдений ( $p = 0,95$ ), коэффициента Стьюдента с четырьмя степенями свободы ( $t_s = 2,776$ ) по формуле:

$$\varepsilon = t_s \cdot S_{\bar{c}} = 2,776 \cdot 1,63 = 4,52 ; \quad (4.17)$$

- оценка суммарной погрешности измерений концентрации пыли по формуле:

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma} = \frac{(\varepsilon + \theta_{\Sigma}) \cdot \sqrt{\frac{\theta_A^2}{3} + \frac{\theta_C^2}{3} + \frac{\theta_H^2}{3} + \frac{S^2}{C} \cdot 100}}{S_{\bar{C}} + \sqrt{\frac{\theta_A^2 + \theta_C^2 + \theta_H^2}{3}}} =$$

$$= 1,96 \cdot 6,75 = 13,26\% \quad (4.18)$$

Для измерений удельной затраченной энергии оценку погрешности выполняли в следующей последовательности:

- оценка суммарной неисклѳченной систематической погрешности выполнена на основе погрешностей измерений соответственно используемых средств измерений (для электронного секундомера  $\theta_C = \pm 1\%$ ; для манометра  $\theta_M = \pm 1\%$ ; для мерного цилиндра вместимостью 500 мл  $\theta_{Ц} = \pm 0,71\%$ ) по формуле:

$$\theta_{\Sigma} = \sqrt{\theta_C^2 + \theta_M^2 + \theta_{Ц}^2} = \sqrt{1 + 1 + 0,49} = 1,54 \% ; \quad (4.19)$$

- оценка случайной составляющей погрешности выполнена с учётом среднеквадратичного отклонения результата наблюдений ( $S=3,58$ ), среднеквадратичного отклонения результата измерений ( $S_{\bar{n}}=1,89$ ), доверительной вероятности среднеквадратичного отклонения результата наблюдений ( $p = 0,95$ ), коэффициента Стьюдента с четырьмя степенями свободы ( $t_s = 2,776$ ) по формуле:

$$\varepsilon = t_s \cdot S_{\bar{n}} = 2,776 \cdot 1,89 = 5,25 ; \quad (4.20)$$

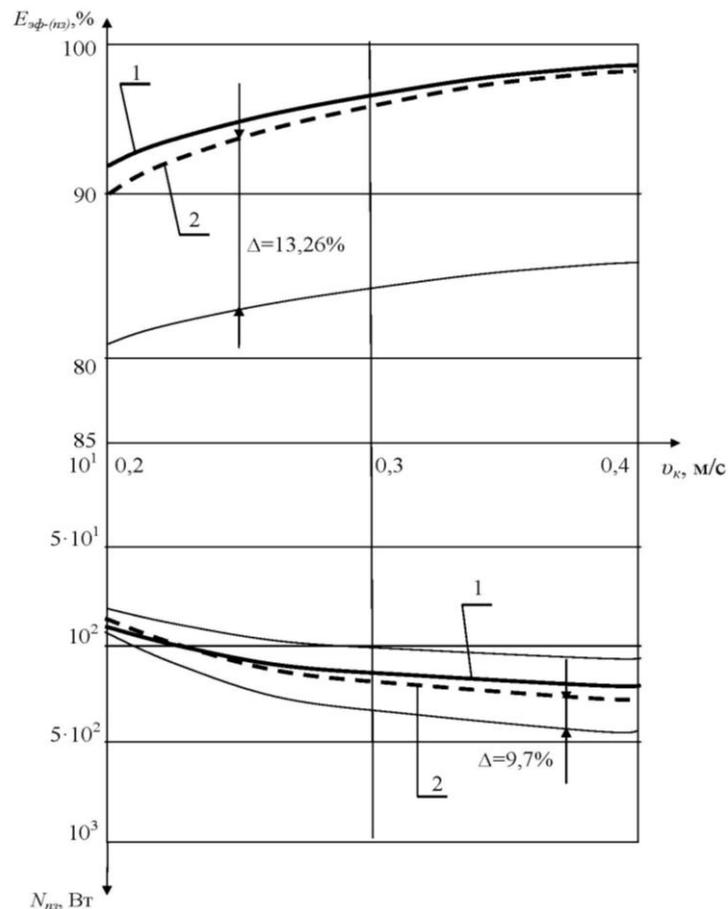
- оценка суммарной погрешности измерений удельной затраченной энергии по формуле:

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma} = \frac{(\varepsilon + \theta_{\Sigma}) \cdot \sqrt{\frac{\theta_C^2}{3} + \frac{\theta_M^2}{3} + \frac{\theta_{Ц}^2}{3} + \frac{S^2}{N} \cdot 100}}{S_{\bar{n}} + \sqrt{\frac{\theta_C^2 + \theta_M^2 + \theta_{Ц}^2}{3}}} =$$

$$= 2,43 \cdot 3,99 = 9,7\% \quad (4.21)$$

В результате, величина максимальной относительной погрешности измерений концентрации пылевых частиц в воздушной среде составляет  $\pm 13,26\%$ , а величина максимальной относительной погрешности измерений удельной затраченной энергии составляет  $\pm 9,7\%$  при доверительной вероятности  $p = 0,95$ .

Примеры графического сопоставления теоретических зависимостей эффективности и удельной затраченной энергии процессов пылезадержания и очистки воздуха от пыли пеной, представленные на рисунках 4.4, 4.5, получены расчётами на основе их математического описания, с эмпирическими зависимостями, составленными с помощью метода анализа размерностей ( $\pi$ -теоремы).



1 – теоретические зависимости; 2 – эмпирические зависимости

Рисунок 4.4 – Сопоставление теоретических и эмпирических зависимостей эффективности и удельной затраченной энергии для процесса пылезадержания в зависимости от скорости движения ленты транспортёра  $v_k$  (над лентой, пыль щебня,  $C_{по} = 0,6\%$ )

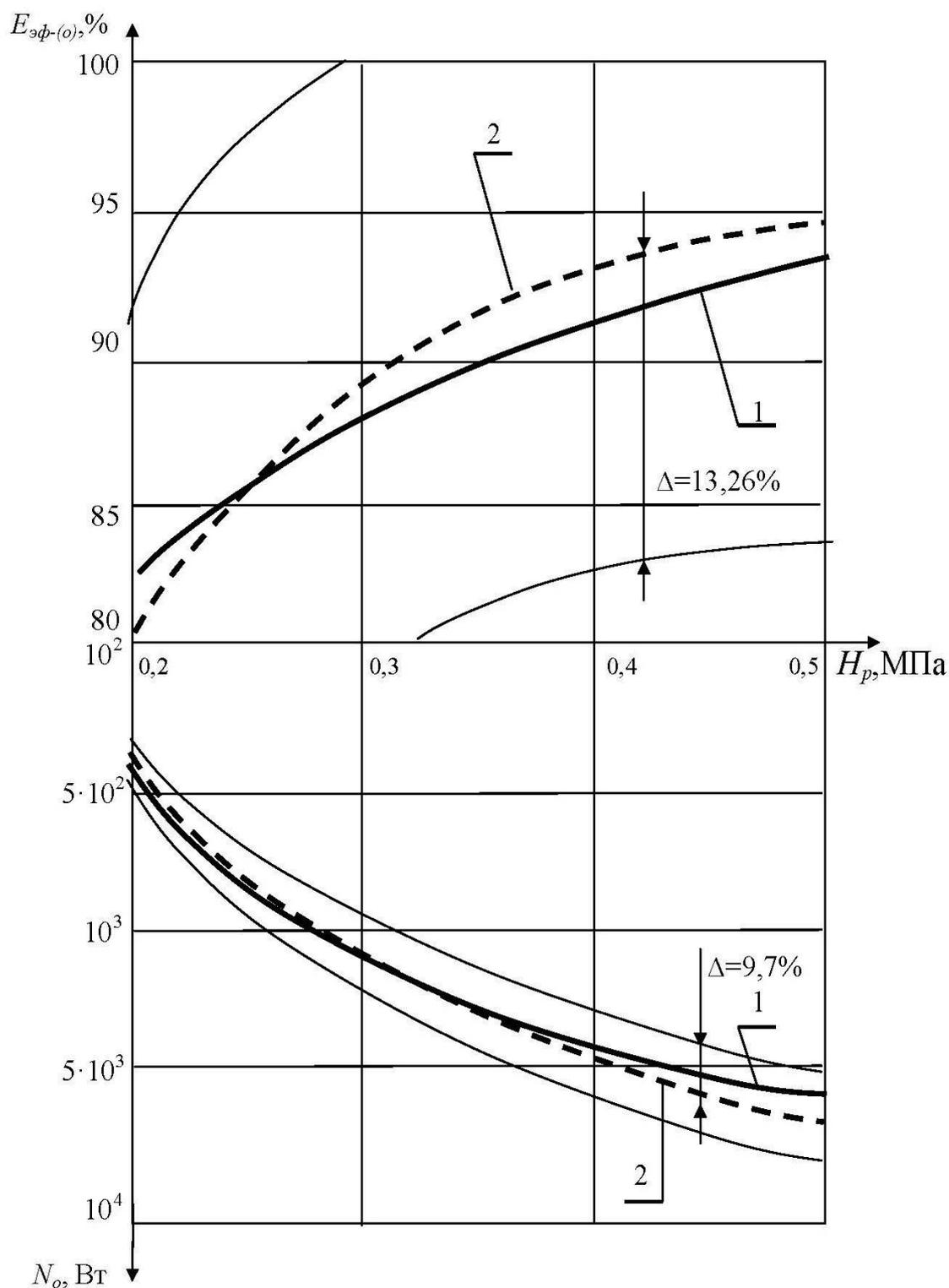


Рисунок 4.5 - Сопоставление теоретических и эмпирических зависимостей эффективности и удельной затраченной энергии для процесса очистки воздуха от пыли в зависимости от давления раствора пенообразователя перед оросителем  $H_p$  (пыль щебня, пенный аэрозоль, встречное движение,  $C_{по}=0,6\%$ )

## Выводы

В результате выполненного предварительного этапа экспериментальных исследований установлено, что максимальная относительная погрешность измерений концентрации пыли в воздухе составляет  $\pm 13,26\%$ , а максимальная относительная погрешность измерений удельной затраченной энергии составляет  $\pm 9,7\%$  при доверительной вероятности  $p = 0,95$ .

Сопоставление результатов теоретических расчётов с экспериментальными данными, выполненное нами для всего диапазона условий применения технологий обеспыливания воздуха на основе использования пены, включая этапы пылезадержания и очистки воздуха от пыли, позволило сделать вывод о том, что, с учетом погрешности измерений, результаты теоретических расчётов согласуются с данными эксперимента в достаточной степени (в пределах доверительных интервалов).

Полученная удовлетворительная сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также тот факт, что отклонение теоретических результатов от экспериментальных по величине не выходит за пределы абсолютных погрешностей измерений и наблюдается как в меньшую, так и в большую сторону, свидетельствует о том, что во всем рассматриваемом диапазоне значений параметров процесса обеспыливания воздуха пеной выполненное нами математическое описание процесса с достаточной степенью достоверности описывает исследуемый процесс.

Таким образом, можно заключить, что выполненное математическое описание физических процессов обеспыливания пеной позволяет оценивать и прогнозировать работу различных его технологических видов (пенным аэрозолем и пенным слоем) без предварительного осуществления их на практике и эмпирического подбора оптимальных рабочих параметров.

## **5 ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭКОНОМИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ПЕНОЙ**

Сложность и широта проблемы обеспыливания воздуха производственных помещений и территории промышленных площадок, особенно предприятий строительной индустрии, находящихся в границах населённых мест, привели в настоящее время к созданию большого количества различных методов, способов и средств, направленных на ее решение. Нередко для достижения цели необходимо применять несколько технических решений, которые необходимо увязывать между собой. Одни и те же задачи могут решаться различными методами и способами, выбор которых не всегда технически и экономически оправдан. Сложившаяся ситуация связана, прежде всего, со сложностью и разнообразием процессов пылеобразования и пылевыведения, а также с разнообразием пыли, поступающей в воздух рабочих зон и в воздушный бассейн промышленных площадок, при реализации соответствующих технологических процессов.

В результате проведенных нами теоретических и экспериментальных исследований обеспечивается возможность полномасштабной оценки способов организации и технологий пылеподавления пеной как единого многостадийного и многофакторного процесса [123, 141, 144].

Практическая реализация процесса подавления пыли в воздухе рабочей зоны и воздушном бассейне промышленной площадки для предприятий стройиндустрии на основе применения пены в большинстве случаев предусматривает необходимость решения нескольких основных задач:

- выбрать оптимальную структуру СБПП и соответствующую ей комбинацию функциональных элементов (пылезадержание, очистка воздуха от пыли, принудительное рассеивание пыли), а также способ организации и технологию применения пены для каждого функционального элемента (применение сетчатого

пенногенератора, барботажного пенногенератора, пенного слоя, пенного аэрозоля и др.);

- определить максимально возможную и приемлемую (исходя из соблюдения соответствующих значений ПДК) эффективность и энергетическую экономичность каждого функционального элемента и/или СБПП в целом для заданных производственно-технологических условий предприятий строительной индустрии;

- рассчитать оптимальные, исходя из обеспечения требуемой эффективности и максимально возможной энергетической экономичности, технологические параметры процесса обеспыливания воздуха и подобрать соответствующее оборудование для их реализации;

- предложить принципиально новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности процесса обеспыливания при одновременном повышении его энергетической экономичности в случаях, когда известные технические решения не позволяют достичь нормативных значений концентрации пыли в воздухе (ПДК<sub>рз</sub> или ПДК<sub>мп(сс)</sub>).

### **5.1 Совершенствование технологий обеспыливания воздуха пеной для условий эксплуатации предприятий строительной индустрии**

Выполненный нами анализ полученных параметрических зависимостей эффективности энергоёмкостного показателя как результирующих характеристик процесса обеспыливания воздуха пеной, а также результатов реализации методики оценки и выбора оптимальной по эффективности и энергетической экономичности технологии реализации пенного способа обеспыливания воздуха на ЭВМ с помощью программы «GEEPSUOR» позволил разработать рекомендации по совершенствованию (повышению эффективности и энергетической экономичности) каждого этапа рассматриваемого процесса

обеспыливания [153, 158, 162, 199, 200].

Так, для повышения эффективности и энергетической экономичности процесса *пылезадержания* целесообразно придерживаться следующих рекомендаций:

- для реализации процесса пылезадержания применять пену в виде слоя;
- увеличивать стойкость пены путем предварительного подбора типа пенообразователя и его концентрации в растворе для заданных производственно-технологических условий и вида пылевого материала;
- максимально возможно (ориентируясь на технологический регламент) снижать скорость движения источника пылеобразования и пылевыделения (в случаях, если он передвижной), либо скорости движения выделяемых источником пылевых частиц;
- максимально возможно (ориентируясь на технологический регламент) уменьшать расстояние между пеногенератором и источником пылевыделения;
- уменьшать смачивающие свойства пены при одновременном увеличении её экранирующих свойств (использование «сухой» пены), применяя растворы пенообразователя с относительно большим поверхностным натяжением;
- применять сетчатые пеногенераторы без принудительной подачи воздуха.

Для повышения санитарно-гигиенической и экологической эффективности, а также энергетической экономичности процесса *очистки воздуха от пыли* целесообразно придерживаться следующих рекомендаций:

- для реализации процесса очистки воздуха от пыли применять пену в виде аэрозоля;
- повышать кратность пены путём применения оросителей (форсунок), использующих сжатый воздух, с предварительным смешиванием раствора пенообразователя и сжатого воздуха;
- увеличивать смачивающие свойства пузырьков пены при одновременном уменьшении их упругих (экранирующих) свойств, применяя растворы пенообразователя с относительно низким поверхностным натяжением;
- увеличивать количество пузырьков пены в единице объёма факела пенного

аэрозоля;

- уменьшать скорость пылевоздушного потока в зоне реализации процесса очистки воздуха от пыли до значений от 3,0 до 6,0 м/с;
- организовывать спутное движение пылевого и пенного аэрозолей в зоне реализации процесса очистки воздуха от пыли.

Для повышения эффективности и энергетической экономичности процесса *принудительного рассеивания пыли в атмосфере* целесообразно придерживаться следующих рекомендаций:

- для реализации процесса принудительного рассеивания пыли в атмосфере применять пену в виде аэрозоля;
- организовывать спутное движение пылевого и пенного аэрозолей в активной зоне процесса принудительного рассеивания пыли;
- применять процесс принудительного рассеивания пыли при скоростях ветра до 6,5 м/с;
- применять процесс принудительного рассеивания пыли для крупнодисперсных и «тяжёлых» пылевых частиц.

Таким образом, в качестве рекомендаций определены основные направления совершенствования каждого этапа реализации процесса обеспыливания воздуха пеной на основе повышения эффективности при обеспечении максимальной энергетической экономичности, а, следовательно, получена возможность совершенствовать существующие и разрабатывать новые технические решения (способы и средства) для достижения оптимальных значений упомянутых выше результирующих параметров процесса обеспыливания.

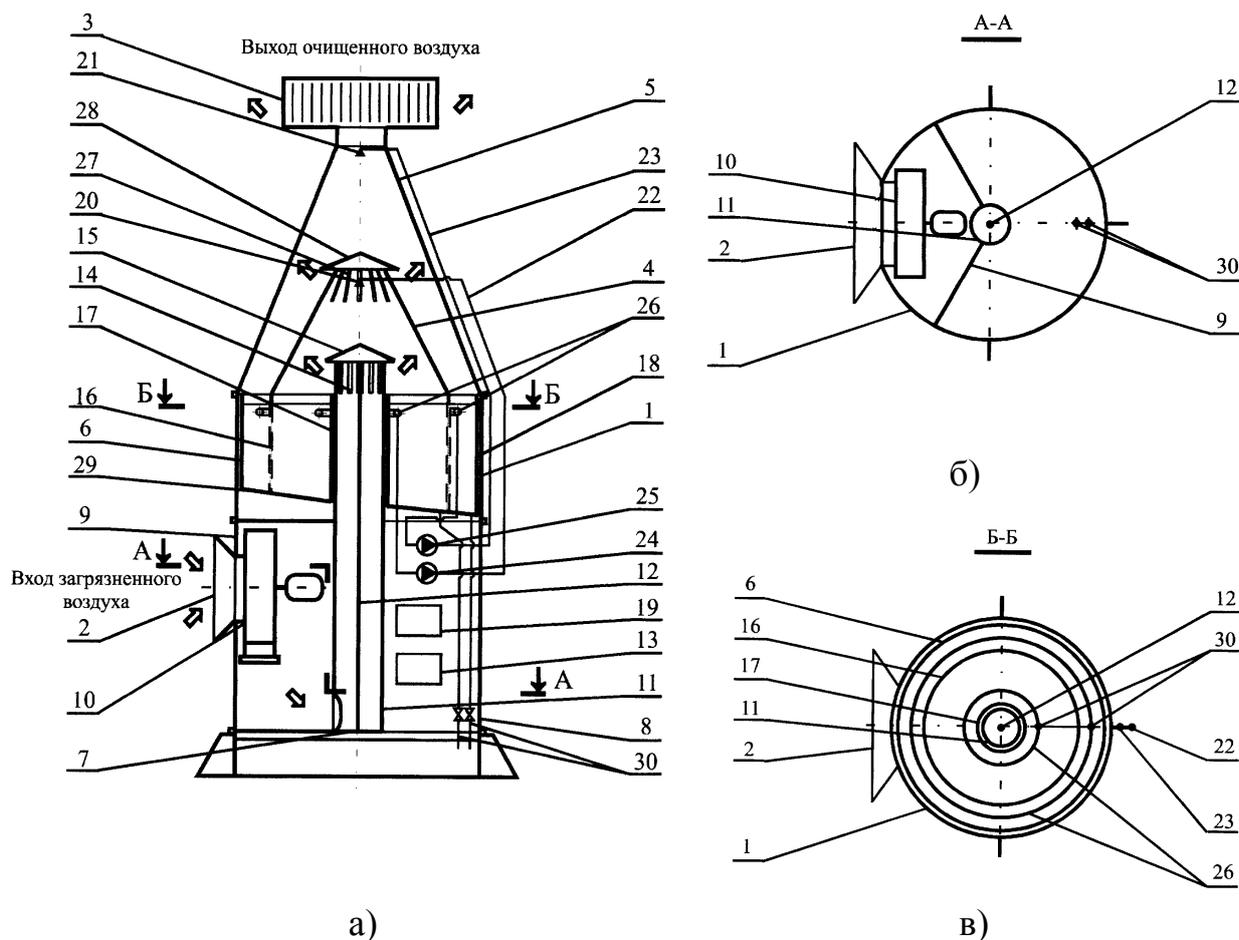
Примерами технической реализации разработанных рекомендаций могут служить разработанные нами следующие принципиально новые технические решения.

*Автономное устройство регенерационной очистки воздуха* рабочей зоны [201, 202], обеспечивающее повышение эффективности очистки воздуха от пыли и других видов загрязняющих веществ при снижении энергетических затрат на организацию процесса очистки за счёт отказа от применения пенообразователя и

связанного с его подачей технологического оборудования (насоса, дозатора, трубопроводов, смесителя).

Устройство (рисунок 5.1) состоит из диэлектрического корпуса 1 со всасывающим 2 и выхлопным 3 воздушными патрубками, установленным одна в другой конические камеры щелочного 4 и кислотного 5 орошения, камеры приготовления активированной жидкости 6, линейного разрядника 7 и сливной коробки 8 с размещённой внутри вентиляционной камерой 9 и побудителя тяги 10. Разрядник 7 выполнен в виде протяжённого полого цилиндрического корпуса 11 с натянутым по оси электродом 12, причем корпус 8 и электрод 12 подключены к разным полюсам высоковольтного источника тока 13. На вертикальных стенках верхней части разрядника 7 проделаны щелевые прорезы 14 и установлен каплезащитный зонт 15. Камера 6 изготовлена из двух коаксиально установленных полых цилиндров и разделена на две части водопроницаемой диэлектрической перегородкой 16. Перегородка 16 имеет цилиндрическую форму и выполнена в виде каркаса из двух колец с натянутым на него водопроницаемым материалом (брезент). К внутренним вертикальным стенкам камеры 6 прикреплены полые цилиндрические электроды 17 и 18, выполненные из токопроводящего материала (графита). Электрод 17 подключается к отрицательному полюсу источника постоянного тока 19, а электрод 18 - к положительному полюсу источника 19. Форсунки 20 и 21, установленные в камерах 4 и 5, соединены соответственно трубопроводами 22 и 23 через насосы 24 и 25, имеющие заборные патрубки 26, отдельно с каждой частью камеры. Причем трубопровод 22 соединен с той частью камеры 6, в которой установлен электрод 17, а трубопровод 23 - с той частью камеры 6, в которой установлен электрод 18. В верхней части камеры 4 выполнены по образующим щелевые прорезы 27 и установлен каплезащитный зонт 28. Водонепроницаемая диэлектрическая перегородка 29 между камерой 6 и коробкой 8 установлена с уклоном таким образом, что сливные патрубки 30 установлены в нижних точках щелочной и кислотной частях камеры 6.

Устройство работает следующим образом. Перед тем как подать запылен-



а) – вид сбоку; б) – разрез А-А; в) – разрез Б-Б

Рисунок 5.1 – Автономное устройство регенерационной очистки воздуха рабочей зоны

ный воздушный поток в устройство, необходимо предварительно заполнить водой камеру приготовления 6.

Расположенные на внутренних вертикальных стенках камеры приготовления 6 электроды 17 и 18 подключают к разноименным полюсам источника постоянного тока 19 (электрод 18 - к положительному полюсу, 17 - к отрицательному). Такое подключение обеспечивает протекание в камере 6 процесса электролиза воды, который обеспечивает смещение химического равновесия относительно водопроницаемой перегородки 16. При этом анионы  $[\text{OH}]^-$  движутся к аноду (+), а катионы  $[\text{H}_3\text{O}]^+$  - к катоду (-). Встречая на своем пути водопроницаемую мембрану, выполненную из водопроницаемого материала (брезента), ионы соответствующих знаков начинают концентрироваться у ее

поверхности ( $[\text{OH}]^-$  со стороны катода,  $[\text{H}_3\text{O}]^+$  - со стороны анода). Интенсивность изменения активации (величины показателя  $pH$  среды) в строго ограниченном объёме определяется напряжением и величиной тока, а объём активации (распределение плотности зарядов в среде) определяется площадью электродов и степенью водопроницаемости материала. В результате, в объёме жидкости, который находится между перегородкой 16 и электродом 17, происходит концентрация анионов  $[\text{OH}]^-$ , приводящая к образованию щелочной среды с  $pH > 7$ . В объёме жидкости, который находится между перегородкой 16 и электродом 18, происходит концентрация катионов  $[\text{H}_3\text{O}]^+$ , приводящая к образованию кислотной среды с  $pH < 7$ . С помощью давления насосов 24 и 25 активированная таким методом вода отдельно поступает в трубопроводы 22 и 23, после – к форсункам 20 и 21, с образованием щелочного (пенного) и кислотного (капельного) факелов орошения. Заборные патрубки 26 служат для отбора воды из камеры и расположены по периметрам обоих объёмов 6. Подключение центрального электрода 12 и корпуса 11 линейного разрядника 7 к разноименным полюсам высоковольтного источника тока 13 позволяет получить в разряднике 7 между электродом 12 и корпусом 10 "тихий" электрический разряд.

Как только достигаются требуемые свойства жидкости происходит автоматическое включение побудителя тяги 10. Запылённый воздушный поток из рабочей зоны поступает в вентиляционную камеру 9 посредством входного воздушного патрубка 2 с помощью побудителя тяги 10 и далее в разрядник 7, где пылевые частицы приобретают дополнительный электрический заряд в электрическом поле высокого потенциала. После выхода из разрядника 7 через щелевые прорези 14, запыленный воздух подается в полость камеры 4, взаимодействуя там с факелом пенного аэрозоля. Затем запыленный воздух проходя через прорези 27, обтекая зонт 28, подается в полость камеры 5, где происходит контакт частиц пыли с факелом капель кислотной жидкости. Посредством выхлопного патрубка 3 полностью очищенный воздух попадает из устройства либо в пространство рабочей зоны, либо в окружающую среду. Капли щелочной и кислотной жидкостей, которые прореагировали с газовым потоком

попадают соответственно в щелочной и кислотный объёмы камеры 6. Образующийся в результате процесса шлам собирается на дне камеры 6 в точках вывода сливных патрубков 30, посредством которых возможно его удаление в сливную коробку 8, в которой происходит нейтрализация обоих стоков.

Эффективность очистки воздуха от частиц пыли песка и пыли щебня фракций PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> составляет 90-93%, что превышает значения эффективности очистки аналогичных известных устройств на 10-15%.

Другим примером является *устройство регенерационной очистки воздуха* от тонкодисперсной неслипающейся пыли [203, 204, 205], обеспечивающее повышение эффективности очистки воздуха от пыли при снижении энергетических затрат на организацию процесса очистки за счёт организации в активной зоне очистки помимо факела пенного аэрозоля дополнительного слоя пены.

Устройство (рисунок 5.2) состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1, который имеет крышку 2, изготовленную конической и заканчивающуюся выходным диффузорным патрубком 3, представляющего собой гиперboloид вращения, а также коническое дно 4, в котором для выпуска скопившегося на дне шлама предусмотрено запорное устройство 5. Входной патрубок 6, расположенный в нижней части корпуса 1, имеет фланец 7 для подключения устройства в целом к воздуховодам. Патрубок 6 соединяется с сифоном 8, в котором для слива избытка раствора пенообразователя выполнено отверстие 9, другой конец сифона, расположенный по оси корпуса 1 сопряжён с ограничительной стенкой 10, которая имеет вид обратного конуса, ступенчато меняющим свою конусность и имеющим перфорацию 11 в верхней своей части. Над ограничительной стенкой 10 вдоль оси корпуса выполнен проходной диффузорный патрубок 12, нижняя часть которого располагается на одном уровне с первой по ходу движения воздушного потока кольцевой пластиной 13, при этом верхняя часть присоединена к выгнутой вверх сферической перегородке 14, имеющей щели 15 по окружности на периферии. Ниже перегородки 14 при помощи стоек 16 крепится сепарационное устройство 17, которое имеет вид

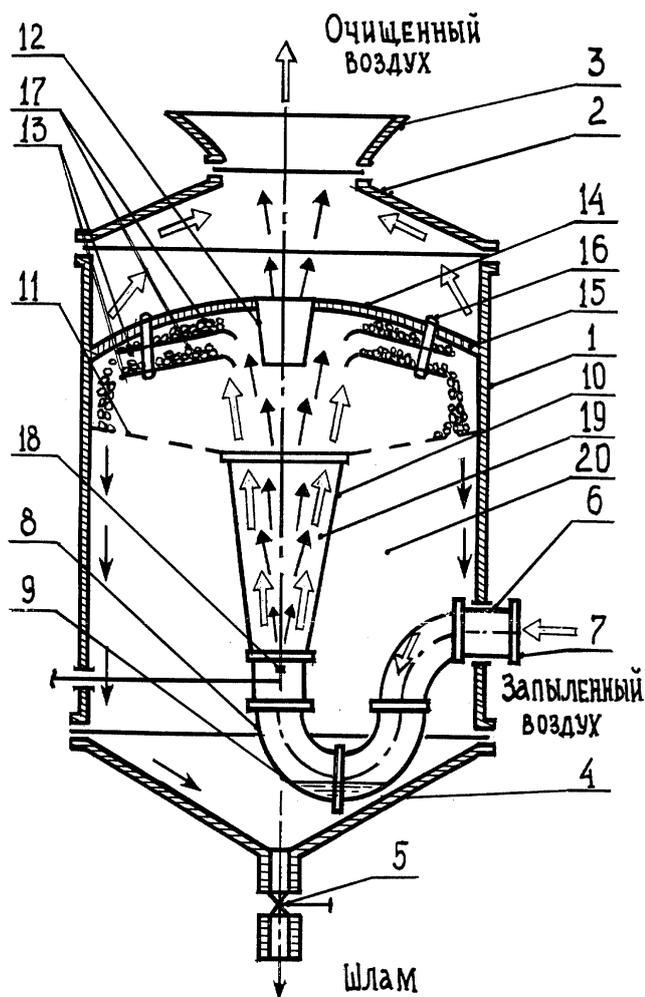


Рисунок 5.2 – Устройство регенерационной очистки воздуха от тонкодисперсной неслипающейся пыли

кольцевых пластин 13, при этом происходит уменьшение их площадей поверхности по мере удаления от нее. Надёжное попадание аэрозоля в выполненные зазоры 17 обеспечивается отогнутыми вниз внутренними краями пластин 13, при этом они образуют кольцевые щели со стенками проходного патрубка 12, а наружные края образуют щели с корпусом 1. Генератор 18 пенного аэрозоля установлен в нижней части корпуса 1 спутно запыленному потоку, при этом пенный аэрозоль попадает во внутреннюю контактную полость 19, которая образована при помощи сифона 8, ограничительной стенки 10 и сферической перегородки 14. Внешнюю контактную полость 20 образует корпус 1 и ограничительная стенка 10.

Устройство работает следующим образом. К генератору 18 осуществляют подачу раствора пенообразователя, контролируя при этом посредством открытого запорного устройства 5 наполняемость пенным аэрозолем сифона 8. С момента вытекания пенного аэрозоля через отверстие 9, закрывают запорное устройство 5, осуществляя подачу пылегазового потока вначале во входной патрубок 6, а затем из него - в сифон 8, реализуя там начальную стадию очистки в результате его взаимодействия с раствором пенообразователя. Поступивший во внутреннюю контактную полость 18 воздух, взаимодействует с активной частью факела пенного аэрозоля, который получают при помощи генератора 18. В результате преимущественного адгезионного воздействия и смачиваемых сил происходит выделение части пылевых частиц из воздушного потока и стекание их вместе с разрушившимися пузырьками по ограничительной стенке 10 в сифон 8. За счет прохождения воздушного потока над поверхностью раствора пенообразователя через щелевые зазоры 17 организуется интенсивный слой пены. Интенсификация процесса смачивания и захват наиболее мелких пылевых частиц обеспечиваются конструкцией и размещением пластин 13. Вывод очищенного воздуха из устройства осуществляется посредством выходного патрубка 3. Как только уровень шлама, который сохраняет пенообразующие свойства, достигнет отверстия 9, его избыток вытекает через него на дно 4, после чего посредством открытого запорного устройства 5 поступает в дренаж.

Эффективность очистки воздуха от частиц пыли керамзита фракций РМ10 составляет 91-93,5%, что превышает значения эффективности очистки аналогичных известных устройств на 12-17%.

Также примером реализации предложенных рекомендаций является модифицированное *устройство очистки воздуха от тонкодисперсной неслипающейся пыли* [206], обеспечивающее повышение эффективности очистки воздуха от пыли при снижении энергетических затрат на организацию процесса очистки за счёт интенсификации смачивания и захвата наиболее тонких фракций пыли.

Устройство (рисунок 5.3) состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1, который имеет крышку 2, изготовленную конической и заканчивающуюся выходным диффузорным патрубком 3, представляющего собой гиперboloид вращения, а также коническое дно 4, в котором для выпуска скопившегося на дне шлама предусмотрено запорное устройство 5. Входной патрубок 6, расположенный в нижней части корпуса 1, имеет фланец 7 для подключения устройства в целом к воздуховодам. Патрубок 6 соединяется с сифоном 8, в котором для слива избытка раствора пенообразователя выполнено отверстие 9, другой конец сифона, расположенный по оси корпуса 1 сопряжён с ограничительной стенкой 10, которая имеет вид обратного конуса, ступенчато меняющим свою конусность и имеющим перфорацию 11 в верхней своей части. Над ограничительной стенкой 10 вдоль оси корпуса выполнен сплошной обтекатель 12, имеющий форму параболоида вращения, нижняя часть которого располагается на одном уровне с первой по ходу движения воздушного потока кольцевой пластиной 13, при этом верхняя часть присоединена к выгнутой вверх сферической перегородке 14, имеющей щели 15 по окружности на периферии. Ниже перегородки 14 при помощи стоек 16 крепится сепарационное устройство 17, которое имеет вид кольцевых пластин 13, при этом происходит уменьшение их площадей поверхности по мере удаления от нее. Надёжное попадание аэрозоля в выполненные зазоры 17 обеспечивается отогнутыми вниз внутренними краями пластин 13, при этом они образуют кольцевые щели со стенками сплошного обтекателя 12, а наружные края образуют щели с корпусом 1. Генератор 18 пенного аэрозоля установлен в нижней части корпуса 1 спутно запыленному потоку, при этом пенный аэрозоль попадает во внутреннюю контактную полость 19, которая образована при помощи сифона 8, ограничительной стенки 10 и сферической перегородки 14. Внешнюю контактную полость 20 образует корпус 1 и ограничительная стенка 10.

К генератору 18 осуществляют подачу раствора пенообразователя, контролируя при этом посредством открытого запорного устройства 5 наполняемость пенным аэрозолем сифона 8. С момента вытекания пенного

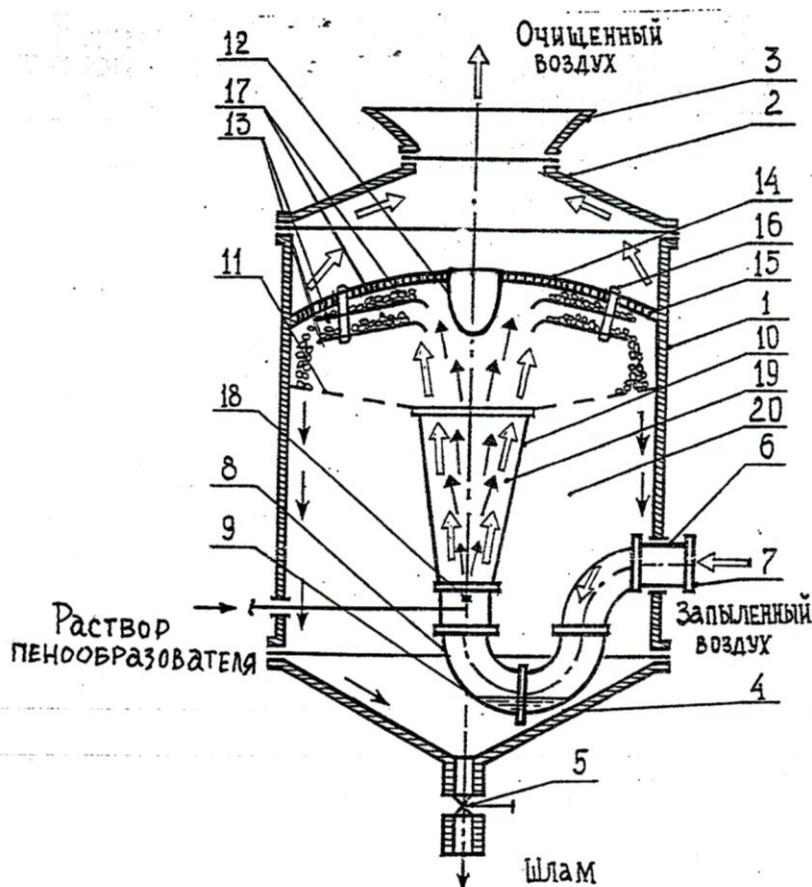


Рисунок 5.3 – Модифицированное устройство регенерационной очистки воздуха от тонкодисперсной неслипающейся пыли

аэрозоля через отверстие 9, закрывают запорное устройство 5, осуществляя подачу пылегазового потока вначале во входной патрубок 6, а затем из него - в сифон 8, реализуя там начальную стадию очистки в результате его взаимодействия с раствором пенообразователя. Поступивший во внутреннюю контактную полость 18 воздух, взаимодействует с активной частью факела пенного аэрозоля, который получают при помощи генератора 18. В результате преимущественного адгезионного воздействия и смачиваемых сил происходит выделение части пылевых частиц из воздушного потока и стекание их вместе с разрушившимися пузырьками по ограничительной стенке 10 в сифон 8. Затем, сплошной обтекатель 12, выполненный в виде параболоида вращения, расположенный по оси корпуса, направляет пыле-газо-жидкостной поток через

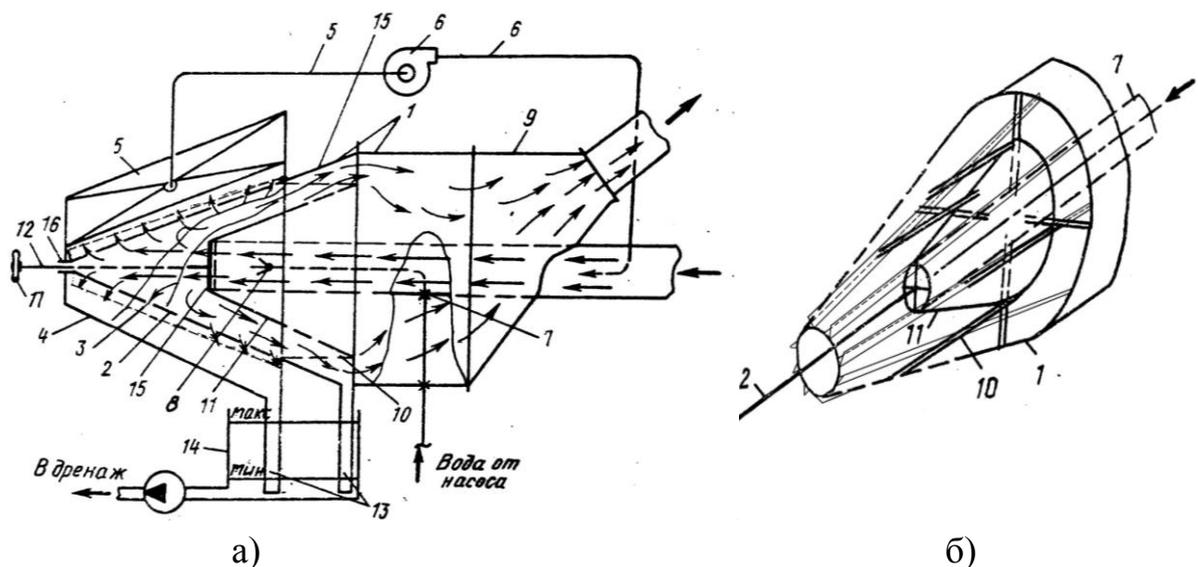
слои пены на кольцевых пластинах 13, конструкция которых обеспечивает интенсификацию процесса смачивания и захват наиболее мелких фракций пылевых частиц. Вывод очищенного воздуха из устройства осуществляется посредством выходного патрубка 3. Как только уровень шлама, который сохраняет пенообразующие свойства, достигнет отверстия 9, его избыток вытекает через него на дно 4, после чего посредством открытого запорного устройства 5 поступает в дренаж.

Эффективность очистки вентиляционного воздуха от частиц пыли керамзита фракций PM<sub>2,5</sub> составляет 84-85,5%, что превышает значения эффективности очистки аналогичных известных устройств на 9-11%.

*Устройство для очистки вентиляционного воздуха [207], обеспечивающее повышение эффективности очистки воздуха от пыли при снижении энергетических затрат на организацию процесса очистки за счёт многократной рециркуляции не уловленных пылевых частиц в активной зоне процесса очистки.* Конструктивно устройство выполнено следующим образом (рисунок 5.4). Камера 1 с конической тупиковой частью 2, на поверхности которой выполнены линейные щелевые зазоры с отогнутыми наружу по ходу движения воздушного потока кромками 3 помещена в улиткообразный кожух 4, имеющий в верхней части тангенциальный отвод 5 для отсоса воздуха, который подключён к всасывающему патрубку вакуум-системы 6. Напорный патрубок вакуум-системы 6 соединён с подводящим патрубком 7 устройства. Ороситель 8 установлен внутри подводящего патрубка 7 соосно с ним и спутно пылевоздушному потоку. Отводящий патрубок 9 является продолжением кольцевого зазора между наружной поверхностью подводящего патрубка 7 и внутренней поверхностью цилиндрической части камеры 1. Внутри камеры 1 по её продольной оси на направляющих 10 установлена обечайка в виде усечённого конуса 11 той же конусности, что и камера 1, жёстко соединённого с тягой 12. В нижней части корпуса 1 и кожуха 4 имеются спускные трубы 13, опущенные в шламоборник 14 и образующие с ним гидрозатвор. Тяга 12 служит для перемещения усечённого конуса 11 в крайнее правое или крайнее левое положение по направляющим 10.

При этом одним концом тяга 12 жёстко соединена с крестовиной 15, которая закреплена с торца усечённого конуса 11 на меньшем его основании, и пропущена через сальниковый уплотнитель 16, расположенный в вершине конического участка камеры 1, а на другом (наружном) конце имеет закреплённый маховик 17 для удобства перемещения конуса 11.

Устройство работает следующим образом. Загрязненный воздушный поток, проходя через подводящий патрубок 7, попутно орошается диспергированной жидкостью из оросителя 8. При этом происходит взаимодействие пылевого и жидкостного аэрозолей, которое в наибольшей степени проявляется в конической части камеры 1.



а) – вид сбоку; б) – фрагмент конического участка камеры со щелевыми зазорами с отогнутыми кромками

Рисунок 5.4 – Устройство для очистки вентиляционного воздуха

Выделенные из воздушного потока частицы пыли с каплями жидкости удаляются в шламособорник 14, а оставшаяся часть пылежидкостного аэрозоля направляется к отводящему патрубку 9. Если в потоке загрязнённого воздуха преобладают пылевые частицы мелких фракций ( $d_{\text{ч}} \leq 50$  мкм), усечённый конус 11 устанавливают посредством тяги 12 в крайнее правое положение вплотную к подводящему патрубку 7. Частицы аэрозоля направляются в зазор между наружной поверхностью усечённого конуса 11 и поверхностью конической

тупиковой части 2, в активной зоне которой происходит их улавливание, при этом отогнутые по ходу движения воздушного потока кромки линейных щелевых зазоров 3 и увеличение их ширины к тупиковой части камеры 1 позволяют увеличить увлечение неуловленных частиц пыли в улиткообразный кожух 4, с последующим направлением на рециркуляцию в активную зону орошения. Если в загрязнённом воздушном потоке преобладают частицы пыли крупных фракций ( $d_p > 100$  мкм), обладающие большой кинетической энергией, скоростью витания и инерционностью, то усечённый конус 11 устанавливают посредством тяги 12 в крайнее левое положение (вплотную к коническому участку камеры 1). При этом перфорация 2 частично перекрывается, что приводит к изменению аэродинамических и геометрических параметров зоны её активного действия, а следовательно, к наиболее эффективному улавливанию и удалению частиц крупных фракций, а неуловленные частицы пыли из зоны их максимальной концентрации увлекаются в улиткообразный кожух 4, с последующим направлением на рециркуляцию в активную зону орошения. Образующийся шлам через спускную трубку поступает в шламосборник 14, из которого насосом удаляется в дренаж. Максимальный и минимальный уровни пульпы в шламосборнике 14 служат для предотвращения соответственно перелива пульпы и подсоса воздуха в кожух 4 извне.

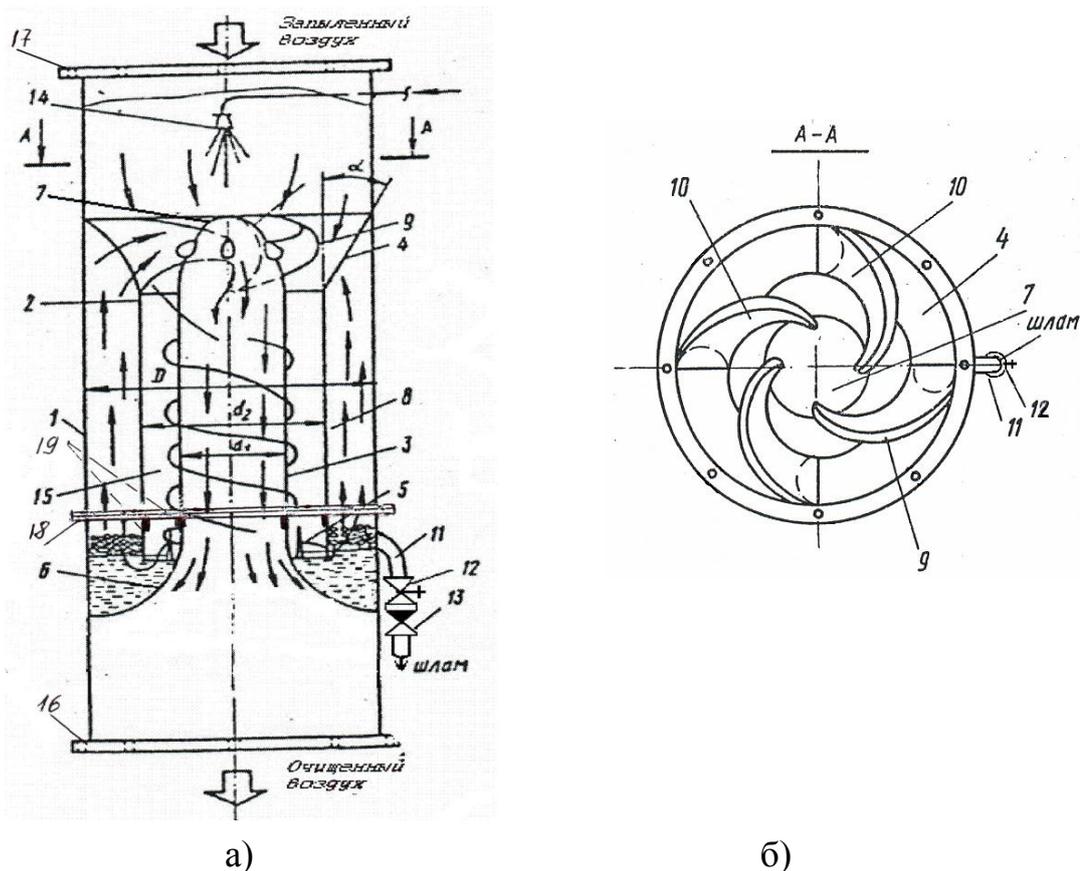
Отогнутые наружу по ходу движения воздушного потока кромки линейных щелевых зазоров позволяют увеличить эжекцию воздушного потока из конической части камеры в улиткообразный кожух, что способствует увеличению увлечения неуловленных частиц пыли в улиткообразный кожух, с последующим направлением на рециркуляцию в активную зону орошения, а увеличение ширины щелевых зазоров к тупиковой части камеры способствует увеличению увлечения неуловленных частиц пыли из зоны их максимальной концентрации в улиткообразный кожух, с последующим направлением на рециркуляцию в активную зону орошения, что в конечном итоге способствует увеличению эффективности процесса очистки вентиляционного воздуха за счет многократной рециркуляции не уловленных каплями жидкости пылевых частиц в активную зону

орошения.

Устройство позволяет производить очистку вентиляционного воздуха при попеременно поступающих различных видах пыли от пылевых частиц мелких фракций с эффективностью до 83-85%, крупных фракций – до 99,2%, а очистку от полидисперсной пыли с интегральной эффективностью – до 99,95%, что превышает эффективность известных устройств по очистке от пылевых частиц мелких фракций на 4-5%, крупных – на 2-4% и полидисперсной пыли – на 5-7%.

*Устройство для очистки воздуха от пыли* [208], обеспечивающее повышение эффективности очистки воздуха от пыли при снижении энергетических затрат на организацию процесса очистки за счёт того, что частицы пыли, находящиеся в воздушном потоке, обладающие большой кинетической энергией, удаляются из воздушного потока за счёт последовательного взаимодействия с факелом пенного аэрозоля, затем со слоем раствора пенообразователя, а частицы пыли, обладающие малой кинетической энергией и подверженные наибольшему влиянию воздушного потока, выделяются из последнего при взаимодействии со слоем пены.

Устройство включает (рисунок 5.5) вертикальный цилиндрический корпус 1, в котором коаксиально на одном уровне установлены входной 2 и выходной 3 патрубки. Входной патрубок 2 выполнен конфузорным и имеет в верхней части конусное сужение 4 с конусностью 40-60°, края которого врезаны в корпус 1, а в нижней части выполнены надрезы, кромки которых отогнуты и образуют закручиватель 5. Выходной патрубок 3 выполнен диффузорным и имеет в нижней части плавное расширение 6, которое своими краями тоже врезано в корпус 1. В верхней части выходной патрубок 3 заглушен параболоидным обтекателем 7. Между стенками корпуса 1 и входного патрубка 2 образована внешняя контактная полость 8, которая соединяется с выходным патрубком 3 полыми лопастями 9. Полые лопасти 9 выполнены спиральными, сегментными в сечении, сужающимися по ходу воздушного потока. Большим сечением каждая лопасть 9 врезана в конусное сужение 4, а меньшим тангенциально в параболоидный обтекатель 7. Кроме того, у каждой лопасти 9 сторона 10, образованная хордой



а) – вид сбоку; б) – разрез А-А

Рисунок 5.5 – Устройство для очистки воздуха от пыли

сегмента, обращена к оси корпуса 1 и все они образуют на входе во входной патрубком 2 статический закручиватель, однонаправленный со статическим закручивателем 5. Полость 8 в нижней части имеет отверстие в стенке корпуса, а верхней части корпуса 1, перед параболоидным обтекателем 7 спутно пылевоздушному потоку установлен генератор 14 пенного аэрозоля. Внутренняя контактная полость 15 образована патрубком 2 и выходным патрубком 3. Корпус устройства имеет фланцы 16, 17 для включения его в сеть воздуховодов. Выше уровня надрезов закручивателя 5 выполнено фланцевое соединение 18 для обеспечения возможности периодического извлечения секции устройства и удаления шлама из нижней части внешней контактной полости 8 и её промывки. Фланцевое соединение 18 для сохранения целостности устройства в местах сопряжения имеет уплотнение 19.

Устройство работает следующим образом. Запылённый воздух поступает в

верхнюю часть устройства, где вступает во взаимодействие с активной частью факела пенного аэрозоля, образуемого генератором 14. Затем он проходит между лопастями 9, закручивается и вихревым потоком проходит через входной патрубок 2, омывая снаружи выходной патрубок 3 через полость 15. При этом происходит интенсивное смачивание и захват частиц пыли диспергированной жидкостью при разрушении пузырьков пенного аэрозоля за счёт интенсивного аэродинамического воздействия (вихревые эффекты) и столкновения с конструктивными элементами устройства, вследствие чего в нижней части полости 8 скапливается раствор пенообразователя, избыток которого через отверстие в корпусе 1 поступает в дренажную трубку 11 и с помощью дренажного вентиля 12 выводится из устройства. Для предотвращения попадания воздуха в устройство предусмотрен обратный клапан 13.

Уже в факеле часть пылинок за счёт преобладающего воздействия адгезионных и смачивающих сил выделяется из воздушного потока и стекает по стенкам в виде шлама в нижнюю часть устройства. Воздушный поток с оставшимися в нём пылевыми частицами из входного патрубка 2 через статический закручиватель 5 поступает в контактную полость 8 и, проходя над поверхностью пенного раствора, скопившегося в нижней части корпуса 1, создает слой пены. Частицы пыли, оставшиеся в воздушном потоке, обладающие большой кинетической энергией, удаляются из воздушного потока за счёт взаимодействия непосредственно со слоем раствора, а обладающие малой кинетической энергией и подверженные наибольшему влиянию этого потока, выделяются из последнего при взаимодействии со слоем пены.

Воздушный поток из полости 8 поднимается вверх, увлекая за собой часть пузырьков из слоя пены, которые захватывают и удаляют из воздушного потока часть пылевых частиц. Проходя внутри лопастей 9, конструкция которых способствует, прежде всего, интенсификации процесса взаимодействия оставшихся пылевых частиц с диспергированной жидкостью, а также разрушению пузырьков пены, воздух освобождается от образовавшегося после разрушения пузырьков раствора и шлама за счёт уклона нижнего сечения

лопастей 9. Очищенный воздух через выходной патрубок 3 выводится из устройства.

Постепенно уровень раствора в нижней части корпуса 1 повышается до тех пор, пока не достигнет нижней кромки отверстия дренажной трубки 11, через которую удаляется избыток раствора. Расход удаляемого раствора регулируется при помощи дренажного вентиля 12. Для предотвращения попадания воздуха в устройство предусмотрен обратный клапан 13. В конечном счёте, при стабильной работе устройства обеспечится такое гидравлическое равновесие, когда расход поступающего в полость 8 раствора будет равен расходу удаляемого. В нижней части внешней контактной полости 8 в объёме раствора пенообразователя постепенно увеличивается концентрация захваченных и смоченных частиц пыли, образующих, в конечном счёте, шлам. При этом увеличение концентрации частиц пыли в объёме раствора пенообразователя влечёт за собой ухудшение его смачивающе-связывающих свойств за счёт замещения части объёма жидкости (раствора) твердыми частицами (пылью), что приводит к постепенному снижению фракционной эффективности очистки воздуха от пыли. В конечном счёте, при полном насыщении объёма жидкости (раствора) твёрдыми частицами (пылью) фракционная эффективность очистки воздуха снижается до 25-35%.

Для периодической регенерации свойств раствора пенообразователя и стабилизации его смачивающе-связывающих свойств за счёт поддержания постоянных значений его поверхностного натяжения и краевого угла смачивания выполнено фланцевое соединение 18, обеспечивающее возможность периодического извлечения секции устройства и удаления шлама из нижней части внешней контактной полости 8, а также её промывки. При этом извлекаемая секция устройства, ограниченная фланцами 17 и 18, после регенерации устанавливается в исходное положение таким образом, что все конструктивные элементы (корпус 1, входной патрубок 2, выходной патрубок 3) сохраняют целостность устройства и в местах сопряжения имеют уплотнения 19, обеспечивая изоляцию внешней контактной полости 8 и внутренней контактной полости 15.

Фракционная эффективность очистки воздуха от тонкодисперсной пыли (PM<sub>2,5</sub>) составляет 89,2%, позволяя экономить производственные площади благодаря тому, что само устройство непосредственно встраивается в вентиляционную систему и практически является элементом воздуховода.

*Аппарат гидродинамической очистки газов* [209], обеспечивающий повышение эффективности очистки воздуха от пыли при снижении энергетических затрат на организацию процесса очистки за счёт того, что основной запылённый газовый поток благодаря собственной кинетической энергии образует в активной зоне очистки дополнительный объём пены (пенный слой).

Аппарат включает (рисунок 5.6) цилиндрический корпус 1 с тангенциальным входным патрубком 2, выходным патрубком 3 и патрубком 4 для вывода шлама. В средней части корпуса 1 установлена опорная решётка 5, выполненная в виде перфорированной конической поверхности, укреплённой на штоке 6, установленной в опоре 7 с возможностью свободного перемещения в вертикальном направлении. На опорную решётку 5 насыпан слой насадки 8, над которой расположено оросительное устройство 9. На штоке 6 под опорной решёткой 5 укреплён жалюзийный водоотбойник 10, образованный соосными прямыми круговыми конусами без оснований, расположенными друг под другом на некотором расстоянии, причём все конусы, кроме верхнего, являются усечёнными и диаметр верхней окружности каждого меньше диаметра воображаемого основания конуса, расположенного над ним. В верхней части корпуса 1 по оси установлен дозатор 11 насадки 8 с бункером 12 и направляющей воронкой 13. При этом для обеспечения равной толщины слоя насадки 8, засыпаемой дозатором 11 на опорную решётку 5, угол между образующей конуса решётки и его воображаемым основанием равен углу естественного откоса используемой насадки. Над зазором между направляющей воронкой 13 и оросительным устройством 9 установлена кольцевая гребёнка 14 с форсунками подачи пенообразователя 15. В нижней части корпуса 1 имеются два разгрузочных окна 16, закрытые при работе аппарата крышками 17. Под

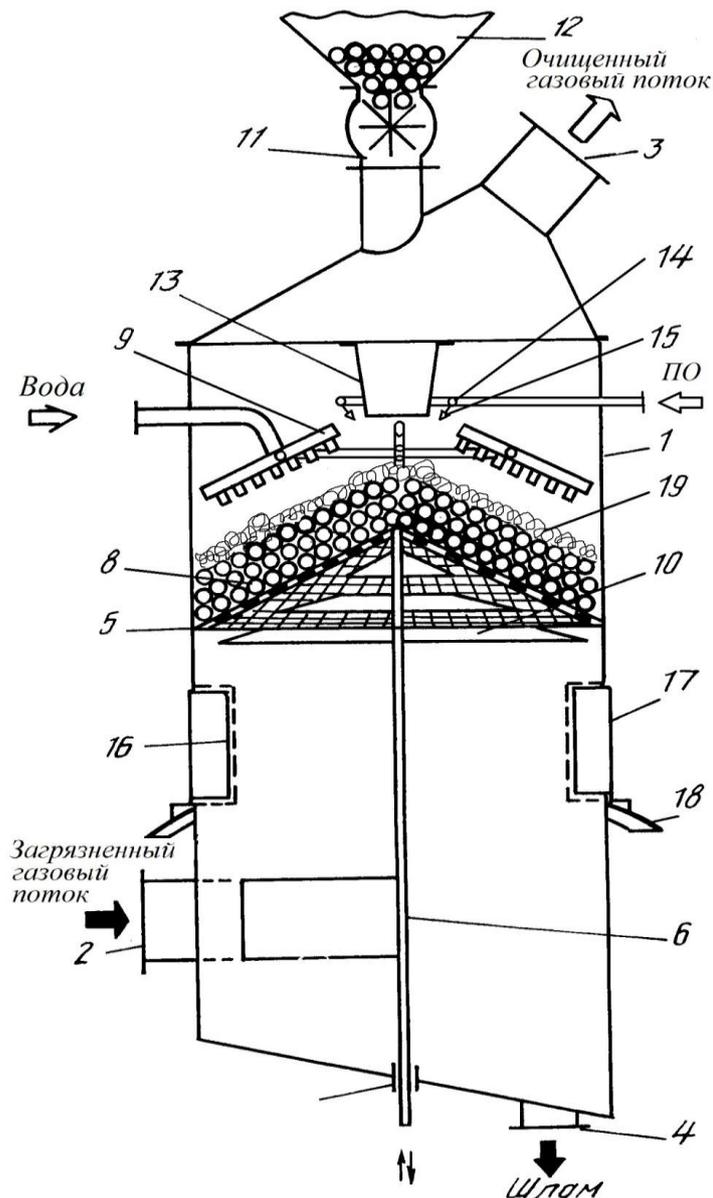


Рисунок 5.6 - Аппарат гидродинамической очистки газов

загрузочными окнами 16 с наружной стороны корпуса 1 установлены лотковые спуски 18.

Аппарат работает следующим образом. Вода через оросительное устройство 9 подается на слой насадки 8, насыпанный на перфорированную опорную решётку 5, проходит через слой насадки 8 и по жалюзийному водоотбойнику 10 стекает к внутренней поверхности стенки корпуса 1, образуя на ней непрерывно стекающую плёнку. Одновременно, посредством кольцевой гребёнки 14 с форсунками 15 обеспечивается непрерывное поступление пенообразователя на

поверхность насадки 8 и её равномерное смачивание, при этом вода, поступающая на поверхность насадки 8 из оросительного устройства 9 перемешивается с пенообразователем, образуя раствор пенообразователя.

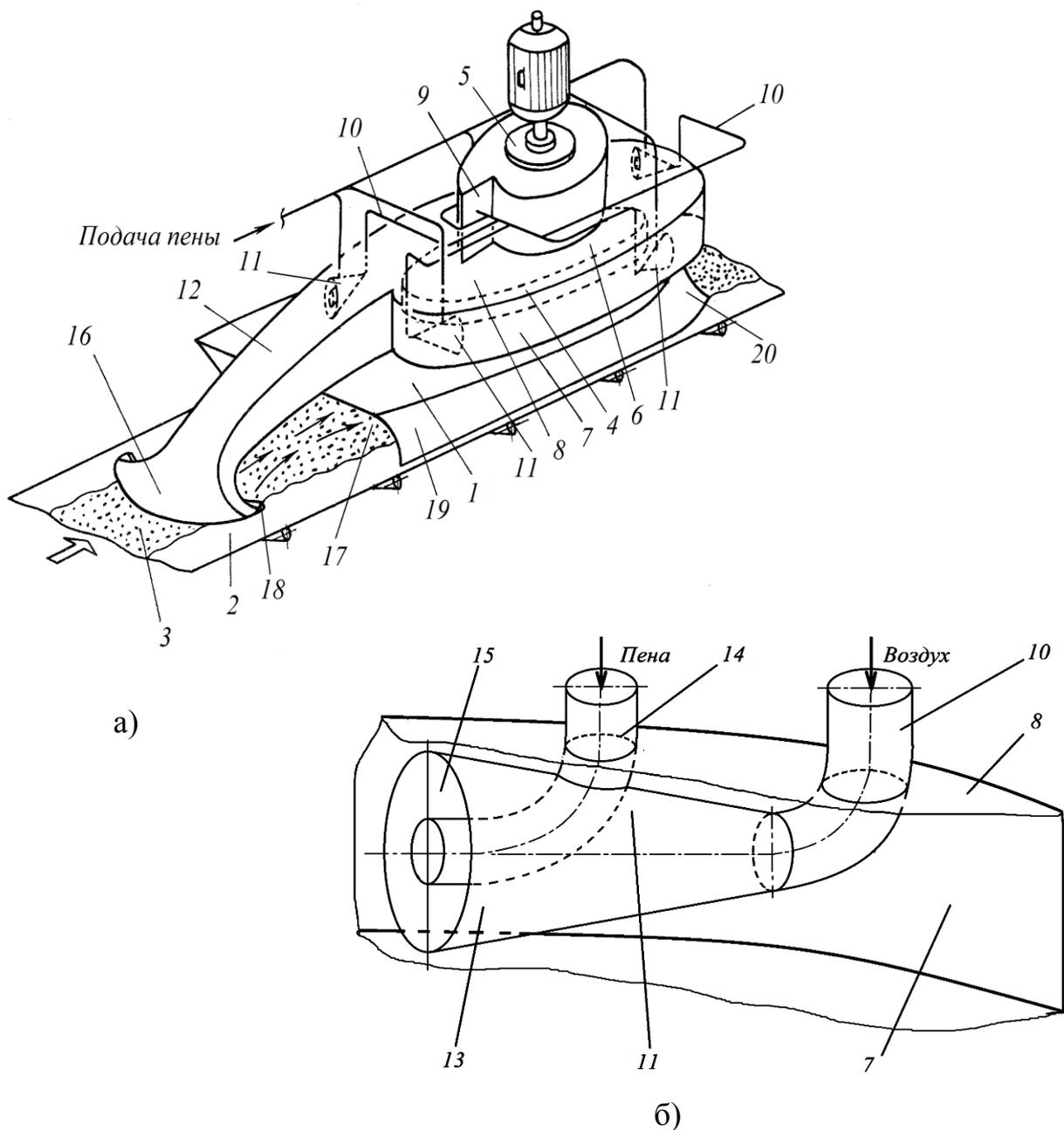
Запылённый газ через входной патрубок 2 тангенциально вводится в нижнюю часть корпуса 1 аппарата, где, попадая на непрерывно стекающую по стенке плёнку воды, первично очищается от пыли. Далее, свободно пройдя жалюзийный водоотбойник 10, газ проходит через слой насадки 8 непрерывно орошаемой водой, где вторично очищается от пыли. Затем, проходя через слой пены 19, образуемый на поверхности слоя насадки 8 в результате барботажа раствора пенообразователя потоком газа, где реализуется завершающий этап очистки. После чего очищенный газовый поток выводится из аппарата через выходной патрубок 3. Шлам выводится из аппарата через патрубок 4. Когда насадка 8 забивается отложениями пыли, производят её быструю замену. При этом шток 6 опускают в крайнее нижнее положение до совмещения нижней кромки опорной решётки 5 с нижним краем разгрузочных окон 16, открывают крышки 17 и насадка по лотковым спускам 18 выгружается из аппарата. После выгрузки забитой насадки окна 16 закрывают крышками 17, а шток 6 возвращают в первоначальное положение. Для засыпки нового слоя насадки включают дозатор 11 и из бункера 12 на опорную решётку 5 подают необходимое количество насадки. Наличие направляющей воронки 13 предохраняет от попадания элементов насадки на оросительное устройство 9. Кольцевая гребёнка с форсунками обеспечивает непрерывное поступление пенообразователя на поверхность насадки, равномерно смачивая её, при этом вода, поступающая на поверхность насадки из оросительного устройства перемешивается с пенообразователем, образуя раствор пенообразователя, проходя через который, газовый поток образует на поверхности слоя насадки объём пены, что обеспечивает его дополнительную очистку, особенно от тонкодисперсных фракций, а, следовательно, увеличивает фракционную эффективность очистки газов.

Аппарат позволяет производить очистку отходящих газов (например,

сушильных барабанов) от тонкодисперсной пыли (например, керамической) с фракционной (PM<sub>2,5</sub>) эффективностью 89,5%, что превышает фракционную эффективность известных устройств на 6-8%.

*Автономное устройство для улавливания и связывания пыли «ОТУО-2-3» [210], обеспечивающее повышение эффективности обеспыливания воздуха при снижении энергетических затрат на организацию процесса пылезадержания на ленточных транспортёрах за счёт многократной рециркуляции выделяющихся из потока транспортируемого сырья пылевых частиц, интенсификации их связывания и их возврата пузырьками пены в поток транспортируемого материала при обеспечении его минимального увлажнения и увеличения времени использования пузырьков пены по сравнению с каплями диспергированной жидкости.*

Устройство состоит (рисунок 5.7) из аспирационного укрытия 1, размещённого над лентой конвейера 2 с транспортируемым обеспыливаемым материалом 3. Аспирационное укрытие 1 соединено со всасывающим патрубком 4 и сообщается с побудителем 5 тяги. При этом всасывающее отверстие 6 всасывающего патрубка 4 сообщено с центральной частью эллиптического корпуса 7 приспособления 8 для пылеулавливания, а выходное отверстие 9 побудителя 5 тяги сообщено посредством воздуховодов 10 с кольцевыми эллиптическими насадками 11. Эллиптический корпус 7 соединён с тангенциальным патрубком 12, а у внутренних стенок эллиптического корпуса 7 размещены кольцевые эллиптические насадки 11, расширяющиеся по ходу потока в эллиптическом корпусе 7 и выполненные в виде усечённого эллиптического конуса 13, внутри которого по его центральной оси размещён патрубок 14 подачи потока пены, а к его малому основанию присоединён патрубок подачи запылённого воздуха 10, при этом большое основание составляет кольцевой зазор 15 с патрубком 14 подачи потока пены, соединённым с системой генерирования и подвода пены. Тангенциальный патрубок 12, соединённый с эллиптическим корпусом 7, выполнен дугообразным, а его выходной элемент 16 размещён перед входом 17 в аспирационное укрытие 1. Сопло 18 выходного элемента 16



а) – общий вид; б) - кольцевой эллиптический насадок устройства

Рисунок 5.7 - Устройство для улавливания и связывания пыли «ОТУО-2-3»

выполнено в виде дуги окружности, центр которой размещён со стороны входа 17 аспирационного укрытия 1. Боковая часть 19 аспирационного укрытия 1 выполнена выпуклой, а торцевая часть 20, размещённая напротив входа 17 в аспирационное укрытие 1, выполнена закруглённой и вогнутой внутрь аспирационного укрытия 1 и сопряжена с его (укрытием) боковой частью 19.

Устройство работает следующим образом. При перемещении сыпучих материалов 3 лентой конвейера 2 за счёт истирания происходит образование пылевых частиц по всему объёму этого материала. Кроме того, определённое число частиц пыли может находиться в слое транспортируемого материала 3 после его перегрузки с конвейера на конвейер. Перемещаемый материал попадает благодаря конструкции этого сопла организуется компактная направленная настилающаяся струя воздуха, аэродинамические параметры которой усиливаются по оси ленты, а, следовательно, транспортируемого материала в направлении входа 17 аспирационного укрытия 1. При этом происходит выдувание как с поверхности, так и из объёма транспортируемого материала 3 тех частиц пыли, которые без применения устройства при любом неорганизованном внешнем воздействии (механическом, аэродинамическом или другом) могут перейти во взвешенное состояние и повлечь увеличение концентрации пыли в воздухе рабочей зоны.

Побудитель 5 тяги обеспечивает всасывание воздуха. Плавный переход аспирационного воздуха в эллиптическом корпусе 7 обеспечивает стабильность аэродинамических параметров указанного всасывающего факела по всей поверхности материала, охваченной этим аспирационным укрытием, а также устранение зон аэродинамического застоя в аспирационном укрытии 1 и интенсивное удаление пыли в полость эллиптического корпуса 7.

В центральной части эллиптического корпуса 7 организован запылённый направленный воздушный поток, часть которого направляется во всасывающее отверстие 6 побудителя 5 тяги, а затем по патрубкам подачи запылённого воздуха 10 подводится в полном объёме к кольцевым эллиптическим насадкам 11. Увеличение соотношения площадей кольцевого зазора 15 каждого насадка 11 и соответствующего патрубка подачи запылённого воздуха 10 обеспечивает увеличение расхода нагнетаемого в зазор воздуха по мере приближения насадков 11 к тангенциальному патрубку 12, а, следовательно, эжекционного эффекта в полости патрубка 12, что создает условия для организации стабильного воздушного потока через патрубок 12 и его сопло 18 к слою транспортируемого

материала 3.

Расположение патрубков 14 подачи потока пены непосредственно по оси кольцевых эллиптических насадков 11 позволяет обеспечить объёмный эжекционный эффект в полости каждого насадка 11, рационально перераспределить аэродинамические и гидродинамические параметры за счёт достижения их максимальных значений в одной зоне, то есть у выходных сечений насадков 11.

При этом воздух, выходящий из кольцевого сечения 15 эллиптических насадков 11, способствует эжектированию пузырьков пены в своей центральной части и частиц пыли в своей периферийной части, создавая дополнительные условия для интенсификации смачивания пылевых частиц в плотном, постоянно перемешиваемом потоке пузырьков пены. При этом применение пены обеспечивает минимальный расход жидкости на увлажнение частиц пыли, в значительной степени снижая переувлажнение транспортируемого материала 3.

За счёт установки насадков 11 в полости эллиптического корпуса 7 создается вихрь, обеспечивающий дополнительный подпор воздуха, за счёт которого образуется ядро вихря, и пылежидкостной аэрозоль, направленный в зону всасывающего факела побудителя 5 тяги, претерпевает дополнительное перемешивание, которое интенсифицирует процесс смачивания за счёт увеличения площади поверхности контакта частиц пыли с пузырьками пены.

Таким образом, все частицы пыли, попавшие во всасывающий факел побудителя 5 тяги, в эллиптическом корпусе 7 обязательно подвергаются комплексному воздействию интенсивными гидродинамическими и вихревыми аэродинамическими факторами.

Установка кольцевых эллиптических насадков у внутренних стенок корпуса обеспечивает непрерывную подачу пены во внутреннюю полость эллиптического корпуса. При этом воздух, выходящий из кольцевого сечения эллиптических насадков, способствует эжектированию пузырьков пены в своей центральной части и частиц пыли в своей периферийной части, создавая дополнительные условия для интенсификации смачивания пылевых частиц в плотном, постоянно

перемешивающемся потоке пузырьков пены. При этом применение пены обеспечивает минимальный расход жидкости на увлажнение частиц пыли, в значительной степени снижая переувлажнение транспортируемого материала.

Устройство обеспечивает реализацию процесса пылезadržания с эффективностью 95,5%, что превышает эффективность известных устройств на 15-18%.

## **5.2 Реализация методики оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной при эксплуатации и реконструкции предприятий строительной индустрии**

### **5.2.1 Для ленточного транспортёра инертных материалов ПАО «КСМ-10» г. Ростова-на-Дону**

Одним из объектов, выбранных для практической реализации и промышленной апробации методики оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной, явилось предприятие строительной индустрии ПАО «КСМ-10» г. Ростова-на-Дону.

В результате предварительных замеров концентрации пыли в воздухе рабочих зон было установлено, что наиболее значимым по вкладу источником пылеобразования и пылевыделения, а, следовательно, пылевого загрязнения воздушной среды явился ленточный транспортёр инертных материалов склада щебня.

Для исследования пылевой обстановки в воздухе рабочей зоны ленточного транспортёра на постоянном рабочем месте оператора проводили измерения концентрации пыли щебня. Анализ и сравнение измеренных значений концентрации пыли щебня ( $C_f$  изменялась в пределах от 15 мг/м<sup>3</sup> при работающей системе пылеподавления пенным аэрозолем до 120 мг/м<sup>3</sup> без

применения системы пылеподавления в зависимости от режима работы транспортёра) с нормативными значениями показали, что во всех точках замеров наблюдается превышение  $ПДК_{pz} = 2 \text{ мг/м}^3$ .

С целью снижения запылённости воздуха в рабочей зоне и обеспечения безвредных условий труда оператора ленточного транспортёра инертных материалов склада щебня нами была применена разработанная методика выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной и соответствующая программа «GEEPSUOR» для её реализации и расчёта оптимальных рабочих параметров системы пылеподавления.

В результате в качестве оптимальных по эффективности и энергетической экономичности способа организации и технологии пылеподавления на начальном участке ленточного транспортёра инертных материалов склада щебня предложено следующее:

- в существующей системе пылеподавления пенным аэрозолем реализовать процесс пылезадержания (экранирования пыли) на основе применения вместо форсунок, использующих сжатый воздух, сетчатого пеногенератора без принудительной подачи воздуха, образующего на поверхности транспортируемого щебня слой пены;
- производительность пеногенератора –  $0,031 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- вид пенообразователя – ОП-7;
- концентрация пенообразователя в водном растворе –  $0,15\%$ ;
- кратность получаемой пены – 400;
- стойкость получаемой пены – 800 с;
- концентрация пыли щебня в рабочей зоне оператора:
  - без применения системы пылеподавления –  $117,1 \text{ мг/м}^3$ ;
  - в результате применения системы пылеподавления –  $1,5 \text{ мг/м}^3$ ;
- эффективность пылезадержания –  $98,72\%$ ;
- удельные энергетические затраты на организацию процесса пылезадержания – 120 Вт;

- энергоёмкостный показатель процесса пылезадержания – 3,78%.

Таким образом, внедрение предлагаемой методики (приложение Е) позволяет реализовать процесс пылеподавления на ленточном транспортёре инертных материалов склада щебня с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли щебня в воздухе рабочей зоны оператора транспортёра до уровня  $ПДК_{рз}$ , экологический эффект за счёт обеспечения  $ПДК_{мр}$  этого вида пыли в воздушном бассейне промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий. При этом экономический эффект от реализации предлагаемой технологии составит 112502 руб/год.

### **5.2.2 Для бульдозера, загружающего инертные материалы в бункер ленточного транспортёра БСУ ПАО «КСМ-10» г. Ростова-на-Дону**

Другим наиболее значимым по вкладу источником пылеобразования и пылевыделения на рассматриваемом предприятии строительной индустрии, а, следовательно, пылевого загрязнения воздушного бассейна промышленной площадки и прилегающей территории среды явился бульдозер, загружающий инертные материалы в бункер ленточного транспортёра БСУ.

Для исследования пылевой обстановки в рабочей зоне машиниста бульдозера (в кабине) и в экологически значимой зоне промышленной площадки (в месте отдыха) проводили измерения концентрации пыли песка и щебня. Анализ и сравнение измеренных значений концентрации пыли песка и щебня ( $C_{\phi}$  изменялась в пределах от 30 мг/м<sup>3</sup> в кабине бульдозера и до 25 мг/м<sup>3</sup> в воздухе экологически значимой зоны) с нормативными значениями показали, что во всех

точках замеров наблюдается соответствующие превышения  $ПДК_{pz} = 2 \text{ мг/м}^3$  и  $ПДК_{mr} = 0,5 \text{ мг/м}^3$

С целью обеспечения безвредных условий труда за счёт снижения запылённости воздуха в рабочей зоне машиниста бульдозера (в кабине), а также обеспечения экологической безопасности в воздушном бассейне промышленной площадки за счёт снижения запылённости воздуха в экологически значимой зоне (в месте отдыха) нами была применена разработанная методика выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной и соответствующая программа «GEEPSUOR» для её реализации и расчёта оптимальных рабочих параметров системы пылеподавления.

В результате для бульдозера, загружающего инертные материалы в бункер ленточного транспортёра БСУ, предложена технологическая схема (рисунок 5.8) высокоэффективной и энергетически экономичной системы пылеподавления пеной со следующими техническими характеристиками:

- реализовать процесс пылезадержания на основе применения форсунок эжекционного типа с принудительной подачей воздуха, образующих перед рабочим органом бульдозера непосредственно у поверхности перемещаемых инертных материалов факел (облако) пенного аэрозоля, предотвращающего распространение выделяющихся пылевых частиц;

- тип форсунки 1ВВК – 12;

- количество форсунок – 2 шт.;

- производительность (по раствору пенообразователя) каждой форсунки –  $0,000215 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

- давление раствора пенообразователя перед форсунками – 0,41 МПа;

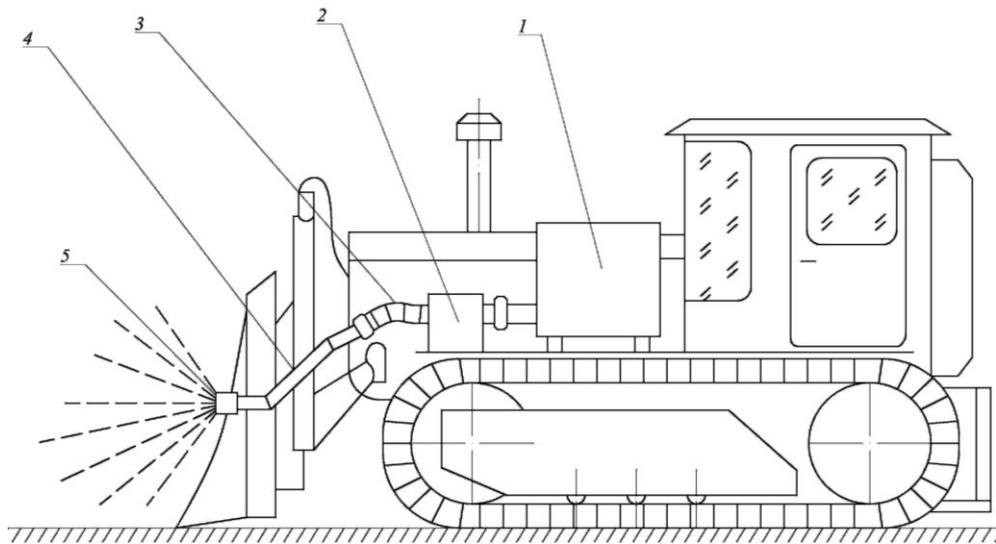
- вид пенообразователя – «Сампо»;

- концентрация пенообразователя в водном растворе – 0,21%;

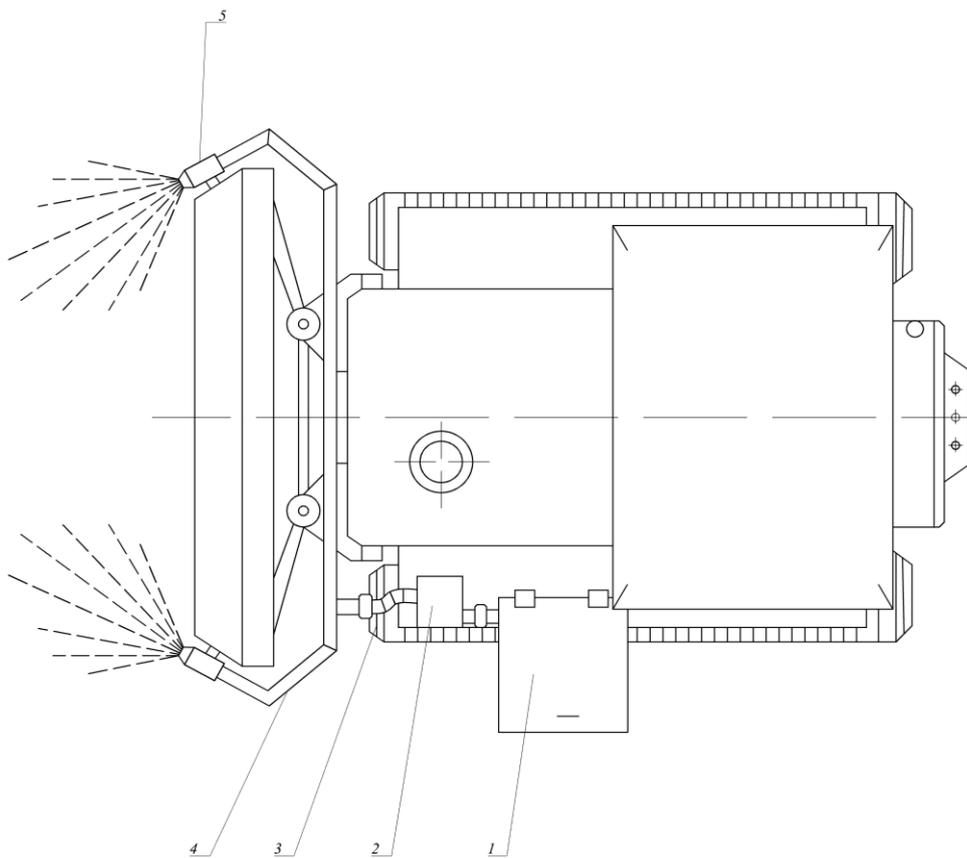
- кратность получаемой пены – 600;

- стойкость получаемой пены – 400 с;

- концентрация пыли щебня в рабочей зоне (в кабине) машиниста бульдозера:



а)



б)

а) – вид сбоку; б) – вид сверху;

1 – ёмкость с раствором пенообразователя; 2 – насос; 3 – гибкие напорные шланги; 4 – стальной трубопровод; 5 – форсунка

Рисунок 5.8 – Технологическая схема системы пылеподавления для бульдозера

- без применения системы пылеподавления –  $28,3 \text{ мг/м}^3$ ;
- в результате применения системы пылеподавления –  $1,2 \text{ мг/м}^3$ ;
- эффективность обеспыливания воздуха рабочей зоны –  $95,76\%$ ;
- концентрация пыли щебня в воздухе экологически значимой зоне (в месте отдыха при штилевых условиях):
  - без применения системы пылеподавления –  $24,1 \text{ мг/м}^3$ ;
  - в результате применения системы пылеподавления –  $0,35 \text{ мг/м}^3$ ;
- экологическая эффективность обеспыливания воздуха экологически значимой зоны –  $98,55\%$ ;
- удельные энергетические затраты на организацию процесса пылеподавления –  $1734 \text{ Вт}$ ;
- энергоёмкостный показатель процесса пылеподавления –  $0,193\%$ .

Таким образом, внедрение предлагаемой технологической схемы (приложение Ж) высокоэффективной и энергетически экономичной системы пылеподавления пеной для бульдозера, загружающего инертные материалы в бункер ленточного транспортёра БСУ, позволяет реализовать процесс пылеподавления с максимальными эффективностью и энергетической экономичностью, обеспечивая санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня в воздухе рабочей зоны загрузочного участка до уровня  $ПДК_{pz}$ , экологический эффект за счёт обеспечения  $ПДК_{mp}$  этих видов пыли в воздушном бассейне промплощадки и социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий. При этом экономический эффект от реализации предлагаемой технологии составит  $104968 \text{ руб/год}$ .

### 5.2.3 Для ленточного транспортёра участка приготовления бетонной смеси ООО «Завод строительного оборудования» г.Ростова-на-Дону

Другим объектом, выбранным для практической реализации и промышленной апробации методики оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной, явилось предприятие строительной индустрии ООО «Завод строительного оборудования» г. Ростова-на-Дону.

В результате предварительных замеров концентрации пыли в воздухе рабочих зон было установлено, что наиболее значимым по вкладу источником пылеобразования и пылевыделения, а, следовательно, пылевого загрязнения воздушной среды явился ленточный транспортёр участка приготовления бетонной смеси.

Для исследования пылевой обстановки в воздухе рабочей зоны ленточного транспортёра на постоянном рабочем месте оператора проводили измерения концентрации пыли песка и щебня. Анализ и сравнение измеренных значений концентрации пыли песка и щебня ( $C_{\phi}$  изменялась в пределах от 10 мг/м<sup>3</sup> при работающей системе пылеподавления пенным слоем до 90 мг/м<sup>3</sup> без применения системы пылеподавления в зависимости от режима работы транспортёра) с нормативными значениями показали, что во всех точках замеров наблюдается превышение  $ПДК_{pz} = 2$  мг/м<sup>3</sup>.

С целью снижения запылённости воздуха в рабочей зоне и обеспечения безвредных условий труда оператора ленточного транспортёра участка приготовления бетонной смеси нами была применена разработанная методика выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной и соответствующая программа «GEEPSUOR» для её реализации и расчёта оптимальных рабочих параметров системы пылеподавления.

В результате в качестве оптимальных по эффективности и энергетической

экономичности способа организации и технологии пылеподавления для ленточного транспортёра участка приготовления бетонной смеси предложено следующее:

- в существующей системе пылеподавления пенным слоем реализовать процесс пылезадержания (экранирования пыли) на основе применения сетчатого пеногенератора без принудительной подачи воздуха;
- производительность пеногенератора –  $0,048 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- вид пенообразователя – «Сампо»;
- концентрация пенообразователя в водном растворе –  $0,24\%$ ;
- кратность получаемой пены –  $750$ ;
- стойкость получаемой пены –  $480 \text{ с}$ ;
- концентрация пыли (по щебню) в рабочей зоне оператора:
  - без применения системы пылеподавления –  $89,6 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
  - в результате применения системы пылеподавления –  $1,1 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
- эффективность пылезадержания (по щебню) –  $98,77\%$ ;
- удельные энергетические затраты на организацию процесса пылезадержания –  $235 \text{ Вт}$ ;
- энергоёмкостный показатель процесса пылезадержания –  $2,69\%$ .

Таким образом, внедрение предлагаемой методики (приложение 3) позволяет реализовать процесс пылеподавления на ленточном транспортёре участка приготовления бетонной смеси с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня в воздухе рабочей зоны оператора транспортёра до уровня  $ПДК_{рз}$ , экологический эффект за счёт обеспечения  $ПДК_{мр}$  этих видов пыли в воздушном бассейне промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий. При этом экономический эффект от реализации предлагаемой технологии составит  $97418 \text{ руб}/\text{год}$ .

#### 5.2.4. Для аспирационной системы узла загрузки песка и щебня БСУ ООО «Завод строительного оборудования» г.Ростова-на-Дону

Предварительно также на ООО «Завод строительного оборудования» г. Ростова-на-Дону был проведён анализ результатов инвентаризации источников выбросов пыли в атмосферу, в результате чего установлено, что наиболее значимым по вкладу источником выброса пыли, а, следовательно, пылевого загрязнения воздушного бассейна промышленной площадки и прилегающей территории явился вентиляционный выброс аспирационной системы узла загрузки песка и щебня БСУ, оснащённый в качестве функционального элемента очистки матерчатый фильтром.

Для исследования пылевой обстановки в экологически значимой зоне промышленной площадки (в месте отдыха) проводили измерения концентрации пыли песка и щебня. Анализ и сравнение измеренных значений концентрации пыли песка и щебня ( $C_{\phi}$  изменялась до  $21 \text{ мг/м}^3$  в воздухе экологически значимой зоны) с нормативными значениями показали, что во всех точках замеров наблюдается соответствующие превышения  $ПДК_{\text{мр}} = 0,5 \text{ мг/м}^3$ .

С целью обеспечения безвредных условий труда за счёт снижения запылённости воздушного бассейна промышленной площадки путём снижения концентрации пыли песка и щебня в воздухе экологически значимой зоны (в месте отдыха) нами была применена разработанная методика выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной и соответствующая программа «GEEPSUOR» для её реализации и расчёта оптимальных рабочих параметров системы пылеподавления.

В результате для функционального элемента, реализующего очистку воздуха от пыли в аспирационной системе узла загрузки песка и щебня БСУ, рассчитаны следующие оптимальные (т.е. обеспечивающие максимальные значения эффективности и энергетической экономичности процесса очистки)

рабочие параметры:

- реализовать процесс очистки воздуха от пыли, применяя форсунки эжекционного типа с принудительной подачей воздуха, образующих в активной зоне очистки факел пенного аэрозоля;
- тип форсунки 1ВВК – 12;
- количество форсунок – 1 шт.;
- производительность (по раствору пенообразователя) форсунки –  $0,0012 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- давление раствора пенообразователя перед форсункой –  $0,35 \text{ МПа}$ ;
- вид пенообразователя – «ОП-7»;
- концентрация пенообразователя в водном растворе –  $1,45\%$ ;
- кратность получаемой пены – 315;
- стойкость получаемой пены –  $650 \text{ с}$ ;
- концентрация пыли щебня в воздухе экологически значимой зоне (в месте отдыха при штилевых условиях):
  - при использовании предыдущего варианта функционального элемента очистки в виде матерчатого фильтра –  $13,7 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
  - в результате применения системы пылеподавления –  $0,15 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
- экологическая эффективность очистки воздуха от пыли (по щебню) –  $98,91\%$ ;
- удельные энергетические затраты на организацию процесса очистки воздуха от пыли (для пыли щебня) –  $2015 \text{ Вт}$ ;
- энергоёмкостный показатель процесса пылеподавления –  $1,094\%$ .

Для реализации рассчитанных рабочих параметров предложено использовать устройство для очистки воздуха от пыли (рисунок 5.5).

Таким образом, внедрение предлагаемого устройства (приложение И) в качестве функционального элемента, реализующего очистку воздуха от пыли в аспирационной системе узла загрузки песка и щебня БСУ, позволяет реализовать процесс очистки с максимальными эффективностью и энергетической экономичностью, обеспечивая экологический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня до  $ПДК_{\text{мр}}$  в воздушном бассейне

промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий. При этом экономический эффект от реализации предлагаемой технологии составит 81346 руб/год.

**5.2.5 Для ленточного транспортёра участка транспортировки песка и щебня бетоносмесительного отделения ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК г. Батайска Ростовской области**

Практическую реализацию и промышленную апробацию методики оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной проводили также на предприятии строительной индустрии ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК г. Батайска Ростовской области.

В результате предварительных замеров концентрации пыли в воздухе рабочих зон было установлено, что наиболее значимым по вкладу источником пылеобразования и пылевыделения, а, следовательно, пылевого загрязнения воздушной среды явился ленточный транспортёр участка транспортировки песка и щебня бетоносмесительного отделения.

Для исследования пылевой обстановки в воздухе рабочей зоны ленточного транспортёра на постоянном рабочем месте оператора проводили измерения концентрации пыли щебня. Анализ и сравнение измеренных значений концентрации пыли песка и щебня ( $C_{\phi}$  изменялась в пределах от 105 мг/м<sup>3</sup> до 120 мг/м<sup>3</sup> без применения системы пылеподавления в зависимости от режима работы транспортёра) с нормативными значениями выявили превышения  $ПДК_{pz} = 2$  мг/м<sup>3</sup> во всех точках замеров.

С целью снижения запылённости воздуха в рабочей зоне и обеспечения безвредных условий труда оператора ленточного транспортёра участка

транспортировки песка и щебня бетоносмесительного отделения нами была применена разработанная методика выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной и соответствующая программа «GEEPSUOR» для её реализации и расчёта оптимальных рабочих параметров системы пылеподавления.

В результате в качестве оптимальных по эффективности и энергетической экономичности способа организации и технологии пылеподавления на начальном участке ленточного транспортёра инертных материалов склада щебня предложено следующее:

- организовать систему пылеподавления пенным слоем, реализующую процесс пылезадержания (экранирования пыли) на основе применения сетчатого пеногенератора без принудительной подачи воздуха;
- производительность пеногенератора –  $0,052 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- вид пенообразователя – ОП-7;
- концентрация пенообразователя в водном растворе –  $0,19\%$ ;
- кратность получаемой пены – 850;
- стойкость получаемой пены – 1200 с;
- концентрация пыли щебня в рабочей зоне оператора:
  - до применения системы пылеподавления –  $119,5 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
  - в результате применения системы пылеподавления –  $2,0 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
- эффективность пылезадержания –  $98,33\%$ ;
- удельные энергетические затраты на организацию процесса пылезадержания – 175 Вт;
- энергоёмкостный показатель процесса пылезадержания –  $2,44\%$ .

Таким образом, внедрение предлагаемой методики (приложение К) позволяет реализовать процесс пылеподавления на ленточном транспортёре участка транспортировки песка и щебня бетоносмесительного отделения с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня в воздухе рабочей зоны оператора транспортёра до уровня

$ПДК_{рз}$ , экологический эффект за счёт обеспечения  $ПДК_{мр}$  этих видов пыли в воздушном бассейне промплощадки, а также социально–экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий. При этом экономический эффект от реализации предлагаемой технологии составит 101472 руб/год.

### **5.2.6 Для аспирационной системы узла загрузки песка и щебня ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК г. Батайска Ростовской области**

Предварительно также на ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК г. Батайска Ростовской области был проведён анализ результатов инвентаризации источников выбросов пыли в атмосферу, в результате чего установлено, что наиболее значимым по вкладу источником выброса пыли, а, следовательно, пылевого загрязнения воздушного бассейна промышленной площадки и прилегающей территории явился вентиляционный выброс аспирационной системы узла загрузки песка и щебня участка приготовления бетонной смеси, оснащённый в качестве функционального элемента очистки батарейным циклоном (1-я ступень) и матерчатый фильтром (2-я ступень).

Для исследования пылевой обстановки в экологически значимой зоне промышленной площадки (в месте отдыха) проводили измерения концентрации пыли песка и щебня. Анализ и сравнение измеренных значений концентрации пыли песка и щебня ( $C_{ф}$  изменялась до  $37 \text{ мг/м}^3$  в воздухе экологически значимой зоны) с нормативными значениями показали, что во всех точках замеров наблюдается соответствующие превышения  $ПДК_{мр} = 0,5 \text{ мг/м}^3$ .

С целью обеспечения безвредных условий труда за счёт снижения запылённости воздушной среды промышленной площадки путём снижения

концентраций пыли песка и щебня в воздухе экологически значимой зоны (в месте отдыха) нами была применена разработанная методика выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной и соответствующая программа «GEEPSUOR» для её реализации и расчёта оптимальных рабочих параметров системы пылеподавления.

В результате для функционального элемента, реализующего 2-ю ступень очистки воздуха от пыли в аспирационной системе узла загрузки песка и щебня БСУ, рассчитаны следующие оптимальные (т.е. обеспечивающие максимальные значения эффективности и энергетической экономичности процесса очистки) рабочие параметры:

- реализовать во 2-й ступени процесс очистки воздуха от пыли на основе применения форсунок эжекционного типа с принудительной подачей воздуха, образующих в активной зоне очистки факел пенного аэрозоля;
- тип форсунки 1ВВК–12;
- количество форсунок – 1 шт.;
- производительность (по раствору пенообразователя) форсунки –  $0,0027 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- давление раствора пенообразователя перед форсункой –  $0,41 \text{ МПа}$ ;
- вид пенообразователя – «ОП-7»;
- концентрация пенообразователя в водном растворе –  $1,27\%$ ;
- кратность получаемой пены – 420;
- стойкость получаемой пены – 460 с;
- концентрация пыли щебня в воздухе экологически значимой зоне (в месте отдыха при штилевых условиях):
  - при использовании предыдущего варианта 2-й ступени функционального элемента очистки в виде матерчатого фильтра –  $36,4 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
  - в результате применения системы пылеподавления –  $0,27 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
- экологическая эффективность очистки воздуха от пыли (по щебню) –  $99,26\%$ ;
- удельные энергетические затраты на организацию процесса очистки воздуха

от пыли (по щебню) – 1873 Вт;

- энергоёмкостный показатель процесса пылеподавления – 1,219%.

Для реализации рассчитанных рабочих параметров предложено также использовать устройство для очистки воздуха от пыли (рисунок 5.5).

Таким образом, внедрение предлагаемого устройства (приложение Л) в качестве функционального элемента, реализующего 2-ю ступень очистки воздуха от пыли в аспирационной системе узла загрузки песка и щебня участка приготовления бетонной смеси, позволяет реализовать процесс очистки с максимальными эффективностью и энергетической экономичностью, обеспечивая экологический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня до  $ПДК_{мр}$  в воздушном бассейне промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий. При этом экономический эффект от реализации предлагаемой технологии составит 41671 руб/год.

Кроме того, промышленную апробацию разработанной методики осуществляли также на ЗАО «Ростовский Завод Железобетонных Конструкций» г. Ростова-на-Дону для ленточного транспортёра БСУ (приложение М). В этом случае кроме санитарно-гигиенического и социально-экономического, достигнут экономический эффект в размере 65491 руб/год.

Полученные результаты исследований и разработанная методика также использованы в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической университет» при проведении лекционных и практических занятий со студентами направления подготовки «Техносферная безопасность», профили «Безопасность технологических процессов и производств» и «Инженерная защита окружающей среды» (приложение Н) по дисциплинам: «Безопасность жизнедеятельности», «Теоретические основы защиты окружающей среды», «Процессы и аппараты защиты окружающей среды», «Механика многофазных сред», «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», а также при выполнении научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Донской

государственный технический университет» по теме: «Создать и внедрить инженерные системы обеспечения чистоты воздуха в производственных помещениях и предупреждения загрязнения атмосферы промышленных площадок», по теме: «Разработка и внедрение в практику систем жизнеобеспечения в производственной и окружающей средах» в рамках комплексной научно–технической программы Министерства образования и науки РФ; по теме: «Совершенствование методических подходов к оценке динамики загрязнения воздушного бассейна территорий городских застроек с учетом региональных природно-климатических, градостроительных особенностей и характеристик источников загрязнения воздуха» в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, № государственной регистрации 5.4244.2011; по теме научно-образовательного проекта «Решение комплексных проблем по разработке методологии выбора комплекса высокоэффективных и экономичных градостроительных, технологических и специальных инженерных мероприятий по обеспечению экологической безопасности территорий городских застроек» в рамках Программы Стратегического развития университета на 2012-2016 гг., № государственной регистрации 01201365848; по теме: «Научное обоснование концепции и разработка методологии оценки, расчета и проектирования экологически эффективных и энергетически экономичных способов и средств снижения загрязнения выбросов предприятий строительной индустрии и объектов городского хозяйства для обеспечения экологической безопасности территорий населенных мест» в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, № государственной регистрации 114041840023.

## **Выводы**

Таким образом, в качестве рекомендаций определены основные направления совершенствования каждого этапа реализации процесса

обеспыливания воздуха пеной на основе повышения эффективности при обеспечении максимальной энергетической экономичности, а, следовательно, получена возможность совершенствовать существующие и разрабатывать новые технические решения (способы и средства) для достижения оптимальных значений упомянутых выше результирующих параметров процесса обеспыливания.

Также выполнена практическая апробация методики принятия решения по выбору максимально эффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной:

- при эксплуатации и реконструкции заводов по изготовлению железобетонных конструкций;
- при проведении научных исследований и в учебном процессе.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях строительной индустрии: ПАО «Комбинат строительных материалов (КСМ) №10 (г. Ростов-на-Дону), ООО «Завод строительного оборудования» (г. Ростов-на-Дону), ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК (г. Батайск Ростовской области) и ЗАО «Ростовский Завод Железобетонных Конструкций» (г. Ростов-на-Дону).

Внедренные разработки позволили обеспечить нормативные значения концентрации пыли песка и щебня на постоянных рабочих местах предприятий строительной индустрии за счет снижения фактического уровня на 96-99%, обеспечив социально-экономический эффект по каждому предприятию в среднем от 40 до 130 тыс.руб/год на основе предотвращенного экономического ущерба от потери трудоспособности работниками предприятия.

В результате выполненных исследований можно заключить, что в качестве перспектив дальнейшей разработки темы необходимо предложить направления по повышению эффективности и энергетической экономичности способов организации и технологий пылеподавления пеной, а также по расширению области применения предложенной методики по спектру видов пылеобразующего материала и производственно-технологического оборудования предприятий стройиндустрии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено решение актуальной задачи по совершенствованию метода оценки и выбора высокоэффективных и энергетически экономичных инженерных систем обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха с целью обеспечения безвредных условий труда в рабочих зонах предприятий строительной индустрии, а также экологически безопасных условий, благоприятных для жизнедеятельности населения городских территорий.

При этом сформулированы следующие *итоги выполненного исследования*:

1. Выявлены основные факторы и источники загрязнения воздушной среды городских территорий, характерные для предприятий строительной индустрии, а также особенности состояния воздушной среды в рабочих зонах заводов по изготовлению железобетонных конструкций.
2. Определены и описаны энергетические характеристики процессов и явлений, наблюдаемых в пылевых аэрозолях, а также оценено влияние этих особенностей на условия реализации процесса обеспыливания воздуха.
3. Выполнен анализ современного состояния теории и практики обеспыливания технологического сырья и воздуха пенным способом как наиболее экономичной технологии борьбы с пылью, технологических особенностей получения пены, её основных свойств и условий пенообразования, а также известных методических подходов к оценке и выбору оптимальных для заданных производственных условий технологий обеспыливания пеной.
4. Разработан алгоритм реализации физико-энергетического подхода к оценке и выбору оптимальных для заданных производственных условий технологий обеспыливания пеной на основе построения физических моделей процессов загрязнения и снижения загрязнения технологического сырья и воздуха для основных технологических процессов на заводах по изготовлению железобетонных конструкций.

5. Получены параметрические зависимости эффективности и критерия энергетической экономичности (энергоёмкостного показателя) процесса обеспыливания пеной воздуха и технологического сырья для условий эксплуатации ленточных транспортёров.
6. Разработана методика принятия решения по выбору экологически эффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной, включая: формирование блока исходных данных для оценки и выбора оптимальных технологий обеспыливания пеной, математическое описание процесса обеспыливания пеной на этапах пылезадержания (экранирования), очистки воздуха от пыли и рассеивания пыли, а также формирование логического блока выбора оптимальной технологии обеспыливания пеной.
7. На основе разработанной методики выполнены теоретические расчеты и определены области существования значений санитарно-гигиенической и экологической эффективности, а также энергетической экономичности различных технологий обеспыливания пеной для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций.
8. Выполнена проверка разработанных теоретических положений экспериментальными исследованиями в лабораторных условиях на экспериментальном стенде для исследования результирующих параметров различных технологий обеспыливания пеной технологического сырья и воздуха для производственных условий заводов по изготовлению железобетонных конструкций, разработанном и смонтированном в лаборатории кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет».
9. Выполнено сопоставление результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными и оценена возможность практического использования разработанной методики. Учитывая погрешность проведенных измерений эффективности обеспыливания и удельной затраченной энергии, результаты теоретических расчетов в достаточной степени согласуются с данными экспериментальных исследований соответственно в пределах

относительных погрешностей  $\Delta_C = \pm 13,26\%$  и  $\Delta_N = \pm 9,7\%$  при доверительной вероятности  $p=0,95$ .

10. Выполнена практическая апробация методики принятия решения по выбору максимально эффективных и энергетически экономичных технологий обеспыливания пеной при эксплуатации и реконструкции заводов по изготовлению железобетонных конструкций, а также при проведении научных исследований и в учебном процессе. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях строительной индустрии: ПАО «Комбинат строительных материалов (КСМ) №10 (г. Ростов-на-Дону), ООО «Завод строительного оборудования» (г. Ростов-на-Дону), ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК (г. Батайск Ростовской области) и ЗАО «Ростовский Завод Железобетонных Конструкций» (г. Ростов-на-Дону). Внедренные разработки позволили обеспечить нормативные значения концентрации пыли песка и щебня на постоянных рабочих местах предприятий строительной индустрии за счет снижения фактического уровня на 96-99%, обеспечив социально-экономический эффект по каждому предприятию в среднем от 40 до 130 тыс.руб/год на основе предотвращенного экономического ущерба от потери трудоспособности работниками предприятия.

В качестве *рекомендаций* определены основные направления совершенствования каждого этапа реализации процесса обеспыливания воздуха пеной на основе повышения эффективности при обеспечении максимальной энергетической экономичности, а, следовательно, получена возможность совершенствовать существующие и разрабатывать новые технические решения (способы и средства) для достижения оптимальных значений упомянутых выше результирующих параметров процесса обеспыливания.

*Перспективы дальнейшей разработки темы* заключаются в предложениях по совершенствованию способов организации и технологий пылеподавления пеной, а также по расширению области применения предложенной методики по спектру видов пылеобразующего материала и производственно–технологического оборудования предприятий стройиндустрии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон № 7–ФЗ «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 г. (ред. от 24.11.2014, с изм. от 29.12.2014) [Электронный ресурс]. – URL.: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/)
2. Федеральный закон № 96–ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» от 04.05.1999 г. (с изм. от 29.12.2014 г.). [Электронный ресурс]. – URL.: <http://docs.cntd.ru/document/901732276>
3. Федеральный закон № 52–ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г. (ред. от 29.12.2014г.) [Электронный ресурс]. – URL.: <http://docs.cntd.ru/document/901729631>
4. ГН 2.1.6.2604-10 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Дополнение №8 к ГН 2.1.6.1338-03» [Электронный ресурс]. – URL.: [http://snipov.net/c\\_4655\\_snip\\_58451.html](http://snipov.net/c_4655_snip_58451.html)
5. Азаров, В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Н. Азаров. – Ростов н/Д, 2004. – 40 с.
6. Азаров, В. Н. Оценка пылевыделения от технологического оборудования [Текст] / В. Н. Азаров // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 7. – С. 45-46.
7. Брославский, Л. И. Экология и охрана окружающей среды: законы и реалии в США и России [Текст]: Монография / Л. И. Брославский. – М.: НИЦ Инфра–М, 2013. – 317 с.
8. Гарнов, А. П. Общие вопросы эффективного природопользования [Текст]: Монография/ А.П. Гарнов, О. В. Краснобаева. – М.: НИЦ ИНФРА – М, 2014. – 214 с.
9. Цховребов, Э. С. Экологическая безопасность в строительной индустрии [Текст]: Монография / Э. С. Цховребов, Г. В. Четвертаков, С. И. Шканов. – М.:

Альфа–М, 2014. – 304 с.

10. Гимадеев, М. М. Современные проблемы охраны атмосферного воздуха [Текст] / М. М. Гимадеев, А. И. Щеповских. – Казань, 1997. – 368 с.

11. Бобровников, Н. А. Охрана воздушной среды от пыли на предприятиях строительной индустрии [Текст] / Н. А. Бобровников. – М., 1981. – 99 с.

12. Бретшнайдер, С. Охрана воздушного бассейна от загрязнений. Технология и контроль [Текст] / С. Бретшнайдер, И. Курфюрст. – Л.: Химия, 1983. – 288 с.

13. Сухачев, А. А. Охрана труда в строительстве [Текст]: Учебник / А. А. Сухачев. – М.: КноРус, 2013. – 272 с.

14. Фролов, А. В. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве [Текст]: Учебное пособие / А. В. Фролов, В. А. Лепихова, Н. В. Ляшенко. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 704 с.

15. Карапата, А. П. Профессиональные пылевые болезни легких [Текст] / А. П. Карапата, А. М. Шевченко. – Киев, 1980. – 182 с.

16. Магомадов, И. З. Снижение пылевого загрязнения воздушной среды при производстве работ по восстановлению разрушенных зданий и сооружений городского хозяйства [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. З. Магомадов. – Волгоград, 2015. – 25 с.

17. Кисленко, Т. А. Совершенствование систем обеспыливания в производстве керамзита [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т. А. Кисленко. – Волгоград, 2015. – 19 с.

18. Садовникова, Н. П. Методологические основы поддержки принятия решений в задачах обеспечения экологической безопасности развития урбанизированных территорий [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н. П. Садовникова. – Волгоград, 2013. – 31 с.

19. Алимов, Л. А. Технология производства неметаллических строительных изделий и конструкций [Текст]: Учебник / Л. А. Алимов, В. В. Воронин. – М.: ИНФРА–М, 2005. – 443 с.

20. Справочник строителя [Текст]: В 2-х т. Т.1 / Под общей ред. Л. Р. Маиляна. – Ростов н/Д: изд–во Ростовского государственного университета, 1996. – 576 с.

21. Справочник строителя [Текст]: В 2-х т. Т.2 / Под общей ред. Л. Р. Маиляна. – Ростов н/Д: изд-во Ростовского государственного университета, 1996. – 512 с.
22. Борщевский, А. А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий [Текст] / А. А. Борщевский, А. С. Ильин. – М.: Высшая школа, 1987. – 326 с.
23. Строительные материалы [Текст]: Учебно-справочное пособие / Г. А. Айрапетов и др.; под ред. Г. В. Несветаева. – 4-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 699 с.
24. Зуева, Н. А. Применение термодинамического резерва для минимизации антропогенного воздействия обжиговых технологий производства строительных материалов на окружающую среду [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Н. А. Зуева. – СПб, 2002. – 182 с.
25. Романюк, Т. Ф. Технология производства строительных материалов [Текст]: Учебное пособие / Т. Ф. Романюк, Г. Г. Петров. – Томск: Томский гос. архитектурно-строительный ун-т, 2006. – 154 с.
26. Зуев, Б. М. Технология и организация производства арматурных изделий для железобетонных конструкций [Текст]: Учебное пособие / Б. М. Зуев, А. В. Уколова, В. Т. Перцев. – Воронеж: Воронежский гос. архитектурно-строит. ун-т, 2009. – 40 с.
27. Маилян, Д. Р. Способы изготовления железобетонных конструкций с переменным преднапряжением по длине элемента [Текст]/ Д. Р. Маилян, Р. Л. Маилян, В. Х. Хуранов // Известия высших учебных заведений. Сер. Строительство. – 2004. – № 5. – С. 4-11.
28. Балтеренас, П. С. Обеспыливание воздуха на предприятиях строительных материалов [Текст] / П. С. Балтеренас. – М.: Стройиздат, 1990. – 180 с.
29. Банит, Ф. Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов [Текст] / Ф. Г. Банит, А. Д. Мальгин. – М.: Стройиздат, 1979. – 352 с.
30. Применение в строительстве и стройиндустрии аппаратов пылеулавливания с фильтрующе-взвешенным слоем [Текст] / Т. А. Кисленко и др. // Проблемы

охраны производственной и окружающей среды: сб. науч. тр. – Волгоград: ПринтТерра-Дизайн, 2013. – Вып. 5. – С. 41 - 45.

31. Минко, В. А. Обеспыливание технологических процессов производства строительных материалов [Текст] / В. А. Минко. – Воронеж, 1981. – 175 с.

32. Комплексные системы обеспыливания при переработке сыпучих материалов [Текст] / А. В. Минко и др. // Высокие технологии в экологии : сб. тр. по мат. Межд. науч.-техн. конф. – Воронеж, 1998. – С. 123 - 127.

33. Сергина, Н. М. Совершенствование схем компоновки многоступенчатых систем пылеулавливания с вихревыми аппаратами [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. М. Сергина. – Волгоград, 2000. – 20 с.

34. Минко, В. А. Комплексное обеспыливание помещений при производстве цемента [Текст] / А. В. Минко, В. Г. Шаптала // Цемент. – 1990. – № 12. – С. 15-17.

35. Беспалов, В. И., Теория и практика обеспыливания воздуха [Текст] / В. И. Беспалов, Д. С. Данельянц, Й. Мишнер. – Киев: Наукова думка, 2000. – 185 с.

36. Расчет и выбор пылеулавливающего оборудования [Текст] / В. А. Горемыкин и др. – Воронеж: Воронежская государственная архитектурно–строительная академия, 2000. – 326 с.

37. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли [Текст] / В. И. Саранчук, В. Н. Качан, В. В. Рекун. и др. – Киев: Наукова думка, 1984. – 216 с.

38. Химические вещества для борьбы с пылью [Текст] / В. И. Саранчук, В. П. Журавлев и др. – Киев: Наукова думка, 1987. – 249 с.

39. Кудряшов, В. В. Научные основы гидрообеспыливания шахт Севера [Текст] / В. В. Кудряшов. – М: Наука, 1984. - 264 с.

40. Кудряшов, В. В. Механизм подавления пыли растворами ПАВ при орошении [Текст] / В. В. Кудряшов, Л. Д. Воронина, М. К. Шуринова // Аэродисперсные системы и коагуляция аэрозолей: тез. док. на Всесоюз. науч. –техн. конф. – М.: 1982. – С. 3 - 5.

41. Ишук, И. Г. Перспективы увеличения эффективности средств борьбы с пылью при работе добычных комбайнов [Текст] / И. Г. Ишук, Г. А.

Поздняков // Труды ИГД им. А. А. Скочинского. – Вып. 127. – М, 1975. – С. 183 - 192.

42. Богуславский, Е. И. Оценка концентрации и дисперсного состава пыли в воздухе рабочих и обслуживаемых зон [Текст] / Е. И. Богуславский, В. Н. Азаров // Безопасность жизнедеятельности. – 2005. – № 2. – С. 46.

43. Богуславский, Е. И. Эффективность массопереноса в центробежном поле пылеулавливающих аппаратов с учетом ударных взаимодействий частиц [Текст] / Е. И. Богуславский // Известия высших учебных заведений. Сер. Строительство. – 1996. – № 5. – С. 76.

44. Беспалов, В. И. Физико-энергетическая концепция описания процессов и системный подход к выбору высокоэффективных и экономичных инженерных комплексов защиты воздушной среды от выбросов загрязняющих веществ [Текст] / В. И. Беспалов // Известия СКНЦ ВШ. Сер. Естественные науки. – 1995. – № 3. – С. 43 - 48.

45. Беспалов, В. И. Физико-энергетическая концепция описания процессов и проектирования инженерных комплексов защиты воздушной среды [Текст] / В. И. Беспалов // БЖД. Охрана труда и окружающей среды: межвуз. сб. науч. тр. – Ростов н/Д.: РГСУ, 1997. – С. 65 - 70.

46. Беспалов, В. И. Разработка метода формирования высокоэффективных и экономичных систем обеспыливания воздуха рабочей зоны горнодобывающих и перерабатывающих предприятий топливно-энергетического комплекса [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Беспалов. – Москва, 1997. – 42 с.

47. Беспалов, В. И. Оценка процессов и расчет аппаратов защиты окружающей среды [Текст]: Учебное пособие / В. И. Беспалов, С. В. Мещеряков, О. С. Гурова. – Ростов н/Д.: ООО «Мини Тайп», 2007. – 192 с.

48. Беспалов, В. И. Анализ методических подходов к выбору обеспыливающего оборудования при эксплуатации агрегата питания асфальтобетонного завода [Электронный ресурс] / В. И. Беспалов, Д. А. Протопопова // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 19. – № 1. – С. 39 – 41. – URL.: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/622>

49. Беспалов, В. И. Анализ возможных применений технологий обеспыливания воздуха на предприятиях строительной индустрии [Текст] / В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Научное обозрение. – 2012. – № 6. – С. 193 – 195.
50. Беспалов, В. И. Применение теории дисперсных систем для описания особенностей поведения токсичных компонентов отходящих и выхлопных газов стационарных и передвижных источников урбанизированных территорий [Электронный ресурс] / В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Н. С. Самарская // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т.27. – № 4. – С.286. URL.: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2319>
51. Беспалов, В. И. Применение физико-энергетического подхода к описанию процесса загрязнения воздуха заводами ЖБИиК [Электронный ресурс] / В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 26. – № 3 (26). – С.175. – URL.: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1963>
52. Беспалов, В. И. Исследование процесса загрязнения воздушной среды города предприятиями строительной индустрии [Текст] / В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Н. С. Самарская и др. // Сб. науч. тр. Sworld. – 2014. – Т. 3. – № 1. – С. 15 - 20.
53. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2009 году [Электронный ресурс]: Государственный доклад. – М., 2009. – URL.: [http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/621/6158\\_osdoklad\\_-2009.zip](http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/621/6158_osdoklad_-2009.zip)
54. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2010 году [Электронный ресурс]: Государственный доклад. – М., 2010. – URL.: <http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/da2/1fevr.rar>
55. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году [Электронный ресурс]: Государственный доклад. – М., 2011. – URL.: <http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/a76/gosdoklad2011.pdf>
56. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2012 году [Электронный ресурс]: Государственный доклад. – М., 2012. – URL.: <http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/cef/gosdoklad za 2012 god.pdf>
57. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 году [Электронный ресурс]: Государственный доклад. – М., 2013. – URL.:

<http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/6c7/gosdokladeco.pdf>

58. Временные методические указания по проведению комплексной экологической оценки состояния атмосферного воздуха большого города [Текст] / Под ред. Э. Ю. Безуглой. – М., 1995.
59. Чистякова, С. Б. Охрана окружающей среды [Текст]: учебное пособие / С. Б. Чистякова. – М.: Стройиздат, 1988. – 315 с.
60. Смирнов, В. И. Математическая оценка застроенных территорий [Текст] / В. И. Смирнов, В. С. Кожевников. – М.: Стройиздат, 1985. – 126 с.
61. Беспалов, В. И. Инженерная методика комплексной оценки состояния застроенных территорий [Текст] / В. И. Беспалов, Ю. Ю. Максюкова // Вестник Донского государственного технического университета. – 2007. – Т. 7. – № 1 (32). – С. 67-69.
62. Беспалов, В. И. Алгоритм определения комплексной оценки состояния застроенных территорий на примере г. Ростова-на-Дону [Текст] / В. И. Беспалов, Ю. Ю. Максюкова // Экологические системы и приборы. – 2007. – № 5. – С. 47-51.
63. Беспалов, В. И. Экологические критерии комплексной оценки застроенных территорий города [Текст] / В. И. Беспалов, Ю. Ю. Максюкова // Строительство – 2005: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2005. – С. 27.
64. Максюкова, Ю. Ю. Комплексная оценка застроенных территорий // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды [Текст] / Ю. Ю. Максюкова // Межвуз. сб. науч. тр. – Ростов н/Д.: РГАСХМ, 2005. – Вып. 9. – С. 58-61.
65. Полянский, В. И. Определение обобщенного критерия оценки технологической системы борьбы с пылью [Текст] / В. И. Полянский, Е. А. Беломойцев // Тез. док. II регион. науч.-техн. конф. (Караганда, 1985). – Караганда: Изд-во Карагандинского гос. ун-та, 1985. – С. 41.
66. Беломойцев, Е. А. Методические положения выбора предпочтительного варианта способа борьбы с пылью [Текст] / Е. А. Беломойцев // Тез. док. II регион. науч.-техн. конф. (Караганда, 1985). – Караганда: Изд-во Карагандинского гос.

ун-та, 1985. – С. 43.

67. Гурова, О. С. Технологические основы пылезадержания пеной на предприятиях строительной индустрии [Текст]/ О. С. Гурова // Научное обозрение. – 2015. – № 24 – С. 30-35.

68. Глузберг, В. Е. Исследование физических механизмов пылеподавления диспергированной жидкостью и совершенствование параметров и средств орошения для борьбы с пылью при работе горных комбайнов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В. Е. Глузберг. – Караганда, 1979. – 300 с.

69. Промышленная экология [Текст]: учеб. пособие / под. ред. В. В. Денисова. – М.: ИКЦ Март, 2007. – 132 с.

70. Тимонин, А. С. Инженерно–экологический справочник [Текст]: в 3 т. Т.1/ А. С. Тимонин. – Калуга, 2003. – 917 с.

71. Беспалов, В. И. Научное обоснование построения баланса и экологической оценки производственных потоков при изготовлении железобетонных изделий и конструкций заводов ЖБИиК [Электронный ресурс]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, О. Н. Парамонова // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – С. 8. – URL.: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3416](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2015/3416)

72. Промышленная экология [Текст]: учеб. пособие / В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Н. С. Самарская и др. – Ростов н/Д.: Рост. гос. строит. ун-т, 2009. – 88 с.

73. Системы борьбы с пылью на промышленных предприятиях [Текст]/ В. И. Саранчук, В. П. Журавлев и др. – Киев: Наукова думка, 1994. – 149с.

74. Журавлев, В. П. Комплексное обеспыливание промышленных предприятий [Текст]/ В. П. Журавлев, А. А. Цыцура. – Ростов н/Д., 1994. – 226 с.

75. Эйнштейн, А. К электродинамике движущихся тел [Электронный ресурс] / А. Эйнштейн // В кн.: Собрание научных трудов: сб. Т. 1 / Под ред. Е. И. Тамма. – М.: Наука, 1966. – С. 7. – URL.: <http://web.ihep.su/dbserv/compas/src/einstein05b/rus.pdf>

76. Einstein, A. Annalender Physik [Электронный ресурс] / A. Einstein // Ann Phys. – 1906. – № 19. – p. 371. – URL.: <http://www.physik.uni-augsburg.de/theo1/hanggi/History/Einstein1906BMII.pdf>

77. Эйнштейн, А. К общей молекулярной теории теплоты [Текст]/ А. Эйнштейн // в кн. Собрание научных трудов Т. 3. – М.: Наука, 1966. – с. 67.
78. Пирумов, А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации [Текст]/ А. И. Пирумов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 124 с.
79. Коузов, П. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей [Текст]/ П. А. Коузов, Л. Я. Скрыбина. – Л.: Химия, 1983. – 143 с.
80. Стрэтт, Дж. В. Волновая теория света [Текст]/ Дж. В. Стрэтт. – М.: Изд-во: Издательская группа "Едиториал УРСС", 2004. – 211 с.
81. Грин, Х. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы [Текст]/ Х. Грин, В. Лейн; под ред. Н. А. Фукса. – Изд. 2-е. – Пер. с англ. – Л.: Химия, 1972. – 428 с.
82. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха [Текст]/ А. И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
83. Кирин, Б. Ф. К вопросу об осаждении частиц на каплях воды [Текст]/ Б. Ф. Кирин, А. С. Дремуха // Вопросы механики горных пород: сб. ст. – М.: Недра, 1971. – с. 192 - 196.
84. Грачев, Ю. Г. Теоретические основы обеспыливания воздушной среды производственных помещений, орошаемых диспергированной водой [Текст] / Ю. Г. Грачев, А. В. Перевозчикова // Физико–математические методы в исследовании свойств строительных материалов и в их производстве: сб. ст. – М.: МИСИ, 1982. – С. 50-54.
85. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию [Текст]/ П. Райст. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
86. Зимон, А. Д. Адгезия пыли и порошков [Текст]/ А. Д. Зимон. – Изд. 2-е перераб. и дополн. – М.: Химия, 1976. - 432 с.
87. Приказ Минтруда России №33н от 24.01.2014 г. «Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению» [Электронный ресурс]. – <http://www.rosmintrud.ru/docs/mintrud/orders/170>

88. ГОСТ ССБТ 12.1.005-88\*. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (введ. 1989-01-01) [Текст]/ Министерство здравоохранения СССР; Всесоюзный Центр Совета Профессиональных Союзов. – М.: Издательство стандартов, 1998.
89. Шелудко, А. И. Коллоидная химия [Текст]/ А. И. Шелудко. – М.:ИЛ, 1960. – 332 с.
90. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия [Текст]/ Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – М.: Изд-во МГУ, 1982. – 352 с.
91. Гамеева, О. С. Физическая и коллоидная химия [Текст]/ О. С. Гамеева. – М.: Высшая школа, 1977. – 415 с.
92. Менковский, М. А. Физическая и коллоидная химия [Текст]/ М. А. Менковский, Л. А. Шварцман. – М.: Химия, 1984. - 368 с.
93. Богуславский, Е. И. Вероятностно-стохастический подход к проблемам охраны производственной и окружающей сред [Текст]: Монография / Е. И. Богуславский; Сев. –Кавказ. науч. центр выс. шк.; Рост. гос. строит. ун–т. – Ростов н/Д.: Изд-во Сев. –Кавк. науч. центр выс. шк., 2000. – 159 с.
94. Цыцура, А. А. Управление процессом очистки атмосферы от пыли на основе физико-химического подхода к рассмотрению механизмов взаимодействия пылевых аэрозолей с диспергированными жидкостями [Текст]: автореферат дис. ... доктора технических наук / А. А. Цыцура. – Ростов н/Д., 1991.– 40 с.
95. Коровченко, Т. И. Разработка способа и средств повышения эффективности пылеулавливания пенным аэрозолем [Текст]: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т. И. Коровченко. – М., 1988.– 40 с.
96. Дюсебаев, М. К. К вопросу взаимодействия пылевых частиц с поверхностью электрозаряженной пены [Текст]/ М. К. Дюсебаев, Б. С. Жумартов, Е. Л. Умнов // Аэродисперсные системы и коагуляция аэрозолей: тез. док. на Всесоюз. науч. – техн. конф. – М.: 1982. – С. 187.
97. Журавлёв, В. П. Совершенствование гидрообеспыливания очистных и подготовительных угольных забоев [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. П. Журавлёв. – Караганда, 1973.– 40 с.

98. Тихомиров, В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения [Текст]/ В. К. Тихомиров. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
99. Аксёнов, А. А. Об оптимальной толщине плёнок пены, обеспечивающей эффективную изоляцию очага пылевыведения [Текст]/ А. А. Аксёнов // Борьба с силикозом: сб. ст. – М.: Наука, 1977. – С.40 – 44.
100. Абрамзон, А. А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение [Текст]/ А. А. Абрамзон. – Л.: Химия, 1981. – 304 с.
101. Неволин, Ф. В. Химия и технология синтетических моющих средств [Текст]/ Ф. В. Неволин. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 185 с.
102. Гродель, Г. С. Результаты оценки пенообразователей для борьбы с угольной пылью [Текст]/ Г. С. Гродель, Б. И. Кривохижа // Борьба с газом, пылью и выбросами в угольных шахтах: сб. ст. – Донецк: ДПИ, 1973. – Вып. 9. – С.78 – 83.
103. Роменский, Л. П. Пена как средство борьбы с пылью [Текст]/ Л. П. Роменский. – Киев: Наукова Думка, 1976. – 153 с.
104. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах [Текст]/ Ф. М. Гельфанд, В. П. Журавлёв и др. – М.: Недра, 1975. – 288 с.
105. Журавлёв, В. П. Определение параметров пены для эффективного подавления пыли [Текст]/ В. П. Журавлёв, В. А. Фихтнер // Борьба с силикозом: сб. ст.- М.: Наука, 1986. – Т.12. – С.70 – 74.
106. Поверхностно–активные вещества [Текст]: Справочник / Под ред. А. А. Абрамзона. – Л.: Химия, 1979.
107. Фихтнер В.А. Разработка метода выбора технологических параметров пенного способа пылеподавления: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Фихтнер Вера Альбертовна. – М.,1988.– 19 с.
108. Гегузин, Я. Е. Пузыри [Текст]/ Я. Е. Гегузин. - М.: Наука. Главная редакция физико-химической литературы, 1985. – 176 с.
109. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию [Текст]/ П. Райст. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
110. Кухлинг, Х. Справочник по физике [Текст]/ Х. Кухлинг; под ред. Е. М. Лейкина. – Изд. 2-е. – Пер. с нем. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

111. Зимон, А. Д. Мир частиц [Текст]: Коллоидная химия для всех / А. Д. Зимон. – М.: Наука, 1988. – 192 с.
112. Пажи, Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей [Текст]/ Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 253 с.
113. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст]/ В. Г. Левич. – М.: Изд. АН СССР, 1952. – 531 с.
114. Фихтнер, В. А. Закономерности процессов образования и разрушения пены как дисперсной системы [Текст]/ В. А. Фихтнер // Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем: тез. док. XV Всесоюз. конф. – Одесса: Изд-во ОГУ, 1989. – Т. II. – С. 218.
115. Пенный режим и пенные аппараты [Текст]/ Э. Я. Тарат, И. П. Мухлёнов и др. – Л.: Химия, 1977. – 288 с.
116. Гурова, О. С. Разработка способа обеспыливания воздуха пеной высокой кратности на этапах улавливания, очистки, рассеивания [Текст]/ О. С. Гурова // Тез. док. Межд. науч. – практ. конф. ИИЭС. – Ростов н/Д., 1997. – С. 70 - 71.
117. Обухов, Ю. Д. Экономическая оценка способов борьбы с пылью в карьере [Текст]/ Ю. Д. Обухов, Е. В. Огарков, Ж. Р. Имашев // II Всесоюзн. науч. – практ. конф. «Аэродисперсные системы и коагуляция аэрозолей». – М., 1988. – С. 53.
118. Беспалов, В. И. Определение критериев выбора методов утилизации твердых бытовых отходов [Текст]/ В. И. Беспалов, О. Н. Парамонова // Проблемы геологии, планетологии, геоэкологии и рационального природопольз: Всеросс. конф., г. Новочеркасск, 26–28 окт. – ЮРГТУ (НПИ), 2011. – С. 265 - 267.
119. Беспалов, В. И. Математическое описание процесса обеспыливания рабочей зоны агрегата питания асфальтобетонного завода [Текст]/ В. И. Беспалов, Д. А. Протопопова // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 4. – С. 34 – 37.
120. Гурова, О. С. Анализ условий применения технологий обеспыливания воздуха на основе пены для предприятий строительной индустрии [Текст]/ О. С. Гурова // Экология и жизнь: Междун. науч. – практ. конф. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2012. – С. 39 - 41.

121. Беспалов, В. И. Совершенствование методики выбора технологии обеспыливания воздуха пенным способом [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Наука и образование в XXI веке: сб науч. тр. – М.: «АР–Консалт», 2013. – С. 92 – 94.
122. Development of Physical and Energy Concept for Assessment and Selection of Technologies for Treatment of Emissions from Urban Environment Objects. [Электронный ресурс] / V. I. Bepalov, O. S. Gurova, E. P. Lysova и др. // BIOSCIENCES BIOTECHNOLOGY RESEARCH ASIA. – 2014. – December. – Vol. 11(3). – p. 1615 – 1620. DOI: <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/1560> (Received: 30 October 2014; accepted: 05 December 2014). – URL: <http://www.biotech-asia.org/dnload/Vadim-Igorevich-Bespalov-Oksana-Sergeevna-Gurova-Natalia-Sergeevna-Samarskaya-Ekaterina-Petrovna-Lysova-and-Alexandra-Nicolaevna-Mishchenko/BBRAV11I03P1615-1620.pdf>
123. Assessment of Ecological Efficiency and Energy Efficiency of Foam Use at the Construction Industry Enterprises by Emission Cleaning Process. [Электронный ресурс] / V. I. Bepalov, O. S. Gurova, N. S. Samarskaya и др. // BIOSCIENCES BIOTECHNOLOGY RESEARCH ASIA. – 2015. – August. – Vol. 12 (2). – p. 1587-1596. DOI: <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/1805> (Received: 10 April 2015; accepted: 19 June 2015). – URL: <http://www.biotech-asia.org/dnload/Vadim-Igorevich-Bespalov-Oksana-Sergeevna-Gurova-%0D%0ANatalia-Sergeevna-Samarskaya-and-Natalya-Vladimirovna-Yudina/BBRAV12I02P1587-1596.pdf>
124. Гурова, О. С. Разработка способа улавливания пыли пеной высокой кратности [Текст]/ О. С. Гурова, Н. А. Ломакина // Экология и регион: Мат. междунар. науч. практ. конф. – Ростов н/Д: изд–во РГЭА, 1995. - С. 65.
125. Беспалов, В. И. Методика расчета эффективности гидроорошения с учетом энергетических параметров [Текст]/ В. И. Беспалов, Н. А. Страхова // Обеспыливание в строительстве: Межвуз. сб. – Ростов н/Д.: изд–во РИСИ, 1987. – С. 35 - 45.
126. Гурова, О. С. Совершенствование пенного способа обеспыливания воздуха рабочих зон [Текст]/ О. С. Гурова // Промышленная экология: мат. Межд. школы-

семинара. – Ростов н/Д., 2000. – С. 15 - 18.

127. Гурова, О. С. Описание физической модели процесса загрязнения воздуха для бетоносмесительного отделения заводов железобетонных изделий и конструкций [Текст]/ О. С. Гурова // Проблемы развития науки и образования: теория и практика: Сб. науч. тр. по мат. Межд. науч. – практ. конф. – М.: «АР-Консалт», 2013. – С. 111 - 113.

128. Совершенствование способов и средств обеспыливания воздушной среды бетоносмесительных отделений заводов железобетонных изделий и конструкций [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Н. В. Юдина и др. – Ростов н/Д.: изд-во Рост. гос. строит. ун-т, 2015. – 126 с.

129. Беспалов, В. И., Гурова, О.С. Математическое описание результирующих параметров процесса обеспыливания отходящих газов и вентиляционного воздуха слоем пены [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Символ науки. – 2015. – № 3. – С. 79 - 83.

130. Никитин, В. С. О механизме взаимодействия пыли с воздушно-механической пеной при пылеподавлении [Текст]/ В. С. Никитин // Борьба с силикозом: сб. ст. – М.: Наука, 1997. – Т. X. – С. 110 - 113.

131. Литвинов, А. Г. Об инерционном осаждении частиц на каплях жидкости [Текст]/ А. Г. Литвинов // Журнал прикладной химии. – 1965. – Вып. 10. – С. 2237 - 2242.

132. Кирин, Б. Ф. К вопросу об осаждении частиц на каплях воды [Текст]/ Б. Ф. Кирин, А. С. Дремуха // Вопросы механики горных пород: сб. ст. – М.: Недра, 1971. – С. 192 - 196.

133. Дюсебаев, М. К. К вопросу взаимодействия пылевых частиц с поверхностью электрозаряженной пены [Текст]/ М. К. Дюсебаев, Б. С. Жумартов, Е. Л. Умнов // Аэродисперсные системы и коагуляция аэрозолей: тез. док. Всесоюз. науч. – технич. конф. – М., 1982. – С. 187.

134. Казиева, Г. С. Разработка средств повышения эффективности пылеподавления при дроблении руды в подземных условиях [Текст]: дис. . . канд. техн. наук / Г. С. Казиева. – Алма-Ата, 1988. – 167 с.

135. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности [Текст]/ Под ред. А. С. Кузьмича. – М.: Недра, 1982. – 240 с.
136. Дерягин, Б. В. Современная теория устойчивости лиофобных суспензий и зольей [Текст]/ Б. В. Дерягин // Тр. III Всесоюз. Конф. по коллоидной химии (Москва, октябрь 1956). – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – С. 226 – 249.
137. Дерягин, Б. В. О безынерционном осаждении на сфере частиц из потока жидкости под действием сил притяжения Ван-дер-Ваальса [Текст]/ Б. В. Дерягин, Л. П. Смирнов // В кн.: Исследования в области поверхностных сил. – М.: Наук, 1967. – С. 188 - 207.
138. Дерягин, Б. В. О безынерционном электростатическом осаждении частиц аэрозоля на сфере, обтекаемой вязким потоком [Текст]/ Б. В. Дерягин, Л. П. Смирнов // Коллоидный журнал. – 1967. – Т. 29. – № 3. – С. 400 - 412.
139. Беспалов, В. И. Теоретические основы описания процесса очистки воздуха от газообразных загрязняющих веществ [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды: межвуз. сб. науч. тр. – Ростов н/Д.: РГАСХМ, 1999. – С. 65 - 68.
140. Беспалов, В. И. Научные основы разработки и формирования высокоэффективных и экономичных систем защиты воздушного бассейна территории комплексной застройки [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды: межвуз. сб. науч. тр. – Ростов н/Д.: РГАСХМ, 2000. – С. 65 - 68.
141. Гурова, О. С. Математическое описание результирующих параметров процесса пылеподавления пенным аэрозолем на ленточных конвейерах предприятий строительной индустрии [Электронный ресурс]/ О. С. Гурова, // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. С. 8. - URL.: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3356](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3356)
142. Ребиндер, П. А. Повышение пылеулавливающей способности воды [Текст]/ П. А. Ребиндер, Н. И. Серб-Сербина, С. А. Кордюкова // Борьба с силикозом. – 1953. – № 3. – С. 57 - 69.
143. Беспалов, В. И. Научное обоснование выбора оптимальной технологии

очистки выбросов пенным слоем [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Строительство-2014: мат. Межд. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2014. – С. 165 - 168.

144. Беспалов, В. И. Методология выбора комплекса высокоэффективных и энергетически экономичных систем обеспечения экологической безопасности территорий городских застроек [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Строительство-2014: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2014. – С. 22 - 28.

145. Беспалов, В. И. Физико-энергетическая концепция выбора комплекса высокоэффективных и энергетически экономичных систем обеспечения экологической безопасности территорий городских застроек [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Строительство и архитектура-2015: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2015. – С. 35 - 55.

146. Беспалов, В. И. Применение теории подобия к описанию механизмов процесса обеспыливания [Текст]/ В. И. Беспалов, Н. А. Страхова // Обеспыливание в строительстве: межв. сб. – Ростов н/Д.: изд-во РИСИ, 1990. – С. 32 - 37.

147. Биркгоф, Г. Гидродинамика: Методы. Факты. Подобие [Текст]/ Г. Биркгоф. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 244 с.

148. Применение теории дисперсных систем для описания особенностей поведения токсичных компонентов отходящих и выхлопных газов стационарных и передвижных источников урбанизированных территорий [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Н. С. Самарская и др. // Научное обозрение. – 2014. – № 9. – Ч. 3. – С. 710 - 713.

149. Самарская, Н. С. Обзор известных методов и способов очистки выбросов предприятий стройиндустрии [Текст] / Н. С. Самарская, О. С. Гурова, О. Н. Парамонова // Научное обозрение. – 2014. – № 7. – Ч. 2. – С. 665 - 667.

150. Гурова, О. С. Влияние основных характеристик процесса барботажа на процесс пенообразования [Текст]/ О. С. Гурова // Строительство-99: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 1998. – С. 41-43.

151. Гурова, О. С. Комплексная система гидродинамического метода очистки воздуха рабочих зон предприятий строительной индустрии [Текст]/ О. С. Гурова // Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности: мат. V Всерос. науч. – практ. конф. – СПб., 2000. – С. 35 - 37.
152. Гурова, О. С. Применение пены для обеспыливания воздушной среды [Текст]/ О. С. Гурова // мат. Межд. конф. Департамента по охране окружающей среды Южного региона. – Ростов н/Д, 2001. – С. 18-19.
153. Гурова, О. С. Особенности реализации пенного способа снижения загрязнения воздуха пылью на предприятиях строительной отрасли [Текст]/ О. С. Гурова // Строительство-2013: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2013. – С.106 – 107.
154. Гурова, О. С. Исследование влияния основных свойств пены и условий пенообразования на эффективность обеспыливания воздуха [Текст]/О. С. Гурова // Научное обозрение. – 2015. - № 24 – С. 56-60.
155. Гурова, О. С. Исследование процесса аэродинамического пылеулавливания для линий транспортировки сыпучих материалов ленточных конвейеров [Текст]/ О. С. Гурова, Н. В. Кудинова // Известия РГСУ. – 2004. – С. 32-34.
156. Гурова, О. С. Параметры пылевого и пенного аэрозолей, определяющие выбор высокоэффективных и экономичных систем обеспыливания [Текст]/ О. С. Гурова // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды: межвуз. сб. науч. тр. – Ростов н/Д.: РГАСХМ, 2003. – № 7. – С. 60-62.
157. Хежев, Т. А. Исследование свойств пены, применяемой для обеспыливания в строительстве [Текст]/ Т. А. Хежев // Научное обозрение. – 2015. – № 24. – С. 82-86.
158. Гурова, О. С. Особенности реализации пенного способа обеспыливания воздуха на предприятиях строительной отрасли [Текст]/ О. С. Гурова, Л. З. Ганичева // Известия РГСУ. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2013. – С.84 – 89.
159. Гурова, О. С. Сравнительный анализ технологий реализации процесса связывания загрязняющих веществ на предприятиях стройиндустрии [Текст]/ О. С. Гурова, С. В. Мещеряков // Строительство-2014: мат. Межд. науч. – практ.

конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2014. – С.168 – 170.

160. Гурова, О. С. Методика рационального использования энергетического потенциала технологических процессов для обеспечения экологической и производственной безопасности [Текст] / С. Гурова, С. В. Мещеряков // Промышленная экология: мат. Межд. школы-семинара. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2001. – С. 27 – 28.

161. Беспалов, В. И. Использование энергетического потенциала технологических процессов для обеспечения экологической и производственной безопасности [Текст]/ В. И. Беспалов, С. В. Мещеряков, О. С. Гурова //Межд. межв. сб. науч. тр. – Ростов н/Д.: изд-во РГАСМ, 2001. – № 5. – С.50-53.

162. Беспалов, В. И. Анализ условий реализации пенного способа обеспыливания воздуха на предприятиях строительной отрасли [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Л. З. Ганичева // Известия РГСУ. – 2014. – С.52 – 57.

163. Беспалов, В. И. К расчёту энергоемкостного показателя процесса обеспыливания воздуха пеной [Текст]/ В. И. Беспалов, А. Л. Берлин // Борьба с пылью в строительстве и промышленности: сб. тр. – Ростов н/Д., 1989. – С. 56.

164. Берлин, А. Л. Оценка экономичности пенного способа гидрообеспыливания с учетом энергетических параметров взаимодействия пыли и пены [Текст]/ А. Л. Берлин // Обеспыливание при проектировании, строительстве и реконструкции промышленных предприятий: сб. тр. – Ростов н/Д., 1989. – С. 87 – 96.

165. Хежев, Т. А. Оценка возможности применения пены для подавления пыли в строительной индустрии [Текст]/ Т. А. Хежев // Научное обозрение. – 2015. – № 24. – С. 87-91.

166. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст]/ М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

167. Ламли, Д. Структура атмосферной турбулентности [Текст]/ Д. Ламли, Г. Пановский. – М.: Мир, 1966. – 246 с.

168. Безуглая, Э. Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов [Текст]/ Э. Ю. Безуглая. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 194 с.

169. Симу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения [Текст]/ Э. Симу, Р. Сканлан. – М.: Стройиздат, 1984. – 360 с.
170. Бызова, Н. Л. Метеорология и атомная энергия [Текст]/ Н. Л. Бызова, К. П. Махонько. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 648 с.
171. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей [Текст]/ А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 210 с.
172. Клойзнер, В. Х. Управление параметрами аэродисперсной системы для повышения эффекта рассеивания пыли в атмосфере [Текст]/ В. Х. Клойзнер, В. И. Беспалов // Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем: тез. док. XV Всесоюз. конф. – Одесса: Изд-во Гос. Ком. СМ СССР по науке и технике, 1989. – Т. 2. – С.124.
173. Гурова, О. С. Рассеивание пыли пенным способом [Текст]/ О. С. Гурова // Строительство-2000: мат. Межд. науч.-практ. конф. . – Ростов н/Д.: РГСУ, 2000. – С. 51.
174. Сеттон, О. Г. Микрометеорология [Текст]/ О. Г. Сеттон. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – 356 с.
175. Журавлев, В. П. Сравнительная оценка способов гидрообеспыливания с учетом энергетических параметров механизма взаимодействия пыли с диспергированной жидкостью [Текст]/ В. П. Журавлев, В. И. Беспалов // В кн: Модернизация систем отопления и вентиляции в реконструированных зданиях. – Ростов н/Д.: Изд-во РИСИ, 1986. – С.157-161.
176. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст]/ Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
177. Романков, П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии [Текст]/ П. Г. Романков, М. И. Курочкин. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
178. Гурова, О. С. Основные принципы классификации источников загрязнения воздушной среды городских территорий Южного Федерального Округа [Электронный ресурс]/ О. С. Гурова // Наукоеведение. – 2013. – № 5. – С. – URL.: <http://naukovedenie.ru/sbornik6/4.pdf>

179. Гурова, О. С. Проблема обеспечения требований безопасности труда в строительной области [Электронный ресурс]/ О. С. Гурова, А. А. Гладилина, О. В. Дзюба // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – С. 8. – URL.: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3220](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3220)
180. Беспалов, В. И. Построение блок–схемы физической модели процесса загрязнения воздуха рабочих зон и прилегающих территорий для заводов ЖБИиК [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Научное обозрение. – 2015. – № 24. – С. 21-26.
181. Гурова, О. С. Совершенствование методов снижения загрязнения воздушной среды [Текст]/ О. С. Гурова // Строительство-2001: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2001. – С. 41 – 43.
182. Гурова, О. С. Улучшение условий труда рабочих на предприятиях стройиндустрии [Текст]/ О. С. Гурова, Н. В. Кудинова, С. В. Мещеряков // Строительство-2005: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2005. – С.118 – 119.
183. Беспалов, В. И. Анализ методических подходов к выбору мероприятий по обеспечению экологической безопасности территорий городских застроек [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Фундаментальные проблемы науки: сб. науч. ст. Межд. науч. – практ. конф. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. – С.59 – 62.
184. Гурова, О. С. Анализ состояния воздуха рабочей зоны в арматурных цехах предприятий строительной индустрии [Текст]/ О. С. Гурова, Е. Р. Каюмова // Строительство 2013: мат. Межд. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2013. – С.107 – 108.
185. Беспалов, В. И. Исследование процесса загрязнения воздушной среды города предприятиями строительной индустрии [Текст]/ В. И. Беспалов О. С. Гурова, Н. С. Самарская // Современные направления теоретических и прикладных исследований: мат. Межд. науч.-практ. конф. – Одесса, 2014.– Вып.1. – Том 3.– С.15-20.
186. Поздняков, Г. А. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных подготовительных забоях [Текст]/ Г. А. Поздняков, Г. К. Мартынюк. – М.: Наука,

1983. – 128 с.

187. Процессы и аппараты снижения загрязнения воздушной среды [Текст]: Учебное пособие / В. И. Беспалов, О. С. Гурова, С. В. Мещеряков и др. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2014. – 112 с.

188. Development and Choice of an Evidence-based Technique of the Most Ecologically Effective and Energetically Economic Technologies of Cleaning of Toxic Components of the Departing and Exhaust Gases of Objects of an Urban Environment Assessment. [Электронный ресурс] / V. I. Bepalov, O. S. Gurova, E. P. Lysova и др. // BIOSCIENCES BIOTECHNOLOGY RESEARCH ASIA. – 2015. – August. – Vol. 12 (2). – p. 1459-1470. DOI: <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/1805> (Received: 10 April 2015; accepted: 19 June 2015). – URL: <http://www.biotech-asia.org/download/Vadim-Igorevich-Bepalov-Oksana-Sergeevna-Gurova-%0D%0AOksana-Nickolaevna-Paramonova-and-Ekaterina-Petrovna-Lysova/BBRAV12I02P1459-1470.pdf>

189. Гурова, О. С. Место и роль пенного способа в классификационной схеме борьбы с промышленной пылью [Текст]/ О. С. Гурова // Проблемы охраны производственной и окружающей среды: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Волгоград: изд-во ВолгАСА, 1997. – С. 38.

190. Гурова, О. С. Разработка эффективных и экономичных систем защиты атмосферы города от промышленной пыли [Текст]/ О. С. Гурова // Здоровье города – здоровье человека: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д., 2001. – С. 56 – 58.

191. Гурова, О. С. Использование методики «дерева целей» при принятии инженерно-экологических решений [Текст]/ О. С. Гурова, О. В. Гриценко // Строительство 2003: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2003. – С. 26 – 28.

192. Беспалов, В. И. Концепция выбора системы обеспечения экологической и производственной безопасности в промышленном комплексе [Текст]/ В. И. Беспалов, С. В. Мещеряков, О. С. Гурова // БЖД, XXI век: Межд. симпозиум. – Волгоград: изд-во ВолгАСА, 2001. – С. 55 - 58.

193. Алгоритм реализации методики оценки и выбора технологий очистки

- отходящих газов промышленных и энергетических предприятий [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Н. С. Самарская и др.// Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Иваново: Научный мир, 2015. – Том 2. – С. 80 – 85.
194. Баранова, В. И. Практикум по коллоидной химии [Текст]/ В. И. Баранова, Е. Е. Бабик. – М.: Высш. школа, 1983. – 216 с.
195. ГОСТ 12.3.018-79 ССБТ. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний [Текст]: введ. 1979-09-05. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
196. Романков, П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии [Текст] / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
197. Дьяконов, Г. К. Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов [Текст]/ Г. К. Дьяконов. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 206 с.
198. Хованский, Г. С. Основы монографии [Текст]/ Г. С. Хованский. – М.: Наука, 1976. – 348 с.
199. Беспалов, В. И. Совершенствование технологий подавления пыли пенным способом [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Развитие науки и образования в современном мире: сб. науч. трудов Межд. науч.-практ. конф.: . – М.: «АР–Консалт», 2015. – С.156-158.
200. Беспалов, В. И. Обоснование применения пены для пылеподавления на конвейерных линиях предприятий строительной индустрии [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова // Инновационная наука. – 2015. – № 11. – С.16 – 18.
201. Гурова, О. С. Применение активированной воды для пенного способа пылегазоочистки [Текст]/ О. С. Гурова // Строительство-99: мат. Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГСУ, 1998. – С. 41-43.
202. Пат. RU 2144434 С1 Российская Федерация МПК В03С3/16. Устройство регенерационной очистки загазованного воздуха [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, В.П. Журавлёв [и др.]; заявители и патентообладатели В. И. Беспалов, О. С. Гурова, В.П. Журавлёв. [и др.] – №98115407/12; заявл. 05.08.1998; опубл.

10.02.2003, Бюл. №4.

203. Гурова, О. С. Устройство для очистки вентиляционного воздуха от тонкодисперсной не слипающейся пыли [Текст]/ О. С. Гурова // Экология и здоровье человека: мат. III Межд. науч. – практ. конф. – Ростов н/Д.: РГЭА, 1997. – С. 41 – 43.

204. Беспалов, В. И. Устройство регенерационной очистки воздуха от тонкодисперсной пыли [Текст]/ В. И. Беспалов, И. Г. Ищук, О. С. Гурова // Техника и технология открытой и подземной разработки месторождений: сб. науч. тр. – М.: изд-во ННЦ ГП- ИГД им. А.А. Скочинского, 2000. – С.86 – 89.

205. Пат. RU 2156643 C1 Российская Федерация МПК B01D47/04. Устройство регенерационной очистки воздуха от тонкодисперсной неслипающейся пыли [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Н.А. Страхова [и др.]; заявители и патентообладатели В. И. Беспалов, О. С. Гурова, Н.А. Страхова [и др.]. – №99109790/12; заявл. 05.05.1999; опубл. 27.09.2000, Бюл. №1.

206. Пат. на полезную модель RU 137210 U1 Российская Федерация МПК B01D47/04 (2006.01). Устройство регенерационной очистки воздуха от тонкодисперсной неслипающейся пыли [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный строительный университет» (РГСУ). – №2013132094/05; заявл. 10.07.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. №4.

207. Пат. на полезную модель RU 139077 U1 Российская Федерация МПК E21F5/00 (2006.01). Устройство очистки вентиляционного воздуха [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, А.В. Долматова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный строительный университет» (РГСУ). – №2013150641/03; заявл. 13.11.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. №10.

208. Пат. на полезную модель RU 145908 U1 Российская Федерация МПК B01D47/04 (2006.01). Устройство для очистки воздуха [Текст]/ В. И. Беспалов, О.

С. Гурова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный строительный университет» (РГСУ). – №2014118319/05; заявл. 06.05.2014; опубл. 27.09.2014, Бюл. №27.

209. Пат. на полезную модель RU 146368 U1 Российская Федерация МПК В01D47/14 (2006.01). Аппарат гидродинамической оценки газов [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, С.В. Мещеряков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный строительный университет» (РГСУ). – №2014129194/05; заявл. 15.07.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. №28.

210. Пат. на полезную модель RU 154725 U1 Российская Федерация МПК E21F5/00 (2006.01). Устройство для улавливания и связывания пыли «ОТУО-2-3» [Текст]/ В. И. Беспалов, О. С. Гурова, С.В. Мещеряков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный строительный университет» (РГСУ). – №2015109550/03; заявл. 18.03.2015; опубл. 10.09.2015, Бюл. №25.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ  
«GEEPSUOR»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016613157

**GEEPSUOR для аналитического моделирования и расчета  
рабочих параметров ценного способа в различных  
производственных условиях**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального  
образования «Ростовский государственный строительный  
университет» (РГСУ) (RU)*

Автор: *Гурова Оксана Сергеевна (RU)*

Заявка № 2016610534

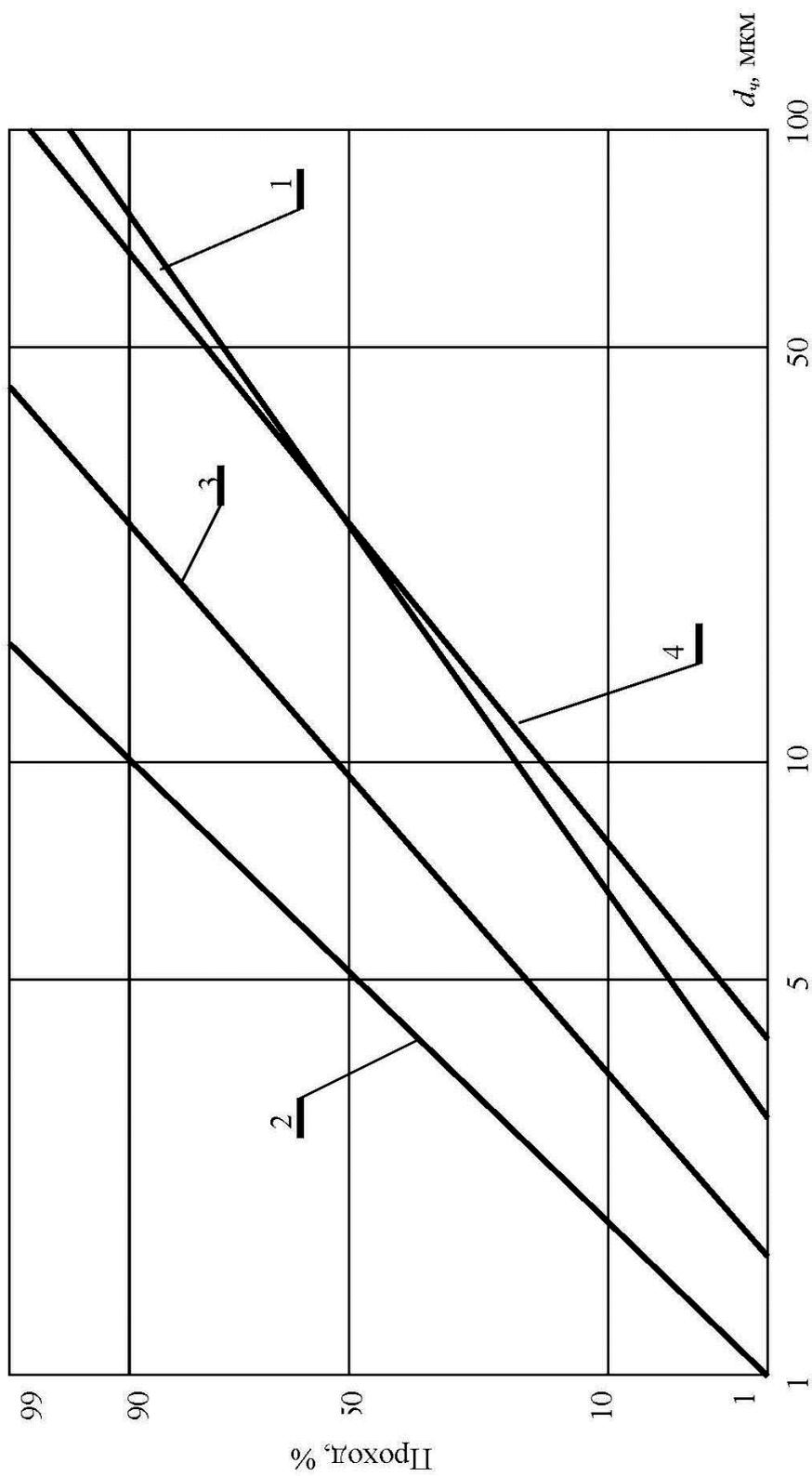
Дата поступления: 26 января 2016 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 18 марта 2016 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Иванов* Г.П. Иванов

Определение дисперсного состава исследуемых видов пыли



1 — пыль песка; 2 — пыль щебня; 3 — керамзитовая пыль; 4 — перлитовая пыль

Основные физико-химические свойства систем пенообразующего раствора и пылевого материала

Состав пенообразующего раствора	Концентрация, $S_{\text{по}}, \%$	Поверхностное натяжение, $\sigma, \text{Н/м}$	Кинематическая вязкость, $\nu \cdot 10^2, \text{м}^2/\text{с}$	Плотность, $R_p, \text{кг/м}^3$	Краевой угол смачивания пыли, $\theta$ , град			
					песок	щебень	керамзит	перлит
вода	-	0,0728	1,005	998				
вода + «Сампо»	0,2	0,0656	1,005	1000	< 10	24,7	40,1	< 10
	0,4	0,0511	1,006	1001		18,1	31,5	
	0,6	0,0339	1,006	1003		13,8	21,7	
	0,8	0,0275	1,006	1004		11,2	17,4	

## Результаты экспериментальных исследований процесса пылезадержания

Таблица П.Г.1

Результаты экспериментальных исследований процесса пылезадержания пенным способом (над лентой подающего транспортёра перед узлом перегрузки, пыль щебня)

Тип пенообразователя	Скорость движения ленты транспортёра, $v_{np}$ , м/с	Концентрация пенообразователя, $C_{no}$ , %	Начальная концентрация пыли, $C_n$ , мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация пыли, $C_k$ , мг/м <sup>3</sup>	Эффективность пылезадержания, $E_{эф-(пз)}$ , %
«Сампо»	0,2	0,4	817,53	42,29	94,88
		0,6	839,45	40,62	95,16
		0,8	860,17	41,16	95,21
		1,0	823,52	37,85	95,47
	0,3	0,4	868,43	39,84	95,41
		0,6	915,42	36,18	96,05
		0,8	963,11	37,08	96,15
		1,0	948,79	37,21	96,08
	0,4	0,4	954,69	37,86	96,03
		0,6	962,84	34,77	96,39
		0,8	981,38	39,51	95,97
		1,0	986,19	39,68	95,98

Результаты экспериментальных исследований процесса пылезadržания пенным способом (над лентой подающего транспортёра перед узлом перегрузки, пыль песка)

Тип пенообразователя	Скорость движения ленты транспортёра, $v_{тр}$ , м/с	Перепад высот между транспортёрами, $H_{пер}$ , м	Концентрация пенообразователя, $C_{по}$ , %	Начальная концентрация пыли, $C_n$ , мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация пыли, $C_k$ , мг/м <sup>3</sup>	Эффективность пылезadržания, $E_{эф-(пз)}$ , %
«Сампо»	0,2	0,5	0,4	273,84	38,61	85,90
			0,6	296,52	40,54	86,33
			0,8	327,09	36,83	88,74
			1,0	308,16	39,06	87,32
	0,3	0,5	0,4	298,49	37,26	87,52
			0,6	330,16	36,32	88,99
			0,8	348,47	35,21	89,90
			1,0	342,03	35,17	89,72
	0,4	0,5	0,4	316,83	29,84	90,58
			0,6	308,27	26,61	91,37
			0,8	300,51	24,98	91,69
			1,0	287,74	21,14	92,65

Результаты экспериментальных исследований процесса пылезadržания пенным способом (в рабочей зоне узла перегрузки, пыль щебня)

Тип пенообразователя	Скорость движения ленты транспортера, $v_{тр}$ , м/с	Перепад высот между транспортерами, $H_{пер}$ , м	Концентрация пенообразователя, $C_{по}$ , %	Начальная концентрация пыли, $C_n$ , мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация пыли, $C_k$ , мг/м <sup>3</sup>	Эффективность пылезadržания, $E_{эф-(пз)}$ , %
«Сампо»	0,2	0,5	0,4	273,84	38,61	85,90
			0,6	296,52	40,54	86,33
			0,8	327,09	36,83	88,74
			1,0	308,16	39,06	87,32
	0,3	0,5	0,4	298,49	37,26	87,52
			0,6	330,16	36,32	88,99
			0,8	348,47	35,21	89,90
			1,0	342,03	35,17	89,72
	0,4	0,5	0,4	316,83	29,84	90,58
			0,6	308,27	26,61	91,37
			0,8	300,51	24,98	91,69
			1,0	287,74	21,14	92,65

Результаты экспериментальных исследований процесса пылезadržания пенным способом (в рабочей зоне узла перегрузки, пыль песка)

Тип пенообразователя	Скорость движения ленты транспортера, $v_{тр}$ , м/с	Перепад высот между транспортерами, $H_{пер}$ , м	Концентрация пенообразователя, $C_{по}$ , %	Начальная концентрация пыли, $C_n$ , мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация пыли, $C_k$ , мг/м <sup>3</sup>	Эффективность пылезadržания, $E_{эф-(пз)}$ , %
«Сампо»	0,2	0,5	0,4	273,84	38,61	85,90
			0,6	296,52	40,54	86,33
			0,8	327,09	36,83	88,74
			1,0	308,16	39,06	87,32
	0,3	0,5	0,4	298,49	37,26	87,52
			0,6	330,16	36,32	88,99
			0,8	348,47	35,21	89,90
			1,0	342,03	35,17	89,72
	0,4	0,5	0,4	316,83	29,84	90,58
			0,6	308,27	26,61	91,37
			0,8	300,51	24,98	91,69
			1,0	287,74	21,14	92,65

Результаты экспериментальных исследований процесса очистки  
воздуха от пыли

Таблица П.Д.1

Результаты экспериментальных исследований процесса очистки воздуха от пыли  
пенным способом (пенный аэрозоль, пыль щебня, встречное движение)

Тип пенообразователя	Скорость воздушного потока в активной зоне очистки, $v_{в-о}$ , м/с	Концентрация пенообразователя, $C_{по}$ , %	Давление раствора пенообразователя перед оросителями, $H_p$ , МПа	Начальная концентрация пыли, $C_n$ , мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация пыли, $C_k$ , мг/м <sup>3</sup>	Эффективность очистки воздуха от пыли, $E_{эф-(o)}$ , %
«Сампо»	2,0	0,4	0,2	875,31	162,98	81,38
			0,3	815,89	122,63	84,97
			0,4	823,45	93,63	88,63
			0,5	818,90	68,71	91,61
			0,6	867,04	48,81	94,37
		0,6	0,2	890,05	158,61	82,18
			0,3	843,21	114,59	86,41
			0,4	867,85	90,78	89,54
			0,5	902,15	57,11	93,67
			0,6	845,76	24,19	97,14
		0,8	0,2	834,53	139,12	83,33
			0,3	855,44	109,67	87,18
			0,4	891,28	63,73	92,85
			0,5	902,52	40,25	95,54
			0,6	852,11	1,87	99,78
		1,0	0,2	863,43	124,16	85,62
			0,3	877,11	95,78	89,08
			0,4	891,31	48,22	94,59
			0,5	852,57	22,85	97,32
			0,6	893,12	1,61	99,82

Результаты экспериментальных исследований процесса очистки воздуха от пыли пенным способом (пенный аэрозоль, пыль щебня, спутное движение)

Тип пенообразователя	Скорость воздушного потока в активной зоне очистки, $v_{в-о}$ , м/с	Концентрация пенообразователя, $C_{по}$ , %	Давление раствора пенообразователя перед оросителями, $H_p$ , МПа	Начальная концентрация пыли, $C_n$ , мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация пыли, $C_k$ , мг/м <sup>3</sup>	Эффективность очистки воздуха от пыли, $E_{эф-(o)}$ , %
«Сампо»	2,0	0,4	0,2	786,35	122,75	84,11
			0,3	803,14	97,58	87,85
			0,4	805,11	67,55	91,61
			0,5	834,91	45,25	94,58
			0,6	788,95	23,35	97,04
		0,6	0,2	769,05	113,74	85,21
			0,3	845,12	89,67	89,39
			0,4	813,09	57,81	92,89
			0,5	835,42	40,69	95,13
			0,6	870,34	17,84	97,95
		0,8	0,2	856,22	117,73	86,25
			0,3	861,35	78,38	90,90
			0,4	809,76	54,01	93,33
			0,5	811,43	27,91	96,56
			0,6	866,15	13,68	98,42
		1,0	0,2	901,15	103,90	88,47
			0,3	843,12	67,03	92,05
			0,4	855,16	36,26	95,76
			0,5	813,05	15,12	98,14
			0,6	832,55	3,75	99,55

Результаты экспериментальных исследований процесса очистки воздуха от пыли пенным способом (пенный аэрозоль, пыль песка, встречное движение)

Тип пенообразователя	Скорость воздушного потока в активной зоне очистки, $v_{в-о}$ , м/с	Концентрация пенообразователя, $C_{по}$ , %	Давление раствора пенообразователя перед оросителями, $H_p$ , МПа	Начальная концентрация пыли, $C_n$ , мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация пыли, $C_k$ , мг/м <sup>3</sup>	Эффективность очистки воздуха от пыли, $E_{эф-(o)}$ , %
«Сампо»	2,0	0,4	0,2	845,13	132,01	81,89
			0,3	857,43	124,76	85,45
			0,4	863,12	88,90	89,70
			0,5	876,45	65,03	92,58
			0,6	880,19	40,40	95,41
		0,6	0,2	875,44	147,16	83,19
			0,3	901,30	118,25	86,88
			0,4	885,15	84,27	90,48
			0,5	869,32	45,55	94,76
			0,6	870,16	15,75	98,19
		0,8	0,2	881,57	137,97	84,35
			0,3	879,42	109,31	87,57
			0,4	875,66	55,69	93,64
			0,5	880,30	28,96	96,71
			0,6	895,64	1,61	99,82
		1,0	0,2	883,48	118,92	86,54
			0,3	868,49	83,55	90,38
			0,4	870,35	36,73	95,78
			0,5	893,22	14,02	98,43
			0,6	876,75	0,70	99,92

Результаты экспериментальных исследований процесса очистки воздуха от пылинным способом (пенный аэрозоль, пыль песка, спутное движение)

Тип пенообразователя	Скорость воздушного потока в активной зоне очистки, $v_{в-о}$ , м/с	Концентрация пенообразователя, $C_{по}$ , %	Давление раствора пенообразователя перед оросителями, $H_p$ , МПа	Начальная концентрация пыли, $C_n$ , мг/м <sup>3</sup>	Конечная концентрация пыли, $C_k$ , мг/м <sup>3</sup>	Эффективность очистки воздуха от пыли, $E_{эф-(o)}$ , %
«Сампо»	2,0	0,4	0,2	883,51	122,37	85,22
			0,3	868,62	102,58	88,19
			0,4	870,41	66,06	92,41
			0,5	893,30	39,04	95,63
			0,6	876,15	18,49	97,89
		0,6	0,2	875,88	120,61	86,23
			0,3	815,14	75,48	90,74
			0,4	823,67	50,16	93,91
			0,5	818,12	31,50	96,15
			0,6	867,85	9,81	98,87
		0,8	0,2	890,31	112,18	87,40
			0,3	843,44	69,58	91,75
			0,4	867,65	47,55	94,52
			0,5	902,77	22,75	97,48
			0,6	845,15	8,03	99,05
		1,0	0,2	881,61	90,37	89,75
			0,3	879,20	59,08	93,28
			0,4	875,53	28,02	96,80
			0,5	880,45	6,43	99,27
			0,6	895,53	0,18	99,98

Копия акта внедрения методики на ПАО «Комбинат Строительных  
Материалов-10» г. Ростов-на-Дону

УТВЕРЖДАЮ

м.п.

Генеральный директор

ПАО «КСМ-10» г. Ростова-на-Дону

Наименование предприятия

Дорофеев В.А.

Фамилия И.О.

« 16 »

ИЮНЯ

2015 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов научно-исследовательских, опытно конструкторских и  
технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы: «Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии»,

выполненной: соискателем, доцентом кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» Гуровой Оксаной Сергеевной,

проводимой с 16 марта 2015 года по 9 июня 2015 года

внедрены: на участке транспортировки склада инертных материалов ПАО «КСМ-10» г.Ростова-на-Дону.

1. Вид внедренных результатов: методика оценки и выбора оптимальной по санитарно-гигиенической эффективности и энергетической экономичности технологии пылеподавления пеной на ленточном транспортёре.
2. Характеристика масштабов внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: применение методики и алгоритма её реализации для выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной, а также расчёта её рабочих параметров.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: принципиально новые.
5. Объект внедрения: ленточный транспортёр инертных материалов склада щебня.
6. Социальный, экологический и научно-технический эффект: внедрение предлагаемой методики позволяет реализовать процесс пылеподавления на ленточном транспортёре с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли щебня в воздухе рабочей зоны оператора транспортёра до уровня ПДК<sub>рз</sub>, экологический эффект за счёт обеспечения ПДК<sub>мр(сс)</sub> этого вида пыли в воздушном бассейне промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий.

От предприятия:

Начальник цеха ЖБИ

(должности)

(Усепян М.О.)

Копия акта внедрения технологической схемы на ПАО «Комбинат Строительных  
Материалов-10» г. Ростов-на-Дону

УТВЕРЖДАЮ

м.п.

Генеральный директор  
Должность  
ПАО «КСМ-10» Ростова-на-Дону  
Именное предприятие  
Дорофеев В.А.  
Фамилия И.О.  
« 16 » июня 2015 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов научно-исследовательских, опытно конструкторских и  
технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы: «Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии»,

выполненной: соискателем, доцентом кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» Гуровой Оксаной Сергеевной,

проводимой с 16 марта 2015 года по 9 июня 2015 года

внедрены: на участке транспортировки склада инертных материалов ПАО «КСМ-10» г.Ростова-на-Дону.

1. Вид внедренных результатов: высокоэффективная и энергетически экономичная система пылеподавления пеной для бульдозера, загружающего инертные материалы в бункер ленточного транспортёра БСУ.
2. Характеристика масштабов внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: технологическая схема высокоэффективной и энергетически экономичной системы пылеподавления пеной для бульдозера, загружающего инертные материалы в бункер ленточного транспортёра БСУ .
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: принципиально новые.
5. Объект внедрения: бульдозер, загружающий со складов песка и щебня инертные материалы в бункер ленточного транспортёра БСУ.
6. Социальный, экологический и научно-технический эффект: внедрение предлагаемой системы пылеподавления обеспечивает санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня в воздухе рабочей зоны грузозачного узла до уровня ПДК<sub>рз</sub>, экологический эффект за счёт обеспечения ПДК<sub>мр(сс)</sub> этих видов пыли в воздушном бассейне промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий.

От предприятия:

Начальник цеха ЖБИ  
(должность)

  
(Усеян М.О.)

## Копия акта внедрения методики на ООО «Завод строительного оборудования»

г. Ростова-на-Дону

УТВЕРЖДАЮ

м.п.

Директор

Должность

ООО «Завод строительного оборудования»

г. Ростова-на-Дону

Наименование предприятия

Абдулкадиров Ш.А.

Фамилия И.О.

июля 2015 г.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательских, опытно конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы: «Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии»,

выполненной: соискателем, доцентом кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» Гуровой Оксаной Сергеевной,

проводимой: с 18 марта 2015 года по 19 июля 2015 года

внедрены: на участке транспортировки песка и щебня ООО «Завод строительного оборудования» г.Ростова-на-Дону.

1. Вид внедренных результатов: методика оценки и выбора оптимальной по санитарно-гигиенической эффективности и энергетической экономичности технологии пылеподавления пеной на ленточном транспортёре участка приготовления бетонной смеси.
2. Характеристика масштабов внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: применение методики и алгоритма её реализации для выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной, а также расчёта её рабочих параметров.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: принципиально новые.
5. Объект внедрения: ленточный транспортёр песка и щебня БСУ.
6. Социальный, экологический и научно-технический эффект: внедрение предлагаемой методики позволяет реализовать процесс пылеподавления на ленточном транспортёре с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня в воздухе рабочей зоны оператора транспортёра до уровня ПДК<sub>рз</sub>, экологический эффект за счёт обеспечения ПДК<sub>мр(сс)</sub> этих видов пыли в воздушном бассейне промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий.

От предприятия:

Зам.директора

(должность)

(Савочкин Н.Г.)

Копия акта внедрения аппарата очистки на ООО «Завод строительного оборудования» г. Ростова-на-Дону

УТВЕРЖДАЮ

М.П.

Директор

Должность



ООО «Завод строительного оборудования»

г.Ростова-на дону

Наименование предприятия

Абдулкадиров Ш.А.

Фамилия И.О.

июля 2015 г.

П О Д П И Р А К Т В Н Е Д Р Е Н И Я

результатов научно-исследовательских, опытно конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы: «Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии»,

выполненной: соискателем, доцентом кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» Гуровой Оксаной Сергеевной,

проводимой: с 18 марта 2015 года по 19 июля 2015 года

внедрены: на участке транспортировки песка и щебня ООО «Завод строительного оборудования» г.Ростова-на дону.

1. Вид внедренных результатов: аппарат гидродинамической очистки вентиляционного воздуха на основе применения пены в аспирационной системе узла загрузки песка и щебня БСУ.
2. Характеристика масштабов внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: монтаж, наладка и эксплуатация аппарата очистки вентиляционного воздуха на основе применения пены в аспирационной системе узла загрузки песка и щебня БСУ.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: принципиально новые.
5. Объект внедрения: аспирационная система узла загрузки песка и щебня БСУ.
6. Социальный, экологический и научно-технический эффект: внедрение аппарата позволяет реализовать процесс очистки вентиляционного воздуха на основе применения пены с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая экологический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня в воздушном бассейне промплощадки до уровня ПДК<sub>мр</sub>, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий.

От предприятия:

Зам.директора

(должность)

(Савочкин Н.Г.)

Копия акта внедрения методики на ПАО «Мостовая Железобетонная  
Конструкция» Батайский завод

**УТВЕРЖДАЮ**



\_\_\_\_\_  
 Должность  
 Директор  
 \_\_\_\_\_  
 ПАО «Мостожелезобетонконструкция»  
 Батайский завод МЖБК  
 Наименование предприятия  
 \_\_\_\_\_  
 Лавриненко В.Б.  
 Фамилия И.О.  
 \_\_\_\_\_  
 « 21 » \_\_\_\_\_ июля \_\_\_\_\_ 2015 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов научно-исследовательских, опытно конструкторских и  
технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы: «Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии»,

выполненной: соискателем, доцентом кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» Гуровой Оксаной Сергеевной,

проводимой: с 10 апреля 2015 года по 12 июля 2015 года

внедрены: на участке транспортировки песка и щебня ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК.

1. Вид внедренных результатов: методика оценки и выбора оптимальной по санитарно-гигиенической эффективности и энергетической экономичности технологии пылеподавления пеной на ленточном транспортёре бетоносмесительного отделения.
2. Характеристика масштабов внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: применение методики и алгоритма её реализации для выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной, а также расчёта её рабочих параметров.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: принципиально новые.
5. Объект внедрения: ленточный транспортёр песка и щебня.
6. Социальный, экологический и научно-технический эффект: внедрение предлагаемой методики позволяет реализовать процесс пылеподавления на ленточном транспортёре с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня в воздухе рабочей зоны оператора транспортёра до уровня ПДК<sub>рз</sub>, экологический эффект за счёт обеспечения ПДК<sub>мр(сс)</sub> этих видов пыли в воздушном бассейне промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий.

От предприятия:  
 \_\_\_\_\_  
 Начальник цеха  
 (должность)

  
 \_\_\_\_\_ (Елсуфьев Е.Н.)

Копия акта внедрения устройства очистки на  
 ПАО «Мостовая Железобетонная Конструкция» Батайский завод



УТВЕРЖДАЮ

Директор

Должность

ПАО «Мостожелезобетонконструкция»

Батайский завод МЖБК

Наименование предприятия

Лавриненко В.Б.

Фамилия И.О.

« 21 » июля 2015 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов научно-исследовательских, опытно конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы: «Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии»,

выполненной: соискателем, доцентом кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» Гуровой Оксаной Сергеевной,

проводимой с 16 марта 2015 года по 9 июня 2015 года

внедрены: на участке приготовления бетонной смеси ПАО «Мостожелезобетонконструкция» Батайский завод МЖБК.

1. Вид внедренных результатов: устройство очистки вентиляционного воздуха на основе применения пенного аэрозоля и слоя пены в аспирационной системе узла загрузки песка и щебня участка приготовления бетонной смеси.
2. Характеристика масштабов внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: монтаж, наладка и эксплуатация устройства очистки вентиляционного воздуха на основе применения пенного аэрозоля и слоя пены в аспирационной системе узла загрузки песка и щебня участка приготовления бетонной смеси.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: принципиально новые.
5. Объект внедрения: аспирационная система узла загрузки песка и щебня участка приготовления бетонной смеси.
6. Социальный, экологический и научно-технический эффект: внедрение устройства позволяет реализовать процесс очистки вентиляционного воздуха на основе применения пенного аэрозоля и слоя пены с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая экологический эффект за счёт снижения концентрации пыли песка и щебня в воздушном бассейне промплощадки до уровня ПДК<sub>мр(сс)</sub>, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий.

От предприятия:

Начальник цеха

(должность)

(Елсуфьев Е.Н.)

Копия акта внедрения методики на ЗАО «Ростовский Завод Железобетонных Конструкций» г. Ростова-на-Дону

УТВЕРЖДАЮ

М.П.

Главный инженер

Должность

ЗАО «Ростовский Завод Железобетонных Конструкций» г. Ростова-на-Дону

Наименование предприятия

Каушанский М.В.

Фамилия И.О.

июня 2015 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ

Настоящим актом подтверждается, что результаты работы: «Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии»,

выполненной: соискателем, доцентом кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет» Гуровой Оксаной Сергеевной,

проводимой с 12 апреля 2015 года по 29 мая 2015 года

внедрены: на участке транспортировки склада инертных материалов ЗАО «Ростовский завод ЖБК» г. Ростова-на-Дону.

1. Вид внедренных результатов: методика оценки и выбора оптимальной по санитарно-гигиенической эффективности и энергетической экономичности технологии пылеподавления пеной на ленточном транспортёре.
2. Характеристика масштабов внедрения: единичное.
3. Форма внедрения: применение методики и алгоритма её реализации для выбора максимально эффективной и энергетически экономичной технологии пылеподавления пеной, а также расчёта её рабочих параметров.
4. Новизна результатов научно-исследовательских работ: принципиально новые.
5. Объект внедрения: ленточный транспортёр инертных материалов склада щебня.
6. Социальный, экологический и научно-технический эффект: внедрение предлагаемой методики позволяет реализовать процесс пылеподавления на ленточном транспортёре с максимальной эффективностью и минимальными энергетическими затратами, обеспечивая санитарно-гигиенический эффект за счёт снижения концентрации пыли щебня в воздухе рабочей зоны оператора транспортёра до уровня ПДК<sub>рз</sub>, экологический эффект за счёт обеспечения ПДК<sub>мр(сс)</sub> этого вида пыли в воздушном бассейне промплощадки, а также социально-экономический эффект за счёт снижения заболеваемости работников предприятия и населения прилегающих территорий.

От предприятия:

Начальник бетоно-формовочного цеха

(должность)

(Гонтарь Г.В.)

**Копия справки о внедрении результатов диссертационной работы  
в учебный процесс**

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе  
Донского государственного  
технического университета

Ю.И. Бабенков



10 2017 г.

**СПРАВКА**

**о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс  
высшего учебного заведения**

Настоящей справкой подтверждается, что результаты диссертационной работы доцента кафедры «Инженерная защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет» Гуровой О.С. на тему «Теоретическое обоснование и разработка способов организации и технологий пылеподавления пеной на предприятиях стройиндустрии» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет» при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам: «Безопасность жизнедеятельности», «Теоретические основы защиты окружающей среды», «Процессы и аппараты защиты окружающей среды», «Механика многофазных сред» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность», профиль «Инженерная защита окружающей среды», а также по дисциплинам «Расчет и проектирование систем обеспечения безопасности», «Защита атмосферы от техногенных воздействий» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность», программа «Инженерная защита окружающей среды».

Заведующий кафедрой ИЗОС,  
профессор, д.т.н.

В.И. Беспалов