

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
Государственный аграрный университет Северного Зауралья



*На правах рукописи*

ЮРКИН ВЛАДИМИР ВАЛЕРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ  
СРЕДЫ ДЛЯ СВИНАРНИКОВ-ОТКОРМОЧНИКОВ

Специальность 4.3.2 Электротехнологии, электрооборудование и  
энергоснабжение агропромышленного комплекса

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент Леонид Николаевич Андреев

Тюмень – 2023

## Оглавление

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                                    | 4  |
| ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....                                                                            | 9  |
| 1.1 Анализ состояния воздушной среды сельскохозяйственных<br>производственных объектов животноводства .....                      | 9  |
| 1.2 Источники пыли .....                                                                                                         | 15 |
| 1.3 Энергопотребление сельского хозяйства .....                                                                                  | 18 |
| 1.4 Особенности существующих системам вентиляции.....                                                                            | 20 |
| 1.5 Особенности режимов циркуляции, рециркуляции и частичной рециркуляции<br>вентиляционного воздуха.....                        | 23 |
| 1.6 Сравнительный анализ методов очистки и воздушных фильтров.....                                                               | 26 |
| 1.7 Обзор существующих систем регулирования микроклимата в<br>животноводстве .....                                               | 46 |
| 1.8 Задачи исследования.....                                                                                                     | 50 |
| ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ<br>СРЕДЫ СТРАНКА.....                                                    | 52 |
| 2.1 Теоретическое обоснование процесса отслеживания концентрации вредных<br>веществ .....                                        | 52 |
| 2.2 Моделирование локальной системы очистки воздушной среды станка .....                                                         | 59 |
| 2.3 Расчет основных параметров мокрого электрофильтра.....                                                                       | 69 |
| 2.4 Оптимизация конструкции МЭФ .....                                                                                            | 76 |
| 2.5 Локальная система очистки воздушной среды станка.....                                                                        | 83 |
| 2.6 Основные выводы и результаты .....                                                                                           | 88 |
| ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ<br>ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ СТРАНКА.....                                                  | 90 |
| 3.1 Лабораторный исследования .....                                                                                              | 90 |
| 3.2 Экспериментальные исследования в производственных условиях участка №3<br>секций №16 и 17 свиногомплекса ООО «Согласие» ..... | 95 |

|                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3 Основные результаты и выводы .....                                                                                                                                           | 99  |
| ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И<br>ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ .....                                                                                    | 100 |
| 4.1 Результаты лабораторных исследований по определению концентраций пыли<br>в разных точках воздушной среды модели станка .....                                                 | 100 |
| 4.2 Результаты лабораторных исследований ЛСОВС .....                                                                                                                             | 103 |
| 4.3 Результаты лабораторных исследований по обоснованию параметров МЭФ<br>.....                                                                                                  | 104 |
| 4.4 Эмпирическая модель зависимости текущей концентрации пыли в воздушной<br>среде помещения от расстояния до источника генерации пыли и времени<br>генерации пыли .....         | 111 |
| 4.5 Результаты экспериментальных исследований в производственных условиях<br>секциях №16 и №17 для содержания поросят-отъемышей участка №3<br>свинокомплекса ООО «Согласие»..... | 118 |
| 4.6 Расчет показателей экономической эффективности применения ЛСОВС.                                                                                                             | 120 |
| 4.7 Основные выводы и результаты .....                                                                                                                                           | 124 |
| ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....                                                                                                                                               | 126 |
| Список литературы .....                                                                                                                                                          | 128 |
| Приложение А - Основные технические характеристики воздушных фильтров                                                                                                            | 144 |
| Приложение Б - Программный код для ЛСОВС.....                                                                                                                                    | 148 |
| Приложение В - Акт внедрения результатов научно исследовательской работы<br>.....                                                                                                | 152 |
| Приложение Г - Патент на полезную модель.....                                                                                                                                    | 154 |

## Введение

**Актуальность.** Производство продукции свиноводства сопровождается повышенной концентрацией животных на комплексах, что приводит к ухудшению условий содержания, выражающееся в ухудшении параметров воздушной среды [1]. Повышенные концентрации пыли и газов отрицательно сказываются на здоровье животных и работников. У животных снижается прирост живой массы, происходит снижение продуктивности, нарушаются терморегуляторные выделительные функции организма, возрастает риск возникновения заболеваний органов дыхания [2,3,4]. Современные свиноводческие помещения представляют из себя длинопролетные строения, приточно-вытяжные системы вентиляции (ПВСВ) которых, предлагаемые рядом российских компаний «ВентИнформ», «АгроВент-М», «РОВЕН», «Турбодефлектор», «РОТАДО» и др., рядом европейских компаний «Skov», «Skiold», «Shauer», «Big Dutchman», «Wesper» и др., выполняются с помощью вытяжных шахт и приточно-стенных клапанов [5-10]. Такие ПВСВ обеспечивают необходимый воздухообмен, однако не в полной мере создают необходимые параметры воздушной среды (в частности, концентрацию содержания пыли) в зоне дыхания животных (0,3 – 0,6 м). Исследования показали, что превышение концентрации пыли в зоне дыхания поросят на откорме при нормально функционирующей ПВСВ может достигать 25.5 мг/м<sup>3</sup>, что превышает ПДК по пыли более чем в 4 раза, что в свою очередь может оказывать негативное воздействие на производственные показатели свиноводческого предприятия. Так у поросят на откорме за один цикл (53 дня), из-за ухудшения параметров воздушной среды, потеря массы животного может достигать 4,6 – 5,4 % [11-20].

В работах таких ученых как Тихомиров Д.А., Самарин Г.Н., Возмилов А.Г., Юферев Л.Ю., Байдукин Ю.А., Першин А.Ф. и др. обосновано что, одним из перспективных и эффективных способов создания нормируемых параметров воздушной среды, является использование систем вентиляции с регулированием

подачи воздуха в режиме рециркуляции с его одновременной высокоэффективной очисткой. В свою очередь в работах Изакова Ф.Я., Возмилова А.Г., Нормова Д.А., Андреева Л.Н., Жеребцова Б.В., Дмитриева А.А., Файн В.Б., Кирпичниковой И.М., Иванова С.А., Звездаковой О.В., Дель М.В. было обосновано использование электрофильтрации, в том числе мокрого электрофильтра (МЭФ), для очистки вентиляционного воздуха локальными системами вентиляции в свиноводческих помещениях [21-26].

Однако, такие меры не в полной мере решают проблемы создания нормируемых параметров воздушной среды в локальных точках станка, решением которых может стать создание локальной системы очистки воздушной среды (ЛСОВС) станка свинарника-откормочника на основе МЭФ, которая может быть использована для типовых и наиболее распространенных свинарников-откормочников с разным поголовьем.

Степень разработанности темы. Существенный вклад в изучение вопросов разработки, применения и управления аппаратами электронно-ионной технологии (в том числе электрофильтрами), систем отопления и вентиляции животноводческих помещений внесли Басов А.М., Бородин И.Ф., Изаков Ф.Я., Файн В.Б., Возмилов А.Г., Самарин Г.Н., Тихомиров Д.А., Мурусидзе Д.Н., Юферев Л.Ю., Кирпичникова И.М., Иванова С.А., Звездакова О.В., Дель М.В., Тайманов С.Т., Смирнягин Е.В., Андреев Л.Н., Жеребцов Б.В., Дмитриев А.А., Черняков Е.В., Гримитлин А.М., Пешко М.С., Михалев П.В. и другие специалисты.

Для решения проблемной ситуации была сформулирована **научная гипотеза**: Межэлектродное расстояние между коронирующими электродами влияет на эффективность очистки МЭФ. Распределение пыли по станку в пространстве станка и времени не равномерно. Максимальные концентрация пыли находятся в сухой части станка.

В качестве предмета исследования рассматривались процесс и режимы работы ЛСОВС.

**Объектом** исследования является ЛСОВС в станке для содержания поросят на откорме.

**Целью** работы является разработка локальной системы очистки воздушной среды станка на основе мокрого электрофильтра для содержания поросят на откорме, обеспечивающая повышение производственных показателей.

**Задачи исследования.**

1. Провести анализ состояния воздушной среды станка для содержания поросят на откорме свинарника-откормочника, проанализировать механизмы распределения пыли в станке, проанализировать существующие системы очистки воздуха.

2. Разработать регрессионную модель распределения концентрации пыли в станке для содержания поросят на откорме свинарника-откормочника.

3. Разработать ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме на основе МЭФ.

4. Оптимизировать параметры МЭФ, разработанного для ЛСОВС.

5. Произвести лабораторные и производственные испытания ЛСОВС на основе МЭФ.

6. Произвести технико-экономический расчет эффективности ЛСОВС на основе МЭФ станка для содержания поросят на откорме.

**Методология и методы исследования.** При выполнении диссертационной работы применялись теоретические и экспериментальные методы исследования, использовались известные положения теоретических основ электротехники, физики, электрического разряда в газах, теплотехники, зоотехники, пакеты прикладных программ, а также современная измерительная аппаратура, на которой проводились экспериментальные исследования.

**Научная новизна работы:**

- получена регрессионная модель распределения концентрации пыли в станке для содержания поросят на откорме.

- обосновано межэлектродное расстояние между коронирующими электродами МЭФ.
- разработана методика определения мест установки элементов ЛСОВС в станке для содержания поросят на откорме.

**Теоретическая и практическая значимость.**

- разработана регрессионная модель, позволяющая прогнозировать значения концентрации пыли во всех точках объема станка для содержания поросят на откорме;
- разработана методика, позволяющая определить места установки элементов ЛСОВС в станке для содержания поросят на откорме;
- разработана ЛСОВС на основе оптимизированного МЭФ для применения в станках для содержания поросят на откорме.

**Реализация результатов исследования.** Локальная система очистки воздушной среды принята и используется свинокомплексом ООО «Согласие» в технологическом процессе выращивания поросят-отъемышей (патент на полезную модель №142385 РФ «Ресурсосберегающая система автоматического регулирования параметров микроклимата в животноводческих помещениях»).

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Разработанная регрессионная модель распределения концентрации загрязнений в станке для содержания поросят на откорме позволяет прогнозировать текущие значения концентрации пыли во всех точках объема станка.
2. Выявленная взаимосвязь эффективности очистки МЭФ от значения межэлектродного расстояния между коронирующими электродами позволяет уточнить существующую методику расчета параметров мокрого электрофильтра.
3. Разработанная ЛСОВС на основе МЭФ позволяет обеспечить нормируемые параметры концентрации пыли в станке с поросятами на откорме и обеспечить повышение производственных показателей.

4. Разработанная методика определения мест установки элементов ЛСОВС на основе МЭФ позволяет определить конструкционные параметры ЛСОВС станка с поросятами на откорме.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на научно-практических конференциях, проводимых в ЮУрГАУ (ЧГАА) (Челябинск, 2014, 2015, 2018 гг.), ГАУСЗ (Тюмень, 2013-2022 гг.) и РГАУ-МСХА (Москва, 2018 г.), ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Москва, май 2019 г., декабрь 2020 г., июнь 2021 г., декабрь 2022 г.) а также на расширенном заседании кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства» ГАУСЗ (25.11.2022 г.).

**Публикации.** Результаты исследований отражены в 22 печатных работах, в том числе 8 из них опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ по специальности, 4 индексируются в базе данных Scopus и Web of Science. По материалам работы получены 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

**Личный вклад автора.** Автор участвовал в разработке ЛСОВС. Под руководством автора и при его личном участии собрана ЛСОВС станка на основе МЭФ. Под руководством автора и при его личном участии собран усовершенствованный оптимизированный МЭФ. Автор проводил натурные испытания в свинокомплексе ООО «Согласие» (с. Новая Заимка Заводоуковский район Тюменская область), проводил оценку применимости и эффективности разработанной системы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы (131 наименование), 4 приложений. Работа изложена на 156 листах машинописного текста, включает 50 рисунков и 26 таблиц.

## ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 Анализ состояния воздушной среды сельскохозяйственных производственных объектов животноводства

Создание нормируемых параметров воздушной среды в животноводческих помещениях наряду с полноценным кормлением являются определяющими факторами в обеспечении здоровья животных, их воспроизводительной способности, которые служат залогом получения от них максимального количества продукции высокого качества. Отклонение параметров микроклимата приводит к снижению удоев молока на 10-20%, уменьшению приростов живой массы на 20-30%, увеличению отхода молодняка до 5-40%, снижению продуктивности птицы на 30-35%, сокращению срока хозяйственного использования животных на 15-20%, увеличению затраты корма и труда на единицу продукции, уменьшению продолжительности эксплуатации зданий и оборудования [8]. Так же качество воздуха коровников, телятников, конюшен, свинарников, кошар и птичников может оказывать влияние на работающих там людей (дойарок, свинарок, чабанов, конюхов и т. д.), которые находятся в помещениях для животных ежедневно в течение многих часов, выполняя производственные процессы по уходу, кормлению и эксплуатации животных. Так же в процессе эксплуатации животноводческих комплексов воздушная среда агрессивно воздействует на оборудование и работу инженерных коммуникаций. Смена температуры, повышенная влажность (до 90%) и наличие пыли и вредных газов (аммиак, сероводород) негативно сказывается на сроке службы оборудования [27,28]. Воздушная среда — это сложный комплекс взаимосвязанных факторов, воздействующих на организм животного (на обмен веществ, теплообмен, газообмен, физико-химические свойства крови, температуру тела и др.). Организм животного может приспосабливаться к любым изменениям воздушной среды, но лишь до определенных пределов. Физиологическое равновесие сохраняется до тех

пор, пока действие внешних раздражителей не превышает возможностей организма. Действие необычных по силе и качеству факторов ослабляет резистентность организма, способствует развитию заболеваний, понижает аппетит и вызывает слабость, неблагоприятно действует на воспроизводительную способность животных, приводит к ряду других нежелательных явлений. Следовательно, создание условий, обеспечивающих здоровье и высокую продуктивность животных, является одной из важнейших задач в развитии животноводства [29].

В последние годы в Российской Федерации значительно осложнилась биологическая ситуация как на крупных животноводческих предприятиях, так и в личных подсобных хозяйствах. Такие инфекционные болезни животных, как африканская чума свиней, нодулярный дерматит, грипп птиц, бруцеллез, бешенство, сибирская язва и другие болезни, в том числе опасные для человека, регистрируются во многих субъектах Российской Федерации, и прослеживается тенденция к их распространению на другие территории [29]. Санитарно-гигиенические условия работы в сельском хозяйстве страны отличаются тем, что часто превышены предельно-допустимые концентрации (ПДК) на пары и газы до 17,8%, а на пыль и аэрозоль – до 22,9%. [30]. Длительное воздействие на животных воздушной пыли может быть причиной заболеваний органов дыхания. Пылевые частицы раздражают и травмируют слизистые оболочки носа и верхних дыхательных путей, способствуя этим внедрению инфекции, и содействуют возникновению острых и хронических катаральных процессов (ринита, фарингита, трахеита, бронхита и перибронхита). Наиболее серьезное заболевание от действия пыли — пневмокониоз — отложение пыли в легких и развитие фиброза в них. Пылинки, достигающие альвеол и оставшиеся в их полости, проникают в промежутки между клетками альвеолярного эпителия и в лимфатические щелевые пространства легких. Пылинки частично задерживаются в лимфатических сосудах или попадают в бронхиальные лимфатические узлы, из которых они могут разноситься в другие ткани и органы. Разрастание фиброзной ткани в легких

у животных может наблюдаться при длительном вдыхании пыли. Чаще у сельскохозяйственных животных встречается силикоз легких, протекающий с характерной патологоанатомической картиной межуточного фиброза. Силикоз сопровождается образованием очагов в легочной ткани, что ведет к уплотнению и снижению ее эластичности, развитию недостаточности сердечной деятельности. Данными В. Ф. Матусевича, полученными в экспериментальных и производственных условиях, доказана возможность заболевания силикозом легких крупного рогатого скота, овец и свиней. У больных животных при мышечных напряжениях отмечается одышка, учащение пульса и дыхания. В настоящее время двуокись кремния относят к веществам, обладающим общетоксическим действием, то есть действующим не только на легочную ткань, но и на организм в целом. Некоторые исследователи устанавливают тесную связь между силикозом и туберкулезом легких [5]. Ларингит — это воспаление слизистой оболочки гортани. Одна из причин возникновения — это вдыхание пыльного воздуха и раздражающих газов. У животных наблюдается частый, резкий и болезненный кашель усиливающийся при движениях и вставании, который является характерным симптомом. Ущерб от заболевания складывается в виде потери продуктивности, работоспособности, иногда вынужденного убоя и гибели больных животных, а также затрат на их лечение. [5] Пневмония, пульмонит, воспаление лёгкого. Болеют животные всех видов, наиболее часто — овцы и свиньи. У молодняка пневмония может принимать массовый характер. Возникновение и развитие обусловлено рядом факторов, один из которых избыточное содержание в животноводческих помещениях пыли и аммиака. Из общих признаков отмечают различной степени угнетение, снижение аппетита и продуктивности, исхудание, анемию, снижение эластичности кожи и потерю блеска волос, повышение температуры тела [31].

Такое состояние воздушной среды ведет к увеличению риска возникновения профессиональных заболеваний у людей. Структура профессиональной заболеваемости работников АПК представлена в таблице 1.1. Положительную

тенденцию имеет доля интоксикаций (отравлений), среди которых преобладают отравления аммиаком, пестицидами и оксидом углерода.

Среди обстоятельств и условий возникновения хронических профессиональных поражений определяющими в 48% являются конструктивные недостатки оборудования, в 19,9% - несовершенство технологических процессов, в 10,3% - неисправность или отсутствие санитарно-технических устройств, в 7,5% - несовершенство и нерациональное оборудование рабочих мест, в 7,3% - нарушения требований охраны труда. В части возникновения острых профессиональных заболеваний на первое место выступают нарушения требований охраны труда (51,2%), несовершенство и нерациональное оборудование рабочих мест (6,3%), несовершенство санитарно-технических установок (4,6%) и аварийные ситуации (6,4%). Первично выявленные случаи профессиональных заболеваний в функции длительности воздействия вредного фактора приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.1 - Структура профессиональных поражений работников сельскохозяйственного производства за последнее десятилетие ушедшего века

| Диагноз или причина         | Удельный вес, % (по годам) |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                             | 1990<br>г.                 | 1991<br>г. | 1992<br>г. | 1993<br>г. | 1994<br>г. | 1995<br>г. | 1996<br>г. | 1997<br>г. | 1998<br>г. | 1999<br>г. | 2000<br>г. |
| Заболевания                 | 92,4                       | 97,1       | 95,0       | 96,3       | 98,0       | 97,8       | 98,2       | 98,8       | 98,8       | 98,81      | 98,8       |
| В том числе:                |                            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Заболевания органов дыхания | 10,2                       | 12,0       | 12,3       | 11,0       | 9,9        | 13,2       | 8,8        | 8,3        | 9,1        | 9,1        | 9,11       |
| Отравления                  | 7,6                        | 2,9        | 5,0        | 3,7        | 2,0        | 2,2        | 1,8        | 1,2        | 1,2        | 1,19       | 1,18       |

Таблица 1.2 - Распределение первично выявленных профессиональных заболеваний и отравлений по длительности воздействия на работающих основных неблагоприятных производственных факторов, %

| Вредные производственные факторы | Длительность воздействия факторов, лет |     |      |       |       |       |       |       |            |            |
|----------------------------------|----------------------------------------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|------------|
|                                  | До года                                | 1-4 | 5-9  | 10-14 | 15-19 | 20-24 | 25-29 | 30-34 | 35 и более | Нет данных |
| Аммиак                           | 59,6                                   | 8,5 | 12,7 | -     | 8,5   | 4,2   | -     | 2,1   | 2,1        | 2,1        |
| Пыль, оксид кремния              | 0,6                                    | 3,1 | 8,5  | 18,4  | 16,2  | 19,4  | 14,1  | 11,5  | 7,0        | 1,2        |

Пыль оказывает негативное влияние не только на людей и животных, но и осуществляет влияние на производственные помещения: увеличивает износ машин и оборудования; ухудшает санитарное состояние производственных помещений; снижает уровень освещенности вследствие загрязнения световых проемов, ламп и осветительной арматуры; может способствовать возникновению пожаров и взрывов [6].

Средний срок службы электродвигателей в сельском хозяйстве составляет 2 года, а аварийность находится на уровне 23%. Статистика говорит о том, что электродвигатели не вырабатывают свой эксплуатационный ресурс, и отказы происходят по следующим причинам: влияние окружающей среды (19%); обрыв фазы питающей сети и несимметрия напряжений (24%); длительные технологические перегрузки (24%); неисправности насосов и выход из строя подшипникового узла (10%); механические повреждения (6%); понижение сопротивления изоляции (5%); ухудшение условий охлаждения (5%); наличие заводских дефектов (1%); прочие (7%) [6].

Пыль, попадая в смазку, оседает на частях и механизмах электротехнических устройств и вызывает быстрый износ трущихся частей и загрязнение изоляции. Пыль наиболее опасна для электродвигателей, в которые она попадает с засасываемым для вентиляции воздухом. Однако и в других элементах электротехнических устройств износ намного ускоряется, если пыль проникает сквозь уплотнения к поверхности трения. Поэтому при большой запыленности особое значение приобретает качество уплотнений элементов электрических устройств и уход за ними [31, 32].

Периодичность чистки осветительной арматуры в животноводческих и птицеводческих помещениях, в кормоприготовительных помещениях и других аналогичных помещениях с тяжелыми условиями окружающей среды установлена требованиями СНиП и зависит от степени загрязнения освещаемых помещений. В относительно чистых производственных помещениях с содержанием пыли не более  $1 \text{ мг/м}^3$  чистка светильников общего освещения должна производиться от

1 до 3-х раз в год, в помещениях с сильной запыленностью — от 4 до 12 раз в год, в помещениях со средней запыленностью — до 6 раз в год.

Удаляемый вентиляционный воздух из животноводческих помещений загрязняет окружающие территории пылью и вредными газами, что негативно сказывается на экологии местности (Таблицы 1.3-1.5).

Таблица 1.3 – Выбросы загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников по видам экономической деятельности, (тысяч тонн) [33]

| Всего                                                   | 2005    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    |
|---------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                         | 20425,4 | 19115,6 | 19162,3 | 19630,3 | 18446,5 | 17451,9 | 17295,7 |
| из них:<br>сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство | 134,1   | 136,6   | 141,1   | 162,5   | 164,7   | 185,3   | 197,3   |

Таблица 1.4 – Уловлено и обезврежено загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников по видам экономической деятельности, (тысяч тонн) [33]

| Всего                                                   | 2005    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    |
|---------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                                         | 58752,8 | 59518,3 | 59177,7 | 56833,7 | 54384,3 | 54098,8 | 51992,7 |
| из них:<br>сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство | 37,1    | 36,7    | 41,1    | 40,6    | 42,5    | 46,8    | 60,5    |

Анализ таблиц (Таблицы 1.3-1.5) показывает, за последние годы доля выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду сельским хозяйством увеличилась, а доля очистки выбросов сократилась. Из выбросов большую часть составляют газообразные. Так, по данным белорусских ученых (И.И. Хохлова и др.), свинокомплекс «Сож» Гомельской области, рассчитанный на откорм 108 тысяч свиней в год, выбрасывает с вентиляционным воздухом 56 и более килограммов аммиака, 1120 млрд. микроорганизмов, 15-20 кг пыли в 1 час. По экологическому давлению этот комплекс можно приравнять к городу с населением около 220 тыс. человек. В комплексе на 10 тыс. телят за один час зимой удаляется

103,9 млрд. микробных тел, 6,2 кг пыли, 23 кг аммиака, а из комплекса на 2 тыс. коров удаляется за час 8,7 млрд. микробных тел, 0,75 кг пыли, 4,8 кг аммиака, 2058 кг влаги в виде аэрозолей [10].

Таблица 1.5 – Выбросы наиболее распространенных загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников по видам экономической деятельности в 2015 году, (тысяч тонн) [33]

|                                                               | Всего   | в том числе |                       |              |              |                |                        |                                       |
|---------------------------------------------------------------|---------|-------------|-----------------------|--------------|--------------|----------------|------------------------|---------------------------------------|
|                                                               |         | твёрдые     | газообразные и жидкие | Из них       |              |                |                        |                                       |
|                                                               |         |             |                       | Диоксид серы | Оксиды азота | Оксид углерода | углеводороды (вез ЛОС) | летучие органические соединения (ЛОС) |
| Всего                                                         | 17295,7 | 1820,4      | 15475,3               | 4099,4       | 1787,4       | 4799,6         | 3323,0                 | 1294,5                                |
| из них по видам экономической деятельности сельское хозяйство | 197,3   | 34,1        | 163,2                 | 4,4          | 11,4         | 42,6           | 55,9                   | 10,2                                  |

В настоящее время для удаления вредностей используется механическая приточно-вытяжная вентиляция, что не оправдано с точки зрения энергосбережения, так как с вентиляционным воздухом удаляется тепловая энергия, на получение которой расходуются энергоресурсы.

## 1.2 Источники пыли

В зависимости от происхождения различают пыль минеральную и органическую. Минеральная пыль состоит из мельчайших частиц почвы (песчаная, кварцевая, известковая и пр.). Органическая пыль включает частицы растений (волоконца, зернышки, споры), кормов, подстилки, навоза, эпидермиса, волос, а также цветочную пыльцу, споры грибов, различные микроорганизмы и пр. В воздухе вне помещений содержится больше минеральной пыли, а в воздухе

помещений для животных — органической. По данным Н. Д. Кракосевича, у подопытных животных отмечены заметные сдвиги при концентрации пыли во вдыхаемом воздухе в 0,6—6,0 мг/м<sup>3</sup>. Объем легочной вентиляции уменьшился на 7,2%, а потребление кислорода снизилось на 3,4%. Концентрация пыли в 1,8—4,8 мг/м<sup>3</sup> во вдыхаемом воздухе у кроликов уменьшала легочную вентиляцию в среднем на 9,3%, а потребление кислорода — на 8,8%. Степень вредного воздействия зависит от количества пыли в 1 м<sup>3</sup> воздуха, размера пылевых частиц, их формы, растворимости и токсических свойств. По данным ряда исследователей (Е. А. Вигдорчик, С. М. Генкин, И. Р. Петров, Маврогордато, Смит, А. К. Скороходько, В. Ф. Матусевич и др.), наиболее опасной считается пыль величиной от 0,2 до 5 микрон, так как она проникает в альвеолы легких и оседает в них от 60 до 100%. Пылинки размерами более 10 микрон задерживаются полностью в верхних дыхательных путях, величиной от 10 до 5 микрон задерживаются на 80—100%, менее 0,1 микрона находятся в непрерывном броуновском движении и оседают в легких только частично.

Пыль растительного и животного происхождения, преобладающая в воздухе помещений для животных, то, как правило, она вся задерживается в верхних дыхательных путях (носоглотке, трахее, крупных и средних бронхах). Таблица 1.6 демонстрирует примеры подобных сред, рабочих процессов и агентов, несущих риск воздействия органической пыли.

Вместе с тем распределение приточного воздуха не всегда происходит равномерно в животноводческих помещениях. Наличие инженерных сетей и оборудования, нарушения технологий монтажа вентиляционных систем и агрегатов, неправильная эксплуатация систем вентиляции приводит к нарушению воздухообмена во всём помещении или его частях, и чаще всего, к застойным явлениям воздушных потоков (аэростам). В отдельных случаях эти нарушения происходят из-за экономии электроэнергии. Исследования В. Митюшникова, Н. Кравченко (1983), показали, что системы вентиляции и отопления в птичниках не обеспечивали необходимый микроклимат в зимний и переходный периоды года. В

результате неравномерного распределения воздуха в помещениях наблюдались застойные зоны, большой перепад температуры и влажности, повышенная запыленность, загазованность, бактериальная обсемененность воздуха и оборудования. Ухудшение микроклимата отрицательно сказывалось на естественной резистентности кур - несушек, так у них отмечались достоверное снижение лизоцимной активности и содержания общего белка в сыворотке крови. Уменьшение гамма - глобулиновой фракции белка сопровождалось увеличением альбуминовой. Процент псевдоэозинофилов в лейкоцитарной формуле снизился, а лимфоцитов повысился. Отмечалось также снижение яйценоскости на 2,5-3,4% в зимний и переходный периоды года по сравнению с летним [35, 36].

Таблица 1.6 - Источники опасного воздействия органической пыли [34]

|                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------|
| Сельское хозяйство                                                       |
| Обработка зерна, сена и других сельскохозяйственных культур              |
| Переработка сахарного тростника                                          |
| Теплицы                                                                  |
| Силосование                                                              |
| Животные                                                                 |
| Загоны для свиней/коров                                                  |
| Птицефермы и перерабатывающие заводы                                     |
| Лабораторные животные, скот и домашние животные                          |
| Переработка отходов                                                      |
| Сточные воды и ил                                                        |
| Отходы домашнего хозяйства                                               |
| Компостирование                                                          |
| Промышленность                                                           |
| Переработка растительного волокна (хлопок, лен, пенка, джут)             |
| Ферментация                                                              |
| Лесозаготовки и переработка древесины                                    |
| Пекарни                                                                  |
| Биотехнологическая переработка                                           |
| Здания                                                                   |
| Загрязненная вода в увлажнителях                                         |
| Микробиологические культуры на конструкциях или в вентиляционных каналах |

Расширение и реконструкция ферм малых и средних мощностей проводилась, опираясь на современное состояние экономики. Тем самым выбиралась технология кормления. Жидкие корма, как правило, выбирают фермы хозяйств, которые располагают отходами переработки сельхозпродукции. Сухое

кормление: снижает объём потребляемого корма; улучшает конверсию корма; снижает затраты на подготовку и транспортировку; снижает риск порчи остатков корма; упрощает, а также удешевляет механизацию и автоматизацию кормораздачи; сокращает потери при поедании, в том числе при кормлении «вволю». Технология жидкого кормления представлена более сложным набором оборудования и, что особенно следует учесть, потребует постоянных затрат на подогрев и смешивание жидкости с сухим кормом, промывку и периодическую дезинфекцию всей системы кормоприготовления и раздачи [37]. С 1992 года совхоз имени 50-летия СССР перешел на «коммерческие рельсы» за эти годы в ООО «Согласие» в ходе реконструкций перешел на сухое кормление. Сухой рассыпной корм (комбикорм) нельзя использовать в помещениях с плохой вентиляцией так как при измельчении зерна образуется много муки. Его можно засыпать только в закрытых кормушках по герметичной системе. В сухом корме содержится около 20 % пылеобразных веществ, которые попадают в верхние дыхательные пути животных и раздражают их, провоцируя болезни легких. Как показывает статистика, кормление свиней сухим комбикормом до 10 % повышает риск заболеваний легких и усугубляет конверсию кормов на 6-10 %.

### **1.3 Энергопотребление сельского хозяйства**

Сельскохозяйственное производство является крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в стационарных процессах в объеме около 10 млн. т.у.т. Из них свыше 65% ТЭР используется в системах теплообеспечения множества производственных объектов: животноводческих ферм, птицефабрик, предприятий по сушке, переработке и хранению сельскохозяйственной продукции, фермерских и личных подсобных хозяйств. Теплота используется в технологических процессах обеспечения микроклимата, горячего водоснабжения и отопления, тепловой обработки кормов, сушки, хранения и переработки различных видов сельскохозяйственной продукции и ряде

других технологических процессов [8,19]. Известно, что затраты на энергоресурсы могут достигать до 15 %. Из которых до 50 % расходуется на микроклимат. Из которых до 70% расходуется на подогрев приточного воздуха [3]. Проанализировав энергобаланс Российской Федерации в частности сельского хозяйства (Таблица 1.7) можно сделать вывод, что сельское хозяйство преодолело кризис 2008 года и продолжает увеличивать производственные мощности, что влечет увеличение потребления электроэнергии.

Таблица 1.7 – Электробаланс Российской Федерации, млн.кВт.ч [7]

|                            | Произведено<br>электроэнергии | Получено<br>из- за<br>пределов<br>Российской<br>Федерации | Потреблено<br>электро<br>энергии-<br>всего | в том числе                       |                       |               |                      |                                              |                                      |                          | Отпущено<br>за<br>пределы<br>РФ |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------|----------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
|                            |                               |                                                           |                                            | Промышлен-<br>ность (всё отрасли) | Сельское<br>хозяйство | строительство | транспорт и<br>связь | Другие виды<br>экономической<br>деятельности | городское и<br>сельское<br>население | потери в<br>электросетях |                                 |
| 2018                       | 1115088                       | 5132                                                      | 1108134                                    | 585832                            | 18798                 | 12622         | 96283                | 132174                                       | 159305                               | 103119                   | 12086                           |
| 2017                       | 1094288                       | 6410                                                      | 1089105                                    | 580218                            | 18171                 | 12711         | 92848                | 124227                                       | 155669                               | 105261                   | 11593                           |
| 2016                       | 1091133                       | 3488                                                      | 1077948                                    | 565644                            | 17162                 | 12628         | 88596                | 132724                                       | 153949                               | 107247                   | 16673                           |
| 2015                       | 1067549                       | 8809                                                      | 1060243                                    | 559226                            | 16757                 | 12140         | 87850                | 131179                                       | 146538                               | 106552                   | 16115                           |
| 2014                       | 1064207                       | 8866                                                      | 1064956                                    | 561137                            | 15947                 | 12782         | 90315                | 131661                                       | 146183                               | 106931                   | 8117                            |
| 2013                       | 1059092                       | 11461                                                     | 1054823                                    | 564987                            | 15287                 | 12294         | 90378                | 128698                                       | 140971                               | 102208                   | 15731                           |
| 2012                       | 1069292                       | 8337                                                      | 1063320                                    | 573969                            | 15278                 | 12237         | 91068                | 126973                                       | 137127                               | 106667                   | 14310                           |
| 2011                       | 1064810                       | 9967                                                      | 1041122                                    | 567909                            | 15525                 | 11811         | 90355                | 119631                                       | 130889                               | 105002                   | 23655                           |
| 2010                       | 1038030                       | 1860                                                      | 1020633                                    | 554358                            | 15885                 | 10659         | 88448                | 119256                                       | 127095                               | 104933                   | 19257                           |
| 2009                       | 991980                        | 3066                                                      | 977122                                     | 533236                            | 14830                 | 10639         | 84023                | 112313                                       | 121124                               | 100959                   | 17923                           |
| 2008                       | 1040379                       | 3105                                                      | 1022746                                    | 570019                            | 15524                 | 12050         | 86732                | 112048                                       | 117134                               | 109240                   | 20738                           |
| 2007                       | 1015333                       | 5670                                                      | 1002535                                    | 558221                            | 16180                 | 11470         | 86646                | 109233                                       | 115930                               | 104855                   | 18468                           |
| 2006                       | 995794                        | 5115                                                      | 979983                                     | 534073                            | 16769                 | 10478         | 85876                | 112670                                       | 112527                               | 107589                   | 20927                           |
| 2005                       | 953083                        | 10139                                                     | 940703                                     | 497435                            | 16908                 | 9527          | 83171                | 112117                                       | 108924                               | 112620                   | 22520                           |
| 2018 к<br>2005<br>мл.кВт.ч | 162004                        | 5007                                                      | 167431                                     | 88397                             | 1889                  | 3095          | 13112                | 20057                                        | 50382                                | 9501                     | 10434                           |
| 2018 к<br>2005 %           | 117,0                         | 50,6                                                      | 117,8                                      | 117,8                             | 111,2                 | 132,5         | 115,8                | 117,9                                        | 146,3                                | 91,6                     | 537                             |

На животноводческих фермах и комплексах при строительстве новых и реконструкции существующих, руководствуются следующими положениями [38,39]: обеспечение нормируемого микроклимата и освещенности помещений путем рациональных строительных решений, сокращения теплопотерь, рекуперации (возврата) тепловой энергии, теряемой с вентиляционным воздухом; максимальное снижение энергозатрат, стоимости строительства и эксплуатации

предприятий, недопущение усложнения и удорожания, неоправданного повышения выпуска продукции.

#### **1.4 Особенности существующих системам вентиляции**

В формировании микроклимата животноводческих ферм и комплексов ведущая роль отводится системам вентиляции, которые имеют следующие функции: удаление излишней влаги, вредных газов и углекислого газа, пылевых и аэрозольных частиц, а также обогащение кислородом. Вентиляционные системы подразделяются на: приточные, вытяжные, приточно-вытяжные, вентиляция с рециркуляцией воздуха. Основными являются вытяжная и приточно-вытяжная системы вентиляции, но эти системы вентиляции имеют существенный недостаток - большие теплотери, в виду того, что энергозатарты на создание микроклимата, а именно подогрев приточного воздуха, могут достигать 60 % от всех энергозатрат предприятия [40,41]. Эта тепловая энергия выбрасывается вместе с вытяжным загрязнённым вентиляционным воздухом в окружающую среду, что приводит не только к снижению энергоэффективности предприятия, но и повышает экологическую нагрузку на близлежащие территории.

Для обогрева приточного воздуха применяют калориферы водяного (КБФ, КФС, КМБ и др.), огневого (теплогенераторы ТГ-75, ТГ-150, ТГ-500 и др.) и электрического (ОКБ, СФОЦ) действия. Используются та же тепловентиляторы ТВ-6, ТВ-9, и др. Используются комплекты автоматизированного вентиляционно-отопительного оборудования «Климат» и зарубежные аналоги, так же приточно-вытяжные установки ПВУ-4, ПВУ-6, ПВУ-9, особенностью которых является совмещение притока и вытяжки воздуха в одном агрегате, что исключает необходимость устройства распределительных воздуховодов в зданиях [8,19,42]. В целях экономии тепловой энергии в отечественной и зарубежной практике существуют различные системы вентиляции, в которых происходит теплообмен между выводным и поступающим в здание воздухом с помощью устройств для возврата тепла (теплообменниками). Теоретически все типы теплообменников

могут применяться в животноводстве, хотя в настоящее время используются только некоторые — в первую очередь поверхностные. Вследствие запыленности воздуха животноводческих помещений регенеративные теплообменники не нашли применения в животноводстве по причине возможного переноса пыли и других загрязнений из удаляемого воздуха в приточный. В этом смысле рекуперативные теплообменники гигиенически более предпочтительны. Недостаток рекуперативных теплообменников — небольшая разница температур между средами, вследствие чего для обеспечения достаточного возврата тепла необходим теплообменник с большой площадью поверхности. Так же при низких наружных температурах происходит замерзание конденсата, и при этом закупориваются каналы вытяжного воздуха. Так же закупоривание каналов теплообменников может происходить из-за высокой загрязнённости пылевыми частицами вентиляционного воздуха [43].

Одним из перспективных вариантов снижения тепловпотерь животноводческих помещений является использование различных режимов работы систем вентиляции, связанных с перераспределением воздушных потоков в режимах прямой циркуляции, рециркуляции, частичной рециркуляции. Для этих можно использовать тепловентиляционные системы «Агровент», энергосберегающий комплект оборудования ЭКО, теплоутилизатор УТ- Ф-12, но из-за высокой загрязненности вентиляционного воздуха применение данных систем не нашло широкого распространения. В работах [8,9,13,25,44] с целью повышения энергоэффективности систем вентиляции предлагается использовать перераспределение воздушных потоков в режимах циркуляции и рециркуляция вентиляционного воздуха с его одновременной высокоэффективной очисткой с помощью воздушного фильтра. Широкое применение когенерационных установок и тепловых насосов затруднительно по причине явно выраженного неравномерного характера суточных графиков потребления тепловой и электрической энергии на объектах животноводства, а также требует значительных единовременных капитальных затрат. В настоящее время срок окупаемости тепловых насосов в

сельскохозяйственном производстве составляет около 10-15 лет [45]. Основными ограничениями внедрения тепловых насосов являются высокие удельные капитальные вложения; ограничения по температуре на выходе из теплового насоса ( $65^{\circ}\text{C}$ ); неоднородность теплового потенциала грунта в региональном разрезе; учет фактора охлаждения грунта при эксплуатации тепловых насосов [46].

Технические средства, формирующие в настоящее время электрические системы теплообеспечения объектов животноводства [47] и используемые проектными организациями, представлены на рисунке 1.1.

Применяемые в системах обеспечения микроклимата технологии и технические средства имеют существенные недостатки: не регулируется подача воздуха в помещениях в зависимости от наружной температуры, влажности, загазованности и температуры внутри помещений; не используется теплота, выделяемая животными из-за ограниченного применения теплоутилизации, других современных методов снижения расхода энергии; отсутствуют средства очистки и обеззараживания воздуха, что приводит к загрязнению воздушного бассейна вблизи ферм.

В Российской Федерации нет специализированных заводов по производству современного тепловентиляционного оборудования с утилизацией теплоты вентиляционных выбросов, очисткой воздуха, а также надежных средств автоматизации этого процесса и использованию других прогрессивных принципов и достижений научно-технического прогресса.

Отсутствие автоматических средств для контроля параметров микроклимата и управления ими приводит к увеличению энергозатрат, нарушению режимов поддержания требуемых параметров среды в помещениях и эффективности систем микроклимата в целом [8].



Рисунок 1.1 – Технические средства, формирующие электрические системы теплообеспечения объектов животноводства

### 1.5 Особенности режимов циркуляции, рециркуляции и частичной рециркуляции вентиляционного воздуха

Для обоснования режима работы системы вентиляции рассмотрим существующие режимы циркуляции и рециркуляции вентиляционного воздуха [48, 49].

**Режим прямой циркуляции.** В режиме прямой циркуляции количество приточного воздуха  $Q_1$ , рассчитанное исходя из санитарно-гигиенических требований по формуле ( $Q_1 = L$ , где  $L = U \cdot n \cdot m / 100$ , где  $L$  – требуемый воздухообмен необходимый по санитарно-гигиеническим нормам, м³ч;  $U$  – интенсивность воздухообмена, м³ч/ц;  $n$  – количество животных, голов;  $m$  – масса одного животного, кг.), равняется количеству вытяжного воздуха  $Q_2$  (Рисунок 1.2).

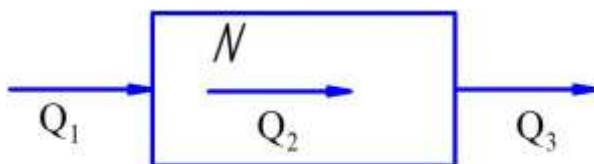


Рисунок 1.2 – Режим прямой циркуляции

Необходимая кратность воздухообмена в животноводческом помещении, обусловленная зоогигиеническими требованиями, рассчитывается по формуле:

$$N=L/V. \quad (1.1)$$

где  $V$ - объём животноводческого помещения,  $\text{м}^3$ .

В свою очередь кратность прямой циркуляции  $N_{пр}$ , равная отношению (1.1), будет равна необходимой кратности  $N$ .

В этом случае количество приточного воздуха равно количеству вытяжного воздуха, и равно количеству воздуха поступающего в помещение:

$$Q_1=Q_2=Q_3. \quad (1.2)$$

Тогда будет верно равенство

$$N_{пр}=Q_1/V= N=L/V. \quad (1.3)$$

Отношение количества воздуха поступающего из окружающей среды на количество воздуха поступающего в помещение будет называться коэффициентом прямой циркуляции  $\beta$ :

$$\beta = Q_1/ Q_2, \quad (1.4)$$

В режиме прямой циркуляции  $\beta=1$  (так как  $Q_1 = Q_2$ ).

**Режим рециркуляции.** В режиме рециркуляции количество приточного воздуха  $Q_1$  и количество вытяжного воздуха  $Q_3$  равно нулю (Рисунок 1.3):

$$Q_1=Q_3=0. \quad (1.5)$$

Количество воздуха  $Q_2$  из помещения направляется в систему рециркуляции и проходит через воздушный фильтр с эффективностью очистки  $\eta$  и возвращается обратно в животноводческое помещение:

$$Q_4=Q_2=L. \quad (1.6)$$

где  $Q_4$  – количество воздуха прошедшее через фильтр,  $\text{м}^3\text{ч}$ .

Отношение количества воздуха проходящего через фильтр на количество воздуха поступающего в помещение будет называться коэффициентом рециркуляции  $\alpha$ :

$$\alpha = Q_4 / Q_2. \quad (1.7)$$

В режиме рециркуляции  $\beta=0$ , а  $\alpha=1$  так как  $Q_4 = Q_2$ . А в режиме прямой циркуляции  $\alpha=0$ , так как рециркуляция отсутствует.

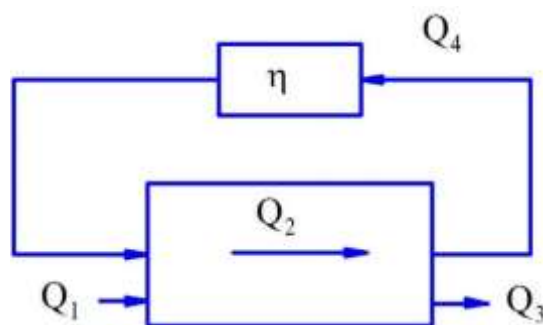


Рисунок 1.3 – Режим рециркуляции

Кратность рециркуляции определяется:

$$N_{pec} = Q_4 / V. \quad (1.8)$$

В зависимости от воздухопроизводительности вентилятора системы рециркуляции воздуха кратность рециркуляции  $N_{pec}$  может быть больше или равна кратности необходимой по зоогигиеническим требованиям  $N$ . Если  $N_{pec} = N$  – режим обычной рециркуляции. Если  $N_{pec} > N$  то режим внутренней рециркуляции.

**Режим частичной рециркуляции.** Частичная рециркуляция воздуха — это режим, при котором к приточному воздуху  $Q_1$  непрерывно подмешивается рециркуляционный воздух из помещения  $Q_4$ , в помещение поступает воздушная смесь  $Q_2 = Q_1 + Q_4$ . В свою очередь удаляемый из помещения воздух включает в себя количество воздуха удаляемого наружу  $Q_3$  и количество воздуха направляемого на рециркуляцию  $Q_4$  таким образом  $Q_2 = Q_3 + Q_4$ . (Рисунок 1.4) При этом обеспечивается условие  $Q_2 = const$ ,  $Q_1 = Q_3$  [44].

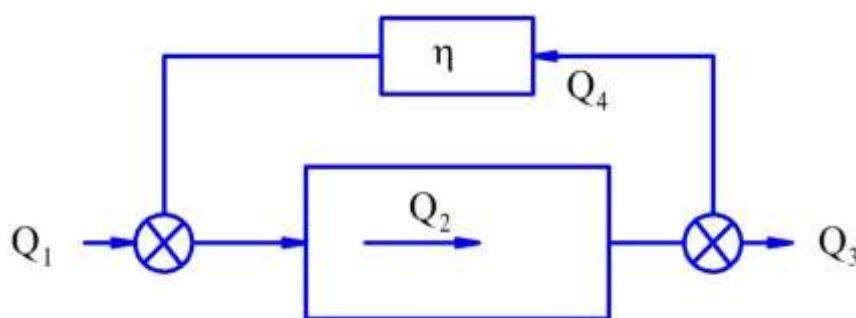


Рисунок 1.4 – Режим частичной рециркуляции

В режиме частичной рециркуляции  $\alpha$  всегда меньше единицы  $\alpha = Q_4 / Q_2 < 1$ , т.к. всегда осуществляется подача приточного воздуха для обогащения кислородом [45]. Кратность частичной рециркуляции  $N_{ч.р.}$  складывается из кратности прямой циркуляции  $N_{пр}$  и кратности рециркуляции  $N_{рец}$ . Кратность прямой циркуляции и кратность рециркуляции определяют по формулам:

$$N_{пр} = N_{ч.р.} \cdot \beta = N_{ч.р.} \cdot (1 - \alpha); \quad (1.9)$$

$$N_{рец} = N_{ч.р.} \cdot \alpha; \quad (1.10)$$

$$N_{ч.р.} = N_{рец} + N_{пр}; \quad (1.11)$$

$$N_{ч.р.} \geq N. \quad (1.12)$$

$N_{ч.р.} = N$  – обычная частичная рециркуляция;

$N_{ч.р.} > N$  – внутренняя частичная рециркуляция.

В общем случае схема частичной рециркуляции будет выглядеть следующим образом (Рисунок 1.5).

Анализ режимов прямой циркуляции, рециркуляции и частичной рециркуляции показал следующее: режим прямой циркуляции воздуха (Рисунок 1.2) характеризуется большими энергозатратами связанными с подогревом приточного воздуха в переходный и холодные периоды года; режим рециркуляции воздуха (Рисунок 1.3) сопровождается сниженными энергозатратами по сравнению с режимом прямой циркуляции, однако, в этом режиме в связи с жизнедеятельностью животных в воздушной среде животноводческих помещений происходит накопление пыли, вредных газов, снижается содержание кислорода.

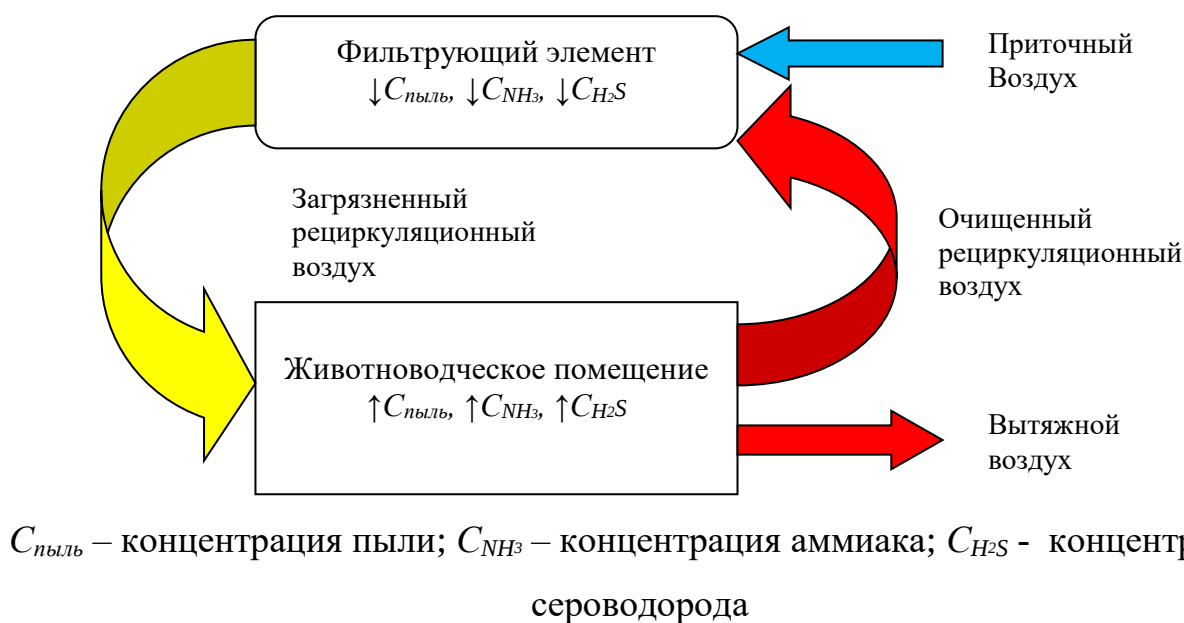


Рисунок 1.5 – Схема частичной рециркуляции воздуха

Для устранения этого недостатка в режиме рециркуляции необходимо использовать высокоэффективные фильтры для очистки от пыли и вредных газов, однако, проблему обогащения воздушной среды кислородом и удаления углекислого газа, установкой фильтра, не решает. На основании вышесказанного целесообразно применять вентиляционные системы, работающие в режиме частичной рециркуляции (Рисунок 1.5) с высокоэффективной очисткой воздуха направляемого на рециркуляцию. В режиме частичной рециркуляции воздуха к рециркуляционному воздуху подмешивается часть приточного наружного воздуха, для обогащения воздушной среды кислородом, с одновременным удалением части вентиляционного воздуха в атмосферу с целью снижения концентрации углекислого газа.

## 1.6 Сравнительный анализ методов очистки и воздушных фильтров

Воздушные фильтры нашли широкое применение в системах очистки воздушных и газовых сред с различной степенью запыленности. Проведенный анализ позволил установить обширный класс фильтров, получивших применение в

различных отраслях промышленности: тканевые или рукавные, зернистые, волокнистые, электрические.

Весомый вклад в деле создания теоретических основ технологии очистки воздуха, разработке конструкций фильтров внесли такие ученые и инженеры как Жебровский С.П., Верещагин И.П., Левитов В.И., Ужов В.Н., Мягков В.И., Булгакова Н.Г., Решидов И.К., Капцов Н.А., Бабашкин В.А., Ермилов И.В., Алиев Г.М.А., Гоник А.Е., Киселев Л.М., Бортников М.М., Гельбштейн Я.И., Мелихов В.Н., Пашин М.И., Байдукин Ю.А., Першин А.Ф. и др.

Следует отметить особый вклад в развитие теории и технологии очистки воздуха в животноводческих, птицеводческих и других сельскохозяйственных помещениях, в разработке оригинальных конструкций электрофильтров для этой области, который внесли Возмилов А.Г., Кирпичникова И.М., Басов А.М., Изаков Ф.Я., Свиридов А.А., Файн В.Б., Тайманов С.Т., Классен Ю.В., Волков Г.К. и другие ученые.

В [28,29,41,47,49] при рассмотрении вопроса очистки рециркуляционного воздуха животноводческих помещений рекомендуется обязательная очистка такого воздуха с эффективностью не менее 90%. В отличие от приточного фильтра рециркуляционный фильтр должен обладать большей пылеемкостью, т.к. концентрация пыли и вредных аэрозолей в рециркуляционном воздухе в большинстве случаев на два и более порядков выше, чем в приточном воздухе. Учитывая то, что объемы очищаемого рециркуляционного воздуха достигают 5,55...11,11 м<sup>3</sup>/с, а концентрация пыли 35 мг/м<sup>3</sup> и более [49], в случае очистки рециркуляционного воздуха целесообразно использовать фильтры с непрерывной регенерацией.

В связи с многообразием требований, предъявляемых к воздушным фильтрам, разработано большое количество конструкций фильтров и фильтрующих элементов [48-53]. Основными показателями воздушных фильтров, являются их эффективность, удельная воздушная нагрузка, сопротивление и пылеемкость [54]. Эффективность фильтров зависит от условий их эксплуатации и

дисперсности улавливаемого аэрозоля. Ввиду того, что на практике она меняется, правильнее говорить об усредненных показателях определенных групп и классов фильтров. Классификация воздушных фильтров, принятая в России, представлена в [55].

Фильтры высокой и сверхвысокой эффективности, как правило, волокнистые, характеризуются способностью улавливать и достаточно надежно удерживать на сухих фильтрующих поверхностях частицы всех размеров - от частиц, измеряемых десятими и даже сотыми долями микрометра, которые улавливаются в результате действия механизмов диффузии и зацепления, до крупных частиц, задерживающихся в густом переплетении тонких волокон, образующих фильтр [51].

Фильтры тонкой очистки можно разделить на две группы:

- специальные конструкции волокнистых фильтров;
- двухзонные электрофильтры.

В волокнистых фильтрах тонкой очистки с более толстыми и редкими волокнами, чем в фильтрах высокой и сверхвысокой эффективности, механизм диффузии менее действенен и поэтому в них задерживаются не все частицы мельче 1 мкм. Более крупные частицы эффективно задерживаются в результате механического зацепления и инерции. Частицы крупнее 4...5 мкм в сухих фильтрах этого класса могут удерживаться недостаточно надежно. Волокна в волокнистых фильтрах тонкой очистки должны быть не толще 8...10 мкм. Скорости фильтрации в таких фильтрах обычно принимают 0,05...0,25 м/с, поэтому для сохранения высокой производительности установки должны иметь весьма развернутую поверхность [51,52].

В электрических фильтрах тонкой очистки эффективно могут улавливаться частицы размером 10...0,01 мкм при скорости воздушного потока в активном сечении фильтра 0,5...2,5 м/с [52].

Характеристики воздушных фильтров, наиболее широко применяемых в России, приведены в (Приложение А). На рисунке 1.6 представлены диапазоны

размеров некоторых аэрозолей и область действия различных фильтров и аппаратов очистки воздуха [52,54].

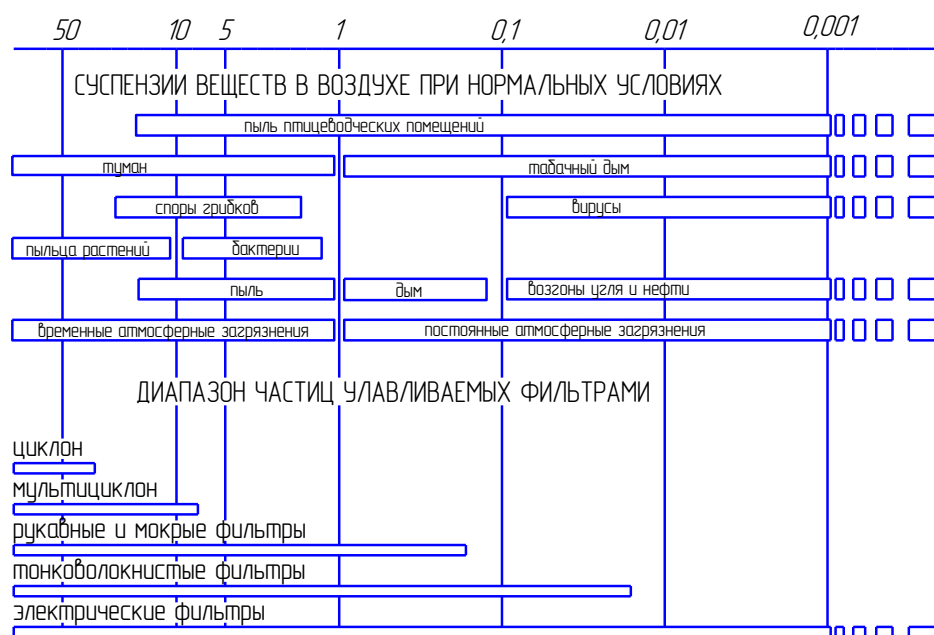


Рисунок 1.6 - Диапазоны размеров аэрозолей и область действия различных фильтров и аппаратов очистки воздуха

Воздушные фильтры нашли широкое применение в системах очистки воздушных и газовых сред с различной степенью запыленности. Проведенный анализ позволил установить обширный класс фильтров, получивших применение в различных отраслях промышленности: тканевые или рукавные, зернистые, волокнистые, электрические. Рассмотрим классификацию существующих воздушных фильтров (Рисунок 1.7).

Тканевые или рукавные фильтры [56, 57] имеют в качестве основного рабочего органа - рукав из грубой ткани, служащий фильтрующим элементом (Рисунок 1.8). При прохождении запыленного воздуха через фильтрующую перегородку рукава твердые частицы осаждаются, образуя пористый слой. Фильтрующий рукав встраивается в нагнетательную или вытяжную систему воздуховодов, т.е. является самостоятельным фильтрующим органом в вентиляционно-очистной системе. Недостатком такого фильтра является

сложность встряхивающих устройств, необходимых для раскрытия (очистки) пор ткани; истирание, разрыв, вытяжка или усадка рукавов, сложность при монтаже и обслуживании узлов регенерации. Рукав одновременно является накопительным бункером продуктов очистки. Эффективность такой очистки зависит от степени заполнения рукава, и, по мере заполнения, увеличивает аэродинамическое сопротивление фильтра, что очень нежелательно, т.к. влияет на показатель воздухопроизводительности вентиляционной системы. Степень очистки таких фильтров в среднем составляет 70-75%.

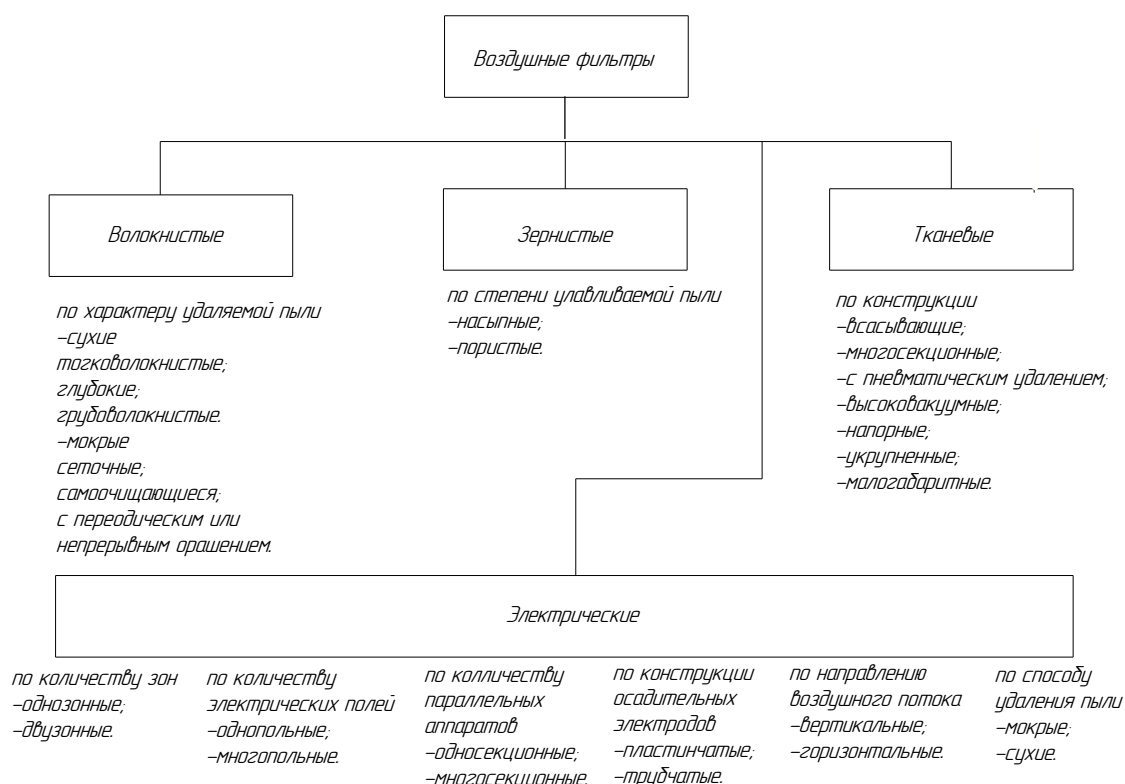
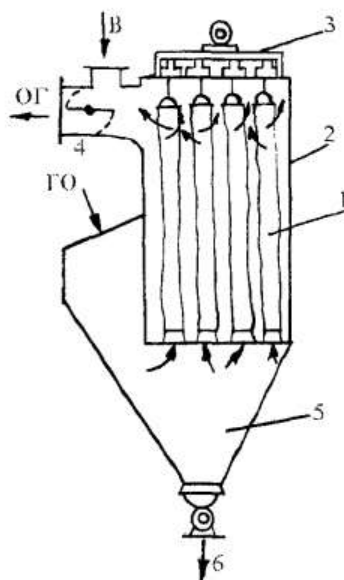


Рисунок 1.7 – Классификация существующих воздушных фильтров

Зернистые фильтры [56,57] также являются своего рода насадками на вентиляционную систему трубопроводов. В качестве такой фильтрующей насадки служит специальная конструкция (Рисунок 1.9), заполняемая различными крупинчатыми материалами: песком, гравием, шлаком, щебнем, коксом, опилками. Степень очистки воздуха зернистыми фильтрами невысока, концентрация пыли на выходе может достигать до 20 - 110 мг/м<sup>3</sup>.

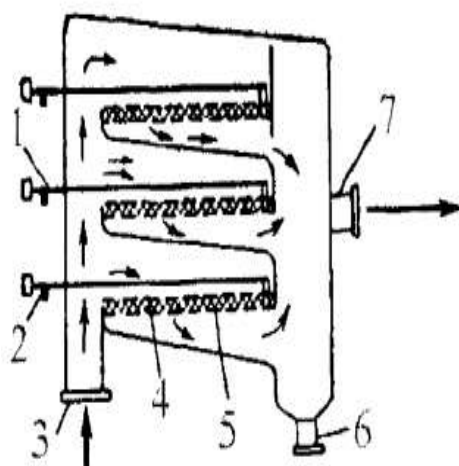
К тому же они имеют ряд конструктивных недостатков: громоздкость, небольшая производительность и несовершенство некоторых узлов, например, устройств регенерации фильтрующего слоя и высокое аэродинамическое сопротивление.



- 1 - рукав; 2 - корпус; 3 - встряхивающий механизм; 4 - клапаны для вывода очищенного воздуха и ввода продувочного воздуха; 5 - бункер для пыли; 6 - выход пыли

Рисунок 1.8 - Технологическая схема тканевого или рукавного воздушного фильтра механического принципа очистки воздуха

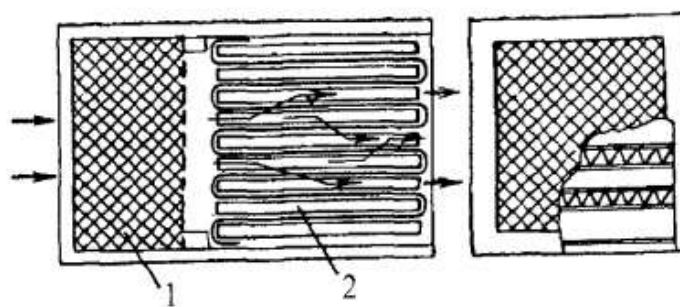
Волокнистые фильтры [56-61] также представляют специальные насадки на трубопровод вентиляционной системы (Рисунок 1.10). В качестве фильтрующего элемента используются слои различной толщины из картона, бумаги, специальные набивные маты. Сплошной слой пыли, образующийся на поверхности наиболее плотных материалов, резко повышает аэродинамическое сопротивление фильтра, что является одним из недостатков такой конструкции. Регенерация тонковолокнистых фильтров после забивания пылью невозможна, они предназначены для непрерывной работы сроком до 2÷3 месяцев с последующей заменой либо всего фильтра, либо фильтрующего элемента.



1 - гребковое устройство; 2 - штуцер подвода воды; 3 - входной патрубок;  
4 - зернистый слой; 5 - сетчатое дно полки; 6 - штуцер для шлама; 7 - выходной  
патрубок

Рисунок 1.9 - Технологическая схема зернистого воздушного фильтра  
механического принципа очистки воздуха

Попытки регенерировать грубоволокнистые фильтры промывкой, воздействием ударных волн, отсасыванием пыли вакуумом не дают положительных результатов.



1 - секция грубой очистки с набивным слоем грубых волокон; 2 - секция тонкой  
очистки

Рисунок 1.10 - Технологическая схема волокнистого воздушного фильтра  
механического принципа очистки воздуха

Анализируя представленных фильтров воздуха, выявил их недостатки: относительно низкую степень улавливаемости частиц (70-80%), высокое аэродинамическое сопротивление, которое требует электровентиляторы с большим воздушным напором и, установленной мощностью электропривода от единиц до нескольких десятков киловатт, что увеличивает энергозатраты на фильтрацию воздуха; несовершенство регенерирующих устройств и их частую замену, невысокую производительность, громоздкость, высокую стоимость.

Сравнение технических характеристик фильтров, показало, что наиболее полно зоотехническим требованиям к установкам очистки и обеззараживания рециркуляционного воздуха на животноводческих комплексах отвечают электрофильтры. Электрофильтры по сравнению с другими фильтрами имеют ряд преимуществ:

- низкое аэродинамическое сопротивление;
- высокая степень очистки;
- способность улавливать частицы размером 10...0,01 мкм и менее;
- возможность регенерации фильтрующего элемента;
- возможность автоматизации всех процессов очистки;
- малое собственное потребление электроэнергии;
- низкая себестоимость очистки [55,57,62,63].

В основу действия электрофильтра положен коронный разряд, в поле которого происходит зарядка взвешенных в очищаемом воздухе частиц и их осаждение на осадительных электродах под действием электрических сил.

Основными конструктивно-технологическими элементами таких электрофильтров являются корпус фильтра с системами подачи запыленного и выхода очищенного воздуха, система коронирующих и осадительных электродов, устройство для снятия осажденной пыли с осадительных электродов, источник высоковольтного напряжения с узлами подачи этого напряжения на электроды [64-67].

Преимущество таких фильтров перед ранее рассмотренными, является высокая степень очистки запыленного воздуха (90% и более) и высокая производительность. Фильтры позволяют улавливать частицы в широком диапазоне от сотен до долей микрометра, имеют низкое аэродинамическое сопротивление (до 100 Па), что на порядок снижает мощность электропривода вентилятора, не требуют замены, как у механических, фильтрующей системы, сбор пыли производится в специальных бункерах, которые можно сделать сменными.

Произведем аналитический обзор конструкций воздухофильтров для класса фильтров, работающих на принципе коронного разряда с выделением конструктивных и функциональных особенностей [68-73].

Известен ряд конструкций электрофильтров, содержащих пластинчатые или трубчатые осадительные электроды и коронирующие электроды. В конструкциях с пластинчатыми осадительными электродами, последние подвешены к рамам подвеса, а в нижней части они закреплены на балке стряхивания, соединенной с ударными механизмами разнообразного исполнения для отряхивания пыли в приемный бункер.

Так, например, по патенту Японии [58] фильтр (Рисунок 1.11-а) состоит из коронирующих электродов (4), балка встряхивания (1) кинематически соединена с молотковым механизмом (2), который приводит в действие систему очистки осадительного электрода (3). Утилизация пыли происходит в приемном бункере (на схеме не показан).

По авторскому свидетельству СССР (Рисунок 1.11-б) [59] через осадительные электроды (1) пропущен натяжной трос (6). Между осадительными электродами расположены коронирующие электроды (10). Встряхивание пыли производится путем сообщения тросу поперечного колебательного движения от вибратора (13), соединенного к тросу посредством тяг.

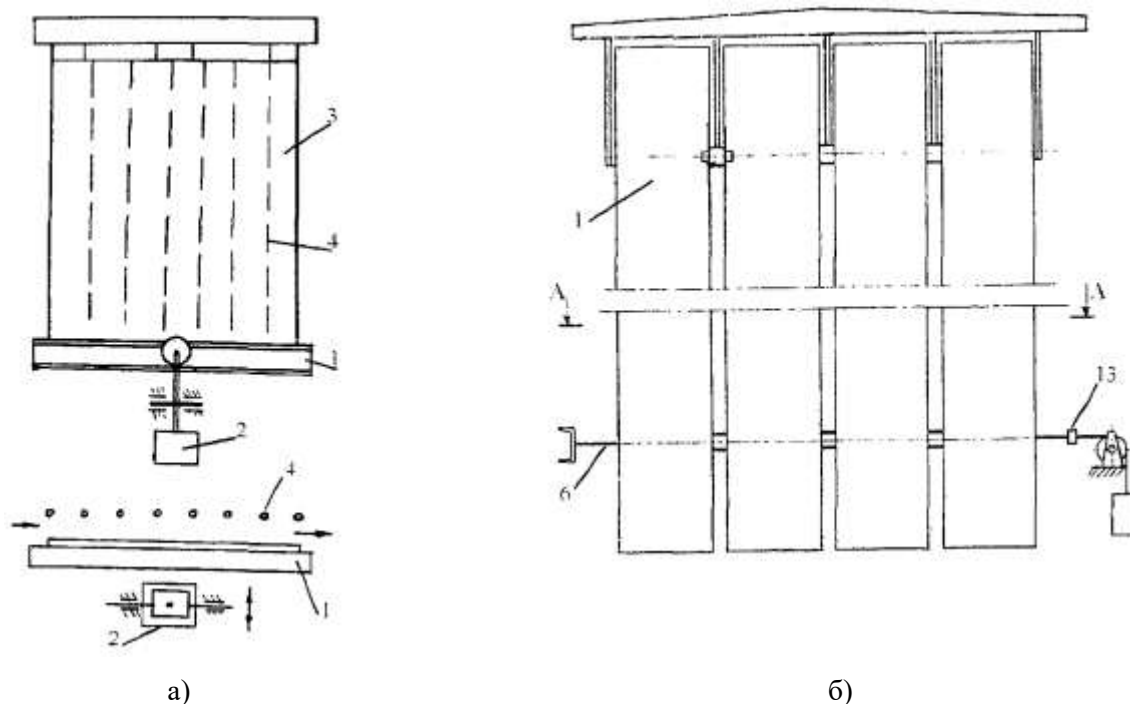


Рисунок 1.11 - Конструктивные схемы электрокоронных фильтров  
запыленного воздуха

Недостатками схем подобных фильтров, является неэффективная схема осаждения улавливаемых частиц, что ухудшает технические характеристики таких аппаратов. К тому же такие фильтры в своей работе создают сильный шум.

В электрофильтре [60] встряхивающие элементы (14) выполнены в виде пружинящих пластин. Радиальные электроды (4) расположены на вращающихся валах (2) с пазами, взаимодействующими с пластинами (Рисунок. 1.12).

Отрицательным фактором применения рассмотренных электрофильтров является еще и то, что их работа сопровождается резкими ударными звуками, которые неминуемо вызовут у животных стрессовые ситуации, что отрицательно скажется на их физиологическом состоянии [51].

Общими недостатками таких электрофильтров являются неэффективное осаждение крупных частиц пуха, а также частиц, способных к коагуляции, что в целом снижает степень улавливаемости частиц такими фильтрами.

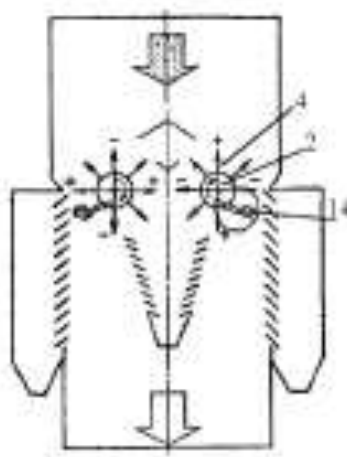


Рисунок 1.12 - Конструктивные схемы электрокоронных фильтров  
запыленного воздуха

Известен также электрофильтр [74] с коронирующим электродом, выполненным в виде трубы (1) с отверстиями (2), по которой подается вода (Рисунок 1.13), осадительного электрода (3) и пылесборника (4).

При подаче высокого напряжения вокруг коронирующего электрода устанавливается корона с фиксированными разрядными точками на поверхностях отверстий. Вода, вытекая струями из отверстий (2) коронирующего электрода (1), направленных навстречу друг другу, разбивается на мелкие капли, создавая туман вокруг коронирующего электрода по всей активной зоне электрофильтра. Частицы пыли, проходя зону короны, коагулируются с заряженными каплями тумана и движутся к осадительному электроду.

Рассмотрим еще ряд «мокрых» электрофильтров. Так, например, [75] в качестве осадительного электрода здесь используются лотки, наполненные водой и периодически отряхивающие содержимое (вода, плюс осевшая в ней пыль) в специальный бункер; электрофильтр с жидкостным осадительным электродом [76], выполненным в виде переливного лотка; электрофильтр [77] имеет жидкостный осадительный электрод и жалюзийную коронирующую решетку; электрофильтр

[79] с желобчатой емкостью в качестве осадительного электрода, которая наполнена токопроводящей жидкостью.

Известен также фильтр [78], где для очистки осадительного электрода на него производится подача кондиционирующего реагента (например, аммиака), который разрыхляет осевшие и уплотнившиеся частицы пыли, что способствует их лучшему удалению.

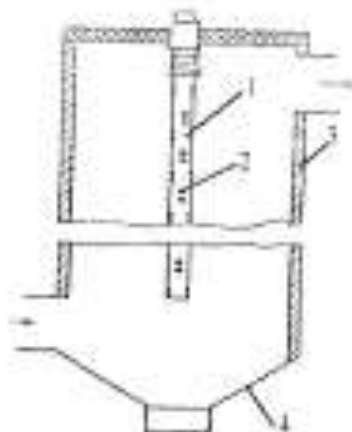


Рисунок 1.13 - Конструктивные схемы электрокоронных фильтров  
запыленного воздуха

К особому классу электрофильтров коронного разряда следует отнести двухзонные электрофильтры [79,80], отличительная особенность которых состоит в том, что зарядка частиц пыли и ее осаждения на пластинчатых электродах разнесены в пространстве. Обладая высокой степенью очистки, регенерация осадительного элемента имеет свои определенные недостатки.

Рассмотрим еще один электрофильтр с иной конструкцией осадительных электродов (Рисунок 1.14). Электрофильтр [80] содержит осадительные электроды, выполненные в виде бесконечных лент из диэлектрического материала (4, 5), расположенных коаксиально, пылесъемные щетки (3) размещены между ними. Электроды и щетки снабжены приводом вращения. При движении осадительный электрод заряжается кондуктивным способом от высоковольтного источника, а,

проходя между щетками, электрод таким же образом перезаряжается, в результате чего уловленная пыль от него отделяется, поступая в накопительную емкость.

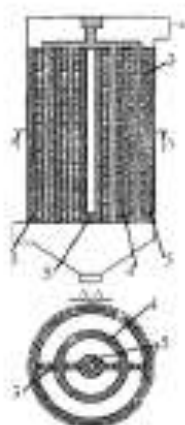


Рисунок 1.14 - Конструктивные схемы электрокоронных фильтров запыленного воздуха

Представленный вариант электрофильтра имеет отличие осадительного электрода, представляющего бесконечные диэлектрические ленты. Эту конструктивную особенность такого электрода - конвейера целесообразно использовать для вынесения осажденной на нем массы частиц пыли из рабочей зоны для последующей очистки электрода от уловленных частиц. [57,63].

Для повышения эффективности очистки и обеззараживания воздуха в животноводческих помещениях в работе Дмитриева А.А. [44] обосновано использование двухступенчатого мокрого электрофильтра.

Двухступенчатый мокрый электрофильтр (ДМЭФ), состоит из двух последовательно соединённых мокрых однозонных электрофильтров, каждый из которых состоит из двух основных частей: верхней части с коронирующими электродами и системой высоковольтных изоляторов; нижней части с емкостью для жидкости и системой удаления шлама через сливной клапан.

В качестве коронирующих электродов используются игольчатые электроды [59]. Осадительные электроды выполнены в виде параллельных плоских дисков, вращающихся на валу электрофильтра. Осадительные электроды, вращаясь с

определенной скоростью на валу электрофилтра, постоянно смачиваются жидкостью в нижней части электрофилтра. Осаждение частиц аэрозоля из воздушного потока происходит в верхней части электрофилтра на покрытые тонким слоем жидкости поверхность осадительных электродов.

Конструкция электрофилтра позволяет непрерывно очищать осадительные электроды от осевшего аэрозоля, а также очищать фильтруемый воздух от вредных газовых составляющих за счёт озона и жидкости, покрывающей осадительные электроды. Схема ДМЭФ представлена на рисунке 1.15.

Конструктивное отличие первой и второй ступени в общем случае заключается в различии межэлектродных расстояний ( $h_1 \neq h_2$ ), что позволяет повысить эффективность тонкой очистки от пыли, составе омывающей осадительные электроды жидкости, а также в различии активной длины электрофилтра ( $l_1 \neq l_2$ ), скорости воздушного потока ( $u_1 \neq u_2$ ).

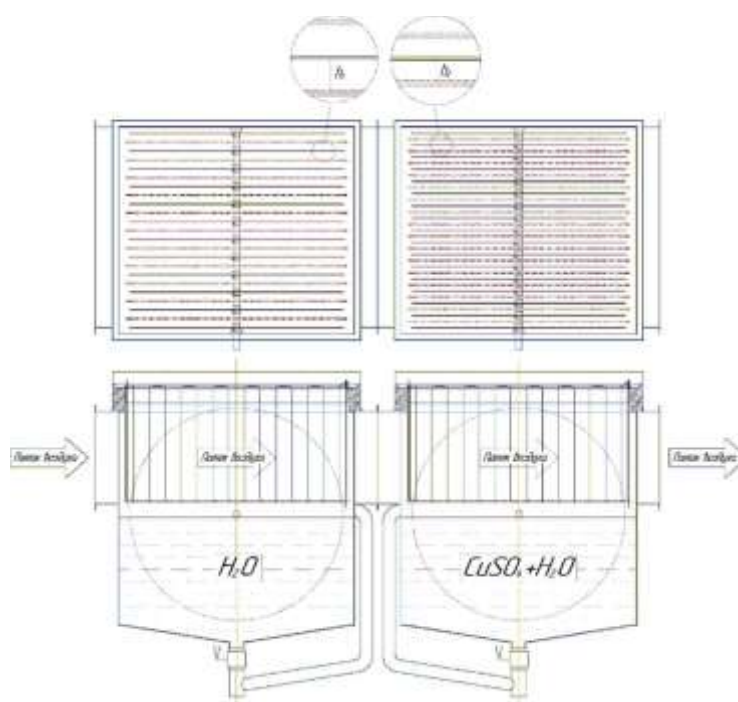


Рисунок 1.15 - Схема двухступенчатого мокрого электрофилтра

Первая ступень (ступень грубой очистки) предназначена для очистки воздуха от пыли и крупнодисперсного аэрозоля, микроорганизмов,  $i$ -го вредного газа (основная очистка) и  $j$ -го вредного газа. Вторая ступень (ступень тонкой очистки)

обеспечивает очистку от мелкодисперсного аэрозоля, j-го вредного газа (основная очистка) и доочистку от пыли, микроорганизмов, i-го газа.

Эффективность очистки воздуха от пылевых и аэрозольных частиц в ДМЭФ определяется по формуле:

$$\eta_n = 1 - \exp \left( - \frac{w_1 l_1 h_2 u_2 + w_2 l_2 h_1 u_1}{h_1 u_1 h_2 u_2} \right). \quad (1.13)$$

От i-вредного газа

$$\eta_i = 1 - \exp \left[ - \frac{l_1}{u_1} \left( k^{i1}_{O_3'} + k^{i1}_{OЖ1} \right) - \frac{l_2}{u_2} \left( k^{i2}_{O_3''} + k^{i2}_{OЖ2} \right) \right]. \quad (1.14)$$

где  $k^{i1}_{O_3'}$  и  $k^{i2}_{O_3''}$  - константа скорости окисления i-ой газовой компоненты воздуха озоном соответственно в первой и второй ступени,

$k^{i1}_{OЖ1}$  и  $k^{i2}_{OЖ2}$  - константа скорости абсорбции i-ой газовой компоненты воздуха омывающей жидкостью соответственно в первой и второй ступени.

Испытания ДМЭФ проводились на свинокомплексе ООО «Согласие», расположенном в с. Новая Заимка Заводоуковского района Тюменской области [83,84]. В результате производственной проверки опытного образца ДМЭФ установлено, что эффективность очистки рециркуляционного воздуха выше, чем у мокрого однозонного электрофилтра и составляет от пылевых и аэрозольных частиц размером 0,3...10 мкм – до 95 %, от аммиака – не менее 84 %, от сероводорода – не менее 50 % при скорости воздушного потока 5,5 м/с. Разработанная система предназначена для комплексной очистки рециркуляционного воздуха в животноводческих помещениях от пыли и вредных газов (аммиак и сероводород), производственные испытания которой показали, что снижение уровня вышеуказанных вредностей ниже значений ПДК происходит за небольшой промежуток времени работы установки (2-3 часа) и остается на этом уровне при дальнейшей работе установки [44]. На рисунке 1.8 представлены сравнительные характеристики фильтров.

Таблица 1.8 – Характеристики фильтров

| Фильтр                                                | Производительность             | Эффективность очистки                         | Сопротивление | Коммуникации                                                                                                        | Производитель                               |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Зернистые фильтры<br>ФЗГИ-Б-1<br>(пыль)               | от 1000 м <sup>3</sup> /ч      | 97-99 %                                       | до 1500 Па    | Пневмоударная регенерацией (Давление сжатого воздуха 2-6 атм.)                                                      | ООО «ИМПЭК»<br>Россия                       |
| Волокнистые фильтры<br>ФКГ-Т(Н)-2                     | от 2000 м <sup>3</sup> /ч      | 96 - 99 %                                     | 500 Па        | Регенерация водой (давление на регенерацию) 0,1-0,2 (1-2), мПа (кгс/м <sup>2</sup> );<br>Время регенерации 5-10 мин | ООО «НПП Фолтер»<br>Россия                  |
| Рукавный фильтр<br>РПАВ-600<br>(пыль)                 | от 600 м <sup>3</sup> /ч       | 99 %                                          | 1000 Па       | Мощность эл.двигателя, 0.75 кВт; 380 В для вентилятора                                                              | «Экоюрус-Венто»<br>Россия                   |
| Локальный фильтр<br>ФКЦ/Л-3.15<br>(пыль)              | от 510 м <sup>3</sup> /ч       | нет данных                                    | нет данных    | Мощность эл.двигателя, 0.55 кВт; 380 В для вентилятора                                                              | ЗАО «Совокрим»;<br>и др. Россия             |
| BDC-5-005/006/007-2500-Компакт (пыль)                 | 2500 - 3500 м <sup>3</sup> /ч  | 99 %                                          | 1200 -1500 Па | Мощность эл.двигателя, 5,5 кВт; 380 В для вентилятора;<br>Давление сжатого воздуха, для очистки 3-6 атм.            | BDC-Air<br>Минск                            |
| Big Dutchman FAF 1500<br>(вирусы)                     | 1750 м <sup>3</sup> /ч         | предварительная очистка 65 %<br>основная 80 % | нет данных    | нет данных                                                                                                          | Big Dutchman International GmbH<br>Германия |
| Ионообменные фильтры РИФ, ФК, РИФ-ФК<br>(газы)        | 500 – 100000 м <sup>3</sup> /ч | 97 – 100%                                     | нет данных    | Водопроводная вода;<br>Канализация;<br>Электроэнергия: 220 В и 380 В;                                               | ООО «ИМТ-Фильтр»<br>Минск                   |
| Фильтр электростатический<br>ЭФВА 10-06<br>(аэрозоль) | 1000 – 4000 м <sup>3</sup> /ч  | 93 – 99 %                                     | до 200 Па     | Установленная мощность 0,4 кВт                                                                                      | ООО «Энергостройтех плюс» Россия            |

Известно, что технологические и конструктивные параметры МЭФ рассчитываются на максимальную концентрацию вредности в воздушной среде животноводческого помещения, которая возникает в периоды максимальной генерации вредности во время кормления животных, их активного перемещения, уборки помещения, вакцинации и т.д. Однако, из литературы известно, что у всех

живых организмов в течение суток можно наблюдать периодическое нарастание и убывание различных функций, (например, чередование состояний активности и покоя) или же периодические изменения состояния отдельных органов и целых систем органов. Все эти явления связаны с чередованием дня и ночи, т. е. с процессами, зависящими от вращения земного шара. Эти изменения именуются дневной или сезонной цикличностью в зависимости от того, связаны ли они с чередованием дня и ночи или же с чередованием отдельных периодов года.

Причина этих периодических циклов кроется отчасти в экзогенных влияниях, например, периодических метеорологических факторов (чередование света и темноты, изменение их продолжительности в течение сезона, смена температуры и влажности воздуха, давления и т. д.). Таких факторов можно насчитать до 25. Не менее важную роль играют эндогенные факторы, обязанные функциональным изменениям организма каждого индивидуума [28,29,36]. На рисунке 1.9 представлен график активности животных на примере свиней [29].

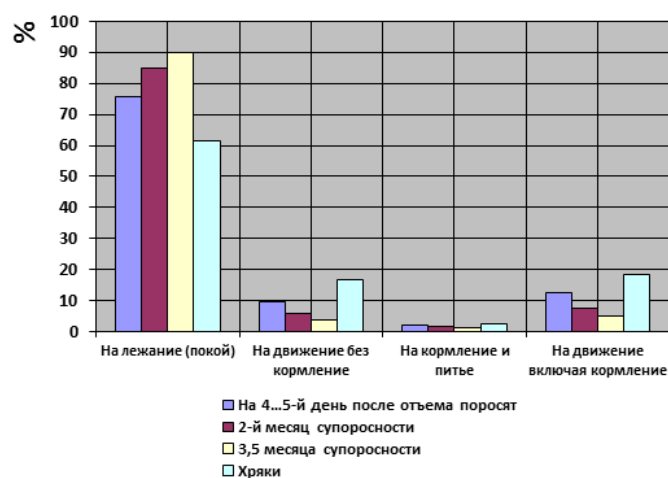


Рисунок 1.16 – Распределение времени суток (%) у свиней при содержании в свиноматках

В свою очередь, система вентиляции включает в себя энергоемкое вентиляционное оборудование, такое как, вентиляторы, калориферы, газовый отопители, сервоприводы, приточные клапаны и др., работа которых, в периоды снижения активности животных, на максимальную производительность не

целесообразна с точки зрения энергосбережения. Таким образом встает вопрос по разработке мероприятий по снижению воздухопроизводительности систем очистки рециркуляционного воздуха в периоды сниженной активности животных [85].

Из литературных данных известна периодичность суточной активности животных. На примере свиноводческого комплекса ООО «Согласие» в секции для поросят отъемышей устанавливается следующий распорядок (Таблица 1.6):

Таблица 1.9 – Суточная активность животных

| № | Время       | Действие                                         |
|---|-------------|--------------------------------------------------|
| 1 | 6.30-8.00   | Кормление, уборка помещений (1,5 часа на секцию) |
| 2 | 8.00-13.30  | Животные малоактивны (лежание)                   |
| 3 | 13.30-15.00 | Животные активны, движение, кормление            |
| 4 | 15.00-20.00 | Животные малоактивны (лежание)                   |
| 5 | 20.00-21.00 | Животные активны, движение, кормление            |
| 6 | 21.00-6.00  | Животные малоактивны (лежание, сон)              |

Из данной таблицы получен график суточной активности животных (Рисунок 1.17).

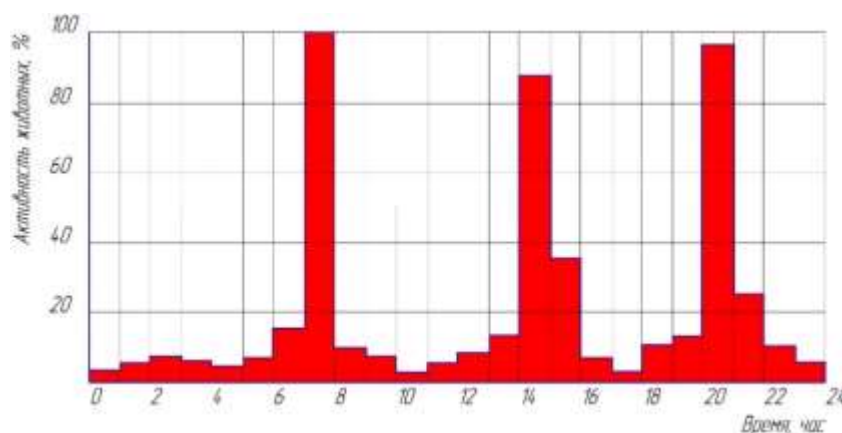


Рисунок 1.17 – Активность животных в течении суток

Из графика, представленного на рисунке 1.9 видно, что поведение животных в течении суток меняется: активность составляет около 20 % суточного времени (движение по секции, кормление, поение), остальные 80 % времени суток животные не активны или малоактивны. Очевидно, что в периоды активности животных текущая концентрация вредностей в воздушной среде

животноводческого помещений будет резко возрастать по сравнению периодами малой активности (не активности), в связи с ростом генерации вышеуказанных вредностей. Система автоматизированного регулирования параметров воздушной среды отслеживает данные изменения вредностей в режиме реального времени с помощью датчиков состояния воздушной среды и управляет исполнительными устройствами такими как рециркуляционный вентилятор, регулируя кратность рециркуляции. В зависимости производительности вентилятора будет меняться и энергопотребление.

Одним из возможных вариантов решения может быть применение системы управления процессом очистки рециркуляционного воздуха на основе автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). Данная система должна поддерживать оптимальные значения концентрации пыли и вредных газов не превышающие предельно допустимые концентрации (ПДК).

Оптимальными называются значения концентрации пыли и вредных газов, при длительном и систематическом воздействии которых, у содержащихся в помещении животных не возникает отклонений в состоянии здоровья и не изменяются показатели продуктивности [30]. Предельно допустимые концентрации – это концентрации пыли и вредных газов в окружающей среде помещения, которые при повседневном влиянии в течении длительного времени на организм животного не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений дискомфорта, ухудшению самочувствия и понижению продуктивности [86-89]. Таким образом, поддерживая концентрацию пыли и вредных газов в пределах оптимальных значений, будем создавать условия для нормальной жизнедеятельности животных без снижения производственных показателей (среднесуточный прирост живой массы одной головы на откорме; выход продукции выращивания живой массы) в сочетании с повышением энергоэффективности предприятия за счет снижения энергопотребления системой

очистки рециркуляционного воздуха. Повышение энергоэффективности указанных систем, за счет снижения энергопотребления возможно за счет внедрения элементов автоматизации в систему управления микроклиматом.

### **1.7 Обзор существующих систем регулирования микроклимата в животноводстве**

В связи с созданием в перспективе полностью автоматизированных сельскохозяйственных предприятий (ферм, теплиц и т.п.) в большей мере должно быть уделено внимание созданию оптимальных систем электротеплообеспечения производственных объектов на базе автоматизированных систем управления электротепловыми процессами (АСУ ЭТП) с использованием унифицированных систем автоматического регулирования, микропроцессорной и компьютерной техники [90]. Повышение энергоэффективности вентиляционных систем свиноводческого помещения возможно не только за счет использования частичной рециркуляции воздуха, но и за счет внедрения систем, функционирующих на основе автоматических систем управления. Проведен обзор существующих отечественных и импортных систем регулирования параметров воздушной среды в животноводческих помещениях, анализ показал, что такие системы дороги или обладают недостаточным функционалом.

Цель АСУ - обеспечение оптимального технологического процесса, т.е. при котором обеспечивается максимальная эффективность эксплуатации животных. Система автоматизации позволяет вести учет и анализ текущей работы вентиляционного оборудования, своевременную фиксацию опасных отклонений, предотвращать нарушение технологического процесса. Точность регулировки управления автоматизированной системой зависит от вида животных в помещении где установлена вентиляционная система, экономической и технической целесообразности, поддерживаемых параметров микроклимата [8].

Основой АСУ является контроллер микроклимата, который обеспечивает контроль и управление состоянием среды в животноводческих помещениях в

режиме реального времени. В рабочем режиме контроллер получает данные о состоянии среды в животноводческом помещении с помощью различных датчиков и управляет исполнительными механизмами в соответствии с написанной программой, поддерживая заданные параметры микроклимата [91, 92].

В настоящее время широкое распространение получили существующие системы контроля микроклимата в животноводческих помещениях, анализ которых приведён ниже.

Автоматизированная система контроля и управления микроклиматом АСУ «Климат», [93-95] предназначена для контроля и управления исполнительными механизмами, обеспечивающими поддержание климатических параметров воздушной среды животноводческого помещения в заданных пределах в ручном, автоматическом и аварийном режимах, в соответствии с технологией выращивания и содержания животных. АСУ позволяет накапливать и организовывать беспроводную (и проводную) передачу информационно-аналитического материала на диспетчерский компьютер для оценки эффективности работы оборудования и применяемых технологий.

АСУ обеспечивает контроль: температуры внутри помещения по зонам и на улице; влажности внутри помещения по зонам и на улице; воздухообмена; разрежения воздуха; энергоснабжения (контроль вводных фаз); исполнительных элементов; освещения; мощности и потребления электроэнергии (по каждой группе исполнительных элементов); потребления воды.

АСУ обеспечивает управление: боковыми вытяжными вентиляторами; частотными преобразователями; приточными клапанами воздушных шахт; разгонными вентиляторами; туннельными вентиляторами и жалюзи; теплогенераторами по зонам регулирования; увлажнителями; охладителями; сервоприводами приточных форточек и сервоприводами вытяжных каминов; резервным питанием для аварийного открытия/закрытия приточных клапанов и сервоприводов.

В автоматическом режиме работы АСУ обеспечивает: поддержание температуры, влажности, минимального (номинального) воздухообмена по графикам выращивания животных, управление воздухообменом от номинального до туннельного; управление увлажнением; управление охлаждением, управление нагревом (калориферами, теплогенераторами или другими нагревательными приборами с автономным управлением); управление клапанами приточных шахт с индивидуальным приводом; управление двумя бесступенчатыми сервоприводами форточек; управление двумя бесступенчатыми сервоприводами штор, гардин или ставень системы туннельного вентилирования или охлаждения; включение сигнализации при нарушении режима или сбоях в работе оборудования; управление освещением по заданному расписанию; управление кормлением по заданному расписанию.

В ручном режиме АСУ обеспечивает управление группами вентиляторов, теплогенераторами, охладителями, увлажнителями, сервоприводами клапанов и форточек.

Автоматизированная система микроклимата Big-Dutchman 307pro [96] предназначена для регулирования параметров микроклимата животноводческих помещений, которая снабжена датчиками для отслеживания параметров температуры, влажности воздуха,  $\text{CO}_2$  или  $\text{NH}_3$ :

- DOL 114 - датчик для измерения относительной влажности воздуха в корпусе. Он имеет два аналоговых выхода 0-10 В и способен производить замер температурных показателей. Светодиоды двух разных цветов используются для индикации рабочего состояния датчика и диагностики неисправностей.

- DOL 19-датчик, управляемый высокоточным микропроцессором, служит для измерения концентрации в воздухе углекислого газа в диапазоне от 0 ppm до 10 000 ppm ( $\text{ppm}=\text{млн}^{-1}$ ) и позволяет осуществлять минимальную вентиляцию в секции корпуса на основе полученных замеров.

- датчик разрежения DOL 18-датчик вакуумметрического давления для активного измерения давления в животноводческом помещении, преобразующий

измеренное давление в сигнал напряжения 0-10 В. Питание датчика, как правило, осуществляется от компьютера микроклимата в диапазоне 15-30 В постоянного тока.

- DOL 53 - датчик, служащий для непрерывного измерения и мониторинга концентрации аммиака в воздухе животноводческого помещения. Имеет диапазон измерения аммиака от 0 до 100 ppm.

Так же были рассмотрены и другие АСУ таких фирм как SKOV (Дания), модели DOL 234 F и DOL 534; Big Dutchman (Германия), модели Viper и Viper Touch; DeLaval (Швеция), модели DF1300, FL250F. Анализ их технических характеристик показал все они имеют общие функциональные характеристики: управление освещением; измерение температуры в помещении; управление отоплением; управление приточно-вытяжными вентиляторами; управление системами охлаждения и увлажнения; регулирование минимальной вентиляции в зависимости от уровня содержания CO<sub>2</sub> и или NH<sub>3</sub> в воздухе; определение скорости движения воздуха; управление по разрежению, т. е. регулирование подачи воздуха в зависимости от показаний датчиков, измеряющих атмосферное давление снаружи и внутри помещения.

Как видно из описания приведённых систем контроля параметров микроклимата животноводческих помещений в их функционал входит лишь контроль температуры, влажности и концентрации аммиака, однако, контроль за пылесодержанием воздуха и концентрацией сероводорода приведённые системы не обеспечивают, что приводит к постановке задачи по созданию универсальной системы контроля параметров микроклимата животноводческих помещений, позволяющей вести мониторинг основных характеристик воздушной среды производственных помещений животноводческих комплексов и в режиме текущего времени (on-line) производить корректировку технологических параметров системы очистки рециркуляционного воздуха, с одной стороны, с целью поддержания вредодействующих компонентов воздушной среды на оптимальном уровне, но ниже значений ПДК и, с другой стороны, позволяющей

минимизировать энергопотребление оборудованием вентиляционных систем, приводящее в целом к повышению энергоэффективности и продуктивности животноводческого предприятия.

Существующие системы поддержания климатических условий в помещении многофункциональны, но дороги, либо обладают недостаточным функционалом. В связи с этим существует потребность в создании узконаправленной системы поддержания климатических условий в помещении. В большинстве таких систем параметрами оптимальных условий является влажность и температура. Температура воздуха измеряется обычным цифровым термометром, а для измерения влажности воздуха требуется изготовление психометрического гигрометра. Поскольку система управления климатическими условиями должна быть автоматизированной её необходимо создавать на основании микроконтроллера и электронных термодатчиков [97-99]. Внедрение такой системы позволит отслеживать изменения воздушной среды животноводческих помещений (изменение концентрации пыли и вредных газов), своевременно управлять работой вентиляционного оборудования животноводческого помещения, что в совокупности приведет к снижению энергопотребления системой вентиляции, что повлечет повышение энергоэффективности производства животноводческой продукции, улучшение условий содержания животных и повышению производственной культуры.

### **1.8 Задачи исследования**

1. Провести анализ состояния воздушной среды станка для содержания поросят на откорме свинарника-откормочника, проанализировать механизмы распределения пыли в станке, проанализировать существующие системы очистки воздуха.

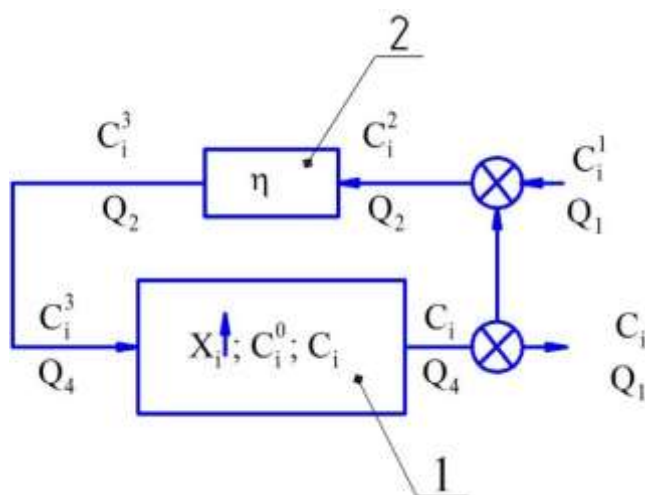
2. Разработать регрессионную модель распределения концентрации пыли в станке для содержания поросят на откорме свинарника-откормочника.

3. Разработать ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме на основе МЭФ.
4. Оптимизировать параметры МЭФ, разработанного для ЛСОВС.
5. Произвести лабораторные и производственные испытания ЛСОВС на основе МЭФ.
6. Произвести технико-экономический расчет эффективности ЛСОВС на основе МЭФ станка для содержания поросят на откорме.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ СТРАНКА

### 2.1 Теоретическое обоснование процесса отслеживания концентрации вредных веществ

В предыдущих исследованиях [44] рассматривался анализ систем рециркуляции вентиляционного воздуха, предусматривающий режим работы системы без учета коэффициента рециркуляции воздуха  $\alpha$  и не предусматривающий очистку приточного воздуха от вредодействующих компонентов. Однако коэффициент рециркуляции  $\alpha$  отвечает за обогащение воздушной смеси кислородом, таким образом предлагается усовершенствованная схема системы очистки воздуха в замкнутом объеме (Рисунок 2.1).



1 - замкнутый объем (помещение, станок и т.п.); 2 - фильтр

Рисунок 2.1 - Структурная схема системы очистки воздуха в замкнутом объеме

В блок-схеме приняты следующие обозначения:  $V$  - объем (помещение, камера и т.п.);  $X_i$  - удельное выделение  $i$ -ой вредно действующей компоненты в воздушную среду замкнутого объема;  $Q_1$  - количество воздуха, поступающего в систему снаружи и удаляемого наружу;  $Q_4$  - количество воздуха, поступающего в замкнутый объем и удаляемого из замкнутого объема;  $C_i^0$ ,  $C_i$  - соответственно

начальная и текущая концентрация  $i$ -ой вредно действующей компоненты воздушной среды замкнутого объема;  $C_i^1$ ,  $C_i^2$ ,  $C_i^3$  - концентрация  $i$ -ой вредно действующей компоненты соответственно в наружном, поступающем в фильтр и удаляемом из фильтра воздухе;  $\eta$  - эффективность очистки воздуха от  $i$ -ой вредно действующей компоненты воздушной среды в рециркуляционном фильтре.

$$C_i^2 = \frac{C_i^1 + C_i}{2}. \quad (2.1)$$

Пусть в воздушной среде замкнутого объема находится  $n$  - компонент различных вредно действующих веществ (углекислота, аммиак, сероводород, органическая и неорганическая пыль, микроорганизмы - грибы, бактерии, вирусы; тиолы (меркаптаны) и т.п.). Требуется определить зависимость текущей концентрации  $i$ -ой вредно действующей компоненты в замкнутом объеме от времени, режимных параметров системы:

$$C_i = f(\eta_i; N_1; N; \dots; N_a; t). \quad (2.2)$$

где  $N_1, N, \dots, N_a$  - режимные параметры системы;

$t$  - время.

При решении данной задачи приняты следующие допущения:

1)  $i$ -я вредно действующая компонента, генерируемая в воздушную среду, мгновенно и равномерно перемешивается воздухом и ее концентрация одинакова во всем объеме помещения;

2) эффективность фильтрации постоянна и не зависит от концентрации  $i$ -ой вредно действующей компоненты на входе электрофильтра;

3) удельное выделение  $i$ -ой вредно действующей компоненты внутри помещения постоянно и не зависит от ее концентрации в воздушной среде помещения;

4) изменение концентрации  $i$ -ой вредно действующей компоненты в воздушной среде помещения за счет естественных процессов несущественно.

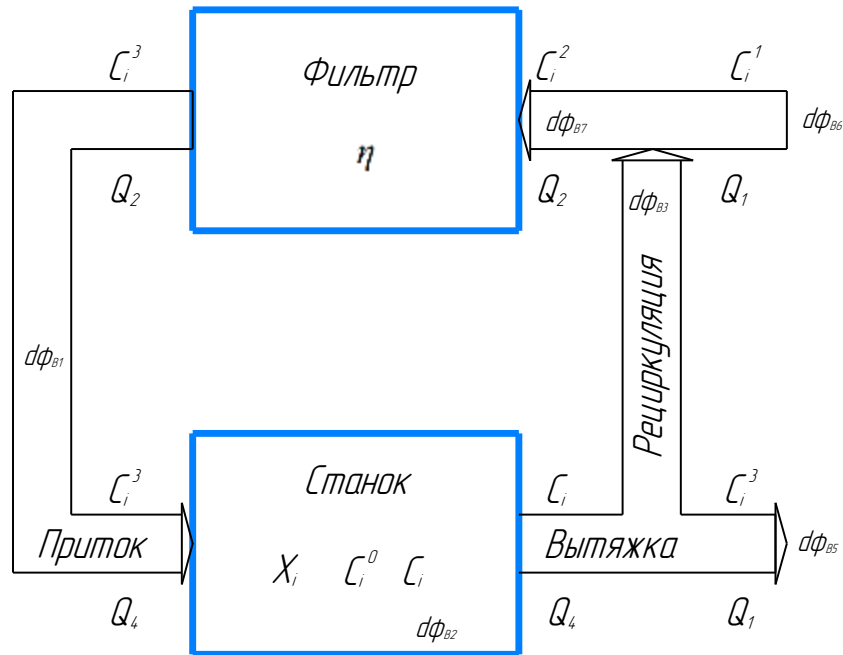


Рисунок 2.2 - Структурная схема системы очистки воздуха в замкнутом объеме

Для определения зависимости (2.2) воспользуемся приведенной схемой (Рисунок 2.2). Уравнение материального баланса для  $i$ -ой вредно действующей компоненты в воздушной среде помещения для интервала времени в  $t, t + dt$ , имеет следующий вид:

$$d\varphi_B = d\varphi_{B1} + d\varphi_{B2} - d\varphi_{B3}. \quad (2.3)$$

где  $d\varphi_B$  - изменение количества  $i$ -ой вредно действующей компоненты в воздушной среде помещения;

$d\varphi_{B1}$ ,  $d\varphi_{B2}$ ,  $d\varphi_{B3}$  - соответственно, количество  $i$ -ой вредно действующей компоненты, поступающее в помещение после фильтра; выделяемое внутри помещения; удаляемое из помещения с вытяжным воздухом.

Часть удаляемого воздуха может поступать на рециркуляцию, проходить через рециркуляционный фильтр, перемешиваться с приточным наружным воздухом и после очистки вновь поступать в помещение.

Поэтому в общем случае

$$d\varphi_{B1} = d\varphi_{B7}(1 - \eta) = (d\varphi_{B6} + d\varphi_{B3} - d\varphi_{B5})(1 - \eta). \quad (2.4)$$

где  $d\varphi_{в1}$  - количество  $i$ -й вредно действующей компоненты, поступающее в помещение;

$d\varphi_{в4}$  - количество  $i$ -й вредно действующей компоненты, выходящее из помещения;

$d\varphi_{в5}$  - количество  $i$ -й вредно действующей компоненты, выбрасываемое наружу;

$d\varphi_{в7}$  - количество  $i$ -й вредно действующей компоненты, поступающее из помещения и снаружи;

$d\varphi_{в6}$  - количество  $i$ -й вредно действующей компоненты, поступающее снаружи;

$d\varphi_{в3}$  - количество  $i$ -й вредно действующей компоненты, выходящее из помещения.

С учетом (2.4) дифференциальное уравнение (2.2) можно записать в виде:

$$d\varphi_{\epsilon} = [d\varphi_{\epsilon6} + d\varphi_{\epsilon3} - d\varphi_{\epsilon5}](1 - \eta) + d\varphi_{\epsilon2} - d\varphi_{\epsilon3}. \quad (2.5)$$

Необходимо отметить, что рециркуляция вентиляционного воздуха может осуществляться в двух режимах. Под первым режимом мы подразумеваем рециркуляцию воздуха в обычном понимании этого процесса, а именно: режим, при котором к свежему воздуху  $Q_1$  непрерывно подмешивается часть воздуха помещения  $Q_5$ , и из приточных отверстий вентиляционной системы в помещение поступать воздушная смесь  $Q_2 = Q_1 + Q_5$ . При этом обеспечивается условие  $Q_2 = \text{const}$ . Режим рециркуляции в данном случае характеризуется коэффициентом рециркуляции  $\alpha$  [80]:

$$\alpha = \frac{Q_5}{Q_5 + Q_1} = \frac{Q_5}{Q_2}; \quad (2.6)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (2.7)$$

Под вторым режимом понимается такой режим внутренней рециркуляции, при котором к свежему воздуху непрерывно подмешивается воздух из помещения, причем количество подмешиваемого воздуха может изменяться в широких

пределах. Поэтому  $Q_2 = Q_1 + Q_5 = \text{Var}$  и данное варьирование может осуществляться в широких пределах за счет изменения  $Q_5$ . Этот режим характеризуется коэффициентом кратности внутренней рециркуляции воздуха  $N_1$ , который определяется из соотношения

$$N = \frac{Q_1}{V}; \quad (2.8)$$

$$0 \leq N_1 \leq \infty.$$

В общем случае система очистки воздуха может работать одновременно в режиме обычной и внутренней рециркуляции. При данном режиме  $N_1 > N_\alpha$ .

При работе системы одновременно в режиме обычной и внутренней рециркуляции ( $0 < \alpha < 1$ ;  $N_1 > N_\alpha$ ) для составляющих  $d\varphi_B$ ;  $d\varphi_{B5}$ ;  $d\varphi_{B2}$ ;  $d\varphi_{B3}$  и  $d\varphi_{B6}$  можно записать:

$$\left. \begin{aligned} d\varphi_B &= VdC_i \\ d\varphi_{B6} &= C_i^1 VN(1 - \alpha)dt \\ d\varphi_{B2} &= X_i Vdt \\ d\varphi_{B5} &= C_i VN(1 - \alpha)dt \\ d\varphi_{B3} &= C_i VNdt \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Подставив (2.9) в (2.5), получим исходное дифференциальное уравнение материального баланса для  $i$ -ой вредно действующей компоненты:

$$VdC_i = \left( (C_i^1 VN(1 - \alpha)dt) + (C_i VNdt) - (C_i VN(1 - \alpha)dt) \right) (1 - \eta) + (X_i Vdt) - (C_i VNdt), \quad (2.10)$$

Разделив обе части уравнения (2.11) на  $Vdt$ , получим

$$\begin{aligned} \frac{dC_i}{dt} &= \left( C_i^1 N(1 - \alpha) + C_i N - C_i N(1 - \alpha) \right) (1 - \eta) + X_i - C_i N; \\ \frac{dC_i}{dt} &= C_i^1 N(1 - \alpha)(1 - \eta) + C_i N(1 - \eta) - C_i N(1 - \alpha)(1 - \eta) + X_i - C_i N; \\ \frac{dC_i}{dt} &= C_i^1 N(1 - \alpha)(1 - \eta) + X_i + C_i (N(1 - \eta) - N(1 - \alpha)(1 - \eta) - N). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Обозначим:

$$A = C_i^1 N(1 - \alpha)(1 - \eta) + X_i ;$$

$$B = (N(1 - \eta) - N(1 - \alpha)(1 - \eta) - N).$$

и получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dC_i}{dt} = A + C_i \cdot B; \quad (2.12)$$

$$dC_i = (A + C_i \cdot B)dt.$$

Сгруппируем переменную  $C_i$  в левую часть уравнения, а переменную  $t$  – в правую:

$$\frac{dC_i}{C_i \cdot B + A} = dt. \quad (2.13)$$

Интегрируем обе части уравнения:

$$\int \frac{dC_i}{C_i \cdot B + A} = \int dt.$$

$$\text{Левую часть} - \int \frac{dx}{kx + b} = \frac{1}{k} \ln|kx + b| + c;$$

$$\text{Правую часть} - \int dt = t + c.$$

Получим общее решение дифференциального уравнения:

$$\frac{1}{B} \ln(C_i \cdot B + A) = t + c. \quad (2.14)$$

Общее решение при начальных условиях  $t=0$  и  $C_i = C_0$ :

$$\frac{1}{B} \ln(C_0 \cdot B + A) = 0 + c.$$

Выразим  $c$ :

$$\frac{1}{B} \ln(C_0 \cdot B + A) = c.$$

Подставим полученное выражение в (2.14):

$$\frac{1}{B} \ln(C_i \cdot B + A) = t + \frac{1}{B} \ln(C_0 \cdot B + A). \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{B} \ln(C_i \cdot B + A) - \frac{1}{B} \ln(C_0 \cdot B + A) = t.$$

Сгруппируем логарифмы в левую часть:

$$\frac{1}{B} [\ln(C_i \cdot B + A) - \ln(C_0 \cdot B + A)] = t.$$

Используя свойства логарифма  $\log_a x - \log_a y = \log_a \frac{x}{y}$ , преобразуем левую часть уравнения:

$$\frac{1}{B} \ln \left( \frac{C_i B + A}{C_0 B + A} \right) = t \cdot B;$$

$$\ln \left( \frac{C_i B + A}{C_0 B + A} \right) = tB.$$

Найдем  $C_i$ :

$$e^{Bt} = \frac{C_i B + A}{C_0 B + A} \cdot (C_0 B + A);$$

$$e^{Bt} (C_0 B + A) = C_i B + A;$$

$$e^{Bt} (C_0 B + A) - A = C_i B;$$

$$C_i = \frac{e^{Bt} (C_0 B + A) - A}{B};$$

$$C_i = \frac{e^{Bt} C_0 B + e^{Bt} A - A}{B}.$$

Получим:

$$C_i = e^{Bt} C_0 + e^{Bt} \frac{A}{B} - \frac{A}{B}. \quad (2.16)$$

Подставив  $A$  и  $B$  в уравнение (2.16) получим:

$$C_i = e^{((N(1-\eta) - N(1-\alpha)(1-\eta) - N))t} C_0 + \\ + e^{((N(1-\eta) - N(1-\alpha)(1-\eta) - N))t} \frac{C_i^1 N(1-\alpha)(1-\eta) + X_i}{(N(1-\eta) - N(1-\alpha)(1-\eta) - N)} - \frac{C_i^1 N(1-\alpha)(1-\eta) + X_i}{(N(1-\eta) - N(1-\alpha)(1-\eta) - N)}. \quad (2.17)$$

Уравнение (2.17) позволяет определить значение текущей концентрации  $i$ -ой вреднодействующих компоненты в замкнутом объёме помещения от времени, в зависимости от кратности воздухообмена  $N$ , коэффициента рециркуляции  $a$ , эффективности очистки МЭФ от  $i$ -ой вреднодействующей компоненты  $\eta$ , генерации  $i$ -ой вреднодействующей компоненты внутри помещения и от концентрации  $i$ -ой вреднодействующей компоненты в приточном воздухе. Уравнение (2.17) не учитывает расстояние до источника генерации вредности. Для уточнения модели необходимо провести ряд лабораторных исследований, для того чтобы понять, как расстояние до источника генерации пыли влияет на значение текущей концентрации пыли.

## 2.2 Моделирование локальной системы очистки воздушной среды станка

Моделирование рассмотрено на примере свинарника-откормочника. На фермах и в специализированных свиноводческих комплексах для содержания свиней, находящихся на откорме, строят специальные свинарники-откормочники и оборудуют их групповыми станками. Вместимость одного станка 25—30 голов. Фронт кормления на одно животное должен составлять не менее 30—32 см. Однако практика показала, что при содержании в станке 12—15 свиней они меньше беспокоят друг друга и имеют лучшие условия для отдыха, что способствует их лучшей сохранности и повышению привесов. Кроме того, уменьшается число больных и вынужденно убитых животных. Межстанковые перегородки в зоне логова делают сплошными, а над решетчатой частью пола с просветом 10—12 см. высота ограждений 1.1 м. В широкогабаритных свинарниках-откормочниках станки располагают в 4 ряда. Для откормочного молодняка площадь логова в станке на одну голову 0.5 м<sup>2</sup>, а для взрослых животных 0.7—0.8 м<sup>2</sup>. Ширина и глубина станка 3.5 м. Фронт кормления 30 см.

Температуру в помещении для откорма животных поддерживают в соответствии с возрастом свиней. В откормочниках нельзя допускать резких колебаний температуры в течение суток, так как к большим колебаниям температуры свиньи приспосабливаются только при потреблении добавочного корма. При низкой температуре в помещении организм свиньи долго не может адаптироваться, и привесы животных снижаются. При температуре ниже 10 °С потребление корма на 1 кг прироста увеличивается на 20—30%. В свинарниках-откормочниках на 1 ц живой массы должен быть предусмотрен воздухообмен: зимой 35—45 м<sup>3</sup> ч. летом до 60 м<sup>3</sup> ч. Поэтому летом со значительным количеством животных в помещении и при недостаточном воздухообмене температура воздуха в помещении повышается до 28—30° С. что неблагоприятно отражается на самочувствии животных — нарушается теплоотдача, возникают болезни органов дыхания, пищеварения и в результате происходит задержка роста и развития

животных. Для улучшения теплоотдачи увеличивают в помещении воздухообмен. Для этого открывают окна, двери, повышают работу принудительной вентиляции и увеличивают скорость движения воздуха до 1 м/с и более [100,101].

В крупных свинарниках-откормочниках для облегчения удаления навоза в кормонавозном проходе над бетонными навозными каналами накладывают чугунные или железобетонные решетчатые панели. Щелевой пол располагают вдоль кормушек непрерывной полосой, но возле кормушек оставляют полосу сплошного пола шириной 30—15 см. Решетчатые панели укладывают так чтобы щели и планки располагались параллельно кормушкам. При такой укладке уменьшаются загрязненность станков и травмирование конечностей животных.

Таблица 2.1 - Нормы площадей и размеры технологических элементов помещений основного назначения принимают по таблице [102,103,104]

| Элементы помещений |                                                  | Предельное поголовье на один элемент помещения, гол. | Норма станковой площади на 1 голову, м <sup>2</sup> |                       | Ширина (глубина) элементов помещения, м |                       |        |
|--------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|-----------------------|--------|
| Название           | Назначение (по группам животным)                 |                                                      | Товарные предприятия                                | Племенные предприятия | Товарные предприятия                    | Племенные предприятия |        |
| Групповые станки   | Для поросят-отъемышей                            |                                                      |                                                     |                       |                                         |                       |        |
|                    | на сплошном полу                                 |                                                      | 25                                                  | 0,35                  | 0,4                                     | до 2,5                | до 3,5 |
|                    | на щелевом полу                                  |                                                      | 30                                                  | 0,3                   | 0,3                                     | до 2,5                | до 3,5 |
|                    | Для ремонтного молодняка:                        |                                                      |                                                     |                       |                                         |                       |        |
|                    | на сплошном полу                                 |                                                      | 10                                                  | 0,8                   | 1,0                                     | до 3,5                | до 3,5 |
|                    | на щелевом полу                                  |                                                      | 15                                                  | 0,75                  |                                         |                       |        |
|                    | Для откормочного молодняка:                      |                                                      |                                                     |                       |                                         |                       |        |
|                    | на сплошном полу                                 |                                                      | 30                                                  | 0,8                   |                                         | до 3,5                |        |
|                    | на щелевом полу                                  |                                                      | 30                                                  | 0,65                  |                                         | до 3,5                |        |
|                    | Для выбракованных свиноматок и хряков на откорме |                                                      | 20                                                  | 1,2                   |                                         | до 3,5                |        |

После окончания срока откорма свиначники освобождают от животных, проводят механическую очистку и дезинфекцию помещения и кормушек. На 5—7 дней помещение оставляют свободным от животных, чтобы за это время как можно лучше произвести обеззараживание поверхностей ограждающих конструкций и воздуха. По истечении этого срока в помещении создают надлежащий микроклимат, чтобы не было резких отличий в условиях содержания, и начинают перевод молодняка из цеха дорастивания.

Весь сектор, подготовленный к приему новой партии, заполняют свиньями в течение одного дня. Более мелких животных выделяют в отдельные станки и первые 2—3 дня подкармливают сухими комбикормами с добавлением сухого молока, рыбьего жира и антибиотиков.

Таблица 2.2– Параметры микроклимата для свиней на откорме [103]

| Параметр                                                          | Значение |
|-------------------------------------------------------------------|----------|
| Температура воздуха, °С                                           | 14-20    |
| Скорость движения воздуха, м/с                                    | 0,3      |
| Относительная влажность воздуха, %                                | 40-70    |
| Предельно допустимая концентрация углекислого газа, %             | 0,2      |
| Предельно допустимая концентрация аммиака, мг/м <sup>3</sup>      | 20       |
| Предельно допустимая концентрация сероводорода, мг/м <sup>3</sup> | 10       |
| Световой коэффициент                                              | 1:20     |
| Коэффициент естественной освещенности, %                          | 0,35     |
| Искусственная освещенность, лк                                    | 20-50    |
| Предельно допустимая концентрация пыли, мг/м <sup>3</sup>         | 6        |
| Микробная загрязненность, тыс./м <sup>3</sup>                     | До 150   |
| Интенсивность воздухообмена, м <sup>3</sup> /ч/ц                  | 35       |

Мощность выделения загрязняющих веществ от мест содержания животных складывается из мощностей выделений от каждой группы животных одного вида, объединенных общим технологическим процессом (содержание, выращивание или откорм) при одинаковом рационе кормления и ежедневном удалении навоза, и рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{общ}}^i = Q_{\text{вент}}^i + Q_{\text{навоз}}^i . \quad (2.18)$$

Мощность выделения загрязняющих веществ от мест содержания животных рассчитывается по формуле:

Мощность выделения ( $Q_n^i$ )  $i$ -го вещества рассчитывается по формуле, г/с:

$$Q_n^i = Y_n^i \times M \times q. \quad (2.19)$$

Или т/год

$$Q_n^i = K \times Y_n^i \times M \times q. \quad (2.20)$$

где  $i$  - условное обозначение загрязняющего вещества. Для микроорганизмов в формулах устанавливается размерность кл./с и  $\cdot 10^6$  кл./год соответственно;  
 $n$  - условное обозначение группы животных одного вида, объединенных общим технологическим процессом;

$K$  - коэффициент перехода от размерности (г/с) к (т/год), в формуле (2.20),

$K = 31,5$ ;

$Y_n^i$  - величины удельного выделения  $i$ -го загрязняющего вещества, установленная для животных определенного вида, участвующих в общем технологическом процессе. Следует выбирать величину удельного выделения с учетом периодичности удаления навоза из помещения для содержания животных;

$M$  - количество животных, участвующих в общем технологическом процессе;

$q$  - средняя масса в центнерах одного животного из группы животных, участвующих в общем технологическом процессе. Произведение  $M \times q$  может быть заменено на массу всех животных, участвующих в одном технологическом процессе [104-109].

Максимально разовое (г/с) выделение рассчитывается аналогично, но в этом случае все расчетные данные выбираются с максимальными значениями. Рассмотрим параметры воздушной среды на примере типового свиного комплекса, секции цеха воспроизводства, в которой находится 250 голов поросят (30-35 голов в одном станке). При норме 0,4 м<sup>2</sup>/голову (Таблица 2.3). Средняя масса при поступлении в секцию поросят-отъемышей 20-23 кг. Время пребывания в секции 53 дня. Масса при отправке 51- 55 кг из секции. Размеры секции: высота 4 м, ширина 22 м, длина 12 м. Таким образом объём помещения равен 1080 м

кубических, при площади 264 м<sup>2</sup>. По зоогигиеническим требованиям интенсивность воздухообмена составляет 35 м<sup>3</sup>/ч/ц. (таблица 2.3) Таким образом необходимый воздухообмен составляет 3850 м<sup>3</sup> в день поступления в секцию и 9625 м<sup>3</sup> выхода из секции.

Таблица 2.3 – Величины удельных выделений загрязняющих веществ непосредственно от животных ( $\cdot 10^{-6}$  г/с·1 центнер живой массы (ц ж.м.), кроме микроорганизмов), установленные для различных этапов технологического процесса воспроизводства, содержания, выращивания и откорма свиней на свиноводческих комплексах мощностью 24, 36 и 54 тыс. свиней в год при ежедневной чистке и удалении навоза из помещений для содержания скота

| Наименование загрязняющего вещества   | Период | Источники выделений загрязняющих веществ, для которых установлены величины удельных выделений |                                         |                                      |                    |        |        |                                            |
|---------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------------------------------------------|
|                                       |        | Содержание супоросных маток (маточник)                                                        | Содержание подсосных маток с поросятами | Дорашивание поросят-отъемшей (отъем) | Ремонтный молодняк | Откорм | Логово | Логово с пунктом искусственного осеменения |
| Микроорганизмы (клеток/с на 1 ц ж.м.) | Т      | 72                                                                                            | 68                                      | 72                                   | 64                 | 76     | 56     | 68                                         |
|                                       | П      | 60                                                                                            | 52                                      | 52                                   | 48                 | 60     | 60     | 56                                         |
|                                       | Х      | 64                                                                                            | 60                                      | 64                                   | 60                 | 68     | 64     | 60                                         |
| Аммиак                                | Т      | 7,5                                                                                           | 19                                      | 41                                   | 18,5               | 24     | 9      | 12,0                                       |
|                                       | П      | 8,0                                                                                           | 20                                      | 43                                   | 19,5               | 25     | 9,5    | 12,5                                       |
|                                       | Х      | 8,5                                                                                           | 21                                      | 45                                   | 20,5               | 26     | 10     | 13,0                                       |
| Сероводород                           | Т      | 1,7                                                                                           | 4,2                                     | 9,2                                  | 4,2                | 5,4    | 2,0    | 2,7                                        |
|                                       | П      | 1,8                                                                                           | 4,5                                     | 9,7                                  | 4,4                | 5,6    | 2,1    | 2,8                                        |
|                                       | Х      | 1,9                                                                                           | 4,7                                     | 10,1                                 | 4,6                | 5,8    | 2,2    | 2,9                                        |
| Меркаптаны                            | Т      | 0,08                                                                                          | 0,21                                    | 0,46                                 | 0,21               | 0,27   | 0,09   | 0,13                                       |
|                                       | П      | 0,09                                                                                          | 0,22                                    | 0,48                                 | 0,22               | 0,28   | 0,10   | 0,14                                       |
|                                       | Х      | 0,10                                                                                          | 0,23                                    | 0,50                                 | 0,23               | 0,29   | 0,11   | 0,15                                       |
| Пыль меховая                          |        | 150                                                                                           | 160                                     | 150                                  | 140                | 140    | 145    | 150                                        |

Таким образом необходимо обеспечить кратность воздухообмена  $N$  не менее 3,8. Определим количество  $i$  вредности в помещении используя формулу (2.18). В системе ЛСОВС предполагается использование МЭФ. Для электрофильтров допустимо повышение скорости воздушного потока через электрофильтр до 3 м/с

без потери эффективности очистки  $\eta$ . Таким образом возможна эффективная работа системы с кратностью воздухообмена  $N=5$ .

От животных в переходный период:

$$Q_{\text{вент}}^{NH_3} = 43 \times 10^{-6} \times 250 \times 0,2 \times 3600 = 7,74 \text{ г/ч};$$

$$Q_{\text{вент}}^{H_2S} = 9,7 \times 10^{-6} \times 250 \times 0,2 \times 3600 = 1,75 \text{ г/ч};$$

$$Q_{\text{вент}}^{\text{Пыль}} = 56 \times 10^{-6} \times 250 \times 0,2 \times 3600 = 10,1 \text{ г/ч}.$$

От навозоуборочного канала в переходный период:

$$Q_{\text{навоз}}^{NH_3} = 53 \times 10^{-6} \times 250 \times 0,2 \times 3600 = 9,54 \text{ г/ч};$$

$$Q_{\text{навоз}}^{H_2S} = 21,8 \times 10^{-6} \times 250 \times 0,2 \times 3600 = 3,9 \text{ г/ч}.$$

Таким образом получим:

$$Q_{\text{общ}}^{NH_3} = 7,74 + 9,54 = 17,3 \text{ г/ч};$$

$$Q_{\text{общ}}^{H_2S} = 1,75 + 3,9 = 5,56 \text{ г/ч}.$$

Таким образом удельное выделение  $i$ -ой вредно действующей компоненты  $X_i$  в воздушную среду данного помещения объемом  $1080 \text{ м}^3$ , составляет  $X_i = \frac{Q}{V}$  по аммиаку  $16 \text{ мг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$ ; по сероводороду  $5,2 \text{ мг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$ ; по пыли  $9,4 \text{ мг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$ . Оптимальные и предельно допустимые концентрация пыли и вредных газов приведены в таблице 1.1 [110,112].

Смоделируем зависимость текущей концентрации  $i$ -ой вредно действующей компоненты в замкнутом объеме от режимных параметров системы. Для апробации теоретической модели поддержания концентрации вреднодействующих веществ был смоделирован процесс изменения текущей концентрации  $i$ -ой вредно действующей компоненты для реального животноводческого помещения. Проектирование модели рассмотрено на примере секции свиарника-откормочника на 250 голов. Для обоих режимов были рассчитаны необходимые объемы вентиляции и кратности воздухообмена по пыли, по влажности, по углекислому газу, по сероводороду и по аммиаку на основе данных о ПДК,

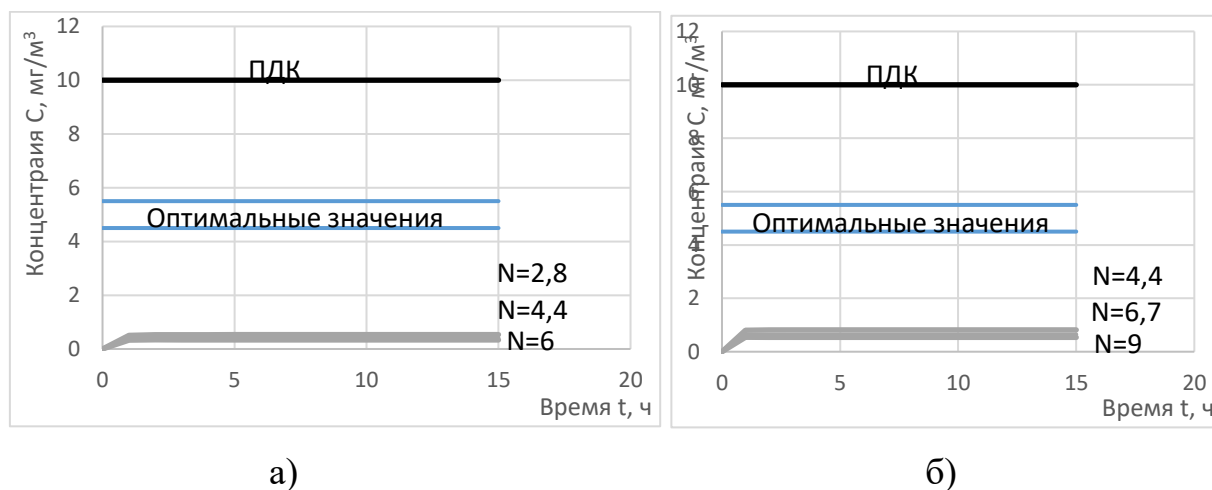
оптимальных значений и удельных выделениях вредодействующих компонентов, приведённых в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Исходные данные для моделирования

| Вредность      | ПДК                             | Оптимальные значения    | Удельное выделение                   |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Пыль           | 6 мг/м <sup>3</sup>             | 5±0,5 мг/м <sup>3</sup> | 9,4...23,5 мг/(ч·м <sup>3</sup> )    |
| Сероводород    | 10 мг/м <sup>3</sup>            | 5±0,5 мг/м <sup>3</sup> | 5,2...13 мг/(ч·м <sup>3</sup> )      |
| Аммиак         | 20 мг/м <sup>3</sup>            | 10±1 мг/м <sup>3</sup>  | 16...40 мг/(ч·м <sup>3</sup> )       |
| Углекислый газ | 2,5 л/м <sup>3</sup> или 0,25 % | -                       | 12500...19400 мг/(ч·м <sup>3</sup> ) |
| Влажность      | 85%                             | 75%                     | 20800...31000 мг/(ч·м <sup>3</sup> ) |

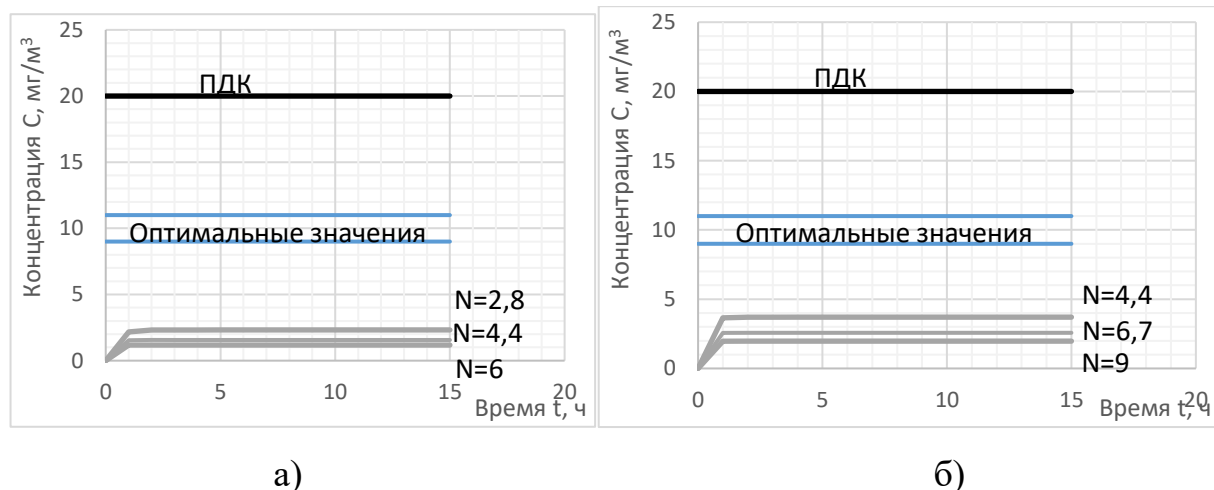
*Сероводород.* Используя выражение (2.17) смоделируем процесс изменения концентрации сероводорода в зависимости от времени при изменении кратности воздухообмена (Рисунок 2.3). Из предыдущих расчетов следует, что удельное выделение сероводорода  $X=13$  мг/(ч·м<sup>3</sup>).

На графике (рисунок 2.3) видно, что при эффективности очистки от сероводорода  $\eta=0,5$  и кратности воздухообмена  $N=3,8$  концентрация по сероводороду находится в пределах оптимальных значений.



а – кратность воздухообмена на момент посадки поросят в секцию; б – кратность воздухообмена на момент высадки поросят из секции  
 $C=f(t)$ ,  $a=\text{const}(0,87)$ ,  $\eta=\text{const}(0,5)$ ,  $N=\text{var.}(2; 3,8; 5)$ ,  $X=13$  мг/(ч·м<sup>3</sup>)  
 Рисунок 2.3 – Динамика изменения концентрации сероводорода

**Аммиак.** Используя выражение (2.17) смоделируем процесс изменения концентрации аммиака в зависимости от времени при изменении кратности воздухообмена (рисунок 2.4). Из предыдущих расчетов следует, что удельное выделение аммиака  $X=40$  мг/(ч·м<sup>3</sup>).



а – кратность воздухообмена на момент посадки поросят в секцию; б - кратность воздухообмена на момент высадки поросят из секции

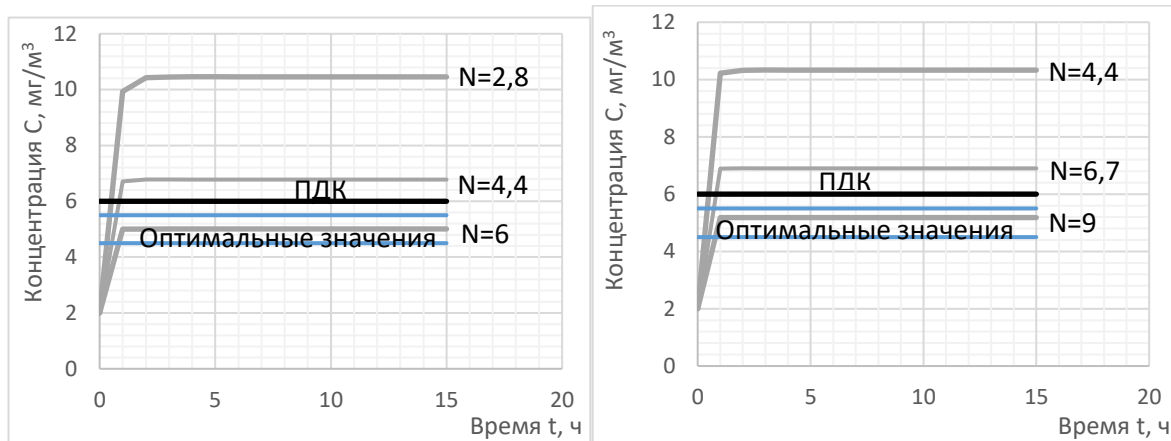
$$C=f(t), a=\text{const}(0,87), \eta=\text{const}(0,84), N=\text{var}(2; 3,8; 5), X=40 \text{ мг}/(\text{ч}\cdot\text{м}^3)$$

Рисунок 2.4 – Динамика изменения концентрации аммиака

На графике (Рисунок 2.4) видно, что при кратности воздухообмена  $N=3,8$  и эффективности очистки  $\eta=0,84$  концентрация аммиака находится в зоне оптимальных значений.

**Пыль.** Используя выражение (2.17) смоделируем процесс изменения концентрации пыли в зависимости от времени при изменении кратности воздухообмена (Рисунок 2.5). Из предыдущих расчетов следует, что коэффициент рециркуляции  $a=0,87$ , удельное выделение пыли  $X=23,5$  мг/(ч·м<sup>3</sup>).

На графике (Рисунок 2.5) видно, что кратности воздухообмена  $N=3,8$  и эффективности очистки от пыли  $\eta=0,95$  достаточно чтобы концентрация пыли находилась в зоне оптимальных значений.

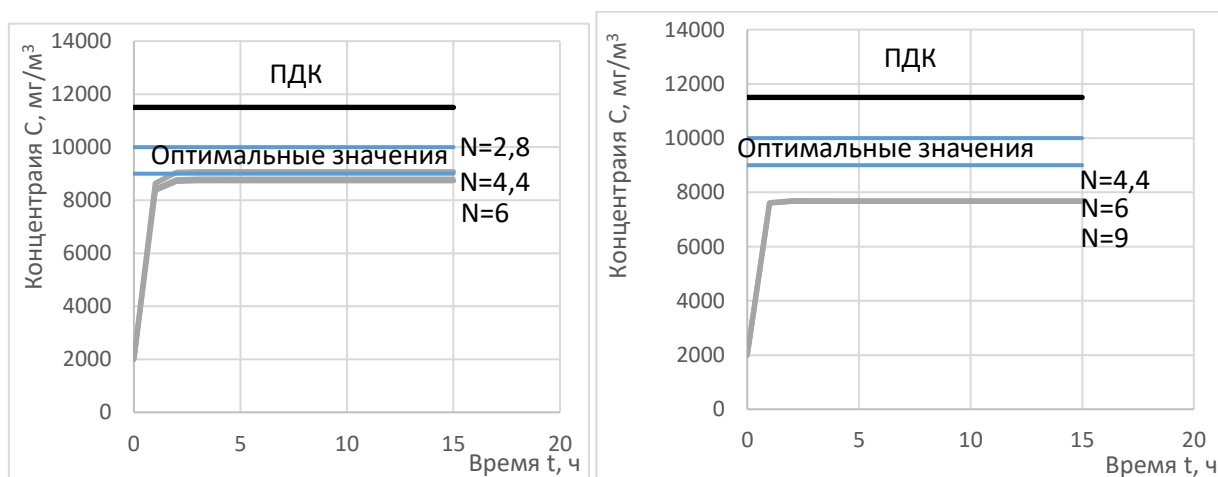


а)

б)

а – кратность воздухообмена на момент посадки поросят в секцию; б - кратность воздухообмена на момент высадки поросят из секции  
 $C=f(t)$ ,  $a=\text{const.}(0,87)$ ,  $\eta=\text{const.}(0,95)$ ,  $N=\text{var.}(2; 3,8; 5)$ ,  $X=23,5 \text{ мг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$

Рисунок 2.5 – Динамика изменения концентрации пыли



а)

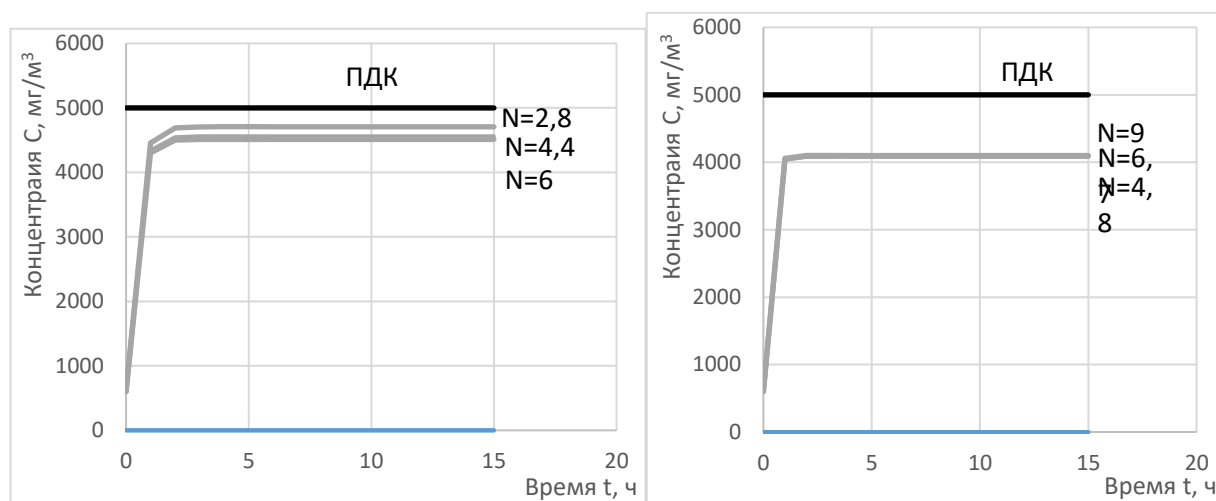
б)

а – кратность воздухообмена на момент посадки поросят в секцию, б - кратность воздухообмена на момент высадки поросят из секции

Рисунок 2.6 – Динамика изменения концентрации влажности

*Влажность.* Используя выражение (2.17) смоделируем процесс изменения концентрации пыли в зависимости от времени при изменении кратности воздухообмена (Рисунок 2.6).

Углекислый газ. Используя выражение (2.17) смоделируем процесс изменения концентрации пыли в зависимости от времени при изменении кратности воздухообмена (Рисунок 2.7).



а)

б)

а – кратность воздухообмена на момент посадки поросят в секцию; б – кратность воздухообмена на момент высадки поросят из секции

Рисунок 2.7 – Динамика изменения концентрации углекислого газа

Анализ полученных при моделировании зависимостей показывает, что общая кратность воздухообмена  $N$  на момент посадки поросят в секцию, достигающая значения  $6 \text{ ч}^{-1}$ , обеспечивает оптимальные параметры воздушной среды в секции при условии, что кратность прямой циркуляции  $N_{пр}$  составляет  $2,8 \text{ ч}^{-1}$ , а кратность рециркуляции  $N_{рец.}$  составляет  $3,2 \text{ ч}^{-1}$ . Общая кратность воздухообмена  $N$  на момент высадки поросят из секции, достигающая значения  $9 \text{ ч}^{-1}$ , обеспечивает оптимальные параметры воздушной среды в секции при условии, что кратность прямой циркуляции  $N_{пр}$  составляет  $4,4 \text{ ч}^{-1}$ , а кратность рециркуляции  $N_{рец.}$  составляет  $4,6 \text{ ч}^{-1}$ .

Данная модель позволяет поддерживать значение текущей концентрации  $C_i$  в пределах оптимальных значений, при установленных режимных параметрах.

Однако, необходимо отметить, что уравнение (2.17) справедливо **только** для точки, в которой происходит генерация вредности, а определение текущей концентрации в иных точках помещения, удаленных от точки генерации по данной модели не представляется возможным, т.к. в модели не учитывает расстояние до источника генерации вредности. Для уточнения данной регрессионной модели необходимо провести исследования механизма распространения пыли в пространстве станка, позволяющие устранить указанные недочеты.

### 2.3 Расчет основных параметров мокрого электрофильтра

Ключевым элементом ЛСОВС является специальный МЭФ, который разработан на базе рециркуляционного электрического фильтра, работающего по принципу использования коронного разряда.

Однако, МЭФ имеет ключевое отличие, заключающееся в наличии жидкости, омывающей осадительные электроды и, как следствие, измененной форме осадительных электродов (диски). Дискообразная форма электродов, повышенная влажность в короноразрядном промежутке, изменение конфигурации потоков электронного ветра и т.д. приводят к необходимости уточнения некоторых важных параметров мокрого электрофильтра, к которым можно отнести межэлектродное расстояние  $h$  и расстояние между коронирующими электродами  $d$ .

Исходные данные для расчета: эффективность очистки электрофильтра по пыли  $\eta_{пыль}=0,9$ ; производительность электрофильтра  $500 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Основными параметрами электрофильтра являются:

- конструкционные параметры: длина активной части электрофильтра  $l$  (часть осадительного электрода, на которую осаждается пыль); радиус осадительных электродов  $R$ ; количество рядов коронирующих электродов  $n$ ; расстояние между коронирующими электродами  $d$  и расстояние между осадительными электродами  $h$ .

- режимные параметры: скорость воздушного потока  $v$ ; напряженность поля коронного разряда  $E$ ; напряжение питания  $U$ ; ток короны  $I$ ; скорость дрейфа частиц  $w$ .

Из них не меняемыми (постоянные) значения параметров, обоснованные в предыдущих исследованиях: напряженность поля  $E=5,3 \cdot 10^5$  В/м; напряжение короны  $U=13,3$  кВ; межэлектродное расстояние  $h=2,5 \cdot 10^{-2}$  м.

Расчетные параметры: длина активной части электрофильтра  $l$ ; радиус осадительных электродов  $R$ ; количество рядов коронирующих электродов  $n$

Эффективности очистки воздуха электрофильтром определяется формулой Дейча,

$$\eta = 1 - e^{\left(-\frac{wl}{hv}\right)}. \quad (2.21)$$

где  $w$  – скорость дрейфа частиц, м/с;

$l$  – длина активной части электрофильтра, м;

$h$  – межэлектродное расстояние, м.

В требованиях к системам очистки рециркуляционного воздуха [55, 105, 110] указано, что очистка должна производиться от пылевых частиц размером 1 мкм и более, для которых скорость дрейфа рассчитывается по формуле:

$$w = 0,118 \cdot 10^{-10} \frac{E^2 \cdot r}{2\mu}. \quad (2.22)$$

где  $E$  – напряженность поля коронного разряда, В/м;

$r$  – размер улавливаемых частиц, мкм;

$\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

По формуле (4) скорость дрейфа частиц  $w$  размером 1 мкм и более равна 0,2 м/с.

Значение межэлектродного расстояния  $h$  принимается равным 0,025 м.

Для установления взаимосвязи между длиной активной части электрофильтра  $l$  и скоростью воздуха  $v$  подставим значения скорости дрейфа частиц  $w$  и межэлектродного расстояния  $h$  в формулу Дейча (2.21):

$$0,9 = 1 - e^{\left(-\frac{wl}{hv}\right)}. \quad (2.23)$$

Проведя ряд преобразований с выражением (3) получаем:

$$e^{\left(\frac{wl}{hv}\right)} = 10. \quad (2.24)$$

На основе понятия о логарифме ( $y = \log_a x \Rightarrow x = a^y$ ), можно выражение (2.24) представить в виде:

$$\frac{wl}{hv} = \log_e 10. \quad (2.25)$$

В свою очередь натуральный логарифм 10 равен:

$$\log_e 10 = \ln 10 = 2,3. \quad (2.26)$$

В итоге получаем:

$$\frac{wl}{hv} = 2,3. \quad (2.27)$$

$$\frac{0,2l}{0,025v} = 2,3.$$

Решив получим,

$$l = 0,29v. \quad (2.28)$$

Формула (2.28), показывает, как изменение скорости воздуха  $v$  будет влиять на значение длины активной части электрофильтра  $l$  при условии, что КПД электрофильтра  $\eta_{пыль} = 0,9$ .

Однако, особенностью мокрого электрофильтра является круглая форма осадительных электродов, что усложняет определение длины активной части электрофильтра  $l$ . В процессе очистки воздуха, у осадительного электрода круглой формы не вся площадь поверхности участвует в процессе осаждения пыли. Таким образом нужен переход от длины активной части электрофильтра  $l$  к радиусу осадительных электродов  $R$  (Рисунок 2.5). Для этого произведен расчет и получено выражение:

$$l = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{2Rb - b^2} \cdot \sqrt{R^2 - \frac{2Rb - b^2}{4}} + 2\pi R^2 \frac{90 - \arccos \frac{R-b}{R}}{360}}{R-b} \quad (2.29)$$

где  $b$  - величина заглубления осадительного электрода в направляющую;

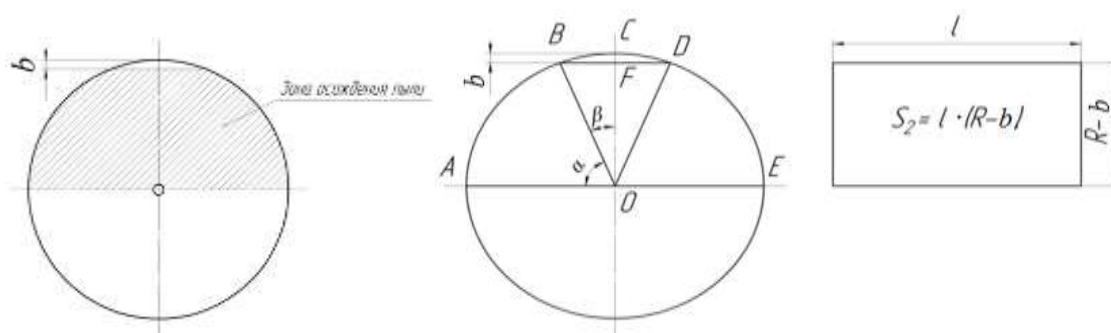


Рисунок 2.5 – К определению перехода от длины активной части электрофильтра к радиусу осадительных электродов

Формула 2.29 позволяет перейти от длины активной части электрофильтра  $l$  к радиусу осадительного электрода  $R$  и свести результаты расчетов в таблицу 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты расчетов

| $l$ , м | $R$ , м | $v$ , м/с |
|---------|---------|-----------|
| 0,3     | 0,2     | 1,03      |
| 0,4     | 0,28    | 1,38      |
| 0,5     | 0,35    | 1,72      |
| 0,6     | 0,41    | 2,01      |
| 0,7     | 0,48    | 2,4       |
| 0,8     | 0,55    | 2,8       |
| 0,9     | 0,62    | 3,1       |
| 1       | 0,69    | 3,45      |

Опыт конструирования показал, с учетом значений расстояния между коронирующими электродами  $d$ , расстояния между осадительными электродами  $h$  и скоростью воздушного потока  $v = 3...4$  м/с радиус осадительного электрода электрофильтра будет составлять  $R = 0,2 \div 0,69$  м. Из таблицы 2 видно, что при  $l = 0,3$  м и  $R = 0,2$  м скоростью воздушного потока будет составлять  $v = 1,03$  м/с и при  $l = 1$  м и  $R = 0,69$  скоростью воздушного потока будет составлять  $v = 3,45$  м/с без потери эффективности очистки.

Учитывая требования эффективности очистки электрофильтра ( $\eta_{\text{пыль}} = 0,9$ ) и производительности электрофильтра ( $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) необходимо определить параметры одного канала электрофильтра и количество каналов  $n$ , для того чтобы определить

конструктивные параметры электрофильтра. Заданная производительность фильтра позволит определить взаимосвязь между скоростью воздушного потока, размерами каналов и количеством каналов электрофильтра (Рисунок 2.6).

Для мокрого электрофильтра производительность определяется по формуле:

$$L_{\text{мэф}} = S_{\text{к}} n v. \quad (2.30)$$

где  $S_{\text{к}}$  – площадь живого сечения одного канала,  $\text{м}^2$ ;

$n$  – количество каналов, шт;

$v$  – скоростью воздушного потока,  $\text{м/с}$ .

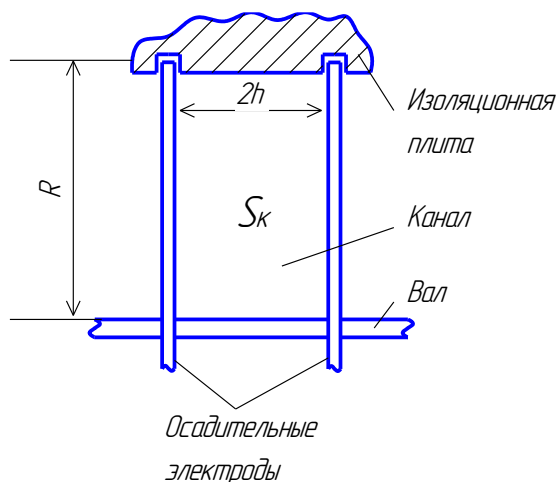


Рисунок 2.6 – Живое сечение канала мокрого электрофильтра

$$L_{\text{мэф}} = R 2 h n v. \quad (2.31)$$

Подставив значения производительности электрофильтра  $L_{\text{мэф}} = 0,14 \text{ м}^3/\text{с}$  и межэлектродного расстояния  $h = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , получим:

$$v = \frac{2,8}{R n}. \quad (2.32)$$

Уравнение 2.32 показывает взаимосвязь между длиной активной части электрофильтра  $l$ , радиусом осадительных электродов  $R$  и скоростью воздушного потока  $v$ , и позволяет рассчитать, рассмотреть и проанализировать варианты конструктивного исполнения электрофильтра (Таблица 2.9).

Из таблицы 2.9 видно, с увеличением длины активной части электрофильтра  $l$  увеличивается скорость воздушного потока  $v$  и уменьшается количество каналов электрофильтра  $n$ . Для экономической оценки вариантов электрофильтра

необходимо определить технико-экономические параметры каждого варианта конструкции электрофильтра (Таблица 2.10).

Таблица 2.9 – Результаты расчетов

| Конструкция фильтра | $l$ , м | $R$ , м | $v$ , м/с | $R \cdot n$ | $n$ , шт |
|---------------------|---------|---------|-----------|-------------|----------|
| 1 вариант           | 0,3     | 0,2     | 1,03      | 2,7         | 14       |
| 2 вариант           | 0,4     | 0,28    | 1,38      | 2,03        | 8        |
| 3 вариант           | 0,5     | 0,35    | 1,72      | 1,6         | 5        |
| 4 вариант           | 0,6     | 0,41    | 2,01      | 1,4         | 4        |
| 5 вариант           | 0,7     | 0,48    | 2,4       | 1,2         | 3        |
| 6 вариант           | 0,8     | 0,55    | 2,8       | 1           | 2        |
| 7 вариант           | 0,9     | 0,62    | 3,1       | 0,9         | 2        |
| 8 вариант           | 1       | 0,69    | 3,45      | 0,8         | 2        |

Таблица 2.10 – Результаты расчетов

| Конструкция фильтра | Итого затраты на производство и монтаж, руб. | Итого затраты на обслуживание, руб. | Эффективность обслуживания, затраты на 1 м <sup>3</sup> очищенного воздуха, руб. |
|---------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1 вариант           | 13995                                        | 1439                                | 2,9                                                                              |
| 2 вариант           | 15609                                        | 1601                                | 3,2                                                                              |
| 3 вариант           | 16491                                        | 1689                                | 3,4                                                                              |
| 4 вариант           | 18934                                        | 1933                                | 4                                                                                |
| 5 вариант           | 21313                                        | 2171                                | 4,3                                                                              |
| 6 вариант           | 22438                                        | 2284                                | 4,6                                                                              |
| 7 вариант           | 27881                                        | 2828                                | 5,7                                                                              |
| 8 вариант           | 33916                                        | 3431                                | 6,9                                                                              |

Анализ таблиц 2.9 и 2.10 показывает, что наиболее приемлемым по технико-экономическим параметрам является 1 вариант конструкции электрофильтра, который принят за основу для дальнейших исследований.

Для окончательного обоснования параметров выбранного варианта конструктивного исполнения МЭФ, необходимо обосновать значения межэлектродного расстояния  $h$  и расстояния между коронирующими электродами

$d$  с целью повышения эффективности электрофилтра за счет достижения максимального значения удельной силы тока коронного разряда.

Для этого был разработан экспериментальный стенд, позволяющий изменять значения межэлектродного расстояния  $h$  и расстояния между коронирующими электродами  $d$  и измерять значения силы тока коронного разряда. (Глава 3). Межэлектродное расстояние  $h$  зависит от напряжения, подаваемого на коронирующие электроды, с целью создания определенной напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке, от проводимости и сопротивления воздуха и влажности воздуха в межэлектродном промежутке. Опыт проектирования и работы с электрофилтрами показывает, что значение межэлектродного расстояния  $h$  находится в пределах  $2 \cdot 10^{-2} \dots 4 \cdot 10^{-2}$  м.

В свою очередь, расстояния между коронирующими электродами  $d$  для МЭФ ранее не определялось. Поэтому встает задача в проведении оптимизации параметром МЭФ с целью определения оптимального значения расстояния между коронирующими электродами, при котором эффективность очистки МЭФ  $\eta$  будет наибольшей. Зависимость  $\eta$  от режимных и конструктивных параметров МЭФ описываться целевой функцией:

$$\eta(w(E, r, \mu), l(R, b), h, v, d) \rightarrow \max. \quad (2.33)$$

ниже приведены составляющие целевой функции:

$$w = 0,118 \cdot 10^{-10} \frac{E^2 \cdot r}{2\mu}.$$

где  $E$  – напряжённость электрического поля в межэлектродном промежутке ( $2 \cdot 10^5 \dots 5,7 \cdot 10^5$  В/м);

$r$  – размер пылевой частицы ( $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 10 \cdot 10^{-6}$  м);

$\mu$  – динамическая вязкость воздуха ( $20 \cdot 10^{-6} \dots 40 \cdot 10^{-6}$  Па·с).

$$l = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{2Rb - b^2} \cdot \sqrt{R^2 - \frac{2Rb - b^2}{4}} + 2\pi R^2 \frac{90 - \arccos \frac{R-b}{R}}{360}}{R-b}$$

где  $R$  – радиус осадительных электродов ( $0,2 \dots 0,7$  м);

$b$  - величина заглубления осадительного электрода в направляющую ((0,005...0,01)R);

$h$  - значение межэлектродного расстояния ( $2 \cdot 10^{-2} \dots 4 \cdot 10^{-2}$  м);

$v$  – скорость воздушного потока (0,5...3 м/с);

$d$  - расстояния между коронирующими электродами (будет определено в результате оптимизации).

## 2.4 Оптимизация конструкции МЭФ

Анализ процессов фильтрации в мокром электрофильтре. Рассмотрим структурную схему МЭФ (Рисунок 2.7). Запыленный воздух, содержащий частицы размером  $r$  в концентрации  $n_1$ , поступает в МЭФ со скоростью  $v$ . Находясь в МЭФ с межэлектродным расстоянием  $h$ , расстоянием между коронирующими электродами  $d$ , частицы пыли заряжаются в поле коронного разряда, возникающего при подаче напряжения  $U$  на коронирующие электроды, и оседают на осадительные электроды. На выходе из МЭФ заряд, приобретенный пылевыми частицами, равен  $q$ ,  $U_2$  концентрация пыли на выходе из МЭФ составляет  $n_2$ , концентрация ионов равна  $n_{i2}$ , концентрация озона -  $C_{O_3}$ , степень очистки воздуха в электрофильтре –  $\eta$ .

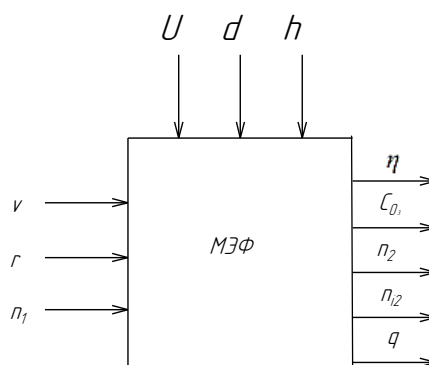


Рисунок 2.7 - Структурная схема МЭФ

Зарядка частицы пыли в поле коронного разряда определяется двумя процессами – процессом направленного движения ионов к частице под действием

внешнего электрического поля («ударная» зарядка) и процессом диффузии ионов к поверхности частицы. В зависимости от размеров частицы указанные процессы играют разную роль [51, 52].

Для крупных частиц (размером  $r \geq 2 \div 3$  мкм) основную роль играет «ударная» зарядка, а процессом диффузии можно пренебречь.

Для частиц размером  $r < 0,08 \div 0,1$  мкм преобладающую роль играют диффузионные процессы и влиянием внешнего электрического поля можно пренебречь (кулоновское поле частицы существенно больше величины внешнего поля).

Для частиц размером  $0,08 \div 0,1 \leq r < 2 \div 3$  мкм необходимо одновременно учитывать и диффузионный и ударный механизмы зарядки [51].

Осаждение частиц пыли происходит под действием электрического поля. Скорость движения заряженных частиц в электрическом поле  $w$  (скорость дрейфа) пропорциональна размеру частицы  $r$  и квадрату напряженности поля  $E^2$  [29]:

$$w \equiv r \cdot E^2. \quad (2.34)$$

Основной характеристикой работы электрофильтра является степень очистки, которая определяется содержанием пыли или жидких частиц в газе до поступления в электрофильтр и после выхода из него [29]:

$$\eta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.35)$$

Известно, что с условием некоторых допущений степень очистки можно рассчитать так [29]:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{w \cdot l}{h \cdot v}}, \quad (2.36)$$

где  $w$  – скорость дрейфа частиц;

$l$  – длина электрофильтра, м;

$h$  – межэлектродное расстояние, м;

$v$  – скорость потока воздуха через электрофильтр, м/с.

Из (2.36) следует, что степень очистки возрастает с увеличением скорости дрейфа (которая пропорциональна квадрату напряженности поля) и с увеличением длины электродов, но уменьшается с ростом межэлектродного расстояния и скорости потока воздуха.

Суммарную степень очистки воздуха в нескольких ступенях электрофильтра, установленных последовательно, рассчитывают по формуле [53]

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n). \quad (2.37)$$

где  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  - степень очистки воздуха, соответственно, в первой, второй,  $n$ -й ступени фильтра.

Одним из главных входных параметров, изменяя который можно добиться интенсификации работы электрофильтра, является удельная сила тока коронного разряда  $I_l$ , т.е. отношение силы тока к длине коронирующего электрода (Рисунок 2.8).

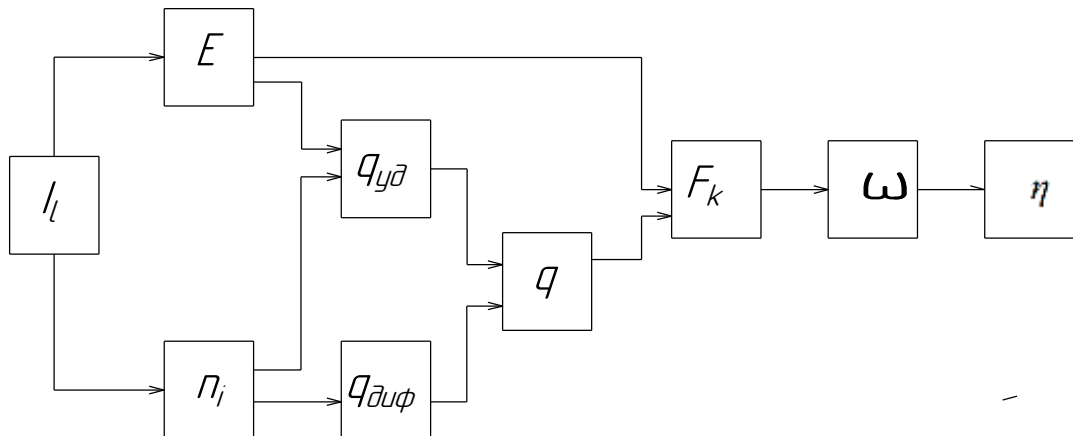


Рисунок 2.8 - К объяснению влияния тока коронного разряда на степень очистки воздуха в МЭФ

Увеличение  $I_l$  сопровождается ростом напряженности поля в зоне зарядки  $E$  и концентрации ионов  $n_i$  [54]:

$$E = B \sqrt{\frac{I_l}{2\pi\epsilon_0 k}}. \quad (2.38)$$

и

$$n_i = \frac{L}{e} \cdot \sqrt{\frac{I_l \varepsilon_0}{2\pi k}}. \quad (2.39)$$

где  $I_l$  – удельная сила тока, А/м;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – электрическая постоянная, Ф/м;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  – заряд электрона, Кл;

$k$  – подвижность ионов,  $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ;

$B$  и  $L$  – параметры, зависящие от системы электродов.

Увеличение напряженности поля ведет к увеличению ударного заряда, получаемого частицей  $q_{y\partial}$  и, следовательно, к увеличению общего заряда  $q$ .

Увеличение концентрации ионов  $n_i$  ведет к увеличению и диффузионного  $q_{диф}$ , и ударного  $q_{y\partial}$  зарядов, получаемых частицей, и, следовательно, к увеличению общего заряда  $q$ .

Увеличение заряда частицы ведет к увеличению силы  $F_k$ , обусловленной действием электрических полей на заряженную частицу, и к увеличению соответствующей скорости дрейфа частицы  $w$ , что, в свою очередь, приводит к повышению степеней очистки в фильтре  $\eta$ .

Рассмотрение процессов, происходящих в МЭФ, позволило сделать вывод о том, что повышение эффективности работы электрофильтра может быть достигнуто за счет учета рационального значения межэлектродного расстояния  $h$  и расстояния между коронирующими электродами  $d$ , позволяющими достичь максимального значения удельной силы тока коронного разряда.

В [20, 47] предлагается определять рациональное соотношение между  $h$  и  $d$  для сухих электрофильтров по формулам:

$$\frac{d}{h} = 1.2 \div 1.6; \quad (2.40)$$

$$\frac{d}{h} = 1.9 \div 2.1. \quad (2.41)$$

Учитывая особенности конструкции МЭФ (дискообразные осадительные электроды), более высокую влажность и особенности движения потоков

электрического ветра встает вопрос о проверке выражений (2.40) и (2.41) на применимость в МЭФ.

Межэлектродное расстояние  $h$  связано с напряженностью электрического поля коронного разряда  $E$  и напряжением, прикладываемым к электродам электрофильтра, и зависит от проводимости воздуха. Значение межэлектродного расстояния  $h$  определяется исходя из характеристик источника высокого напряжения и требуемой напряженности коронного разряда.

В свою очередь методика определения оптимального значения расстояния между коронирующими электродами  $d$  для мокрого электрофильтра в литературе не описана.

Очевидно, что  $d$  влияет на ток коронного разряда  $I_l$  и рисунок 2.8 можно изобразить (Рисунок 2.9):

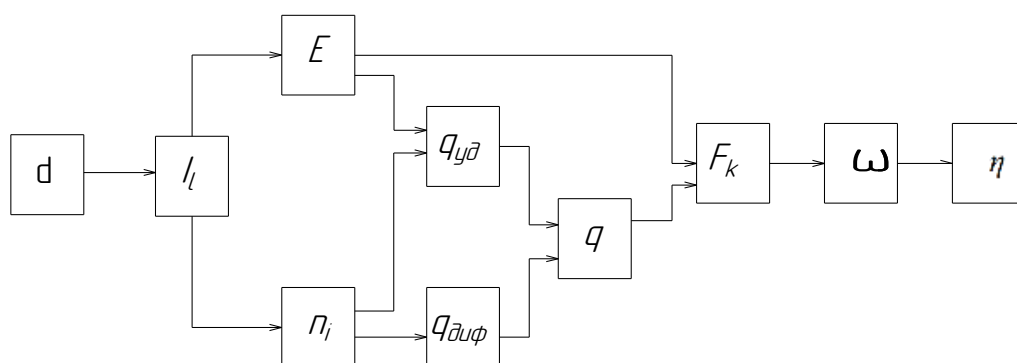


Рисунок 2.9 - К объяснению влияния расстояния между коронирующими электродами  $d$  на степень очистки воздуха в МЭФ

Для определения значения оптимального расстояния между коронирующими электродами  $d$  необходимо провести исследования влияния значения  $d$  на ток коронного разряда и, как следствие, на эффективность электрофильтрации.

При проведении оптимизации расстояния между коронирующими электродами  $d$  необходимо наложить ограничения на факторы, (рисунок 2.10), т. е. определить область, в которой будет проводиться оптимизация.

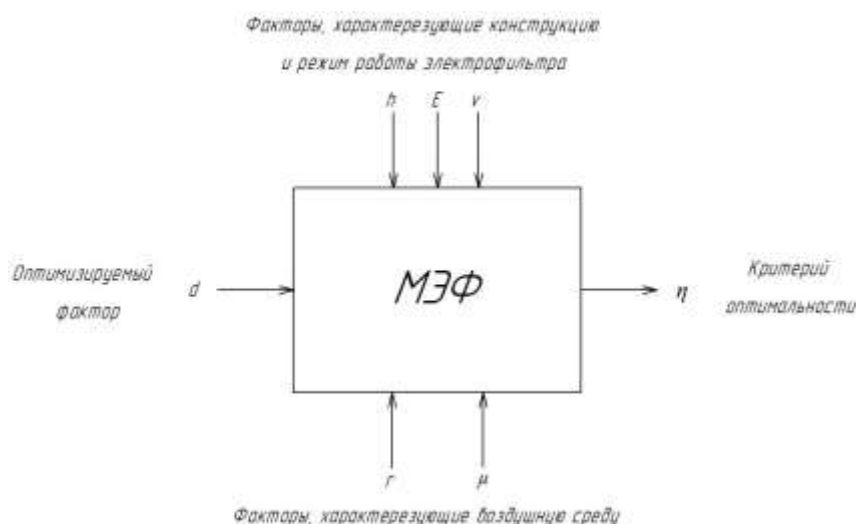
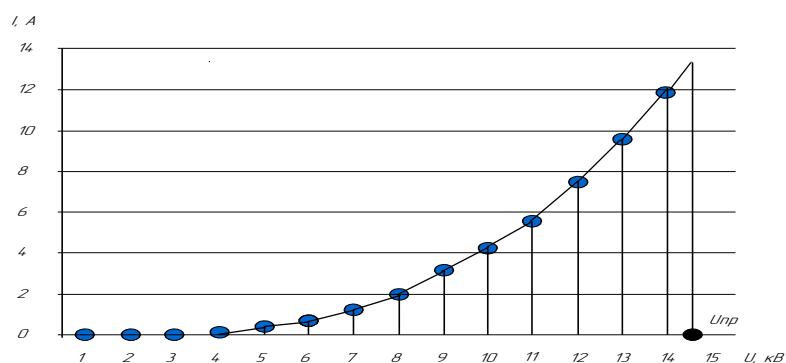


Рисунок 2.10 - Факторы, влияющие на критерий оптимальности

На факторы, характеризующие пылевую частицу, конструкцию и режим работы электрофильтра, были наложены следующие ограничения: частицы, находящиеся в электрофильтре, имели размеры  $r$  от  $0,5 \cdot 10^{-6}$  м до  $10 \cdot 10^{-6}$  м. Скорость воздушного потока в фильтре  $v$  изменялась от 0,5 до 3 м/с. Напряженность электрического поля короны  $E$  варьировалась в пределах от  $2 \cdot 10^5$  В/м до  $5,7 \cdot 10^5$  В/м. С учетом [20, 47, 113] межэлектродное расстояние  $h$  изменялось в пределах от  $2 \cdot 10^{-2}$  м до  $4 \cdot 10^{-2}$  м.

Для определения напряжения пробоя, рабочего напряжения и напряжения разгорания короны МЭФ была снята вольтамперная характеристика (ВАХ) (Рисунок 2.11):



$U_{пр}$  – напряжение пробоя, кВ

Рисунок 2.11 - ВАХ МЭФ

Из рисунка 2.11 видно, что напряжение пробоя  $U_{np}$  составило  $14,8 \pm 0,1$  кВ, напряжение разгорания короны  $U_{p.k}$  составило  $4,9 \pm 0,2$  кВ. Установлено рабочее напряжение короны  $U$ ,  $13,3 \pm 0,4$  кВ МЭФ. Таким образом напряженность поля будет определяться по формуле

$$E = \frac{U}{h}. \quad (2.42)$$

- для основного уровня (рабочее напряжение короны  $U$ )

$$E = \frac{13300}{0,025} = 530 \text{ кВ/м.}$$

- для крайних значений: при напряжении разгорания короны ( $U_{p.k}$ )  $E = 198$  кВ/м; при напряжении пробоя ( $U_{np}$ )  $E = 570$  кВ/м.

Интервалы варьирования и основные уровни факторов представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 - Параметры варьирования факторов при оптимизации

| Фактор                               | Интервал варьирования                      | Основной уровень    |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------|
| Напряжение $U$ , кВ                  | 4,9...14,4                                 | 13,3                |
| Межэлектродное расстояние $h$ , м    | $2 \cdot 10^{-2} \dots 4 \cdot 10^{-2}$    | $2,5 \cdot 10^{-2}$ |
| Скорость воздушного потока $v$ , м/с | 0,5...3                                    | 2                   |
| Размер пылевой частицы $r$ , м       | $0,5 \cdot 10^{-6} \dots 10 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$   |

Производилось поэтапное определение зависимости степени очистки воздуха в МЭФ  $\eta$  при варьировании расстояния между коронирующими электродами  $d$  таким образом, что один из влияющих факторов фиксировался на минимальном, основном и максимальном уровнях [114-121].

## 2.5 Локальная система очистки воздушной среды станка

Для разработки ЛСОВС составим алгоритм работы, представленный на рисунке 2.12.

По данному алгоритму при запуске микроконтроллера происходит инициализация оборудования (датчиков, исполнительных механизмов, чтение

установленных значений концентраций). После, программа начинает работать по замкнутому циклу:

Этап 1 – замер концентрации текущей концентрации  $i$ -той вредности ( $C_i$ ) (сохранение показаний датчиков в оперативную память микроконтроллера).

Этап 2 – сравнение текущих концентраций с ПДК ( $X_3$ ):

Этап 2.1 – в случае превышения ПДК ( $C_i > X_3$ ) включается режим работы системы вентиляции «Режим МАХ», включается блокировка режима 1 и режима 2, ход программы переключается на 5 этап.

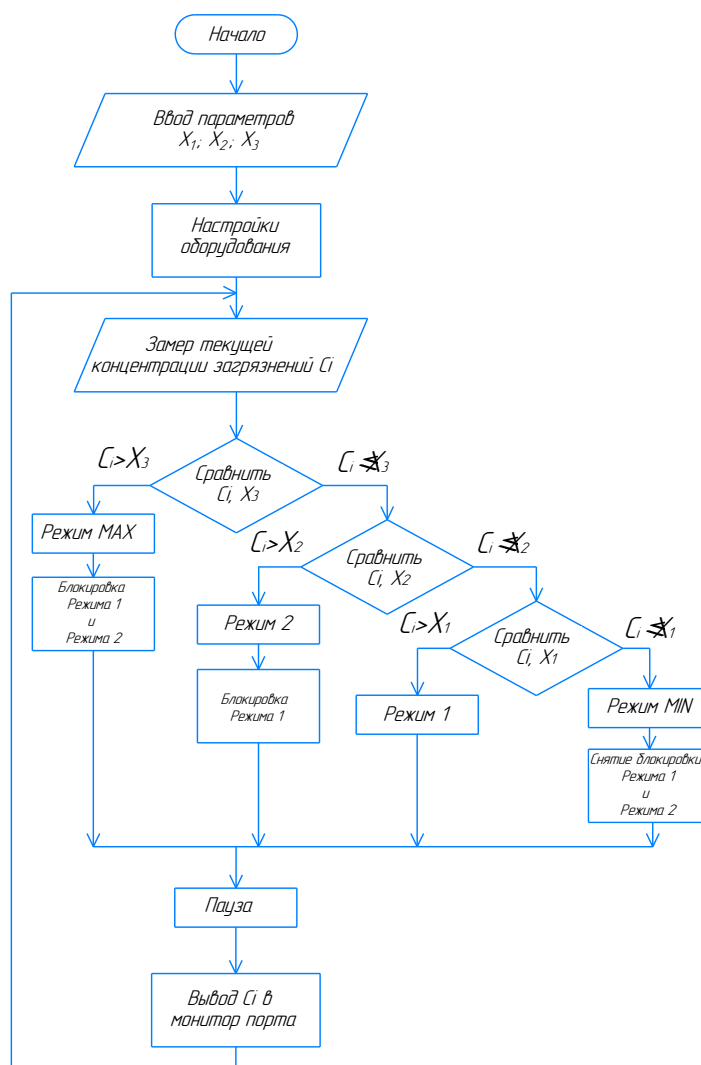


Рисунок 2.12 – Алгоритм работы ЛСОВС на основе МЭФ

Этап 2.2 – в случае не превышения ПДК ( $C_i < X_3$ ) ход программы переключается на 3 этап.

Этап 3 – сравнение текущих концентраций с верхней границей оптимальных значений ( $X_2$ ):

Этап 3.1 – в случае превышения верхней границы оптимальных значений ( $C_i > X_2$ ) включается режим работы системы вентиляции «Режим 2», включается блокировка режима 1, ход программы переключается на 5 этап.

Этап 3.2 – в случае не превышения верхней границы оптимальных значений ( $C_i < X_2$ ) ход программы переключается на 4 этап.

Этап 4 – сравнение текущих концентраций с нижней границей оптимальных значений ( $X_1$ ):

Этап 4.1 – в случае превышения нижней границы оптимальных значений ( $C_i > X_1$ ) включается режим работы системы вентиляции «Режим 1», ход программы переключается на 5 этап.

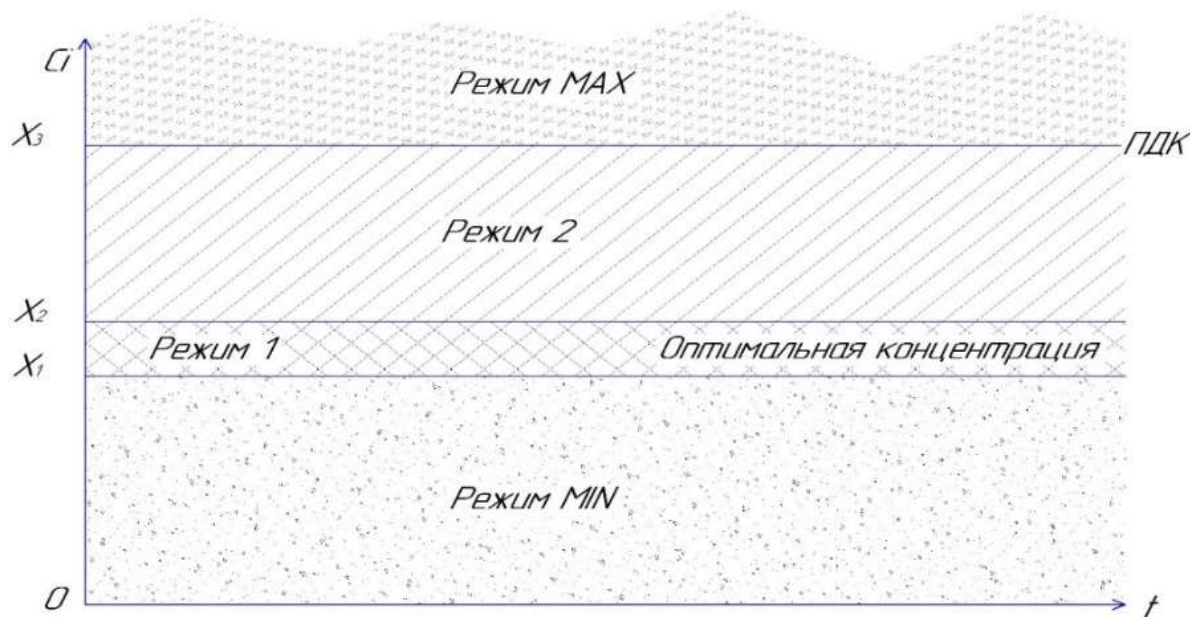


Рисунок 2.13 – Границы режимов работы по концентрации вредностей

Этап 4.2 – в случае не превышения нижней границы оптимальных значений ( $C_i < X_1$ ) включается режим работы системы вентиляции «Режим MIN», снимается блокировка режима 1 и режима 2, ход программы переключается на 5 этап.

Этап 5 – осуществляется ожидания до повторного хода цикла, принимаются изменения настроек установленных значений концентраций, ход программы осуществляется на первый этап.

$X_1$  – нижняя граница оптимальных значений концентрации вредности;

$X_2$  – верхняя граница оптимальных значений концентрации вредности;

$X_3$  – значение предельно допустимой концентрации вредности.

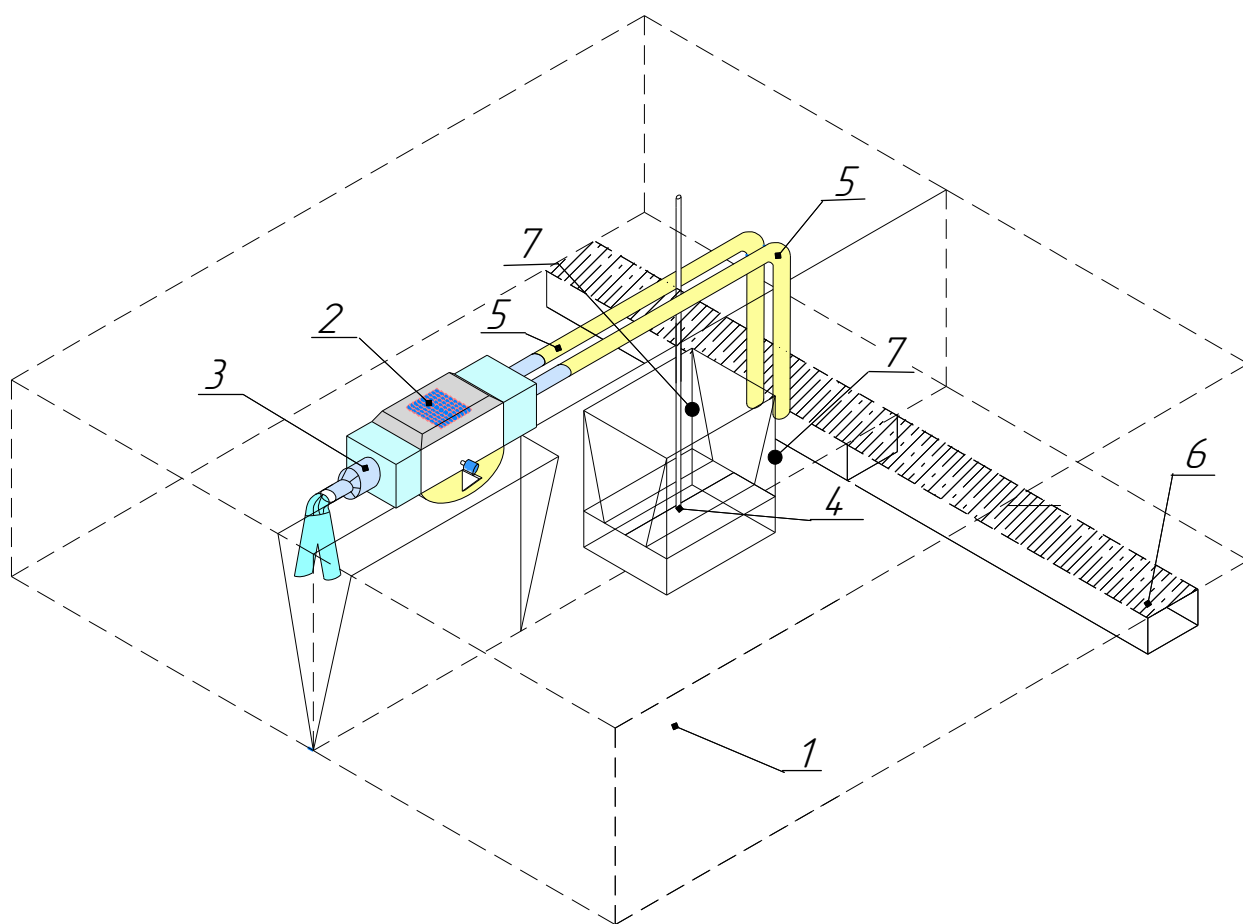
Работа системы автоматизированного регулирования параметров воздушной среды осуществляется следующим образом. Система с помощью датчиков (запыленности и загазованности) совершает замер текущей концентрации вредностей  $C_i$  в животноводческом помещении. Затем, полученные данные сравниваются с установленными значениями ПДК  $X_3$ , в случае превышения ПДК, система включается в режим работы «Режим МАХ», система будет работать в этом режиме до тех пор, пока концентрация вредностей  $C_i$  не станет ниже нижней границы оптимальных значений  $X_1$ , система перейдет в режим работы «Режим MIN», при этом «Режим1» и «Режим2» заблокированы. В случае если ПДК не превышено, то система сравнивает  $C_i$  с верхней границей оптимальных значений  $X_2$ . Если граница  $X_2$  превышена, т.е. значение текущей концентрации  $C_i$  находится в диапазоне от  $X_2$  до  $X_3$ , система переходит в режим работы «Режим2», система будет работать в этом режиме до тех пор, пока концентрация вредностей  $C_i$  не станет ниже нижней границы оптимальных значений  $X_1$ , система перейдет в режим работы «Режим MIN», при этом «Режим1» заблокирован. Если значение текущей концентрации  $C_i$  находится ниже границы оптимальных значений  $X_2$ , то система сравнивает  $C_i$  со значением нижней границы  $X_1$  оптимальных значений. В случае если  $X_1$  превышена, т.е. значение текущей концентрации  $C_i$  находится в диапазоне от  $X_1$  до  $X_2$ , система переходит в режим работы «Режим1», система будет работать в этом режиме до тех пор, пока концентрация вредностей  $C_i$  не станет ниже нижней границы оптимальных значений  $X_1$ , система перейдет в режим работы «Режим MIN». Если значение текущей концентрации  $C_i$  находится ниже границы



вентиляции животноводческого помещения, улучшению условий содержания животных и повышению производственной культуры.

Исходя из выше сказанного, предложено разработать локальную систему очистки воздушной среды станка. (Рисунок 2.15).

ЛСОВС представляет из себя систему, в которую входят следующие элементы: мокрый электрофильтр МЭФ (для очистки рециркуляционного воздуха от пыли, аммиака и сероводорода), датчики (измерение текущих концентраций загрязнений (в нашем случае это пыль) в пространстве станка), вентилятор и система воздуховодов, контроллер (с алгоритмом работы всей системы).



1 – станок (площадь 31,5 м<sup>2</sup>, объем 95м<sup>3</sup>); 2 – МЭФ; 3 – вентилятор; 4 – кормушка;  
5 – вытяжной воздуховод; 6 – навозоуборочный канал; 7 - датчик

Рисунок 2.15 – План станка с размещением ЛСОВС

## 2.6 Основные выводы и результаты

1. Анализ воздушной среды свиноводческих помещений показал, что при прямой циркуляции вентиляционного воздуха кратность воздухообмена для удаления пыли достигает значений от 6 до 9 ч<sup>-1</sup> в зависимости от возраста животных, а по удалению влажности и углекислого газа составляет от 2,8 до 4,4 ч<sup>-1</sup>. т.о. существует потенциал по снижению кратности прямой циркуляции до значений от 2,8 до 4,4 ч<sup>-1</sup> с переходом системы вентиляции в режим частичной рециркуляции воздуха, без снижения эффективности по удалению из воздушной среды помещения избыточной влаги и углекислого газа.

2. Составлена регрессионная модель, связывающая значение текущей концентрации  $i$ -ого загрязнения в замкнутом объёме помещения от времени, с кратностью воздухообмена, коэффициентом рециркуляции, эффективностью очистки от  $i$ -ой вредодействующей компоненты, генерацией  $i$ -ой вредодействующей компоненты внутри помещения и концентрацией  $i$ -ой вредодействующей компоненты в приточном воздухе, позволяющая определить необходимые значения эффективности очистки рециркуляционного фильтра от сероводорода, аммиака и пыли.

3. На основе регрессионной модели для секции существующего свинарника-откормочника на 250 голов, определены значения эффективности электрофилтра по очистки рециркуляционного воздуха от сероводорода, аммиака и пыли которые составили, соответственно, 0,5; 0,84; 0,95. Данным требованиям соответствует двухступенчатый мокрый электрофилтр (МЭФ).

4. Обосновано проведение оптимизации параметром МЭФ с целью определения оптимального значения расстояния между коронирующими электродами  $d$ , при котором эффективность очистки МЭФ  $\eta$  будет наибольшей.

5. Разработан алгоритм работы ЛСОВС станка, обеспечивающий нормируемые параметры воздушной среды животноводческих помещений путем поддержания текущей концентрации загрязнений в диапазоне оптимальных значений, не превышающих предельно допустимые значения.

6. Разработана и запатентована ЛСОВС станка на основе МЭФ, позволяющая отслеживать и регулировать параметры воздушной среды в режиме реального времени с целью снижения энергопотребления системы вентиляции.

## **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ СТАНКА**

### **3.1 Лабораторные исследования**

Экспериментальные исследования проводились на базе лабораторий кафедры «Энергообеспечение СХ» Государственного аграрного университета Северного Зауралья (г. Тюмень).

Целью лабораторных исследований являлось изучение механизма распределения пыли в объёме лабораторной установки, определение концентраций пыли в разных точках воздушной среды модели станка, определение места установки элементов ЛСОВС, а также обоснование параметров МЭФ.

Программой работ предусматривалось исследование влияния режимов работы ЛСОВС на текущую концентрацию пыли в воздушной среде модели станка от расстояния до источника генерации пыли и от времени, прошедшего после окончания генерации пыли.

Для проведения лабораторных исследований был изготовлен экспериментальный стенд, оснащённый опытным образцом мокрого электрофильтра (Рисунок 3.1) в котором были определены точки замеров текущей концентрации пыли. При выборе основных конструктивных параметров опытного образца был учтён опыт конструирования предыдущих моделей мокрых электрофильтров [44].

Приборы и оборудование:

- МЭФ (эффективность очистки по сероводороду – 50%, по пыли – 95%, по аммиаку – 84%);
- комплект оборудования Arduino (микроконтроллер ArduinoMega 2560, датчик аммиака MQ-135, датчик сероводорода MQ-136, датчик пыли Sharp) [122,123];

- источник высокого напряжения Плазон ИВНР-30/10. Выходное напряжение до 30 кВ и ток в нагрузке до 10 мА. Выходная мощность до 250 Вт. Питание ~ 220 В. Выходная цепь гальванически связана с клеммой заземления. Ручная регулировка выходного напряжения. Оснащён защитным электронным ограничением тока и напряжения, а также отключением при возникновении аварийного режима. Имеет встроенные измерители выходного напряжения и тока;

- киловольтметр С-196 (диапазоны показаний прибора: 0 -7.5; 0 -15 и 0 - 30 кВ; предел допускаемой основной погрешности  $\pm 1.0\%$  от конечного значения диапазона измерений; предел допускаемой дополнительной погрешности, вызванной изменением температуры окружающего воздуха от  $20 \pm 5$  °С до любой температуры в пределах от 10 до 35 °С, на каждые 10 °С изменения температуры равен  $\pm 1.0\%$ );

- миллиамперметр М109/1 № 3966 (класс точности - 0,5; предел измерения -  $I=0...3$  мА);

- вольтметр Э 378 (погрешность  $\pm 1,5\%$  конечного значения шкалы; предел измерения 0...250 В).

- измеритель комбинированный TESTO 425 с диапазоном измерений скорости воздушного потока (0,1...20,0) м/с с погрешностью  $\pm 0,1$  м/с; с диапазоном измерения температуры (минус 20 ... плюс 70)°С с погрешностью  $\pm 0,5$ °С в диапазоне (0... плюс 60) °С;

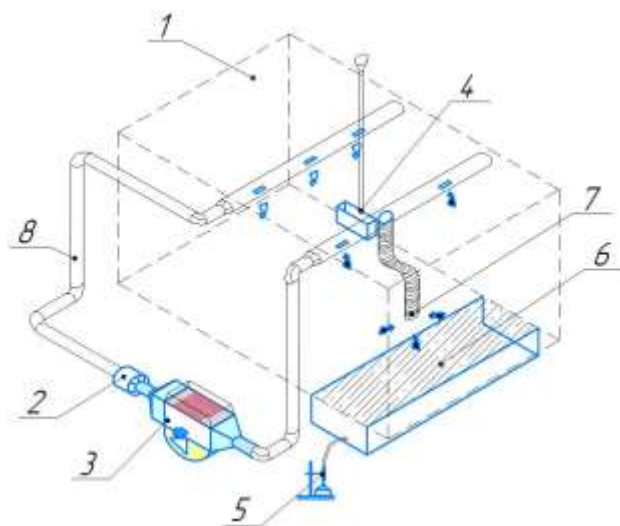
- газосигнализатор индивидуальный ИГС-98 производства ФГУП «НПП «Дельта» с диапазоном измерения концентрации аммиака (0...300) мг/м<sup>3</sup> с относительной погрешностью измерений  $\pm 25$  %;

- газоанализатор портативный ПГА-200 в комплекте с датчиком ДГЭ-М2-Н<sub>2</sub>S с диапазоном измерения концентрации сероводорода (0...45) мг/м<sup>3</sup> с относительной погрешностью измерений  $\pm 25$  %;

- анализатор пыли «Атмас» диапазон измерений массовой концентрации пыли, от 0,1 до 150 мг/м<sup>3</sup>; предел допускаемой относительной погрешности, в

поддиапазоне от 0,1 до 20 мг/м<sup>3</sup>  $\pm$  20%; в поддиапазоне от 20 до 150 мг/м<sup>3</sup>  $\pm$ 25 %;

- счетчик взвешенных частиц FLUKE 983 (шесть каналов по размерам частиц 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0  $\mu$ m).



1 – модель станка (герметичный резервуар  $V=0,96$  м<sup>3</sup>); 2 – вентилятор; 3 – МЭФ;  
4 – кормушка, источник пыли; 5 – источник вредных газов; 6 – навозоуборочный канал;  
7 – вытяжной воздуховод (локальный); 8 – соединительные воздуховоды;  
9 – ПК (ноутбук); 10 – ИВН; 11 – контроллер; 12 – датчики воздушной среды;  
13 – канал подачи сухого корма

Рисунок 3.1 – Функциональная схема лабораторной установки

Плата Arduino Mega построена на микроконтроллере ATmega2560. Платформа содержит 54 цифровых входа/выходов (14 из которых могут использоваться как выходы широтно-импульсного модуля), 16 аналоговых входов, 4 последовательных порта аппаратного последовательного интерфейса UART, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы платформа подключается к компьютеру посредством кабеля USB. Характеристики Arduino Mega представлены в Приложении Б.

Датчики размещены в герметичном резервуаре емкостью  $0,96 \text{ м}^3$  и подключены к ПК через микроконтроллер ArduinoMega 2560. Управление датчиками осуществлялось с помощью программного обеспечения Arduino IDE (программная оболочка). Датчики (датчик пыли Sharp GP2Y1010AU0F, датчик аммиака MQ-135, датчик сероводорода MQ-136) проводили замеры текущих концентраций загрязнений в резервуаре с частотой 20 замеров в минуту, полученные данные выводились на ПК в течение всего эксперимента. С помощью приборов (газоанализаторы ИГС-98, ПГА-200, анализатор пыли «Атмас») проводился контрольный забор проб воздуха в контрольных точках так же в течении всего опыта В кормушку по каналу подачи засыпалось 3 кг сухого корма (количество корма необходимое для заполнения кормушки). В процессе заполнения кормушки кормом генерировалась пыль. По завершению засыпки корма замерялась концентрация пыли на разных уровнях, в разных точках модели станка. Время генерации загрязнения менялось (0-40 с).

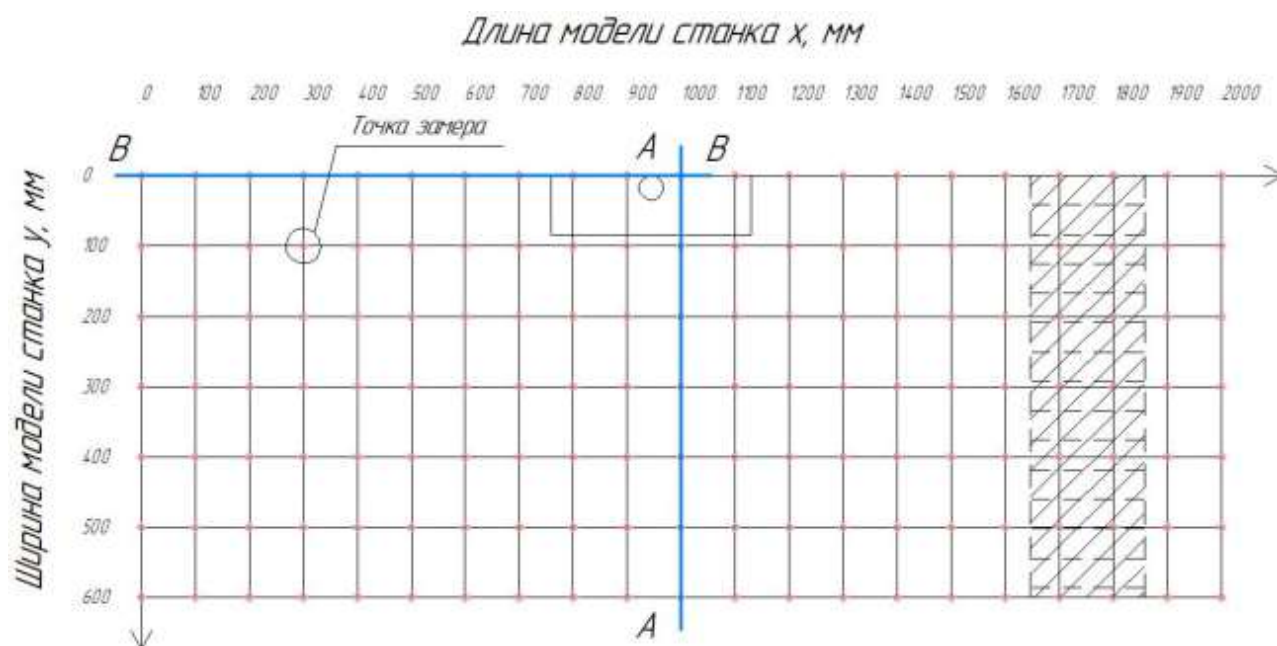


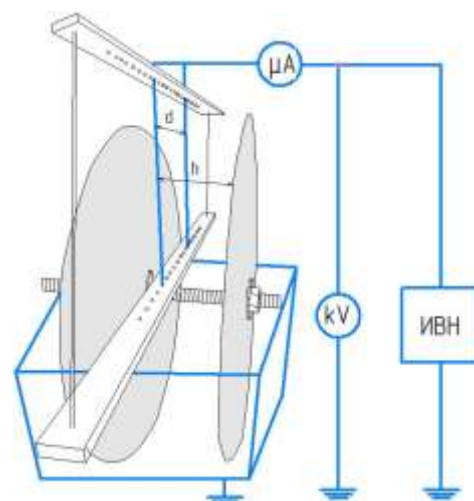
Рисунок 3.2 – Точки замеров в модели станка

Подавалось напряжение на короноразрядную систему МЭФ ( $U=13,3 \text{ кВ}$ ). Одновременно контроллер с помощью датчиков отслеживал текущую

концентрацию пыли в герметичном резервуаре в  $i$ -й точке пространства резервуара. Расположение датчиков в пространстве менялось согласно методике проведения эксперимента (Рисунок 3.2). Концентрации пыли замерялись на уровнях 60 мм, 100 мм и 680 мм. При исследовании модели станка без элементов ЛСОВС необходимо определить координаты точек с максимальной концентрацией пыли с целью определения места установки датчика пыли. Полученные данные необходимы для построения зависимости изменения текущей концентрации  $C_i$  пыли в воздушной среде помещения от времени, прошедшего после окончания генерации пыли и от расстояния до источника генерации пыли. После определения точек максимальной концентраций было определено место размещения датчика пыли и точка забора загрязненного воздуха вытяжным воздуховодом ЛСВОС.



а) внешний вид стенда



б) схематичное изображение

Рисунок 3.3 – Экспериментальный стенд

После, в определенной зоне повышенных концентраций, были размещены датчик пыли и вытяжной воздуховод, была включена ЛСОВС. Опыт был выполнен повторно. В резервуар генерировалась пыль до концентрации  $50 \pm 3 \text{ мг/м}^3$ . Замерялись текущие концентрации пыли в станке. С помощью датчиков отслеживалась текущая концентрация пыли в герметичном резервуаре в  $i$ -й точке пространства резервуара. Расположение датчиков в пространстве менялось согласно методике проведения эксперимента. Концентрации пыли замерялись на

уровнях 60 мм, 100 мм и 680 мм. По полученным данным строились графики зависимости текущей концентрации пыли от времени и расстояния до источника генерации пыли.

Для окончательного обоснования параметров выбранного варианта конструктивного исполнения МЭФ (Таблица 2.11), необходимо обосновать значения межэлектродного расстояния  $h$  и расстояния между коронирующими электродами  $d$  с целью повышения эффективности электрофильтра за счет достижения максимального значения удельной силы тока коронного разряда.

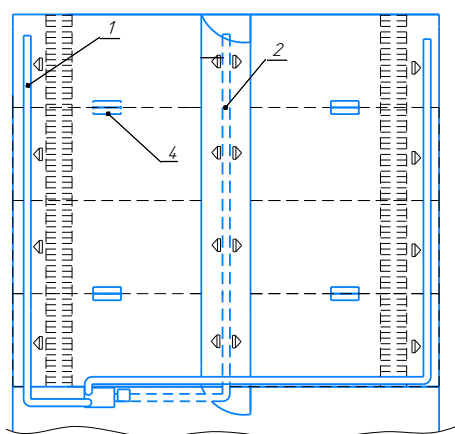
Для этого был разработан экспериментальный стенд, позволяющий изменять значения межэлектродного расстояния  $h$  и расстояния между коронирующими электродами  $d$  и измерять значения силы тока коронного разряда. (Рисунок 3.3).

Межэлектродное расстояние  $h$  зависит от напряжения, подаваемого на коронирующие электроды, от проводимости и сопротивления воздуха и влажности воздуха в межэлектродном промежутке. Опыт проектирования и работы с электрофильтрами показывает, что значение межэлектродного расстояния  $h$  находится в пределах  $2 \cdot 10^{-2} \dots 4 \cdot 10^{-2}$  м. Расстояние между коронирующими электродами  $d$  для МЭФ ранее не определялось. Поэтому встает задача в проведении оптимизации параметром МЭФ с целью определения оптимального значения расстояния между коронирующими электродами  $d$ , при котором эффективность очистки МЭФ  $\eta$  будет наибольшей.

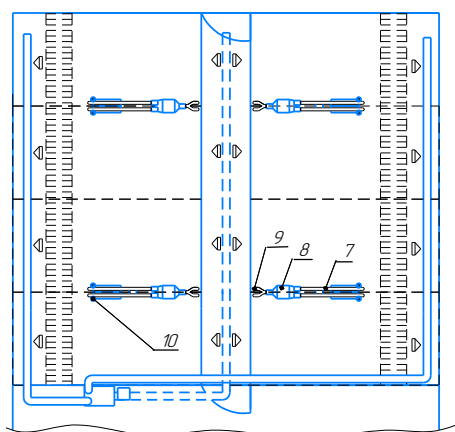
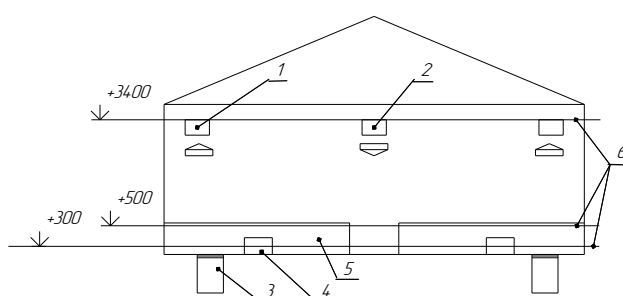
### **3.2 Экспериментальные исследования в производственных условиях участка №3 секций №16 и 17 свиного комплекса ООО «Согласие»**

Целью производственных исследований являлось определение влияния работы ЛСОВС станка для содержания поросят на параметры воздушной среды станка и на энергопотребление вентиляционного оборудования. Исследования проводились в станках в секциях №16 (контрольная секция) и №17 (опытная секция) участка № 3 свиного комплекса ООО «Согласие» (с. Новая Заимка Заводоуковского района Тюменской области).

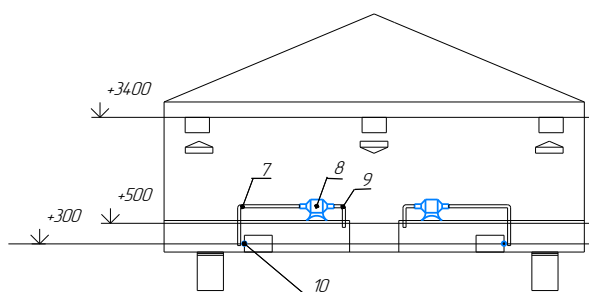
Производственные испытания проводились в свинокомплексе «Согласие» Заводоуковского района Тюменской области. Для испытаний были выбраны однотипные секции, в них одинаковые станки с одинаковым количеством поросят, не угловые, предварительно вымытые. При проведении производственного эксперимента условия содержания животных, кормовая база в опытной и контрольной секциях не изменялись.



*Секция №16 (Контрольная)*



*Секция №17 (Опытная)*



- 1 – вытяжной воздуховод общеобменной системы вентиляции (300x200 мм);
- 2 – приточный воздуховод общеобменной системы вентиляции (300x200 мм);
- 3 – навозоуборочный канал (гидросмыв); 4 – кормушка с трубой подачи корма;
- 5 – станок (площадь 31,5 м<sup>2</sup>, объем 95м<sup>3</sup>); 6 – уровни забора проб воздуха;
- 7 – вытяжной воздуховод ЛСОВС; 8 – приточный воздуховод ЛСОВС;
- 9 – электрофильтр; 10 – место установки датчика пыли

Рисунок 3.4 – План секций №16 и №17 участка №3 свинокомплекса ООО «Согласие» с размещением оборудования ЛСОВС

Сделано допущение: эксфильтрация и инфильтрация отсутствовала. Точки установки датчиков пыли, а также места установки вытяжного воздуховода были приняты согласно проведенным ранее лабораторным исследованиям. Для замеров были определены точки заборов проб воздуха в контрольном станке секции №16 без ЛСОВС и точки заборов проб воздуха и установки датчиков в опытном станке секции №17 с ЛСОВС (Рисунок 3.4). Точки определены из расчета на каждые 20 м<sup>2</sup> площади - одна проба воздуха, по типу конверта: 4 точки по углам комнаты и 5-я точка - в центре. Расстояние от стены не менее 1 м. Высота расположения точек в свинарниках 0,3 - 0,5 м от пола и 0,6 м от потолка. План размещения оборудования представлен на рисунках 3.4 и 3.5.



Рисунок 3.5 – Размещение оборудования ЛСОВС в секции №17

Начальную концентрацию пыли в воздушной среде станков секций №16 и №17 для содержания поросят-отъёмышей определяли с помощью анализатора

пыли «АТМАС», начальную концентрацию аммиака – с помощью газосигнализатора индивидуального ИГС-98, начальную концентрацию сероводорода – портативного газоанализатора ПГА-200. После определения начальных концентраций переходили к основной части эксперимента. Одновременно с посадкой животных в обеих секциях на коронирующую системы МЭФ было подано напряжение, в опытной секции №17 с ЛСОВС перед началом эксперимента включен ПК, запущена программа Arduino IDE, включена ЛСОВС. На основании лабораторных исследований было выбрано место установки элементов ЛСОВС (Датчик и воздухопровод в опытной секции и датчик в контрольной секции). На основании данных, полученных в лабораторных исследованиях, датчик пыли был размещен в точке №16. Приборами проводились контрольные замеры во всех точках. В контрольной секции №16 без ЛСОВС замеры текущей концентрации пыли и вредных газов проводились с помощью приборов («АТМАС», ИГС-98, ПГА-200), полученные результаты записывались в журнал замеров. В опытной секции №17 ЛСОВС фиксировала показания текущей концентрации загрязнений и сохраняла в памяти компьютера, так же проводились контрольные замеры с помощью приборов («АТМАС», ИГС-98, ПГА-200). В обеих секциях велся контроль потребления энергии. Производился контроль производственных показателей.

### **3.2 Основные выводы и результаты**

1. Разработана экспериментальная установка (модель станка) в масштабе 1:5 с общеобменной ПВВ для исследования механизма распространения пыли в станке.
2. Разработана стенд на базе МЭФ для исследования влияния расстояния между коронирующими электродами  $d$  на эффективность очистки электрофильтра  $\eta$  от пыли.

3. Разработана методика проведения экспериментальных исследований системы ЛСОВС станка в лабораторных условиях, включающая в себя снятие зависимостей текущей концентрации пыли по времени и расстоянию до источника генерации загрязнений.

4. Разработана методика проведения производственного эксперимента, которая предусматривает исследование влияния ЛСОВС на производственные показатели.

## ГЛАВА 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ

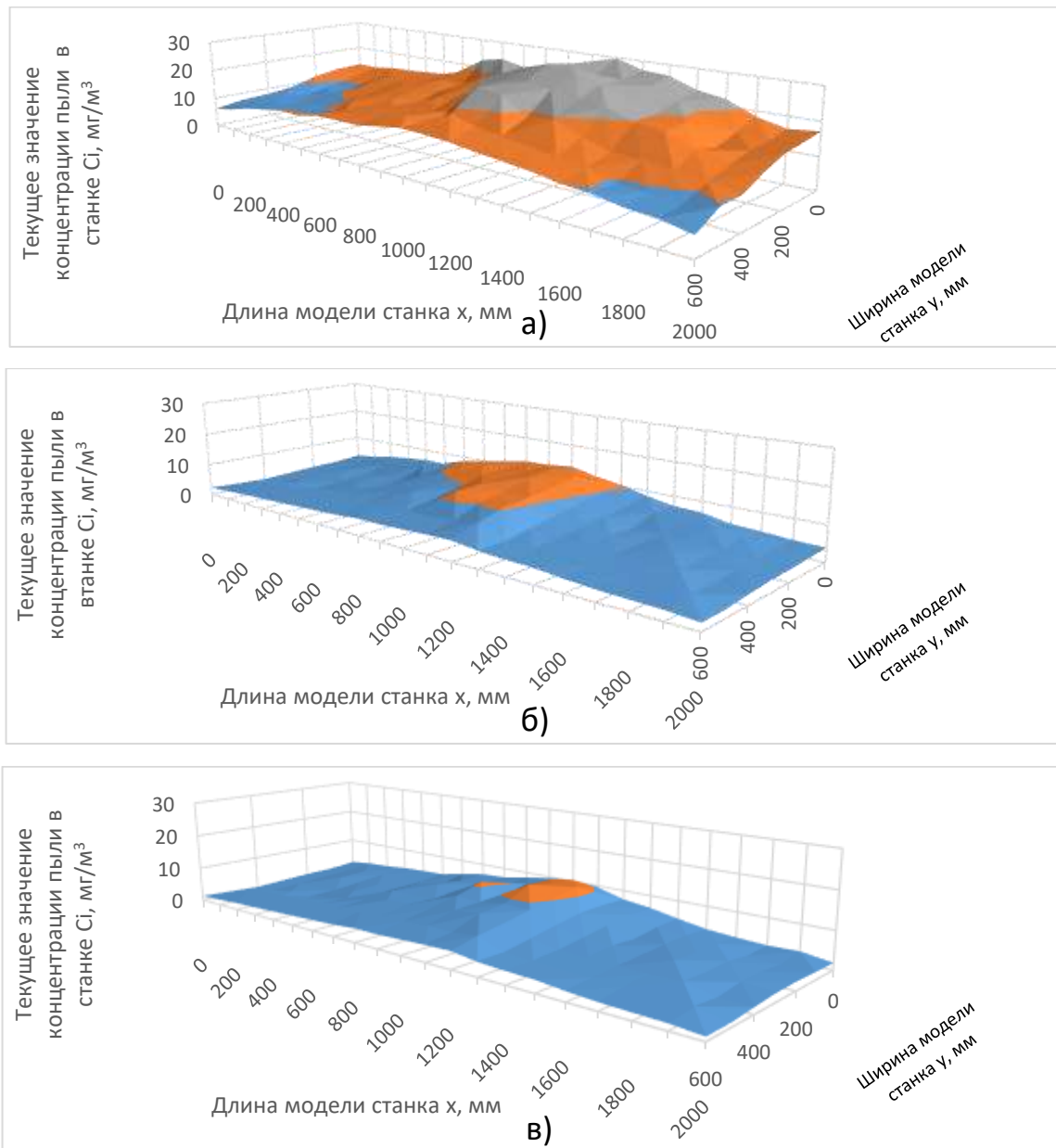
### 4.1 Результаты лабораторных исследований по определению концентраций пыли в разных точках воздушной среды модели станка

В соответствии с разработанной методикой лабораторного эксперимента концентрация пыли замерялась на уровнях  $H$  (высота от пола модели станка) 60 мм, 100 мм и 680 мм. Наибольшие значения были получены на уровне  $H = 100$  мм. В связи с чем данный уровень высоты взят за основной при анализе механизма распространения пыли.

Ниже приведены графические зависимости, отображающие уровни концентрации пыли в модели станка (Рисунок 4.1) на уровне  $H = 100$  мм в разное время после окончания генерации пыли (сразу после окончания генерации ( $t=0$ ), через 180 с. ( $t=180$ ), через 360 с. ( $t=360$ )).

Из рисунка 4.1а, отображающего концентрацию пыли в разных точках модели станка **в начальный момент времени** ( $t = 0$  секунд), т.е. сразу после окончания генерации пыли, видно, что максимальное значение концентрации пыли составляет  $29,8 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  (превышение ПДК достигает 5-ти кратного значения) в точке с координатами ( $x = 1300$  мм;  $y = 0$  мм). Минимальное значение концентрации пыли  $5,9 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  в точке с координатами ( $x = 2000$  мм;  $y = 600$  мм), что ниже ПДК по пыли.

Из рисунка 4.1б, на котором показаны концентрации в разных точках модели станка через **180 с** после окончания генерации, видно, что максимальное значение концентрации пыли составило  $14,2 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  (ПДК по пыли превышен почти в 3 раза) в точке с координатами ( $x = 1100$  мм;  $y = 100$  мм). Минимальное значение концентрации пыли  $1,5 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  в точке с координатами ( $x = 0$  мм;  $y = 400$  мм), что ниже ПДК по пыли.



а)  $H=100$  мм,  $t=0$  с; б)  $H=100$  мм,  $t=180$  с; в)  $H=100$  мм,  $t=360$  с

Рисунок 4.1 – Распространение пыли в модели станка

Из рисунка 4.1 в, на котором показаны концентрации в разных точках модели станка через **360 с** после окончания генерации видно, что максимальное значение концентрации пыли составило  $12,6 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  (ПДК по пыли превышен почти в 2 раза) в точке с координатами ( $x = 1100$  мм;  $y = 200$  мм). Минимальное значение концентрации пыли  $0,5 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  в точке с координатами ( $x = 0$  мм;  $y = 500$  мм), что ниже ПДК по пыли.

Данное исследование позволило установить, что текущая концентрация пыли в любой точке пространства модели станка зависит от расстояния до источника генерации пыли и времени, прошедшего после окончания генерации пыли. Таким образом, лабораторные исследования позволили скорректировать регрессионную модель (2.17) с учётом расстояния от исследуемой точки в пространстве до источника загрязнения (генерации пыли)  $L$ .

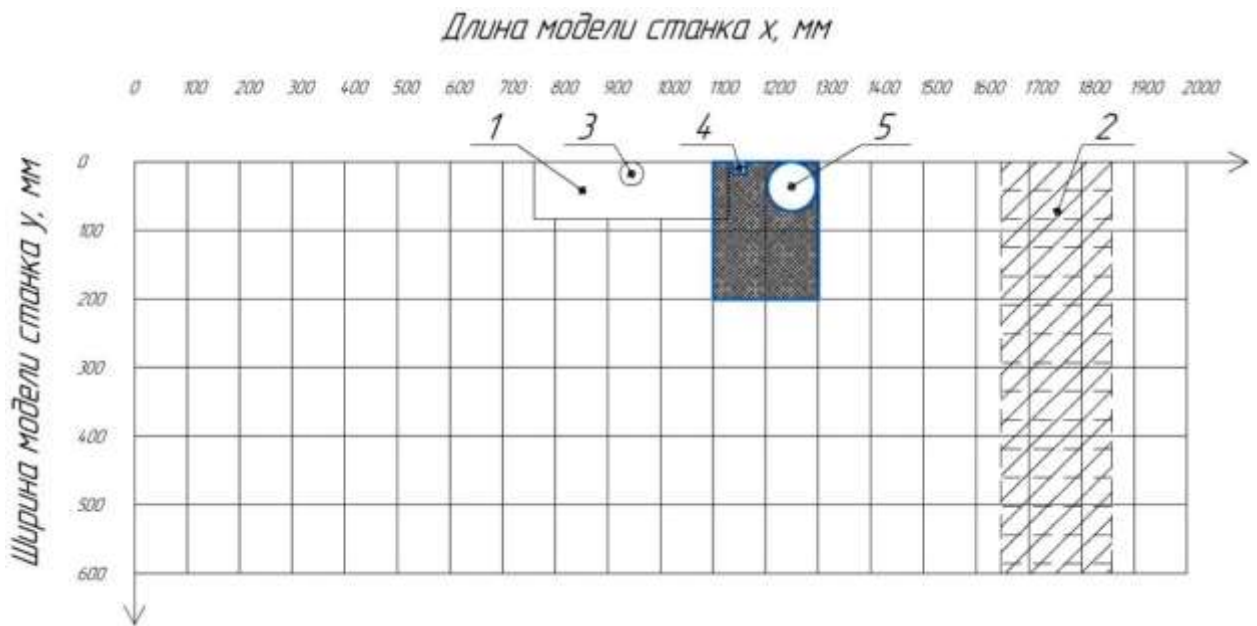
$$C_i = e^{((N(1-\eta)-N(1-\alpha)(1-\eta)-N))t} C_0 + e^{((N(1-\eta)-N(1-\alpha)(1-\eta)-N))t} \frac{C_i^1 N(1-\alpha)(1-\eta) + X_i}{(N(1-\eta)-N(1-\alpha)(1-\eta)-N)} - \frac{C_i^1 N(1-\alpha)(1-\eta) + X_i}{(N(1-\eta)-N(1-\alpha)(1-\eta)-N)} - b_2 L. \quad (4.1)$$

где  $L$  – расстояние от источника генерации пыли до исследуемой точки;

$b_2 = 0,118...0,181$  – коэффициент учитывающий расстояние от источника генерации пыли до исследуемой точки.

Так же проведённый лабораторный эксперимент позволяет определить значения координат точек максимальной концентраций пыли, которые расположены в следующих диапазонах:  $x \in [1100;1300]$ ,  $y \in [0;200]$ , что позволяет определить место размещения датчика пыли и точки забора загрязненного воздуха вытяжным воздуховодом (Рисунок 4.2).

Проведенные лабораторные исследования показали, что несмотря на наличие общеобменной системы вентиляции в станке по содержанию поросят на откорме, в зоне раздачи корма присутствуют значительные превышения концентрации пыли (до 5-ти кратных значений ПДК). Снижение повышенной концентрации до значений ПДК происходит в течении 7-10 мин. Количество подобных «скачков» концентрации пыли в станке достигает 11-12 раз в сутки. Таким образом, учитывая продолжительность активного периода суток у поросят на откорме, получаем, что около 13-15 % времени они находятся в воздушной среде с повышенной концентрацией пыли.



1 – кормушка, источник пыли; 2 – навозоуборочный канал; 3 – канал подачи сухого корма; 4 – датчик пыли; 5 – вытяжной воздуховод.

Рисунок 4.2 – Зона размещения датчика пыли и точка забора загрязненного воздуха вытяжным воздуховодом,  $H=100$  мм

#### 4.2 Результаты лабораторных исследований ЛСОВС

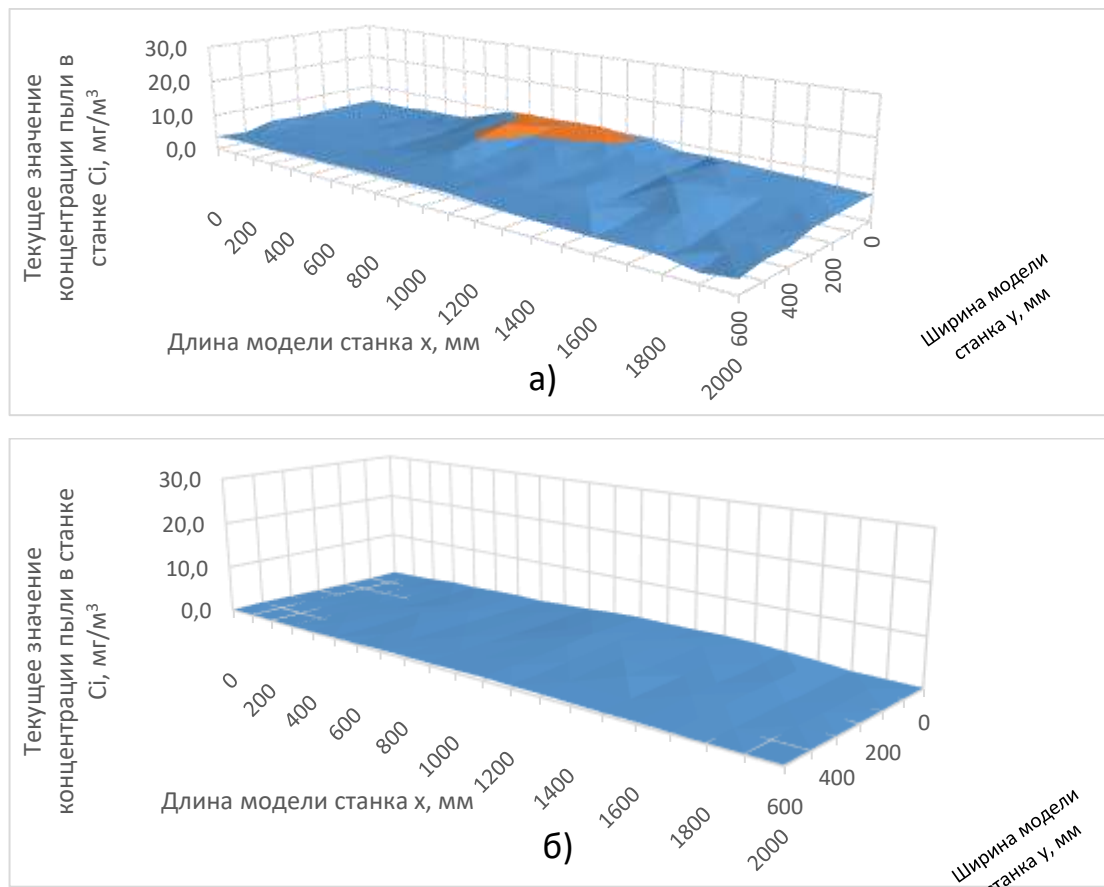
На рисунках 4.3 а, б представлены результаты лабораторных исследований модели станка после установки ЛСОВС.

Из рисунка 4.3 а, на котором показаны концентрации в точках опытной установки **в начальный момент времени** ( $t = 0$  секунд) после окончания генерации, видно, что максимальное значение концентрации пыли при работе ЛСОВС составило  $12,2 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  (ПДК по пыли превышена в 2 раза) в точке с координатами ( $x = 900 \text{ мм}$ ;  $y = 200 \text{ мм}$ ). Минимальное значение концентрации пыли  $2,1 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  в точке с координатами ( $x = 1900 \text{ мм}$ ;  $y = 600 \text{ мм}$ ), что ниже ПДК по пыли.

Из рисунка 4.3 б, на котором показаны концентрации в точках опытной установки через **180 с** после окончания генерации видно, что максимальное значение концентрации пыли при выключенной системе вентиляции составило  $2,1 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  (ПДК по пыли не превышена) в точке с координатами

( $x = 1400$  мм;  $y = 0$  мм). Минимальное значение концентрации пыли достигает нулевых значений.

Таким образом, из представленных графиков можно сделать вывод, что дополнение существующей системы общеобменной ПВВ локальной системой очистки ЛСОВС способствуют снижению концентрации пылевых частиц в области максимальной концентрации пыли. Концентрация пыли в данной точке снижается ниже ПДК через 60 - 80 с. Анализ значений концентрации пыли при проведении лабораторного эксперимента показал адекватность разработанной формулы (4.1).



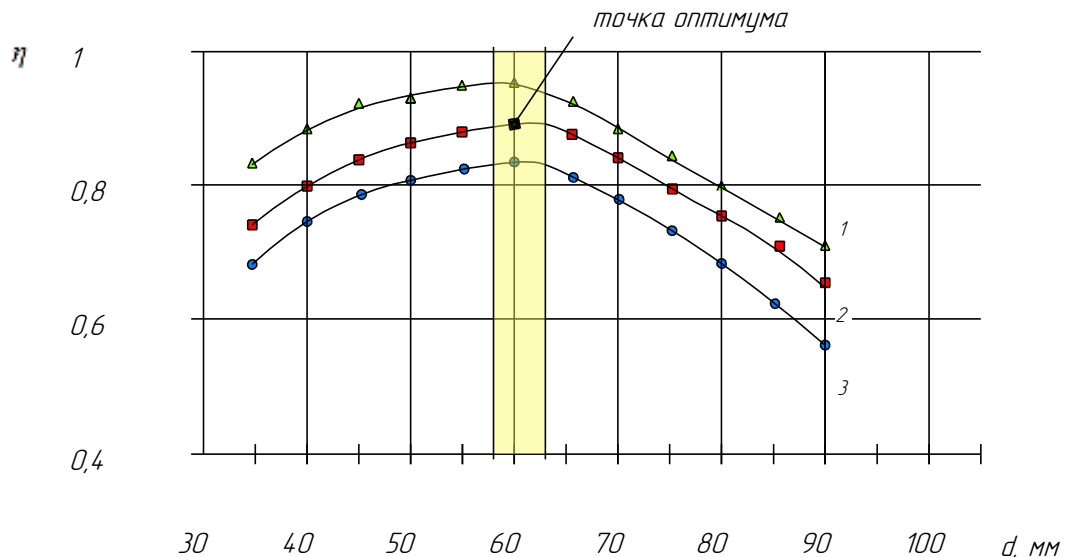
а)  $H=100$  мм,  $t=0$  с; б)  $H=100$  мм,  $t=180$  с

Рисунок 4.3 – Распространение пыли в модели станка

### 4.3 Результаты лабораторных исследований по обоснованию параметров МЭФ

Результаты оптимизации представлены на рисунках 4.4 – 4.7.

На рисунке 4.4 изображены зависимости эффективности  $\eta$  МЭФ от расстояния между коронирующими электродами  $d$  при различных значениях напряженности электрического поля  $E$ . Видно, что с увеличением  $E$  максимум  $\eta$  возрастает, а значение  $d$ , при котором достигается этот максимум, уменьшается. Возрастание максимума  $\eta$  объясняется возрастанием степени очистки в МЭФ.

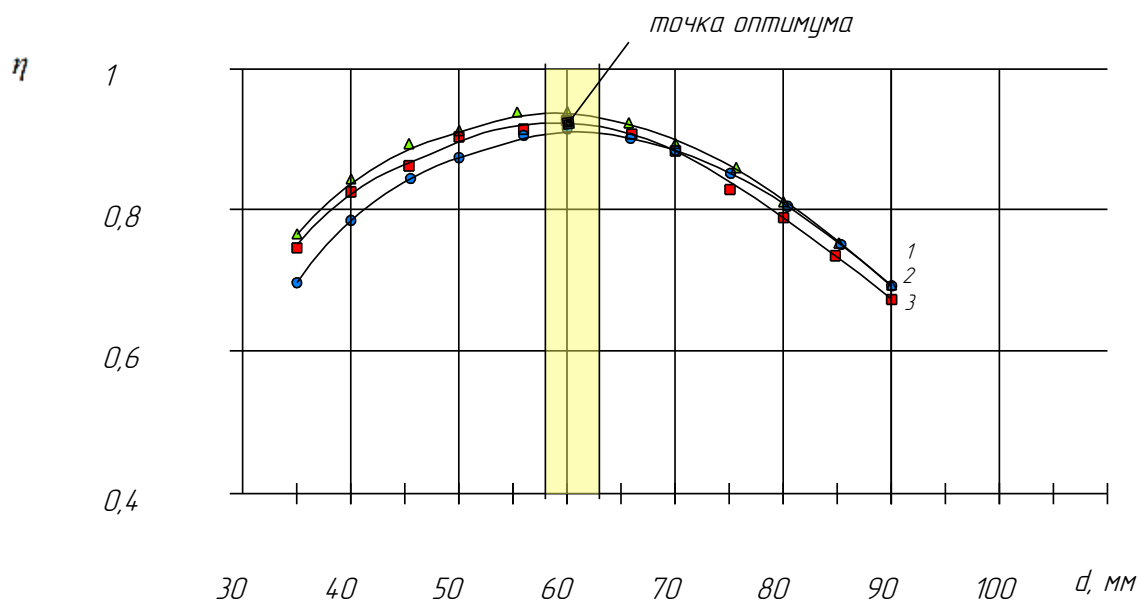


1 -  $U=4,9$  кВ ( $E=5,7 \cdot 10^5$  В/м); 2 -  $U=13,3$  кВ ( $E=5,3 \cdot 10^5$  В/м); 3 -  $U=14,4$  кВ ( $E=2 \cdot 10^5$  В/м);  $h=\text{const}$  ( $2,5 \cdot 10^{-2}$  м);  $v=\text{const}$  (2 м/с);  $\mu=\text{const}$  ( $40 \cdot 10^{-6}$  Па·с);  $r=\text{const}$  ( $5 \cdot 10^{-6}$  м)

Рисунок 4.4 - Зависимость эффективности  $\eta$  МЭФ от расстояния между коронирующими электродами  $d$  при варьировании напряженности  $E$

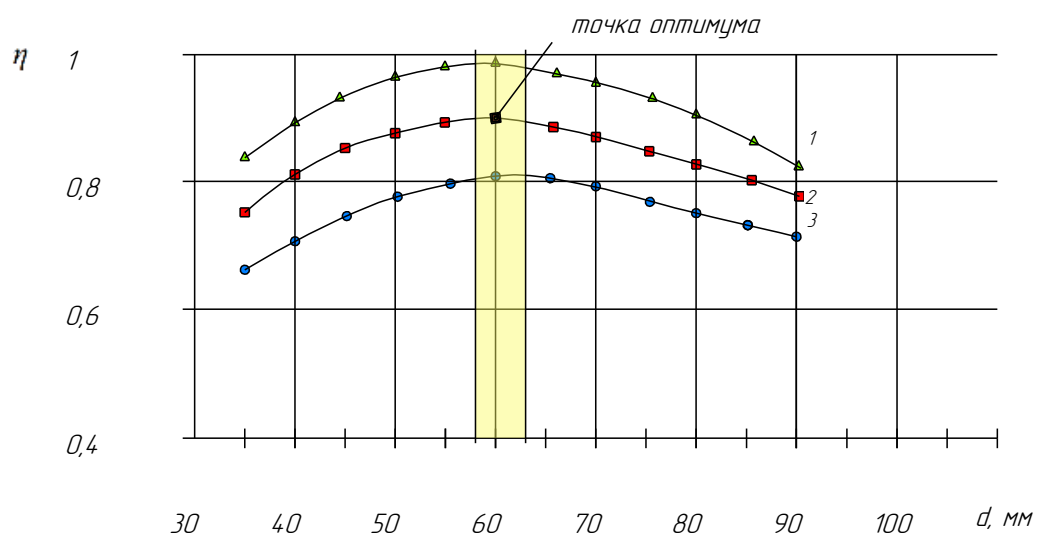
Для поддержания напряженности  $E$  на одном уровне при изменении межэлектродного расстояния  $h$  необходимо изменять напряжение  $U$ . Таким образом напряжение  $U$  для крайних значений интервала составит  $4,9 - 14,4 \pm 0,2$  кВ.

На рисунке 4.5 изображены зависимости  $\eta(d)$  при различных значениях межэлектродного расстояния  $h$ . Изменение межэлектродного расстояния не оказывает существенного влияния на удельный ток коронного разряда и, как следствие, на эффективность очистки воздуха от пыли в МЭФ. В связи с чем в нашем случае целесообразно оставить значение  $h$  на основном уровне 25 мм.



1-  $h=2 \cdot 10^{-2}$  м (4,9 кВ); 2 -  $h=2,5 \cdot 10^{-2}$  м (13,3 кВ); 3 -  $h=4 \cdot 10^{-2}$  м (14,4 кВ);  $E=\text{const}$  ( $5,3 \cdot 10^5$  В/м);  $v=\text{const}$  (2 м/с);  $\mu=\text{const}$  ( $40 \cdot 10^{-6}$  Па·с);  $r=\text{const}$  ( $5 \cdot 10^{-6}$  м)

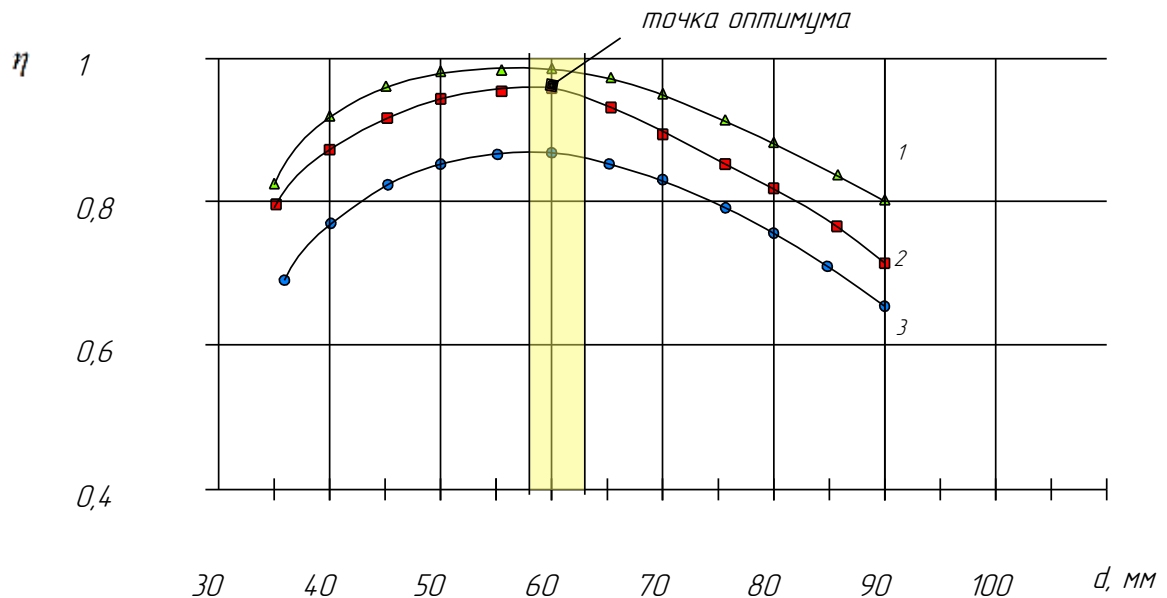
Рисунок 4.5 - Зависимость эффективности  $\eta$  МЭФ от расстояния между коронирующими электродами  $d$  при варьировании межэлектродного расстояния  $h$



1-  $v=0.5$  м/с; 2 -  $v=2$  м/с; 3 -  $v=3$  м/с;  $E=\text{const}$  ( $5,3 \cdot 10^5$  В/м);  $U=\text{const}$  (13,3 кВ);  $h=\text{const}$  ( $2,5 \cdot 10^{-2}$  м);  $\mu=\text{const}$  ( $40 \cdot 10^{-6}$  Па·с);  $r=\text{const}$  ( $5 \cdot 10^{-6}$  м)

Рисунок 4.6 - Зависимость эффективности  $\eta$  МЭФ от расстояния между коронирующими электродами  $d$  при варьировании скорости воздушного потока  $v$

На рисунке 4.6 изображены зависимости  $\eta(d)$  при различных значениях скорости воздушного потока  $v$  в фильтре. С увеличением скорости воздушного потока  $v$  максимальное значение  $\eta$  снижается. Снижение максимума  $\eta$  объясняется тем, что с увеличением скорости уменьшается время нахождения пылевых частиц в зоне зарядки, что ведет к уменьшению получаемого ими заряда.



1-  $r=10$  мкм; 2 -  $r=5$  мкм; 3 -  $r=0,5$  мкм;  $E=const$  ( $5,3 \cdot 10^5$  В/м);  $U=const$  (13,3 кВ);  $h=const$  ( $2,5 \cdot 10^{-2}$  м);  $\mu=const$  ( $40 \cdot 10^{-6}$  Па·с)

Рисунок 4.7 - Зависимость эффективности  $\eta$  МЭФ от расстояния между коронирующими электродами  $d$  при разных размерах пылевых частиц  $r$

На рисунке 4.7 изображены зависимости  $\eta(d)$  при различных значениях размера пылевых частиц. Видно, чем больше размер частицы  $r$  тем эффективность  $\eta$  выше, с ростом размера улавливаемых частиц значение  $d$  при котором достигается максимум эффективности уменьшается.

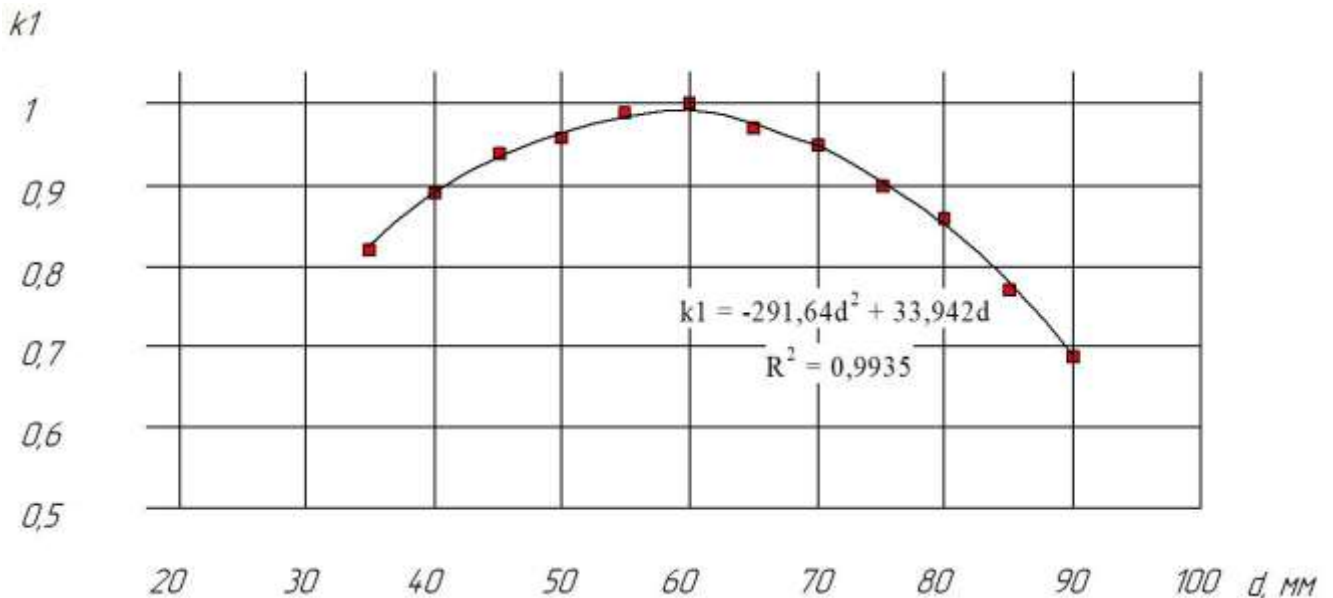
Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 4.4 – 4.7, отображающих динамику изменения эффективности очистки воздуха от пыли в МЭФ в зависимости от расстояния между коронирующими электродами  $d$  при разных значениях варьируемых факторов ( $E$ ,  $h$ ,  $v$ ,  $r$ ), показал, что при значении  $d = 58...63$  мм, достигается максимальное значение эффективности очистки от

пыли в связи с чем, указанные значения расстояния между коронирующими электродами  $d$  можно считать оптимальными для МЭФ [124].

Для определения влияния расстояния между коронирующими электродами  $d$  на значение эффективности очистки от пыли  $\eta$  в целевую функции (2.33) введем поправочный коэффициент  $k1$ , учитывающий расстояние между коронирующими электродами  $d$ :

$$\eta(w(E, r, \mu), l(R, b), h, v, k1(d)) \rightarrow \max. \quad (4.2)$$

На рисунке 13 изображен график зависимости  $k1$  от расстояния между коронирующими электродами  $d$  при значениях основных уровней факторов, характеризующих конструкцию и режимы работы МЭФ и характеризующих воздушную среду (Таблица 2.11).



$$E=5,3 \cdot 10^5 \text{ В/м } (U=13,3 \text{ кВ}); h=\text{const } (2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}); v=\text{const } (2 \text{ м/с});$$

$$\mu=\text{const } (40 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}); r=\text{const } (5 \cdot 10^{-6} \text{ м})$$

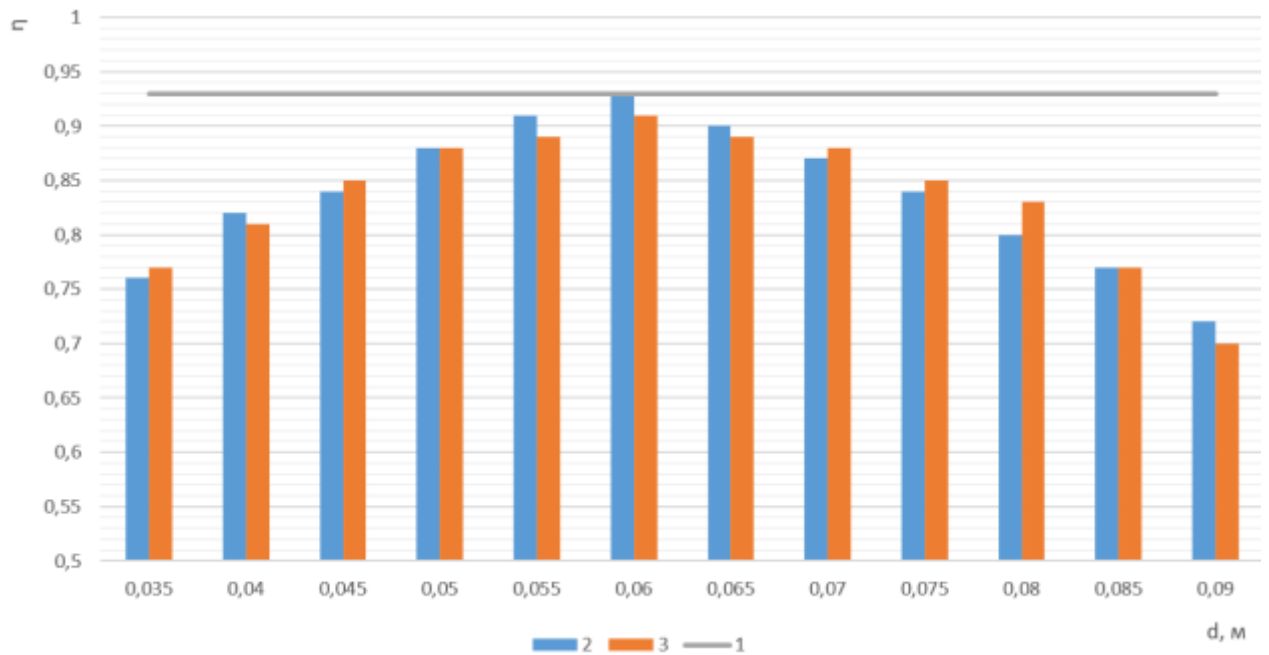
Рисунок 4.8 – Зависимость коэффициента  $k1$  от расстояния между коронирующими электродами  $d$

Учитывая проведенные исследования, целевая функция (2.21) примет вид:

$$\eta = \left(1 - e^{\left(-\frac{wl}{hv}\right)}\right) \cdot k1; \quad (4.3)$$

или

$$\eta = \left( 1 - e^{\left( - \frac{(0,118 \cdot 10^{-10} \frac{E^2 \cdot r}{2\mu}) \left( \frac{1}{2} \sqrt{2Rb-b^2} \cdot \sqrt{R - \frac{2Rb-b^2}{4}} + 2\pi R^2 \frac{90 - \arccos \frac{R-b}{R}}{360} \right)}{h\nu} \right)} \right) \cdot (-291,64d^2 + 33,942d).$$



1 – график эффективности МЭФ (без учета влияния расстояния между коронирующими электродами  $d$ ) полученный по формуле Дейча (3); 2 – график эффективности МЭФ полученный экспериментальным путем (с учетом влияния расстояния между коронирующими электродами  $d$ ); 3 – график эффективности МЭФ (с учетом влияния расстояния между коронирующими электродами  $d$ ) полученный по формуле (17)

Рисунок 4.9 – Зависимости эффективности электрофильтра  $\eta$  от расстояния между коронирующими электродами  $d$  по формуле Дейча, по уточненной формуле и полученная экспериментальным путем

Из графиков, изображенных на рисунке 4.9 видно, что учет значения расстояния между коронирующими электродами  $d$  оказывает существенное влияние на расчет эффективности МЭФ  $\eta$  от пыли. Анализ графиков 2 и 3 показывает сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований по влиянию расстояния между коронирующими электродами  $d$  на эффективность очистки МЭФ  $\eta$  по пыли.

Результаты проведенного исследования показывают, что адекватность теоретических значений, полученных на модели и экспериментальных значений может считаться удовлетворительной, так как значения критериев Стьюдента и Фишера не превышают табличных значений, а коэффициент корреляции показывает связь тесную между сравниваемыми результатами [124].

#### **4.4 Эмпирическая модель зависимости текущей концентрации пыли в воздушной среде помещения от расстояния до источника генерации пыли и времени генерации пыли**

На основе анализа поверхностей распределения пыли в станке (Рисунок 4.1, 4.3) выбраны плоскости А-А и В-В (Рисунок 4.10) для построения зависимостей текущей концентрации пыли от времени и расстояния от точки генерации (рисунок 4.11, 4.12).

Из рисунков 4.11 а, б и 4.12 а, б видно, что значение максимальной концентрации пыли достигается в непосредственной близости к источнику генерации пыли (труба подачи корма), которое уменьшается с увеличением времени и расстояния от источника генерации пыли и достигает ПДК при выключенной системе ЛСВОС через 450-500 с и при включенной системе ЛСВОС через 60 - 80 с.

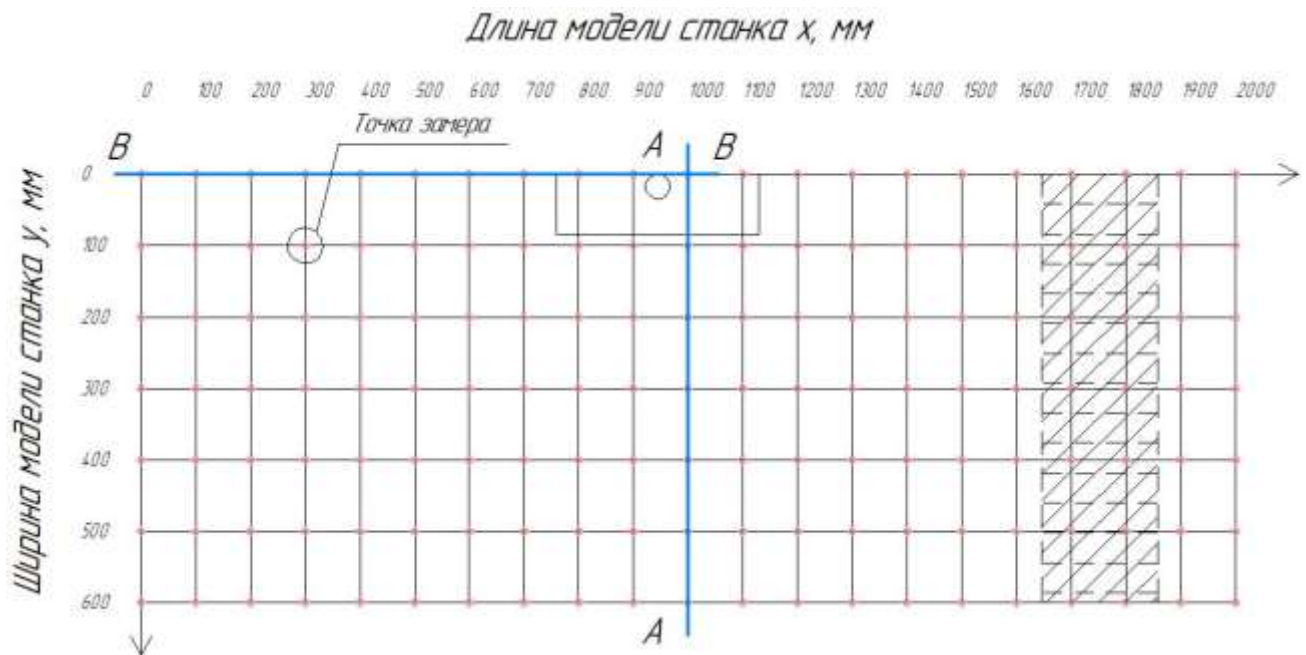


Рисунок 4.10 – Расположение плоскостей А-А и В-В в модели станка

Зависимость текущей концентрации пыли в воздушной среде помещения от времени и от расстояния от источника пыли в помещении очевидна. Однако, какую роль играет каждый из вышеперечисленных факторов в данной зависимости без математической обработки оценить сложно, поэтому было проведено планирование эксперимента, позволяющее по результатам экспериментальных исследований построить уравнение регрессии, позволяющее с достаточной степенью точности описать данную зависимость.

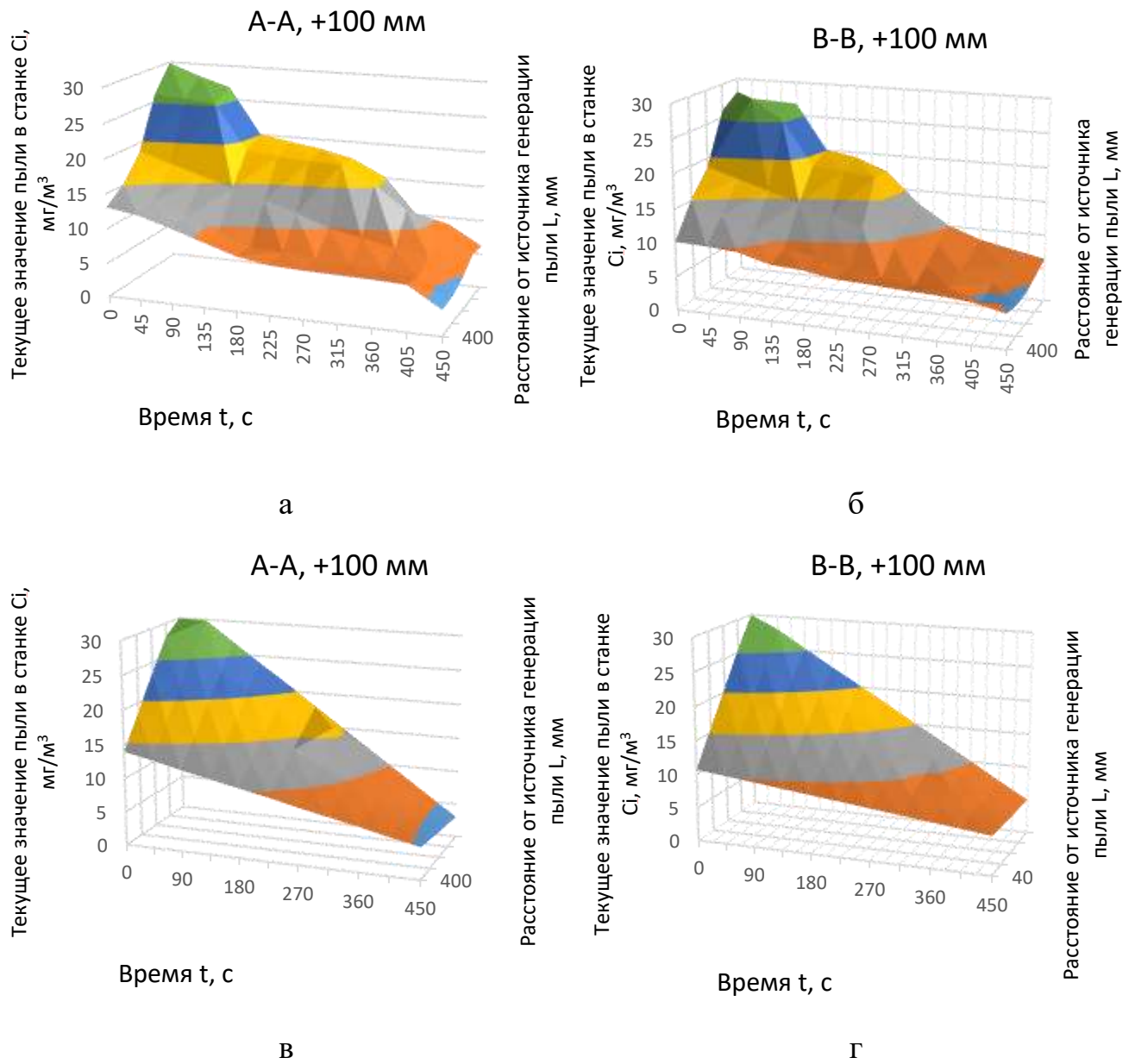


Рисунок 4.11 – Поверхность на высоте 100 мм (без ЛСВОС)

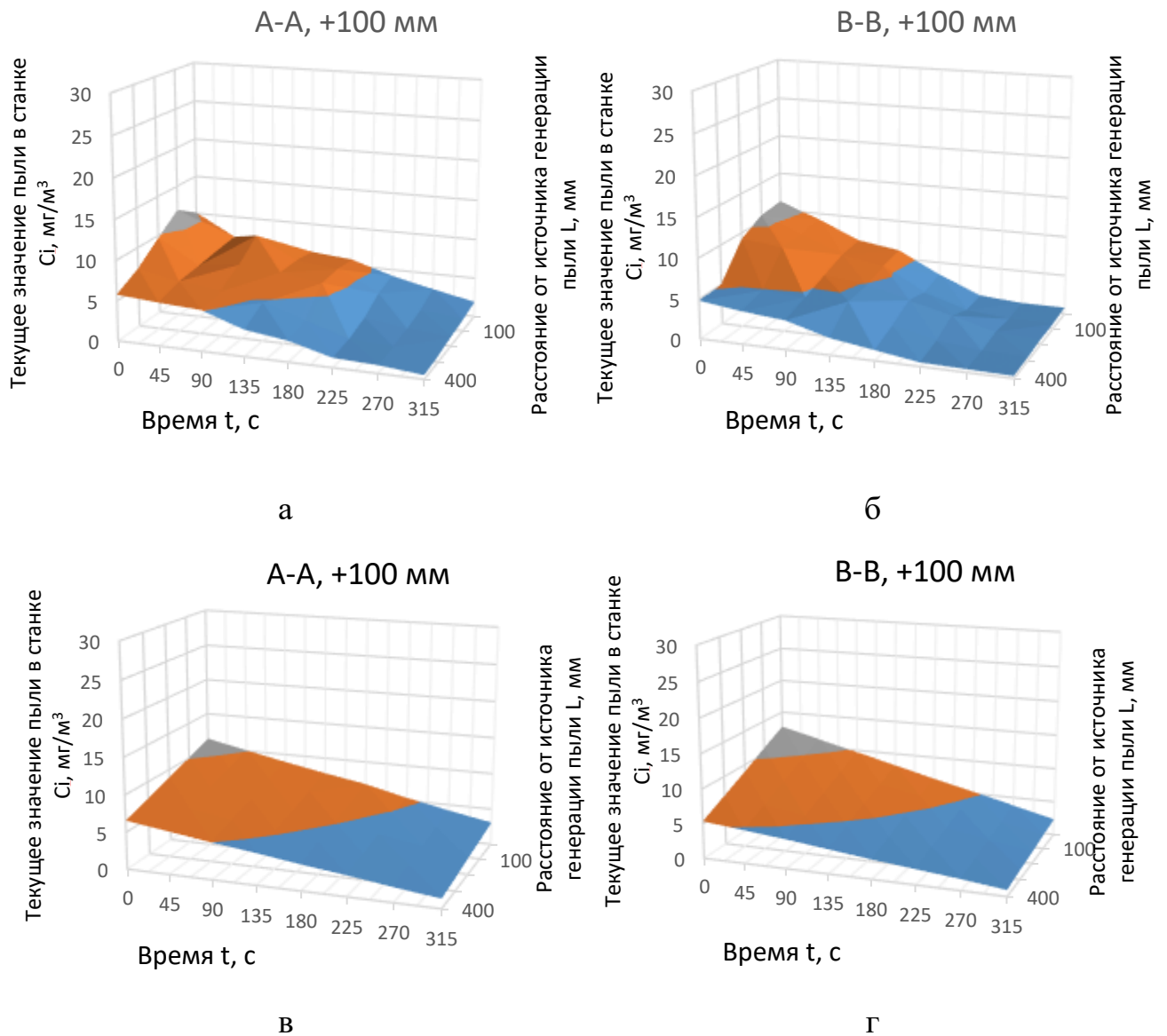


Рисунок 4.12 – Поверхность на высоте 100 мм при работе ЛСВОС

Зависимость текущей концентрации пыли в воздушной среде помещения от расстояния от источника генерации вредности и времени после генерации вредности в помещении очевидна. Однако, какую роль играет каждый из вышеперечисленных факторов в данной зависимости без математической обработки оценить сложно, поэтому было проведено планирование эксперимента, позволяющее по результатам экспериментальных исследований построить уравнение регрессии, позволяющее с достаточной степенью точности описать данную зависимость [124].

Планирование полного факторного эксперимента позволяет получить модель с взаимосвязями вида:

$$y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^k A_{ij} x_i x_j \quad (4.4)$$

где  $y$  – отклик;

$A_0, A_i, A_j$  – коэффициенты регрессии, подлежащие определению;

$x_i, x_j$  – факторы эксперимента;

$k$  – число факторов.

В данном случае число факторов  $k = 2$ , тогда опытные точки можно расположить в вершинах квадрата, построенного в осях  $X_1$  и  $X_2$ , а план эксперимента представить в виде таблицы 4.1.

Таблица 4.1 – Исходная матрица ПФЭ  $2^2$

| № опыта | Фактор |       |           |       |
|---------|--------|-------|-----------|-------|
|         | $X_1$  | $X_2$ | $X_1 X_2$ | $Y$   |
| 1       | +1     | +1    | +1        | $y_1$ |
| 2       | -1     | +1    | -1        | $y_2$ |
| 3       | -1     | -1    | +1        | $y_3$ |
| 4       | +1     | -1    | -1        | $y_4$ |

Фактор  $X_1$ , являющийся расстоянием от источника генерации вредности, колеблется в пределах 0...40 см. Фактор  $X_2$  – это время после генерации вредности в помещении, которая составляет 45...360 с. Для каждого фактора находим центр, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной  $z_i$  от натуральной  $x_i$ . Результаты сводим в таблицу 4.2. Для данного случая уравнение регрессии будет иметь вид:

$$y = A_0 + A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_{12} x_1 x_2 \quad (4.5)$$

В результате эксперимента получаем систему уравнений, в которых коэффициенты регрессии являются неизвестными:

$$\begin{cases} y_1 = A_0 + A_1 + A_2 + A_{12} \\ y_2 = A_0 - A_1 + A_2 - A_{12} \\ y_3 = A_0 - A_1 - A_2 + A_{12} \\ y_4 = A_0 + A_1 - A_2 - A_{12} \end{cases} \quad (4.6)$$

После решения системы получим:

$$A_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}; \quad (4.7)$$

$$A_1 = \frac{y_1 - y_2 + y_3 - y_4}{4}; \quad (4.8)$$

$$A_2 = \frac{y_1 - y_2 - y_3 + y_4}{4}; \quad (4.9)$$

$$A_{12} = \frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4}{4}. \quad (4.10)$$

Подставив в (4.5) – (4.10) значение текущей концентрации пыли в помещении, получим значения коэффициентов регрессии, а именно  $A_0 = 32,75714$ ;  $A_1 = -0,46357$ ;  $A_2 = -0,06349$ ;  $A_{12} = 0,000968$ .

Подставив полученные коэффициенты регрессии в уравнение (4.5), получим эмпирическую модель зависимости изменения текущей концентрации пыли от кратности воздухообмена и генерации пыли в помещении:

$$y = 32,75714 - 0,46357x_1 - 0,06349x_2 + 0,000968x_1x_2. \quad (4.11)$$

Для статистической оценки результатов и проверки воспроизводимости опытов проведём ряд математических расчётов и заполним таблицу 4.2. Для этого необходимо найти среднеарифметическое от значения отклика, рассчитать квадраты отклонений и определить сумму подстрочных дисперсий  $\sum S_{II}^2 = 0,84$ .

Определяем расчётное значение критерия Кохрена:

$$G_{max} = \frac{S_{II\max}^2}{\sum S_{II}^2} = \frac{0,39}{0,84} = 0,464. \quad (4.12)$$

Полученное значение критерия должно удовлетворять условию:

$$G_{\max} \leq G_{табл} \quad (4.13)$$

Число степеней свободы в нашем случае равно  $\gamma_1 = 2$  и  $\gamma_2 = 4$ . Для данных условий выбираем  $G_{табл} = 0,7679$ . Условие (4.12) выполняется, опыт воспроизводим.

Для определения значимости коэффициентов регрессии, необходимо выявить их значимость.

Для этого находим оценку генеральной дисперсии:

$$S^2 = \frac{\sum S_{\Pi}^2}{N} = \frac{0,84}{4} = 0,21. \quad (4.14)$$

где  $N$  – число факторов ( $N = 2^k$ ,  $k$  – число факторов).

Дисперсия определения коэффициентов регрессии:

$$S_A^2 = \frac{S^2}{N \times m} = \frac{0,21}{4 \times 3} = 0,0175. \quad (4.15)$$

где  $m$  – число повторностей.

$$S_A = 0,132;$$

$$v = N(m - 1). \quad (4.16)$$

Коэффициент регрессии значим в том случае, если  $A > S_{At}$ , где  $t$  – критерий Стьюдента, равный для наших условий 2,306. Тогда  $S_{At} = 0,305$ .

Сравнивая коэффициенты регрессии с значением  $S_{At}$ , видим, что коэффициент  $A_2$  незначим и  $A_{12}$  незначим.

Таблица 4.2 - Результаты эксперимента

| №<br>п/п | $X_1$ | $X_2$ | $X_1X_2$ | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_{cp}$ | $y_1 - y_{cp}$ | $y_2 - y_{cp}$ | $y_3 - y_{cp}$ | $(y_1 - y_{cp})^2$ | $(y_2 - y_{cp})^2$ | $(y_3 - y_{cp})^2$ | $\sum(\Delta y)^2$ | $S_{\Pi}^2$ |
|----------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|----------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| 1        | +1    | +1    | +1       | 12,2  | 11,8  | 11,7  | 11,9     | 0,3            | -0,1           | -0,2           | 0,09               | 0,01               | 0,04               | 0,14               | 0,07        |
| 2        | -1    | +1    | -1       | 6,0   | 5,5   | 5,9   | 5,8      | 0,2            | -0,3           | 0,1            | 0,04               | 0,09               | 0,01               | 0,14               | 0,07        |
| 3        | -1    | -1    | +1       | 22,9  | 23,8  | 24,1  | 23,6     | -0,7           | 0,2            | 0,5            | 0,49               | 0,04               | 0,25               | 0,78               | 0,39        |
| 4        | +1    | -1    | -1       | 43,3  | 43,7  | 42,6  | 43,2     | 0,1            | 0,5            | -0,6           | 0,01               | 0,25               | 0,36               | 0,62               | 0,31        |

По уравнению видно (Рисунок 4.11а), что наиболее сильное влияние оказывает фактор  $x_1$  – расстояние от источника пыли, так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент. После него по силе влияния на отклик (текущее значение концентрации пыли) идут: фактор  $x_2$  – время; парное взаимодействие  $x_1x_2$  – сочетание расстояния от источника и времени после загрязнения в помещении. Так как коэффициент при  $x_1x_2$  положительный, то с увеличением этого фактора увеличивается отклик. Коэффициенты при  $x_1$  и  $x_2$  отрицательны, это означает, что с уменьшением фактора  $x_1$  и фактора  $x_2$  значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать. Окончательно уравнение регрессии примет вид:

$$y = 32,75714 - 0,46357x_1. \quad (4.17)$$

Уравнение регрессии имеет вид (Рисунок 4.11б):

$$y = 30,12857 - 0,48571x_1 - 0,0473x_2 + 0,000905x_1x_2. \quad (4.18)$$

Окончательно уравнение регрессии примет вид:

$$y = 30,12857 - 0,48571x_1. \quad (4.19)$$

Уравнение регрессии имеет вид (Рисунок 4.12а):

$$y = 11,27143 - 0,11786x_1 - 0,02603x_2 + 0,00023x_1x_2. \quad (4.20)$$

Окончательно уравнение регрессии примет вид:

$$y = 11,27143 - 0,11786x_1. \quad (4.21)$$

Уравнение регрессии имеет вид (Рисунок 4.12б):

$$y = 12,68571 - 0,18107x_1 - 0,03302x_2 + 0,000468x_1x_2. \quad (4.22)$$

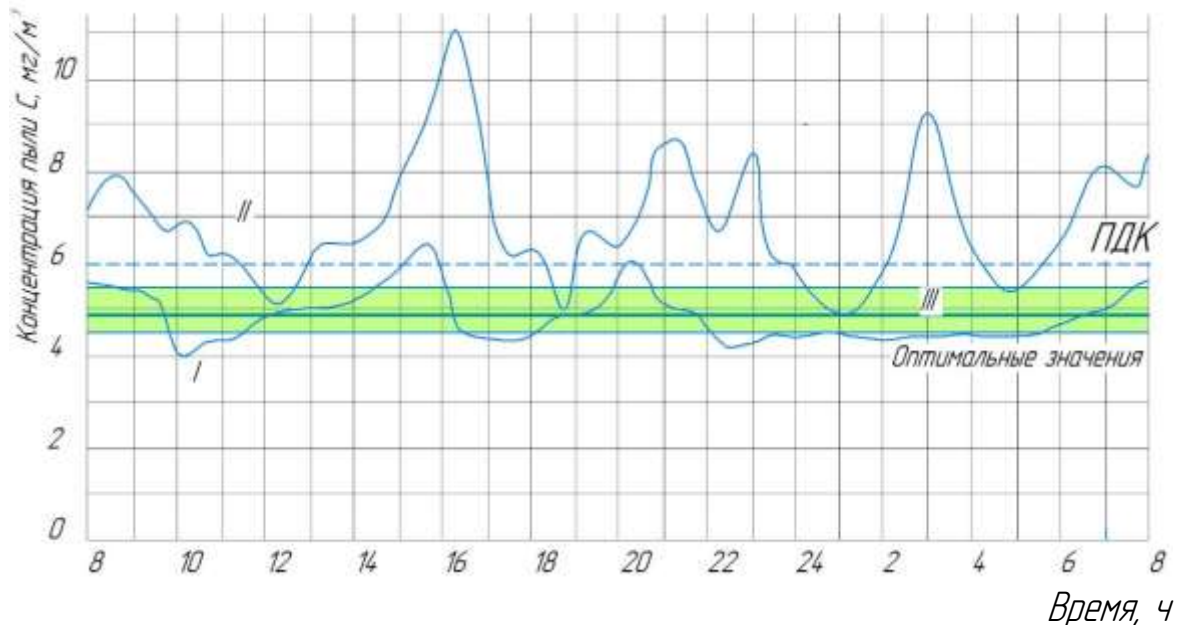
Окончательно уравнение регрессии примет вид:

$$y = 12,68571 - 0,18107x_1. \quad (4.23)$$

Таким образом, лабораторные исследования позволили разработать методику по определению мест установки элементов ЛСОВС, определены места установки датчика контроля пылевой загрязненности и вытяжного воздуховода. И скорректировать регрессионную модель. По уточненной регрессионной модели построены поверхности (Рисунки 4.11 в, г и 4.12 в, г) и сравнены с поверхностями, полученными по опытными данным. При обработке полученных результатов (Рисунок 4.11) был получен коэффициент корреляции  $r_{xy} = 0,92$ ; коэффициент Стьюдента  $t_{ст} = 1,12$  ( $t_T = 2,26$ ) ( $t_{ст} < t_T$ ); критерий Фишера  $F = 1,19$  ( $F_T = 3,29$ ) ( $F < F_T$ ). При обработке полученных результатов (Рисунок 4.12) был получен коэффициент корреляции  $r_{xy} = 0,87$ ; коэффициент Стьюдента  $t_{ст} = 1,26$  ( $t_T = 2,26$ ) ( $t_{ст} < t_T$ ); критерий Фишера  $F = 0,76$  ( $F_T = 3,29$ ) ( $F < F_T$ ).

#### 4.5 Результаты экспериментальных исследований в производственных условиях секциях №16 и №17 для содержания поросят-отъёмышей участка №3 свиногомплекса ООО «Согласие»

Программой исследований предусматривалось изучение влияния ЛСОВС на производственные параметры.



I – опытная секция №17 (с ЛСОВС); II – контрольная секция №16 (без ЛСОВС);  
III - теоретическая кривая

Рисунок 4.13 – Суточное изменение концентраций пыли в станке

Из рисунка 4.13 (кривая II) видно, что концентрация пыли в контрольной секции №16, при работе системы вентиляции без ЛСОВС, достигает до 11,3 мг/м<sup>3</sup> в периоды активности животных. В периоды покоя животных концентрация пыли достигает до 4,9 мг/м<sup>3</sup>. При этом необходимо отметить, что текущие значения концентрации пыли находятся, как выше ПДК, так и выше оптимальных значений. Из рисунка 4.13 (кривая I) видно, что концентрация пыли, в опытной секции №17 при работе ЛСОВС, находится в диапазоне оптимальных значений. В пики активности животных концентрация превышает ПДК не значительно. ЛСОВС переходит в режим «МАХ» и снижает текущую концентрацию пыли ниже нижней

границы оптимальных значений. Из рисунка 4.13 (прямая III) видно, что теоретические значения концентрации пыли, полученные на основании регрессионной модели (4.1), находятся в области оптимальных значений, что говорит о сходимости результатов, полученных опытным путем.

В периоды активности животных текущая концентрация вредностей в воздушной среде животноводческих помещений резко возрастает по сравнению периодами малой активности (не активности), в связи с ростом генерации пыли. ЛСОВС отслеживает данные изменения вредностей в режиме реального времени с помощью датчиков пыли и управляет, согласно написанному алгоритму работы, исполнительными устройствами такими как вентилятор, регулируя кратность частичной рециркуляции.

Производственные испытания ЛСОВС проводились в условиях свинарника-откормочника на 250 голов и показали, что при работе общеобменной ПВВ без ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме (секция №16) значения текущей концентрации пыли достигают  $11,3 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$ , находятся выше оптимальных значений и выше ПДК, а при работе общеобменной ПВВ с ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме (секция №17) значения текущей концентрации пыли достигают  $6,5 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$ , незначительно превышают ПДК и поддерживаются в области оптимальных значений.

В период испытания ЛСОВС по контрольной №16 и опытной №17 секциям велся учет основных производственных показателей. В результате сохранность животных составила в секции №16 – 97,5%, в секции №17 – 97,8%. Среднесуточный привес составил в секции №16 – 670гр., в секции №17 – 685гр. (Данные предприятия).

Полученные результаты показывают, что производственные показатели (привес и сохранность животных) остались практически неизменными по сравнению с результатами в контрольной секции №16, что подтверждено актом производственных испытаний (Приложение Г).

#### 4.6 Расчет показателей экономической эффективности применения ЛСОВС

Опираясь на базовые методики [125-131] и учитывая другие практические рекомендации была определена совокупность расчетов, которая позволяет выполнить технико-экономический анализ и оперативно оценить целесообразность применения ЛСОВС в конкретном помещении животноводческого комплекса.

При применении ЛСОВС дополнительно улучшается экологическая обстановка в районе расположения свинарника, снижается потенциальный ущерб, наносимый окружающей среде путем снижения выброса в атмосферу пыли с удаляемым из помещений воздухом. Кроме этого достигается положительный социальный эффект для персонала, обслуживающего хозяйство, а также для населения, проживающего в районе размещения объекта.

Результатом комплексной очистки воздушной среды в опытной секции в течение цикла (53 дня) выращивания поросят-отъемышей в возрасте от 2 до 4 мес. является повышение технологических показателей животноводства в опытной секции №17 по сравнению с контрольной секцией №16.

При этом параметры микроклимата в помещении поддерживались в нормируемых пределах.

Результаты расчета основных экономических показателей проекта в ценах 2020 г. представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.3 - Основные технологические и технические показатели проекта

| Показатель                               | Ед. изм. | ОС №17 | КС №16 |
|------------------------------------------|----------|--------|--------|
| Количество поросят-отъемышей при посадке | гол.     | 250    | 253    |
| Средний вес при посадке                  | кг       | 20,2   | 20,2   |
| Средний вес на сдаче                     | кг       | 55,7   | 55,5   |
| Средние привесы                          | кг       | 36,31  | 35,5   |
| Падеж                                    | гол.     | 4      | 7      |
| Коэффициент сохранности животных         | %        | 97,8   | 97,5   |

Таблица 4.4 - Основные экономические показатели проекта

| Показатель                                 | Ед. изм.  | Значение |
|--------------------------------------------|-----------|----------|
| Капитальные вложения (К)                   | тыс. руб. | 225,040  |
| Годовые эксплуатационные затраты ( $Z_t$ ) | тыс. руб. | 30,050   |
| Годовой экономический эффект ( $\Xi_t$ )   | тыс. руб. | 151,206  |
| Срок службы                                | лет       | 10       |
| Срок окупаемости                           | лет       | 1,5      |

Окупаемость локальной установки по очистке воздуха на основе МЭФ происходит за счет улучшения технологических показателей животноводства.

Общая величина капитальных затрат  $K$  складывается из капитальных затрат на отдельные элементы установки  $K_i$ . Составляется спецификация оборудования, изделий и материалов, выполняется сметный расчет с учетом текущей стоимости основного оборудования и материалов, транспортировки ЛСОВС на объект, монтажные и наладочные работы.

$$K = \sum K_i; \quad (4.24)$$

$$K_i = Z_{об_i} + Z_{тр_i} + Z_{смр_i} + Z_{пр_i}. \quad (4.25)$$

где  $Z_{об_i}$  - сумма затрат на приобретение, руб.;

$Z_{тр_i}$  - сумма затрат на транспортировку оборудования, руб.;

$Z_{смр_i}$  - сумма затрат на монтажные работы, руб.;

$Z_{пр_i}$  – прочие затраты, руб.

По ранее проведенным расчетам  $K_i = 225040$  руб.

Затраты на эксплуатацию установки в  $t$ -ом году можно выразить следующей формулой:

$$Z_t = Z_{ээ_t} + Z_{обсл_t}. \quad (4.26)$$

где  $Z_{ээ,t}$  - затраты на электроэнергию, потребляемую установкой, руб.;

$Z_{обсл,t}$  - затраты на обслуживание установки действиями дежурного и ремонтного персонала, руб.

Дополнительные затраты на электроэнергию, связанные с установкой нового электрооборудования, рассчитываются по формуле:

$$З_{ээ}_t = \Delta P \cdot t_{ээ} \cdot C_{ээ}. \quad (4.27)$$

где  $\Delta P$  - увеличение расчетной мощности электрооборудования, кВт;

$t_{ээ}$  - годовое время включения электроустановки, рассчитанное из условия работы 8 часов в сутки 260 дней в году, которое составляет 2080 ч/год;

$C_{ээ}$  - средняя (удельная) стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб./кВт·ч.

Затраты на обслуживание установки (слив, залив омывающей жидкости, визуальный контроль работоспособности установки, проведение ТО и ТР – замена масла в редукторах, чистка электрофилтра, вентиляторов и др. оборудования) можно определить по формуле:

$$З_{обсл.t} = T_{обсл} \cdot t_{обсл} + C_{мат}. \quad (4.28)$$

где  $T_{обсл}$  - тарифная ставка работников необходимой специализации, руб./ч;

$t_{обсл}$  - трудозатраты на проведение обслуживания, ч;

$C_{мат}$  - стоимость материалов, необходимых для проведения ТО и ТР, руб.

Затраты на электроэнергию, определяемые по формуле (4.27), равны:

$$З_{ээ}_t = 2,5 \cdot 2080 \cdot 4,5 = 3150 \text{ руб.}$$

Затраты на обслуживание установки, определяемые по формуле (4.28), равны:

$$З_{обсл.t} = 172 \cdot 100 + 9700 = 26900 \text{ руб.}$$

Затраты на эксплуатацию установки в  $t$ -ом году, определяемые по формуле (4.26), равны:

$$З_t = 3150 + 26900 = 30050 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от принятых решений, полученный в  $t$ -ом году, определяем по формуле:

$$Э_t = Э_{тп_i} - З_t. \quad (4.29)$$

где  $Э_{тп_i}$  - экономический эффект за счет улучшения технологических показателей, руб.;

$Z_t$  - эксплуатационные затраты, руб., рассчитываемые по формуле (4.25).

Экономический эффект (руб.), полученный за счет улучшения технологических показателей, можно определить по формуле:

$$\text{Этп}_t = (P_1 \cdot k_{\text{сохр}1} \cdot n_1 - P_2 \cdot k_{\text{сохр}2} \cdot n_2) C_{\text{прод}} \quad (4.30)$$

где  $P_1, P_2, k_{\text{сохр}1}, k_{\text{сохр}2}, n_1, n_2$  - привесы, кг, коэффициент сохранности животных, количество голов при посадке в опытном и контрольном секторах соответственно;

$C_{\text{прод}}$  - среднерыночная стоимость готовой продукции, руб./кг.

Таблица 4.5 - Исходные данные для расчета эксплуатационных затрат

| Наименование показателей                                 | Обозначение       | Единица измерения | Величина | Источник информации |
|----------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|----------|---------------------|
| увеличение расчетной мощности электрооборудования        | $\Delta P$        | кВт               | 2,5      | Расчетные данные    |
| средняя (удельная) стоимость 1 кВт·ч электроэнергии      | $C_{\text{ээ}}$   | руб./кВт·ч.       | 4,5      | Данные предприятия  |
| тарифная ставка электромонтера                           | $T_{\text{обсл}}$ | руб./ч            | 172      | Данные предприятия  |
| трудозатраты на проведение обслуживания                  | $t_{\text{обсл}}$ | ч                 | 100      | Расчетные данные    |
| стоимость материалов, необходимых для проведения ТО и ТР | $C_{\text{мат}}$  | руб.              | 9700     | Расчетные данные    |

Таблица 4.6 - Основные технологические и технические показатели проекта

| Показатель                               | Ед. изм. | ОС №17 | КС №16 |
|------------------------------------------|----------|--------|--------|
| Количество поросят-отъемышей при посадке | гол.     | 250    | 253    |
| Средний вес при посадке                  | кг       | 20,2   | 20,2   |
| Средний вес на сдаче                     | кг       | 55,7   | 55,5   |
| Средние привесы                          | кг       | 36,31  | 35,5   |
| Падеж                                    | гол.     | 4      | 7      |
| Коэффициент сохранности животных         | %        | 97,8   | 97,5   |

Экономический эффект (руб.), полученный за счет улучшения технологических показателей, определяемых по формуле (4.29), равен:

$$\text{Этп}_t = (36,31 \cdot 0,978 \cdot 250 - 35,5 \cdot 0,975 \cdot 253) \cdot 250 = 30209,4 \text{ руб.}$$

Данный экономический эффект был получен за 2 мес. работы установки, при расчете годового эффекта полученную сумму необходимо умножить на 6.

Экономический эффект от принятых решений, полученный в  $t$ -ом году, определяемый по формуле (4.28), равен:

$$\text{Э}_t = 30209,4 \cdot 6 - 30050 = 151206,3 \text{ руб.}$$

Для расчета технико-экономического обоснования срок функционирования ЛСОВС принимается равным 10 лет. Такой срок службы обоснован сроком службы основного оборудования (электроприводы осадительных электродов, вентилятор и др.), в течение которого гарантируется работа установки с надлежащими техническими характеристиками.

Срок окупаемости капиталовложений при использовании ЛСОВС определяется по формуле 4.31:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_i}{\text{Э}_t} \quad (4.31)$$

$$T_{\text{ок}} = 225040 / 151206 = 1,5 \text{ года.}$$

#### 4.7 Основные выводы и результаты

1. Проведены лабораторные испытания, показавшие, что наибольшие значения концентрации пыли были получены на высоте 100 мм между навозоуборочным каналом и кормораздаточной трубкой на расстоянии 150-350 мм до источника генерации пыли (труба подачи корма), максимальное значение концентрации пыли достигает  $29,8 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  и снижается до ПДК через 450-500 с. При ЛСВОС максимальное значение концентрации пыли достигает  $12,2 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$  и снижается до ПДК через 60 - 80 с.

2. Проведены производственные испытания в условиях свиарника-откормочника на 250 голов, показавшие что при работе общеобменной ПВВ без

ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме (секция №16) значения текущей концентрации пыли достигают  $11,3 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$ , находятся выше оптимальных значений и выше ПДК, а при работе общеобменной ПВВ с ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме (секция №17) значения текущей концентрации пыли достигают  $6,5 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$ , незначительно превышают ПДК и поддерживаются в области оптимальных значений.

3. Оптимизация конструкции МЭФ показала, что при значении  $d = 58 \dots 63 \text{ мм}$  достигается максимальное значение эффективности очистки от пыли.

4. Проведены производственные испытания в условиях свинарника-откормочника на 250 голов, показавшие что при работе общеобменной ПВВ без ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме (секция №16) значения текущей концентрации пыли достигают  $11,3 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$ , находятся выше оптимальных значений и выше ПДК, а при работе общеобменной ПВВ с ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме (секция №17) значения текущей концентрации пыли достигают  $6,5 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$ , незначительно превышают ПДК и поддерживаются в области оптимальных значений.

5. Техничко-экономический расчет применения ЛСОВС станка основе МЭФ для содержания поросят на откорме на свинокомплексе ООО «Согласие» показал, что годовой экономический эффект составит 151206,3 руб., срок окупаемости составит 1,5 года.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ состояния воздушной среды станка и механизмов распределения загрязнений выявил: наличие застойных зон воздуха (аэростазов) с критическими значениями концентраций по пыли  $25,5 \pm 3$  мг/м<sup>3</sup>, по сероводороду  $23,1 \pm 1$  мг/м<sup>3</sup>, по аммиаку  $32,3 \pm 1,3$  мг/м<sup>3</sup>. Анализ существующих системы очистки воздуха показал, что наиболее приемлемыми фильтрующими элементами для локальной системы очистки воздуха являются электрофильтры, в том числе МЭФ.

2. Получено уравнение регрессионной модели, позволяющее определить значение текущей концентрации пыли в любой точке станка в зависимости от времени, кратности воздухообмена, коэффициента рециркуляции, эффективности очистки МЭФ, генерации пыли внутри помещения, концентрации пыли в приточном воздухе и от расстояния до источника генерации пыли в станке для содержания поросят на откорме.

3. Разработана ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме, определено место установки датчика пыли и вытяжного воздуховода между навозоуборочным каналом и кормораздаточной трубкой на расстоянии 150-350 мм до источника генерации пыли. Разработан алгоритм работы ЛСОВС.

4. Оптимизация конструкции МЭФ, разработанного для ЛСОВС показала, что при значении  $d = 58 \dots 63$  мм достигается максимальное значение эффективности очистки от пыли.

5. Проведены лабораторные испытания, показавшие, что наибольшие значения концентрации пыли были получены на высоте 100 мм между навозоуборочным каналом и кормораздаточной трубкой на расстоянии 150-350 мм до источника генерации пыли (труба подачи корма), максимальное значение концентрации пыли достигает  $29,8$  мг/м<sup>3</sup>  $\pm 1,5$  % и снижается до ПДК через 450-500 с. При ЛСВОС максимальное значение концентрации пыли достигает  $12,2$  мг/м<sup>3</sup>  $\pm 1,5$  % и снижается до ПДК через 60 - 80 с. Проведены производственные испытания в условиях свинарника-откормочника на 250 голов,

показавшие что при работе общеобменной ПВСВ без ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме (секция №16) значения текущей концентрации пыли достигают  $11,3 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$ , находятся выше оптимальных значений и выше ПДК, а при работе общеобменной ПВСВ с ЛСОВС станка для содержания поросят на откорме (секция №17) значения текущей концентрации пыли достигают  $6,5 \text{ мг/м}^3 \pm 1,5 \%$ , незначительно превышают ПДК и поддерживаются в области оптимальных значений.

6. Техничко-экономический расчет применения ЛСОВС станка основе МЭФ для содержания поросят на откорме на свиномкомплексе ООО «Согласие» показал, что годовой экономический эффект составит 151206,3 руб., срок окупаемости составит 1,5 года.

## Список литературы

1. Научно-исследовательская организация United States Census Bureau, Bureau of the Census. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.census.gov/> (дата обращения: 01.10.2015).
2. Агропортал. Новости агропромышленного комплекса России. Август 31st, 2008 в Научные публикации. Метки: Животноводство. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http:// agroportal.su](http://agroportal.su). (дата обращения: 12.12.2014).
3. Бородин, И.Ф. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов [Текст] / И.Ф. Бородин, Н.И. Кирилин. М.: Колос, 1977. - С. 81, 129.
4. СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*/Минрегион России, введ.2013-01-01.— М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 115 с.
5. Петровский, С. В. Взаимосвязь незаразных патологий у поросят, содержащихся в условиях промышленного комплекса [Текст] / С. В. Петровский, Н. К. Хлебус, В. Н. Целобёнок // Ученые записки учреждения образования Витебская государственная академия ветеринарной медицины : научно-практический журнал. - Витебск: УО ВГАВМ, 2011. - Т. 47, вып. 1. - С. 221-224.
6. Макаренко, М.А. Защита электродвигателя погружного насоса на основе усовершенствования параметров устройства контроля фаз [Текст]: дис. ... кандидата технических наук 05.20.02 / КубГАУ им И.Т. Трибулина. Краснодар. 2018. – 145 с.
7. Энергетический баланс России / Федеральная служба государственной статистики (Росстат). М., 2018. [Электронный ресурс]. –Режим доступа: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/industrial/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/industrial/#) (дата обращения: 17.11.2018).
8. Тихомиров, Д.А. Энергосберегающие электрические системы и технические средства теплообеспечения основных технологических процессов в

животноводстве [Текст]: дис. ...доктора технических наук: 05.20.02 / ФГБНУ ВИЭСХ – Москва, 2015. – 277 с.

9. Мурусидзе, Д.Н. Установки для создания микроклимата на животноводческих фермах [Текст] / Д.Н. Мурусидзе, А.М. Зайцев, Н.А. Степанова и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1979. – 327 с.

10. Плященко, С.П. Микроклимат и продуктивность животных [Текст] / С.П. Плященко, И.И. Хохлова. – Л.: Колос, 1976. – 208 с.

11. Басов, А.М., Возмилов А.Г. Фильтрация вентиляционного воздуха в промышленном птицеводстве. Научн. отчет по теме НИС - 512. № гос. рег. 79032741, Инв. № 849858., ЧИМЭСХ. - Челябинск, 1980. - 51 с.

12. Возмилов, А. Г. Электроочистка и электрообеззараживание воздуха в промышленном животноводстве и птицеводстве [Текст]: Дис. ...д-ра техн. наук: 05.20.02 / ЧИМЭСХ.- Челябинск, 1993.- 337 с.

13. Андреев, Л.Н. Разработка и исследование мокрого однозонного электрофильтра для очистки рециркуляционного воздуха животноводческих помещений [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Л.Н. Андреев. - ЧГАУ. – Челябинск, 2010. – 142 с.

14. Кирпичникова, И. М. Энергосберегающие системы электроочистки воздуха в сельскохозяйственных помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.02 / И.М. Кирпичникова. - ЧГАУ. – Челябинск, 2001. – 318 с.

15. Иванова, С. А. Исследование эффективности очистки воздуха от пыли в сельскохозяйственных малообъемных помещениях на основе использования рециркуляционных электрофильтров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / С.А. Иванова. - ЧГАУ – Челябинск, 2003. - 130 с.

16. Звездакова, О.В. Совершенствование двухзонного электрофильтра для очистки воздуха от пыли в сельскохозяйственных помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздушной среды [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / О.В. Звездакова. - ЧГАУ. – Челябинск, 2009. – 164 с.

17. Дель, М.В. Электрофильтр с трибоэлектрическим генератором для очистки воздуха от пыли в сельскохозяйственных помещениях [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / М.В. Дель. - ЧГАУ. – Челябинск, 2010. – 186с.

18. Тайманов, С.Т. Исследование и разработка системы электроочистки воздуха и дезинфекции яиц в инкубаторе [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / С.Т. Тайманов. - ЧГАУ. – Челябинск, 1995. – 153с.

19. Самарин, Г.Н. Энергосберегающая технология формирования микроклимата в животноводческих помещениях [Текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.02 / Г.Н. Самарин. - Москва, 2009. – 443 с.

20. Астафьев, Д.В. Исследование и разработка электрофильтра – озонатора для очистки и озонирования воздушной среды в цехе инкубации (на примере помещения хранения инкубационных яиц) [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Д.В. Астафьев. - ЧГАУ. – Челябинск, 2010. – 135 с.

21. Возмилов, А. Г. Результаты исследований мокрого однозонного электрофильтра [Текст] / А. Г. Возмилов, В. Н. Мишагин, Л. Н. Андреев // Техника в сельском хозяйстве.- 2009.- № 3.- с. 20-22.

22. Возмилов, А.Г. Результаты производственных испытаний мокрого электрофильтра [Текст] / А. Г. Возмилов, Л.Н. Андреев, Д.В. Астафьев, Б.В. Жеребцов, А. А. Дмитриев // Вестник КрасГау. – 2013. - № 8 – С. 185-192.

23. Пат. 2343362 Российская Федерация, МПК F24F3/16 Мокрый однозонный электрофильтр [Текст] /Возмилов А.Г., Мишагин В.Н., Андреев Л.Н., Астафьев Д.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Челябинский государственный агроинженерный университет». - № 2007124044/06; заявл. 26.06.2007; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.

24. Гауптман, Я. Этология сельскохозяйственных животных [Текст] / Я. Гауптман, Б. Чумлински, Я. Душек и др. Пер. с чешского Б. Н. Пакулева. Под ред. и с предисл. Е. Н. Панова. - М., «Колос», 1977. 304 с.

25. Храмцов, В. В. Зоогигиена с основами ветеринарии и санитарии [Текст] / В. В. Храмцов, Г. П. Табаков - М.: Колос, 2004.- 281с.
26. Калашников, А.П. Справочник зоотехника [Текст] / А.П. Калашников, О.К. Смирнов, Н.И. Стрекозов и др. - М.: «Агропромиздат», 1986.- 589 с.
27. Рекомендации по расчёту и проектированию систем обеспечения микроклимата животноводческих помещений с утилизацией теплоты выбросного воздуха. Рекомендации разработаны институтами «Гипронисельхоз» (Антонов П.П., Павлов Ф.С.), МИМСХ г. Мелитополь (Лебедь А.А., Рубцов Н.А.). - М.: Печатно-множительное производство ВНИЭСХ, 1986.- 78с.
28. Бабаханов, Ю.М., Снижение энергопотребления системы микроклимата в животноводческих помещениях / Ю.М. Бабаханов, Н.А. Степанова, А.П. Шаталов // Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве. ВНИЭСХ. Науч. тр. Том 64, 1985. с. 98-107.
29. Кривова, В.И. О состоянии эпизоотической обстановки в Российской Федерации и предпринимаемых противоэпизоотических мероприятиях по недопущению массовых заболеваний сельскохозяйственных животных: мат-лы субъектов Российской Федерации; под общ. ред. В. И. Кривова // Аналитический вестник. - № 17 (674). - М.: Управления информационных технологий и документооборота Аппарата Совета Федерации, 2017. - С. 76-78.
30. Шкрабак, Р.В. Профессиональная заболеваемость и травматизм животноводства и обоснование их снижения [Текст] / Р.В. Шкрабак // Вестник КрасГАУ- 2008. №3 С 298-303
31. Шарабрин, И.Г. Внутренние незаразные болезни сельскохозяйственных животных [Текст] / И.Г. Шарабрин, В.А. Аликаев, Л.Г. Замарин и др.; Под. ред. И.Г. Шарабрина. М.: Агропромиздат, 1985. 527с.
32. Хорольский, В. Я. Эксплуатация электрооборудования: Учебник. [Текст] / В.Я. Хорольский, М.А. Таранов, В.Н. Шемякин — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 268 с.

33. Коротнеченко, И.С. Охрана окружающей среды: учеб. пособие [Текст] И.С. Коротнеченко, Е.Н. Еськова. Краснояр. гос. ун-т. – Красноярск, 2014. – 502 с.

34. Ragnar Rylander, Richard S. F. Schlling Заболевания вследствие воздействия органической пыли Документ из ИПС «Кодекс» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://base.safework.ru/iloenc?hdoc&nd=857400194&nh=2&spack=110LogLength%3D0%26LogNumDoc%3D857400016%26listid%3D010000000100%26listpos%3D4%26lsz%3D18%26nd%3D857400016%26nh%3D1%26> (дата обращения: 01.10.2014).

35. Салеева, И.П. Аэростазные зоны в производственных помещениях при выращивании бройлеров [Текст] / И.П. Салеева, А.К. Османян, В.В. Малородов // Птица и птицепродукты. -2018.-№3.-С.34-37.

36. Соколов, Г.А. Классификация внутренних аэростазов животноводческих помещений [Текст] / Г.А. Соколов, Д.Г. Готовский // Гигиена содержания и кормления животных - основа сохранения их здоровья и продуктивности: Материалы Всероссийской научно-производственной конференции, г. Орёл, 21-23 сентября 2000 г. // Орёл ГАУ. - Орёл, 2000 г. - С. 142-144.

37. Енохович, А.С. Справочник по физике и технике Справочник [Текст] / А.С. Енохович. М.: Просвещение, 1989. 224 с.

38. Торников, Ф.Г. Зоогигиена в промышленном свиноводстве [Текст] / Ф.Г. Торников – Л: Колос, Ленинградское отделение, 1980. – 229 с.

39. Нормы технологического проектирования свиноводческих ферм крестьянских хозяйств: НТП-АПК 1.10.02.001-00. введ. 15.09.2000. М.: НИПИАгропром, 2000. 52 с.

40. Крум Д., Робертс Б. Кондиционирование воздуха и вентиляция зданий [Текст] / Пер. с англ. Под ред. Е.Е. Карписа. М.: Стройиздат, 1980.-399с

41. Юрков, О.И. Тепло - и массообменные процессы в теплообменнике животноводческих помещений [Текст] / О.И. Юрков // Водоснабжение и санитарная техника. -1972. - 7. - С.

42. Мурусидзе, Д.Н. Установки для создания микроклимата на животноводческих фермах [Текст] / Д.Н. Мурусидзе, А.М. Зайцев, Н.А. Степанова и др.-Изд.2-е, перераб. и доп. // -М.: Колос, 1970.-327 с.

43. Антонов, А.П. Анализ режимов работы вентиляционных установок на фермах [Текст] / А.П. Антонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1983. - №10. -С. 23-26.

44. Дмитриев, А.А. Энергоэффективная система комплексной очистки рециркуляционного воздуха животноводческих помещений [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А.А. Дмитриев. - Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2015. – 110 с.

45. Суслов, А.В. Специфика Российского рынка тепловых насосов и перспективы его дальнейшего развития [Текст] / А.В. Суслов // Тепловые насосы. – 2012. – №1 (4). – С. 31-39.

46. Филиппов, С.П. Перспективы применения тепловых насосов в России [Текст] / С.П. Филиппов, М.Д. Дильман, М.С. Ионов // Энергосовет. – 2011. - №5. – С. 41-45.

47. Черноиванов, В.И. Новые технологии и оборудование для технического перевооружения и строительства свиноводческих ферм и комплексов [Текст] / В.И. Черноиванов, В.Ф. Федоренко, И.В. Ильин и др. - Москва: Росинформагротех. - 2006. - 264 с.

48. Андреев, Л.Н. Повышение продуктивности и энергоэффективности животноводческих предприятий за счёт использования систем рециркуляции вентиляционного воздуха с его очисткой и обеззараживанием [Текст] / Л.Н. Андреев, Б.В. Жеребцов, В.В. Юркин, В.В. Волков // Логос, №1, 2012.

49. Захаров, А. А. Применение тепла в сельском хозяйстве [Текст] / А.А. Захаров. М.: Колос, 1980. - 311 с.

50. Селянский, В.М. Микроклимат в птичниках [Текст] / В.М. Селянский. - М.: Колос. - 1975. - 304 с.

51. Уаддн, Р.А. Загрязнение воздуха в жилых и общественных зданиях [Текст] / Р.А. Уаддн, П.А. Шефф. М.: Стройиздат. 1987. – с.158.
52. Биргер, М.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков. Под общей ред. А.А. Русанова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
53. Федотов. А.Е. Чистые помещения. Проблемы. Теория. Практика [Текст] / Под ред. А.Е. Федотова. М.: АСИНКОМ, 2003. 576 с.
54. Санаев, Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами [Текст] / Ю.И. Санаев. М.: Кондор-Эко, 2009. 163 с
55. Токарев, А.В. Коронный разряд и его применение [Текст] / А.В. Токарев. -Бишкек: КРСУ. - 2009. - 138 с.
56. Energy-efficient and environment friendly ventilation systems in piggeries / Aima Ramata / Riga technical university/ The Faculty of Building and Civil Engineering Institute of Heat, Gas and Water Technology. - Riga. - 2010. - 22 с.
57. Электрофильтры. Требования безопасности и методы испытаний. ГОСТ Р 51707-2001; введ. 01.07.01. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/GOSTR517072001Elektrofilt.html> (дата обращения: 01.10.2014).
58. Электрофильтр. Патент Японии на изобретение № 13480, кл. 72 С 54. 1969.
59. Пат. 575115 СССР, МПК В01D 35/06, В 03 С 3/00 Электрофильтр [Текст] / Стуканов В.И., Шилька М.Ф., Гордая А.И., Иванов В.Н., Кирносова Н.И., Микулевич В.А.; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт безопасности труда в горнорудной промышленности. - № 2096965; заявл. 08.01.1975; опубл. 05.10.1977, Бюл. № 1.
60. Электрофильтр. Авторское свидетельство СССР №762931 кл. В 01 D 35/06, В 03 С 3/16. 1977.
61. Медведев, В.Т. Инженерная экология [Текст] / В.Т. Медведев. - М.: Гардарики, 2002.- 687 с.

62. Страус, В. Промышленная очистка газов: Пер. с англ. [Текст] / В. Страус. М.: Химия, 1981. 616 с
63. Левитов, В.И. Дымовые электрофилтры [Текст] /В. И. Левитов, И.К. Решидов, В..М. Ткаченко и др.; Под общ.ред. В.И. Левитова. - М.: Энергия, 1960. - 446 с
64. Masuda S., Mizumo A., Akutsu K. Initiation condition and mode of back discharge for extremely resistivity powders [Текст]// Records of IEEE/IAS, 1977. Annual Meeting. 1977.182
65. Thank L.C. Back corona [Текст]//Journal of Electrostatics. №6. 1979.
66. Masuda S. Resistivity and back corona [Текст] // Proceeding International Conference on Electrostatic Precipitation, USA. 1981.
67. Masuda S., Nonogaki Y. Detection of back discharge in electrostatic precipitators [Текст] //Records of IEEE/IAS, 1980. Annual Meeting. 1980.
68. Masuda S., Nonogaki Y. Sensing of back discharge and dipolar ionic current [Текст] // Journal of Electrostatics. №10. 1981.
69. Owen P. Dust deposition from a turbulent airsireram. Department of Mechanics of Fluids University of Manchester, 1960.
70. Robinson M. Turbulent gas flow and electrostatic precipitation. Journ. of the Air Pollution Control Association, 1968, №4.
71. Seman G., Penney G. Photographic records of particle trajectories during electrostatic precipitation. IEEE Conf. Rec., 1975.
72. Coopermann P.A. New theory of precipitator efficiency. Atm. Environment, 1971.
73. Clark W.C. The human ecology of global change: unresolved questions. GeoJournal. 1990.
74. Пат. 587968 СССР, МПК В01D 33/06 Электрофилтр [Текст] / Несин В.Н., Павловский Е.И.; заявитель и патентообладатель Предприятие ПЯ А-7229. - № 2111136; заявл. 13.03.1975; опубл. 15.01.1978.

75. Пат. 986459 СССР, МПК В01D 35/06 Приточный электрофильтр [Текст] / Еремеева Т.В., Иванов В.Н., Логинов С.М.; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт безопасности труда в горнорудной промышленности. - № 3315310/23-26; заявл. 03.07.81; опубл. 07.01.83, Бюл. № 1.

76. Пат. 1037930А СССР, МПК В01D 35/06 Электрофильтр [Текст] / Еремеева Т.В., Иванов В.Н., Логинов С.М., Потемка Н.Г.; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт безопасности труда в горнорудной промышленности. - № 3475053/23-26; заявл. 28.07.82; опубл. 30.08.83, Бюл. № 32.

77. Электрофильтр (его варианты). Патент на изобретение №2163167. Москва, 20 февраля 2001г

78. Пат. 1148635 СССР, МПК В01D 35/06, В03С 3/47 Устройство для улавливания высокоомной пыли [Текст] / Несин В.Н.; - № 3591757/23-26; заявл. 10.05.83; опубл. 07.04.85. Бюл. № 13.

79. Возмилов, А.Г. Исследование и разработка двухзонного электрофильтра очистки воздуха в промышленном птицеводстве (Цех инкубации цыплят): Автореф. дис.... канд. техн. наук . Челябинск, 1980.

80. Карасенко, В.А. Электротехнология / В.А. Карасенко, Е.М. Заяц, А.Н. Баран М.: Колос, 2012. 304 с.

81. Пат. 581971 СССР, МПК В 01 D 35/06, В 03 С 3/00 Электростатический пылеулавливатель [Текст] / В. К. Журавлев; заявитель и Казахский политехнический институт им. В. И. Ленина. - № 2047434/23-26; заявл. 19.07.74; опубл. 30.11.77, Бюл. № 44.

82. Пат. 128919 Российская Федерация, МПК F24F Система двухступенчатой очистки воздуха [Текст] / А.Г. Возмилов, Б.В. Жеребцов, Л.Н. Андреев, А.В. Якурнов, Н.И. Смолин.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменская государственная

сельскохозяйственная академия». - № 2012114273; заявл. 11.04.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

83. Возмилов, А.Г. Очистка вентиляционного воздуха свиноферм [Текст]/ А.Г. Возмилов, Л.Н. Андреев, А.А. Дмитриев, В.В. Юркин // Свиноводство. -2015.- №2. - С. 19-20

84. Смолин, Н.И. Исследование режимных характеристик двухступенчатого мокрого электрофилтра в лабораторных условиях [Текст] / Смолин Н.И., Андреев Л.Н., Юркин В.В. // Вестник КрасГАУ. 2016. № 8 (119). С. 115-122.

85. Самарин, Г.Н. Контроль и управление основными параметрами микроклимата животноводческого помещения [Текст]/ Г.Н. Самарин // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». -2008.-№3.-С.19-21.

86. Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий СП 2.2.1.1312-03 [Электронный ресурс]:  
 Режим доступа:  
<http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=LAW&n=102687&req=doc>. (дата обращения: 01.09.2019).

87. Семашко, Н. А. Большая медицинская Энциклопедия. Том 13 Кишечный шов-Корреляция [Текст] / Н. А. Семашко. – М.: Нобель Пресс, 1930. - 404 с.

88. Вильнер, А. М. Кормовые отравления [Текст] / А. М. Вильнер. - СПб.: КолосС , 1974.-408 с.

89. Кузнецов, А. Ф. Гигиена животных: учебник / А. Ф. Кузнецов и др.; под общ. ред. А. Ф. Кузнецова. СПб.: Издательство Квадро, 2015. 488 с

90. Расстригин, В.Н. Развитие систем автоматизированного управления электротепловыми процессами в животноводстве / В.Н. Расстригин, Д.А. Тихомиров // Автоматизация сельскохозяйственного производства: сборник докладов международной научно-технической конференции. – Москва, Углич, 2004. – Ч.2. – С.11–17.

91. Бисов, А.А. Автоматизированная система управления климатическими условиями [Текст] / А.А. Бисов, П.В. Уваров // Молодой ученый. — 2014. — №3. — С. 263-265

92. Бородин, И.Ф. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления (ССУЗ) [Текст] / И.Ф. Бородин - М.: КолосС, 2006. - 352 с.

93. Осафий, В.К. Оптимизация энергетических затрат в сельскохозяйственном производстве [Текст] / В.К. Осафий - Оптимизация и обработка данных. Кишинев: Штиинца, 1987.

94. Возмилов, А.Г. Анализ контроллеров микроклимата животноводческих помещений [Текст] / А.Г. Возмилов, Л.Н. Андреев, В.В. Юркин // Современная техника и технологии, 2013, № 12.

95. Андреев, Л.Н. Автоматизация процессов очистки воздуха электрофильтрами [Текст] / Л.Н. Андреев, В.В. Юркин, В.Н. Агапов, // Современная техника и технологии, 2013, № 12.

96. Буяров, В.С. Научные основы ресурсосберегающих технологий производства мяса бройлеров: моногр. [Текст] / В.С. Буяров, Т.А. Столляр, А.В. Буяров: под общ. ред. д-р с.-х. наук В.С. Буярова. - Орел: Изд-во Орел ГАУ, 2013. - 284 с.

97. Биргер, М.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков и др.; под общ. ред. А. А. Русанова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат. - 1983. - 312 с.

98. ГОСТ Р 50820 – 95 Оборудование газоочистительное и пылеулавливающее. Методы определения запыленности газопылевых потоков. ГОССТАНДАРТ России, М.

99. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий [Электронный ресурс]: СН 245-71; введ. 05.11.71. - Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=ESU;n=5385>. (дата обращения: 24.05.2018).

100. Юдаев И. В. Энергосбережение в сельском хозяйстве [Текст] / Гордеев А. С., Огородников Д. Д // Учебное пособие – М.: «Лань» 2014 – С. 221-255.
101. Карпов В.Н. Введение в энергосбережение на предприятиях АПК: Монография. - СПб.: СПбГАУ, 1999. - 73 с.
102. Методические рекомендации по технологическому проектированию свиноводческих ферм и комплексов РД АПК 1.10.02.04-12. МСХ РФ, М. 2012
103. Мурисидзе, Д.Н. Электромеханизация создания микроклимата в животноводческих помещениях [Текст] / Д.Н. Мурисидзе, Р.Ф. Филонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства.-2003.-№10.-С.12-15.
104. Пат. 142385 Российская Федерация, МПК F24F 7/00 Мокрый однозонный электрофильтр [Текст] / Возмилов А.Г., Смолин Н.И., Андреев Л.Н., Юркин В.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья». - № 2014108265/12; заявл. 04.03.2014; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 8.
105. Возмилов, А. Г. Результаты исследований мокрого однозонного электрофильтра [Текст] / А. Г. Возмилов, В. Н. Мишагин, Л. Н. Андреев // Техника в сельском хозяйстве.- 2009.- № 3.- с. 20-22.
106. Возмилов, А.Г. К определению активной длины осадительного электрода мокрого электрофильтра [Текст] / А.Г. Возмилов, Н.И. Смолин, Л.Н. Андреев, Б.В. Жеребцов //Достижения науки и техники АПК. – 2012. - №12.
107. Возмилов, А.Г. Расчёт основных параметров осадительных электродов мокрого электрофильтра [Текст] /А.Г. Возмилов, В.Н. Мишагин, Л.Н. Андреев // ТвСХ №2 2010.
108. Возмилов, А.Г. Очистка вентиляционного воздуха свиноферм [Текст] / А.Г. Возмилов, Л.Н. Андреев, А.А. Дмитриев, В.В. Юркин // Свиноводство, 2015, №2.

109. Смолин, Н.И. Результаты экспериментальных исследований двухступенчатого мокрого электрофильтра [Текст] / Н.И. Смолин, Л.Н. Андреев, В.В. Юркин // Вестник КрасГАУ №8.

110. Пат. 128919 Российская Федерация, МПК F24F Система двухступенчатой очистки воздуха [Текст] / А.Г. Возмилов, Б.В. Жеребцов, Л.Н. Андреев, А.В. Якурнов, Н.И. Смолин. - № 2012114273; заявл. 11.04.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11.

111. РД-АПК 3.10.07.05-17. Ветеринарно-санитарные требования при проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации животноводческих помещений [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://rulaws.ru/acts/RD-APK-3.10.07.05-17.-Veterinarno-sanitarnye-trebovaniya-priproektirovanii,-stroitelstve,-rekonstru-solt-budafede/> (дата обращения: 12.12.2018).

112. Славин, Р.М. Комплексная механизация и автоматизация промышленного производства [Текст] / Р.М. Славин - М.: Колос-; 1978.- 348 с.

113. Методические рекомендации по применению и исследованию средств очистки и дезинфекции вентиляционного воздуха животноводческих и птицеводческих помещений - М.: ВИЭСХ, 2004.

114. Вестник УКЦ АПИК № 53 Воздушные фильтры и их классификация. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mir-klimata.info/vestnik-ukc-apik-vozdushnye-filtry-i-ih-klassifikaciya/> (дата обращения: 01.03.2018).

115. Пирумов, А.И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А.И. Пирумов - М.: Стройиздат, 1991. 295 с

116. Изаков, Ф.Я. К расчету системы очистки воздуха от пыли в вентилируемых животноводческих помещениях [Текст] / Ф.Я. Изаков, В.Б. Файн // Труды ЧИМЭСХ. Вып. 81. - Челябинск, 1974. - С.130-133.

117. Страус, В. Промышленная очистка газов [Текст] /Пер. с англ. - М.: Химия, 1961. - 616 с.

118. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов фильтрами [Текст] / В.Н. Ужов, Б.И. Мягков - М.: Химия, 1970.

119. Левитов, В. И. Дымовые электрофилтры [Текст] /В. И. Левитов, И.К. Решидов, В.М. Ткаченко и др.; Под общ.ред. В.И. Левитова. - М.: Энергия, 1960. - 446 с.
120. Жебровский, С.П. Электрофилтры [Текст] / С.П. Жебровский - М., Госэнергоиздат. 1950. - 256 с.
121. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов электрофилтрами [Текст] / В.Н. Ужов - М.: Химия, 1981. 390с.
122. Блум, Джереми Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства: пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2015. 336 с
123. Карвинен Теро, Карвинен Киммо, Валтокари Вилле Делаем сенсоры: проекты сенсорных устройств на базе Arduino и Raspberry Pi.: пер. с англ. - М.: ООО «И.Д. Вильямс»: 2015. - 432 с.
124. Изаков, Ф.Я. Планирование эксперимента и обработка опытных данных: учеб. пособие [Текст]/ Ф.Я. Изаков. Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2003. 104 с
125. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. - М.: Экономика, 1978.
126. Тюменская Энергосбытовая Компания, Тарифы на энергоснабжение [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://www.tmesk.ru/predel>. (дата обращения: 01.03.2018).
127. Практические рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике (с типовыми примерами) [Электронный ресурс]: утв. приказом РАО «ЕЭС России» от 07.02.2000 г. № 54, М. - 2000 г. Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293836/4293836510.htm>. (дата обращения: 01.03.2018).
128. Инструкция по определению экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в энергетике. Мин. энергетики и электрификации СССР, М., 1986. [Электронный

ресурс]. - Режим доступа: <http://www.opengost.ru/iso/9324-instrukciya-po-opredeleniyu-ekonomicheskoy-effektivnosti-novoy-tehniki-i-racionalizatorskih-predlozheniy-v-energetike.html> (дата обращения: 01.03.2018).

129. Российская Федерация. Министерство сельского хозяйства. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники / М-во сел. хоз-ва и продовольствия Рос. Федерации. -М.: ГП УСЗ Минсельхозпрода России, 1998. - 219 с.

130. Возмилов, А.Г. Электрооборудование и средства автоматизации в агропромышленном комплексе [Текст] / учебное пособие: в 2 ч. Часть 1. Основы электропривода. / А. Г. Возмилов, М. Я. Ермолин, И. М. Кирпичникова, В. Н. Сажин; Челяб. гос. агроинженер. ун-т. – Челябинск. - 2008. - 134 с

131. Информация о розничных ценах на отдельные виды социально значимых продовольственных товаров первой необходимости в Заводоуковском городском округе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zavodoukovsk.admtymen.ru/mo/Zavodoukovsk/economics/more.htm?id=11001442@cmsArticle> (дата обращения: 01.03.2018).

## **Приложения**

## Приложение А - Основные технические характеристики воздушных фильтров

Таблица А.1 - Основные технические характеристики воздушных фильтров

| Тип         | Вид       | Класс<br>эффективности | Воздушная нагрузка на входное сечение, м <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> |            | Сопротивление при допустимой воздушной нагрузке |                                    | Пылеемкость при достижении сопротивления, г/м <sup>2</sup> | Средняя начальная запыленность очищаемого воздуха, мг/м <sup>3</sup> |            | Способ регенерации | Влияние на ионный состав воздуха | Влияние на газовый состав очищаемого воздуха |
|-------------|-----------|------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|
|             |           |                        | рекомендуемая                                                          | допустимая | начальное                                       | конечное при указанной пылеемкости |                                                            | допустимая                                                           | предельная |                    |                                  |                                              |
| 1           | 2         | 3                      | 4                                                                      | 5          | 6                                               | 7                                  | 8                                                          | 9                                                                    | 10         | 11                 | 12                               | 13                                           |
| Волокнистые | Ячейковые | I                      | 1,66                                                                   | 1,94       | 100                                             | 300                                | 430                                                        | 0,05                                                                 | 0,15       | Смена материала    | Деионизация воздуха              |                                              |
| Сухие       | Ячейковые | I                      | 0,139                                                                  | 0,278      | 100                                             | 500                                | 100                                                        | 0,01                                                                 | 0,05       | Смена фильтра      | то же                            |                                              |
|             | Карманные | II                     | 1,66                                                                   | 1,94       | 60                                              | 300                                | 1400                                                       | 1                                                                    | 2          | Смена материала    | то же                            |                                              |

| Тип                         | Вид        | Класс<br>эффективности | Воздушная<br>нагрузка на<br>входное<br>сечение,<br>м <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> |            | Сопротивление при<br>допустимой<br>воздушной нагрузке |                                          | Пылеемкость при достижении<br>сопротивления, г/м <sup>2</sup> | Средняя<br>начальная<br>запыленно<br>сть<br>очищаемог<br>о воздуха,<br>мг/м <sup>3</sup> |            | Способ<br>регенерации     | Влияние на ионный состав<br>воздуха   | Влияние на газовый состав<br>очищаемого воздуха |
|-----------------------------|------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                             |            |                        | рекомендуема<br>я                                                                  | допустимая | начальное                                             | конечное при<br>указанной<br>пылеемкости |                                                               | допустимая                                                                               | предельная |                           |                                       |                                                 |
| 1                           | 2          | 3                      | 4                                                                                  | 5          | 6                                                     | 7                                        | 8                                                             | 9                                                                                        | 10         | 11                        | 12                                    | 13                                              |
| Электрические<br>двухзонные | Агрегатные | II                     | 1,94                                                                               | 2,22       | 10/40**                                               | 10/150**                                 | 1500                                                          | 2                                                                                        | 10         | Промывка<br>водой         | Ионизация<br>положительными<br>ионами |                                                 |
|                             | Тумбочные  | II                     | 0,278                                                                              | 2,22       | 10/40**                                               | 10/150**                                 | 1500                                                          | 2                                                                                        | 10         | Промывка<br>водой         | то же                                 |                                                 |
| Волокнистые<br>сухие        | Панельные  | III                    | 1,94                                                                               | 2,78       | 60                                                    | 300                                      | 570                                                           | 0,1                                                                                      | 0,5        | Смена<br>материала        | Деионизация<br>воздуха                |                                                 |
|                             | Рулонные   | III                    | 2,78                                                                               | 2,78       | 30                                                    | 300                                      | -                                                             | 4                                                                                        | 30         | Пневматическая<br>очистка | то же                                 |                                                 |

| Тип                          | Вид       | Класс<br>эффективности | Воздушная<br>нагрузка на<br>входное<br>сечение,<br>м <sup>3</sup> /см <sup>2</sup> |            | Сопротивление при<br>допустимой<br>воздушной нагрузке |                                          | Пылеемкость при достижении<br>сопротивления, г/м <sup>2</sup> | Средняя<br>начальная<br>запыленно<br>сть<br>очищаемог<br>о воздуха,<br>мг/м <sup>3</sup> |            | Способ<br>регенерации                           | Влияние на ионный состав<br>воздуха | Влияние на газовый состав<br>очищаемого воздуха |
|------------------------------|-----------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                              |           |                        | рекомендуема<br>я                                                                  | допустимая | начальное                                             | конечное при<br>указанной<br>пылеемкости |                                                               | допустимая                                                                               | предельная |                                                 |                                     |                                                 |
| 1                            | 2         | 3                      | 4                                                                                  | 5          | 6                                                     | 7                                        | 8                                                             | 9                                                                                        | 10         | 11                                              | 12                                  | 13                                              |
|                              | Ячейковые | III                    | 1,66                                                                               | 1,94       | 60                                                    | 150                                      | 2400                                                          | 1                                                                                        | 3          | Промыв<br>ка водой                              | то же                               |                                                 |
| Губчатые                     | Ячейковые | III                    | 1,66                                                                               | 1,94       | 70                                                    | 150                                      | 350                                                           | 0,3                                                                                      | 0,5        | Промыв<br>ка водой<br>или<br>пневмат<br>ическая | Деионизация<br>воздуха              |                                                 |
| Волокнист<br>ые<br>смоченные | Рулонные  | III                    | 2,22                                                                               | 2,78       | 60                                                    | 300                                      | 450                                                           | 0,5                                                                                      | 1          | Смена<br>материа<br>ла                          | то же                               |                                                 |

| Тип      | Вид             | Класс<br>эффективности | Воздушная нагрузка на входное сечение, $\text{м}^3/\text{см}^2$ |            | Сопротивление при допустимой воздушной нагрузке |                                    | Пылеемкость при достижении сопротивления, $\text{г}/\text{м}^2$ | Средняя начальная запыленность очищаемого воздуха, $\text{мг}/\text{м}^3$ |            | Способ регенерации           | Влияние на ионный состав воздуха | Влияние на газовый состав очищаемого воздуха |
|----------|-----------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|
|          |                 |                        | рекомендуемая                                                   | допустимая | начальное                                       | конечное при указанной пылеемкости |                                                                 | допустимая                                                                | предельная |                              |                                  |                                              |
| 1        | 2               | 3                      | 4                                                               | 5          | 6                                               | 7                                  | 8                                                               | 9                                                                         | 10         | 11                           | 12                               | 13                                           |
| Масляные | Самоочищающиеся | III                    | 1,66                                                            | 1,94       | 80                                              | -                                  | 7-15**<br>*                                                     | 0,5                                                                       | 1          | Непрерывная промывка в масле | то же                            |                                              |
|          | Ячейковые       | III                    | 1,66                                                            | 1,94       | 60                                              | 150                                | 2600                                                            | 1                                                                         | 3          | Непрерывная промывка в масле | то же                            |                                              |

\*) в таблице не рассмотрены технические характеристики ряда фильтров (ФШ, ФРП, ФяУ), т. к. они относятся к фильтрам третьего класса и по основным показателям идентичны фильтрам этого класса, приведенным в таблице;

\*\*) в числителе дано начальное сопротивление без использования противоуносного фильтра, в знаменателе с использованием противоуносного фильтра.

\*\*\*) в процентах от массы масла, залитого в ванну фильтра.

## Приложение Б - Программный код для ЛСОВС

```

#include <BaseMQ.h>
#include <MQ4.h>
#include <MQ135.h>
#include <TroykaMQ.h>
#include <DHT.h>
#define PIN_MQ4      A1
#define PIN_MQ4_HEATER 12
MQ4 mq4(PIN_MQ4, PIN_MQ4_HEATER);
#define DHTPIN 10
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
#define PIN_MQ135_HEATER 11
#define ANALOGPIN 2
float airthreshold[3] = {
    400, 400, 800};
MQ135 gasSensor = MQ135(ANALOGPIN);
int measurePin = 4;
int ledPower = 8;
int samplingTime = 280;
int deltaTime = 40;
int sleepTime = 9680;
float voMeasured = 0;
float calcVoltage = 0;
float dustDensity = 0;
void setup() {
    // открываем последовательный порт
    Serial.begin(9600);

```

```

    pinMode(ledPower,OUTPUT);
    // включаем нагреватель
    mq4.heaterPwrHigh();
    Serial.println("Heated sensor");
    {
        Serial.println("DHTxx test!");
        dht.begin();
    }
}

void loop() {
    // если прошёл интервал нагрева датчика
    // и калибровка не была совершена
    if (!mq4.isCalibrated() && mq4.heatingCompleted()) {
        // выполняем калибровку датчика на чистом воздухе
        mq4.calibrate();
        // выводим сопротивление датчика в чистом воздухе (Ro) в serial-порт
        Serial.print("Ro = ");
        Serial.println(mq4.getRo());
    }
    // если прошёл интервал нагрева датчика
    // и калибровка была совершена
    if (mq4.isCalibrated() && mq4.heatingCompleted()) {
        // выводим отношения текущего сопротивление датчика
        // к сопротивлению датчика в чистом воздухе (Rs/Ro)
        Serial.print("Ratio: ");
        Serial.print(mq4.readRatio());
        // выводим значения газов в ppm
        // выводим значения газов в ppm
        Serial.print(" Methane: ");

```

```

Serial.print(mq4.readMethane());
Serial.println(" ppm ");
delay(100);
}
{
    float ppm = gasSensor.getPPM();
    Serial.print(" CO2: ");
    Serial.print(ppm);
    Serial.println(" ppm ");
    delay(1000);
}
{
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();

    if (isnan(t) || isnan(h)) {
        Serial.println("Failed to read from DHT");
    }
    else {
        Serial.print("Humidity: ");
        Serial.print(h);
        Serial.print(" %\t");
        Serial.print("Temperature: ");
        Serial.print(t);
        Serial.println(" *C");
        delay(100);
    }
    {
        digitalWrite(ledPower,LOW); // power on the LED

```

```
delayMicroseconds(samplingTime);
voMeasured = analogRead(measurePin); // read the dust value
delayMicroseconds(deltaTime);
digitalWrite(ledPower,HIGH); // turn the LED off
delayMicroseconds(sleepTime);
// 0 - 3.3V mapped to 0 - 1023 integer values
// recover voltage
calcVoltage = voMeasured * (3.3 / 1024);
dustDensity = 0.17 * calcVoltage - 0.1;
Serial.print("Raw Signal Value (0-1023): ");
Serial.print(voMeasured);
Serial.print(" - Voltage: ");
Serial.print(calcVoltage);
Serial.print(" - Dust Density: ");
Serial.println(dustDensity);
delay(1000);
}
}
}
```

## Приложение Г - Акт внедрения результатов научно исследовательской работы

|                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Утверждаю:</p> <p>Главный зоотехник</p> <p>ООО «Согласие»</p>  <p style="text-align: right;">В.П. Подойников<br/>«    »    2020г.</p> | <p>Утверждаю:</p> <p>Ректор Государственного аграрного<br/>университета Северного Зауралья</p>  <p style="text-align: right;">Е.Г. Бойко<br/>«    »    2020г.</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**АКТ**  
**производственной проверки**

Мы, нижеподписавшиеся: представители предприятия свиногомплекса ООО «Согласие» главный зоотехник Подойников В.П., начальник участка №3 Казанцев П.В., инженер цеха воспроизводства Билолюбский Е.В. с одной стороны и представители ФГБОУ ВО «Государственного аграрного университета Северного Зауралья» к.т.н. доцент кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства» Андреев Л.Н., преподаватель кафедры «Энергообеспечение сельского хозяйства» Юркин В.В. с другой стороны, составили настоящий акт о том что в период с 10.12.19-01.02.20 гг на свиногомплексе ООО «Согласие» была произведена производственная проверка экспериментального образца локальной системы очистки воздушной среды (ЛСОВС) станка на основании мокрого электрофилтра (МЭФ). Указанный экспериментальный образец ЛСОВС выполнен ГАУСЗ по собственной инициативе.

Производственная проверка проводилась в секциях №16 и №17 участка №3 свиногомплекса. В секции №16 система (ЛСОВС) отсутствовала. В секции №17 система очистки воздуха на основе МЭФ работала круглосуточно и ежедневно (53 дня) под управлением ЛСОВС. Количество животных составило в секции №16 – 253 головы, в секции №17 – 250 голов. Средняя масса одного животного составила в день посадки 20,2 кг, в день высадки в секции №16 – 55,5 кг, в секции №17 – 55,7 кг. Продолжительность

пробытия животных в секции составила 53 дня.

В результате сохранность животных составила в секции №16 – 97,5%, в секции №17 – 97,8%. Среднесуточный привес составил в секции №16 – 670гр., в секции №17 – 685гр.

Представители предприятия:

В.П. Подойников

  
(подпись)

П.В. Казанцев

  
(подпись)

Е.В. Билолюбский

  
(подпись)

Представители ГАУСЗ:

Л.Н. Андреев

  
(подпись)

В.В. Юркин

  
(подпись)

## Приложение Д - Патент на полезную модель



Автор(ы): *Возмилов Александр Григорьевич (RU), Смолин  
Николай Иванович (RU), Андреев Леонид Николаевич (RU),  
Юркин Владимир Валерьевич (RU)*

РР



«Ресурсосберегающая система автоматического регулирования параметров микроклимата в животноводческих помещениях»

