

На правах рукописи



**Романюк Елена Васильевна**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ АСПИРАЦИЕЙ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ  
ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

Специальность 2.3.3. – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Федоров Андрей Владимирович**

Официальные оппоненты: **Матвейкин Валерий Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
технический университет», кафедра  
«Информационные процессы и управление»,  
заведующий

**Манохин Вячеслав Яковлевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет», кафедра техносферной и  
пожарной безопасности, профессор

**Владова Алла Юрьевна**  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБУН Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова Российской академии наук,  
лаборатория 41, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБУ ВНИИПО МЧС России

Защита диссертации состоится «28» сентября 2022 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.01, созданного на базе Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте: <https://academygps.ru/upload/iblock/80d/80ddd78ab5224ec67f7cb382441be13b.pdf>

Автореферат разослан «11» мая 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Р.Ш. Хабибулин

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Для целого ряда производств, деятельность которых связана с образованием и обращением горячей пыли, эффективная система предотвращения пожаров является залогом безопасного функционирования и обеспечением требований пожарной безопасности в рамках российского законодательства. К таким производственным объектам относятся предприятия химической, пищевой, деревообрабатывающей, фармацевтической, металлообрабатывающей, добывающей и других отраслей экономики государства. Способами исключения условий образования горючей среды (пылевоздушной смеси) на таких производствах являются, прежде всего, применение устройств защиты производственного оборудования, исключающих выход горючих веществ в помещение, или устройств, исключающих образование в помещении горючей среды, а также автоматизация технологических процессов, связанных с обращением горючей среды. На производстве таким устройством является система аспирации, ее работа в автоматизированном режиме значительно повышает уровень пожарной безопасности, а также безопасность производства для здоровья людей и окружающей среды.

Согласно международной статистике (2018-2020 гг.) ежегодно в мире происходит порядка 200 взрывов и пожаров на производстве, причиной которых является горючая пыль. В 80 % из приведенных случаев технологические процессы были оснащены системами аспирации, и в 60% из них аспирация была автоматизирована. Это указывает на объективно существующие проблемы в организации работы аспирационных систем и недостаточной разработанности теории их автоматизации.

Сегодня автоматизированные системы управления широко применяются в непрерывных технологических процессах, однако теория регулирования, используемая в производстве, не может быть применима при управлении системами безопасности в полной мере. Это связано с тем, что обеспечение безопасности – не только непрерывное поддержание нормального технологического режима, но и грамотная комплексная реакция на нештатные ситуации и аварии, возникающие всегда неожиданно.

Возникновение техногенной аварии невозможно предсказать без досконального знания технологического процесса, поэтому основой для автоматизации систем безопасности являются знания особенностей процесса. Основой надежности - мобильность и многоуровневость систем управления средствами обеспечения защиты. Особенностью систем защиты является дискретность их состояний, а спецификой управления - алгоритмы, привязанные к определенным плохо предсказуемым событиям, зависимым от времени и места возникновения. Классическая теория автоматизации не справляется с такой задачей, поэтому следует привлечь методы и средства, используемые в теории управления, вооружиться новыми эмпирическими знаниями о технологическом процессе.

Автоматизация систем аспирации в большинстве случаев ограничивается элементарным уровнем, подразумевающим только включение и выключение всей системы, хотя с учетом многообразия конструкций и механизмов действия пылеуловителей, являющихся ключевыми элементами аспирации, способы автоматизированного регулирования через них представляются перспективными.

Учитывая вышесказанное, актуальным является разработка нового научного подхода к автоматизированному управлению аспирацией, учитывающему нестационарность и дискретность возникающих состояний объекта управления, а также новые возможности автоматизированной нормализации работы с помощью инновационных пылеуловителей.

**Степень разработанности темы исследования.** Над вопросами эффективного пылеулавливания работали такие отечественные и зарубежные исследователи как Е.А. Штокман, Гордон Г.М., А.Ю. Вальдберг, Ю.В. Красовицкий и другие. В их трудах тема эффективного управления системами аспирации в целом и автоматизации в частности затронута в общих чертах.

Теория автоматизированного управления технологическими процессами, в том числе применительно к рассматриваемым техническим системам, разрабатывалась такими учеными, как А.А. Красовский, Г.С. Поспелов, А.С. Шаталов, А.И. Кухтенко, В.С. Пугачев и другие.

Вопросы автоматизации процессов обеспечения безопасности занимают такие современные ученые как Н.Г. Топольский, А.В. Федоров, А.Н. Членов, Н.Л. Сальников, Д.И. Пуцев, О.С. Кочетов и другие.

Исследования указанных выше ученых позволяют определить лишь некоторые аспекты автоматизированного управления системами производственной аспирации, не представляя единой концепции решения проблемы. В существующих работах, как и в других литературных источниках, отсутствует описание работы аспирации производственных объектов с фильтрами-пылеуловителями во взрывоопасных режимах, соответственно нет методик и алгоритмов, позволяющих нейтрализовать аварийные ситуации и обеспечивать высокоэффективное функционирование.

**Целью диссертационного исследования** является создание научных основ автоматизации систем управления производственной аспирацией и обеспечения ее пожарной безопасности на производствах, связанных с обращением горючей пыли, на основе новой концепции управления производственной аспирацией посредством предупреждения аварийных режимов работы пылеуловителей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий комплекс задач.

1. Обоснование необходимости разработки автоматизированных систем управления аспирацией пылящих производств на основе анализа пожарной опасности технологических процессов и производств, а также существующих систем, методов и средств контроля эффективности и обеспечения безопасности.

2. Создание на основе существующих методик обоснования и выбора пылеулавливающего оборудования единой системы идентификации пылеуловителя для производственной аспирации с учетом взрывопожароопасных свойств производственных пылегазовых потоков как части автоматизированной системы управления аспирацией.

3. Разработка и научное обоснование принципиального подхода к созданию многоуровневых автоматизированной системы управления предупреждением и противопожарной защитой (АСУППЗ) аспирации с фильтрами-пылеуловителями и ее интеграции в АСУТП производством.

4. Разработка технического и программного обеспечения АСУППЗ аспирацией для экспериментальных исследований и производственного использования.

5. Получение эмпирических данных и формулировка основных закономерностей кинетики общего перепада давлений на фильтровальных слоях различного типа для предотвращения аварийных режимов работы аспирации.

6. Разработка математического обеспечения и алгоритмов функционирования АСУППЗ аспирацией.

7. Создание инновационных технических средств для реализации управляющих функций АСУППЗ аспирацией.

**Объектом диссертационного исследования** является система управления технологическим процессом аспирации пылегазовых потоков на производстве.

**Предмет исследования** – математическое, информационное, алгоритмическое и техническое обеспечения создания автоматизированных систем управления производственной аспирацией и обеспечения пожарной безопасности производств, связанных с образованием и обращением горючей пыли.

**Научная новизна** работы заключается в следующем.

1. Разработаны комплекс алгоритмов и их информационное обеспечение, представляющих собой систему идентификации пылеуловителя и позволяющих осуществить выбор и идентификацию пылеуловителя для системы аспирации на основе справочных, частично справочных и частично экспериментальных и исключительно экспериментальных данных.

2. Разработаны теоретические основы автоматизации системы управления предупреждением и противопожарной защитой (АСУППЗ) аспирации с фильтрами-пылеуловителями на основе контроля общего перепада давлений как управляющей функции с учетом впервые описанного аварийного режима работы фильтра – экзоссии, и регулирования состояния аспирации путем смены режимов работы фильтров, а также их конфигурации с применением специальных инновационных конструкций.

3. Предложен метод повышения надежности и эффективности АСУ аспирацией путем создания дополнительных подсистем контроля режимов работы (супервизора) и обеспечения пожарной безопасности, который обеспечивается моделью взаимодействия систем текущей диагностики состояния аспирации и

супервизора на основе впервые предложенной многомерной цепи полумарковского процесса.

4. Разработаны и апробированы структура, техническое и программное обеспечения АСУ аспирацией для экспериментальных исследований и промышленного использования.

5. Получены математические модели, заложенные в основу работы систем управления аспирацией для диагностики и прогнозирования времени возникновения аварийных режимов работы фильтров в системе аспирации и обеспечивающие текущую диагностику и супервизорную функцию АСУ аспирацией с однослойными и двухслойными фильтрами-пылеуловителями.

6. Разработана методика интеграции АСУ аспирацией с подсистемами АСУ производством, учитывающая информационную среду на основе комбинированной модели сетей Петри с приоритетом и сетей Маркова и реализован на их основе концептуальный подход к созданию интегрированной системы управления безопасностью производства (ИСУБП) как выделенному комплексу функций по обеспечению безопасности в структуре производственной АСУ.

7. Предложен новый метод реализации регулирующих функций АСУ посредством применения новых конструктивных решений фильтров-пылеуловителей.

**Теоретическая значимость** работы заключается в следующем.

1. Создание методов и алгоритмов идентификации пылеуловителя в системе производственной аспирации на основе справочных и экспериментальных данных.

2. Разработка методологии, научных основ и формализованных методов построения автоматизированной системы управления предупреждением и противопожарной защитой аспирации на основе контроля режима работы фильтра-пылеуловителя и использования мобильной структуры и (или) конструкции фильтра для реализации регулирующих функций системы.

3. Экспериментальное обнаружение, теоретическое и математическое описание аварийного режима работы фильтра – экзосции.

4. Создание методик, алгоритмов обеспечения работы АСУ аспирацией с фильтрами-пылеуловителями, а также структуры и принципов построения таких АСУ на основании обнаруженных эмпирически и описанных математически закономерностей кинетики общего перепада давлений на фильтрах-пылеуловителях различного вида.

5. Предложена концепция работы интегрированной системы управления безопасностью производства (ИСУБП), связанного с обращением горючих пылей.

**Практическая значимость** работы заключается в следующем.

1. Разработаны алгоритмы и программы идентификации пылеуловителя для системы аспирации на основе:

- исключительно справочных данных;
- частично справочных и частично экспериментальных данных;
- полностью экспериментальных данных.

2. Разработано техническое и программное обеспечение (Свидетельства государственной регистрации № 2014610850, 2017614784, 2020612201) для автоматизированной системы управления работой системы аспирации.

3. Разработана методика двойного контроля состояния фильтра и идентификации аварийных режимов на основе текущих замеров общего перепада давлений на фильтре и работы цифрового двойника процесса.

4. Разработаны и подтверждены патентами РФ способы (алгоритмы) для текущего распознавания и прогнозирования аварийных ситуаций в системе аспирации с однослойными и двухслойными фильтрами-пылеуловителями (патенты №№ 2743560, 2746369).

5. Разработаны конструкции фильтров-пылеуловителей (патенты №№ 2474463, 2629683, 2656304, 164866, 169127, 2656304), позволяющие реализовывать регулирующие функции автоматизированной системы идентификации пылеуловителя и контроля работы аспирации с фильтрами.

6. Разработаны технические решения для реализации функций пламяпреграждения и пламягашения в системах аспирации производств, связанных с обращением горючей пыли (патенты №№ 2597535, 2657692, 2713685).

7. Создан опытный образец АСУ, включающий подсистему мониторинга фильтровальных установок с применением проводной и беспроводной связи и модульную фильтровальную установку.

**Методология и методы исследования.** В ходе диссертационного исследования использовались закономерности процесса фильтрования и механики аэрозолей; экспериментально-статистические методы с использованием факторного планирования; принятые методики аэродинамических и пылегазовых замеров НИИОГАЗ; методы дифференциального исчисления; элементы теории вероятностей и математической статистики; физического, математического и имитационного моделирования; стереометрии; основы теории построения алгоритмов и программ высокого уровня; теории марковских процессов, сетей Петри и имитационного моделирования.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Комплекс алгоритмов и их информационное обеспечение, представляющих собой систему идентификации пылеуловителя и позволяющих осуществить выбор и идентификацию пылеуловителя для системы аспирации на основе справочных, частично справочных и частично экспериментальных и исключительно экспериментальных данных.

2. Теоретические основы автоматизации системы управления предупреждением и противопожарной защитой (АСУППЗ) аспирации с фильтрами-пылеуловителями на основе контроля общего перепада давлений как управляющей функции с учетом впервые описанного аварийного режима работы фильтра – экзосции, и регулирования состояния аспирации путем смены режимов работы фильтров, а также их конфигурации с применением специальных инновационных конструкций.

3. Метод повышения надежности и эффективности АСУ аспирацией путем создания дополнительных подсистем контроля режимов работы (супервизора) и обеспечения пожарной безопасности, который обеспечивается моделью взаимодействия систем текущей диагностики состояния аспирации и супервизора на основе впервые предложенной многомерной цепи полумарковского процесса.

4. Структура, техническое и программное обеспечения АСУ аспирацией для экспериментальных исследований и промышленного использования.

5. Математические модели, заложенные в основу работы систем управления аспирацией для диагностики и прогнозирования времени возникновения аварийных режимов работы фильтров в системе аспирации и обеспечивающие текущую диагностику и супервизорную функцию АСУ аспирацией с однослойными и двухслойными фильтрами-пылеуловителями.

6. Методика интеграции АСУ аспирацией с подсистемами АСУ производством, учитывающая информационную среду на основе комбинированной модели сетей Петри с приоритетом и сетей Маркова и реализованный на их основе концептуальный подход к созданию интегрированной системы управления безопасностью производства (ИСУБП) как выделенному комплексу функций по обеспечению безопасности в структуре производственной АСУ.

7. Новый метод реализации регулирующих функций АСУ посредством применения новых конструктивных решений фильтров-пылеуловителей.

**Степень достоверности.** Полученные в диссертационной работе результаты обосновываются теоретическими и практическими сведениями, представленными в известных научных работах и публикациях; подтверждаются использованием апробированных научных положений и методов исследования, корректным применением математического аппарата и сертифицированных программ моделирования. Теоретические разработки подтверждаются результатами апробации, внедрения и экспериментальной проверкой отдельных теоретических положений. При этом максимальное расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований не превышает 16% с доверительной вероятностью 0,95.

**Апробация результатов.** Теоретические и практические результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 40 международных научно-практических конференциях, научных форумах и конгрессах.

Результаты работы отмечены на выставках и конкурсах:

– II Международной выставке изобретений и инноваций (Воронеж, ВГТА, 2017) в номинации «Лучшая инновационная разработка в интересах защиты, спасения и безопасности человека» (серебряная и бронзовая медали);

– Международном салоне «Комплексная безопасность-2017» (Ногинск, 2017) и «Комплексная безопасность-2019» (Москва, 2019);

– Ежегодном межвузовском конкурсе инновационных проектов «Кубок инноваций» в 2018 (Воронеж), третье место;

– конкурсе НИОКР и монографий, проводимом Национальной академией наук пожарной безопасности в 2018 г.

**Практическую реализацию** имели следующие результаты исследования.

1) Техническое (МФУ) и программное обеспечение (Свидетельства государственной регистрации № 2014610850, 2017614784, 2020612201) для автоматизированной системы управления работой системы аспирации успешно прошло апробацию на Воронежском вагоноремонтном заводе.

2) Комплекс алгоритмов и база данных, позволяющие осуществить выбор и идентификацию пылеуловителя для системы аспирации на основе справочных, частично справочных, частично экспериментальных и исключительно экспериментальных данных внедрены в производственную деятельность Воронежского мукомольного комбината, ООО «Модификация» при совершенствовании систем управления аспирацией цехов модификации древесины, ООО «ОЛ-ТЕКС» при разработке АСУ аспирацией текстильного производства.

3) Методы и алгоритмы двойного контроля состояния фильтра и идентификации аварийных режимов используются для мониторинга состояния рукавных фильтров системы аспирации на участках текущего ремонта и окрасочных работ депо ГУП «Мосгортранс», в цехах ООО «Модификация» и ООО «ОЛ-ТЕКС».

4) Заключен лицензионный договор с ООО «ВНИТЕХ» (номер государственной регистрации договора 58/10 от 10.11.2010 г на использование конструкции фильтра.

5) Метод интеграции системы управления аспирацией с учетом отнесения помещений и зданий к категории по взрывопожарной опасности и оценки дискретности технологических процессов в автоматизированную систему управления производством принят к внедрению в депо ГУП «Мосгортранс».

6) Научно-методические результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в учебный процесс на кафедре информационных и управляющих систем Воронежского государственного университета инженерных технологий при изучении учебных дисциплин «Управление техническими системами», «Автоматизированные системы управления», «Системы управления химико-технологическими процессами»; на кафедре систем управления и информационных технологий в строительстве Воронежского государственного технического университета при изучении учебных дисциплин «Автоматизация технологических процессов и производств» и др.

7) Научно-методические результаты, полученные в диссертационной работе и выполненные в рамках НИОКР «Разработка автоматизированной системы контроля взрывобезопасной работы фильтров-пылеуловителей с несвязанной структурой зернистого слоя», использованы в учебном процессе на кафедре «Пожарная автоматика» Академии ГПС МЧС России.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 186 работ, в том числе 49 работ – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК России, 6 работ индексируются в международной базе SCOPUS, изданы 2 научные монографии,

получены 12 патентов на изобретение и полезные модели, 3 свидетельства Роспатента о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, из совместных работ с соавторами в диссертацию включены только те результаты, которые принадлежат автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 427 страницах текста, включает в себя 45 таблиц, 134 рисунка, список литературы из 433 наименований, 6 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, показана степень разработанности области исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, приведены объект и предмет исследования, показана научная новизна работы и ее практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе **«Анализ и обоснование необходимости разработки автоматизированных систем управления аспирацией технологических процессов, связанных с образованием и обращением горючих пылей»** рассмотрены предпосылки для создания автоматизированных систем управления аспирацией на «пылящих» производствах. Предпосылками для создания и разработки научных основ, согласно работе, является несовершенство и ограниченность представленных подходов к автоматизации, к тому же создающих потенциальную опасность при утилизации воздуха с горючей взрывоопасной пылью, а также ограниченное взаимодействие систем контроля аспирации с другими системами обеспечения безопасности, в частности систем обеспечения пожарной безопасности. В рассмотренных производственных условиях (с горючей пылью) основным аргументом стало несовершенство методов автоматизированного контроля путем изменения расхода пылегазового потока и мощности вентиляторов. неприменимость методов автоматизированного регулирования. Проанализированы существующие подходы к решению вопроса снижения пожарной опасности посредством регулирования работы систем аспирации и технических решений в данной области.

Приведенная статистика пожаров и взрывов на производственных объектах деревообрабатывающей, пищевой, машиностроительной, химической и других отраслей подтверждает, что безопасность таких объектов связана, в первую очередь, с эффективной работой аспирации технологических процессов, в ходе которых обращается горючая пыль – рис. 1.

Однако система аспирации на предприятиях чаще всего рассматривается как оборудование, дополнительное к основному, и крайне редко как отдельная технологическая система, контроль которой осуществляется не только на основе показателей основного оборудования, но и с учетом специфики работы входящих в нее технических устройств. С учетом того, что основной опасностью является именно

обращение взрывоопасных пылегазовых потоков, система аспирации может и должна быть рассмотрена как отправная точка при создании систем обеспечения пожарной безопасности на объектах указанного типа. Выбор, контроль и прогнозирование работы аспирационного оборудования должны учитывать специфику оборудования и минимизировать человеческий фактор при принятии решений о его функциональных свойствах.

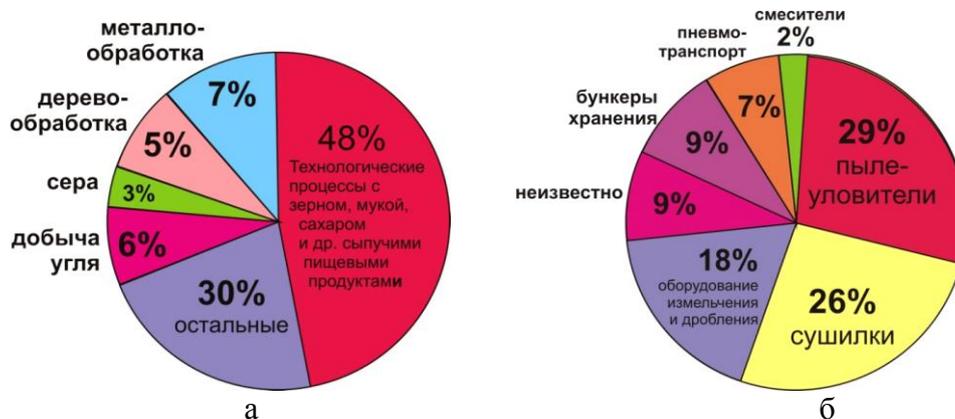


Рисунок 1 – Статистика взрывов пыли:

а - в основных отраслях промышленности; б – в технологическом оборудовании.

Анализ условий образования пылегазовых аспирационных потоков на примере технологического процесса мукомольного комбината, объектов химического, деревообрабатывающего, текстильного и металлообрабатывающего производств указывает на необходимость балансирования между масштабом аварийных ситуаций и масштабом применяемых компенсирующих мероприятий, направленных на нормализацию работы производства.

При оценке масштаба последствий чрезвычайных ситуаций имеет значение наличие технических средств предотвращения пожара и его распространения, поэтому в рамках темы проанализированы существующие конструкции пламяпреградителей, искрогасителей, средств активного подавления пожара в системе. Существующие конструкции пламяпреградителей могут быть применимы лишь при низких концентрациях пыли или высокой дисперсности частиц, поэтому требуют усовершенствования.

Рассмотрены основные физико-химические свойства аспирационных потоков и выделены наиболее значимые их них при выборе и оценке процесса. Приведены технические средства контроля работы оборудования и системы в целом, используемые как при точечных одноразовых замерах параметров работы аспирационного оборудования, так и в системах производственной автоматики АСУ ТП. Выделены цифровые датчики абсолютного давления как наиболее перспективные для систем беспрерывного автоматизированного контроля.

Систематизация свойств потоков и средств измерения позволяет унифицировать подход как к рациональной организации пылеулавливания, так и к вопросам машинного контроля, что является важным аспектом при автоматизации технологических процессов.

В условиях замкнутого объема производственной аспирации концентрация горючей взвешенной пыли легко достигает нижнего концентрационного предела воспламенения, поэтому некорректная работа любого из ее технических устройств может привести к чрезвычайным ситуациям на производстве, в том числе

масштабным взрывам и пожарам. Одним из ключевых устройств аспирации является пылеуловитель, по причине неэффективной работы или неудачного выбора которого чаще всего и возникают аварии. Существует широкий ассортимент пылеуловителей с различными механизмами пылеулавливания, но, как показывают приведенные в работе характеристики, не все применимы для взрывоопасных пылегазовых потоков.

Таким образом, разнообразие технических средств аспирации и средств ее контроля, необходимость оценки характеристик различных пылегазовых потоков, с одной стороны, и ограниченная практическая реализация автоматизации аспирации, напрямую связанная с отсутствием системного подхода к оценке существующей информации, с другой стороны, являются предпосылками к созданию единого научного подхода при разработке систем автоматизированного контроля аспирации. Задачами при разработке данного подхода являются научно обоснованный выбор технических средств и средств контроля, грамотная диагностика и прогнозирование работы аспирации с учетом используемых технических устройств, определение характера и масштаба регулирующих воздействий автоматизированной системы управления аспирацией при возникновении аварийных режимов работы.

Во второй главе **«Разработка структуры и принципов построения автоматизированной системы управления производственной аспирацией с обеспечением пожарной безопасности»** предложена концепция создания автоматизированной системы управления аспирацией на пылящих производствах, которая представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из базы данных и программного обеспечения для их обработки, приборов контроля давления и температуры, программы текущей диагностики и прогнозирования работы пылеуловителя, модульной фильтровальной установки для работы с экспериментальными потоками и устройствами.

Комплекс автоматизированной системы управления аспирации состоит из двух логических частей – системы идентификации и автоматизированной системы управления, предупреждения и противопожарной защиты аспирации (АСУППЗ) – рис. 2. Система идентификации работает в следующих трех вариантах.

1. Система идентификации с применением стандартных решений по пылеулавливанию для традиционного производства, работающая как программа с обширной базой данных применяемых решений в области аспирации и пылеулавливания.

2. Автоматизированная система для производства, информация о котором уже есть в базе данных, однако отсутствуют данные о конкретном технологическом процессе (например, ввод в эксплуатацию нового основного технологического оборудования или работа с новыми веществами и материалами).

3. Автоматизированная система для совершенствования аспирации путем использования нового экспериментального фильтра с неизвестными свойствами пылегазового потока (новое оборудование, новый материал).

4. Автоматизация работы установленного оборудования.

Опции 2–3 работают только для фильтров-пылеуловителей, так как они наиболее перспективны для взрывопожароопасных пылегазовых потоков. АСУППЗ также предназначена для управления аспирацией с фильтрами-пылеуловителями.

В целом АСУ аспирацией выполняет функции по контролю работы идентифицированного устройства; идентификации некорректных и опасных режимов работы; идентификации необходимых решений в области защиты аспирации; настройке системы на автоматизированную реакцию по предупреждению аварий и

противопожарную защиту, на некорректную работу системы аспирации (пылеуловителя в частности).

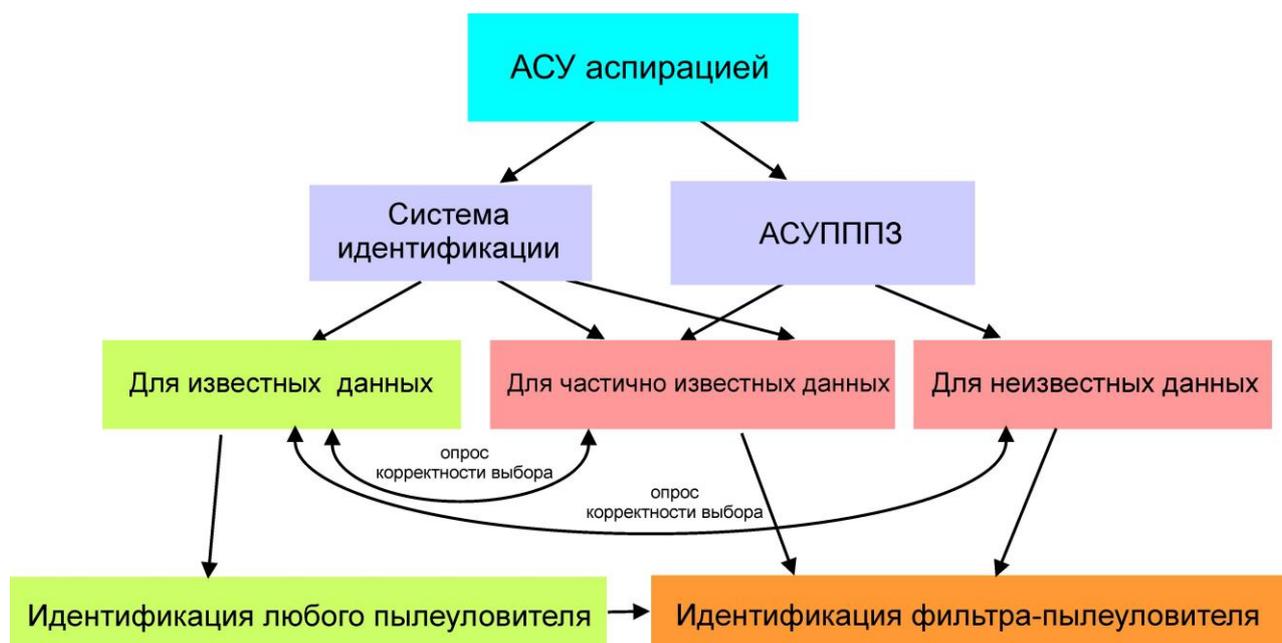


Рисунок 2 – Концепция АСУ аспирацией

При реализации первого варианта система работает на основе известных решений в области пылеулавливания, использует справочные данные и общепринятые методики. Целью является выбор системы пылеулавливания и набора технических средств по защите аспирации. Выбор стандартных решений подразумевает поиск стандартного подхода к управлению. На рис. 3 представлен фрагмент блок-схем алгоритма по решению задачи на основе систематизированных в работе данных о свойствах пылегазовых потоков, справочных данных об оборудовании, стандартных методик расчета.

Использование разработанных алгоритмов позволило определить, что наилучшим вариантом для работы со взрывоопасными пылегазовыми потоками заданных свойств являются зернистые фильтры-пылеуловители, позволяющие связать и удержать в своей структуре пыль.

Использование зернистых фильтров-пылеуловителей открывает новые возможности для управления системой аспирации посредством модификации фильтровальной среды (регенерации, смены, досыпания, отсыпания слоя и т.д.), так как они обладают уникальным свойством фильтровальной среды – несвязанностью структуры, которую можно назвать мобильностью. Учитывая то, что ранее управление аспирацией осуществлялось путем изменения расхода, скорости и направления пылегазового потока, включения и выключения вентиляторов системы, открыванием и закрыванием задвижек, предлагаемый подход требует детального изучения входных параметров системы управления, методов регулирования, их оценки с точки зрения значимости для процесса пылеулавливания и автоматизированной системы управления им.

В качестве управляющей функции для системы целесообразно использовать общий перепад давления ( $\Delta P$ ) на фильтровальной перегородке, позволяющий с учетом возможности цифровых датчиков абсолютного давления вести непрерывный

контроль процесса – текущую диагностику. Методом экспертных оценок и последующего априорного ранжирования факторов была определена информационная структура управления системой аспирации с зернистыми фильтрами принятых конфигураций: горизонтальной плоской однослойной, горизонтальной плоской двухслойной, цилиндрической однослойной и цилиндрической двухслойной.

В рамках построения информационной структуры АСУ был проведен анализ способов регенерации фильтровальной структуры. Регенерация при разработке концепции выступила основным регулирующим воздействием системы, поэтому была проведена оценка параметров различных способов регенерации. В результате была разработана информационная матрица процесса управления аспирацией с фильтрами-пылеуловителями – таблица 1.

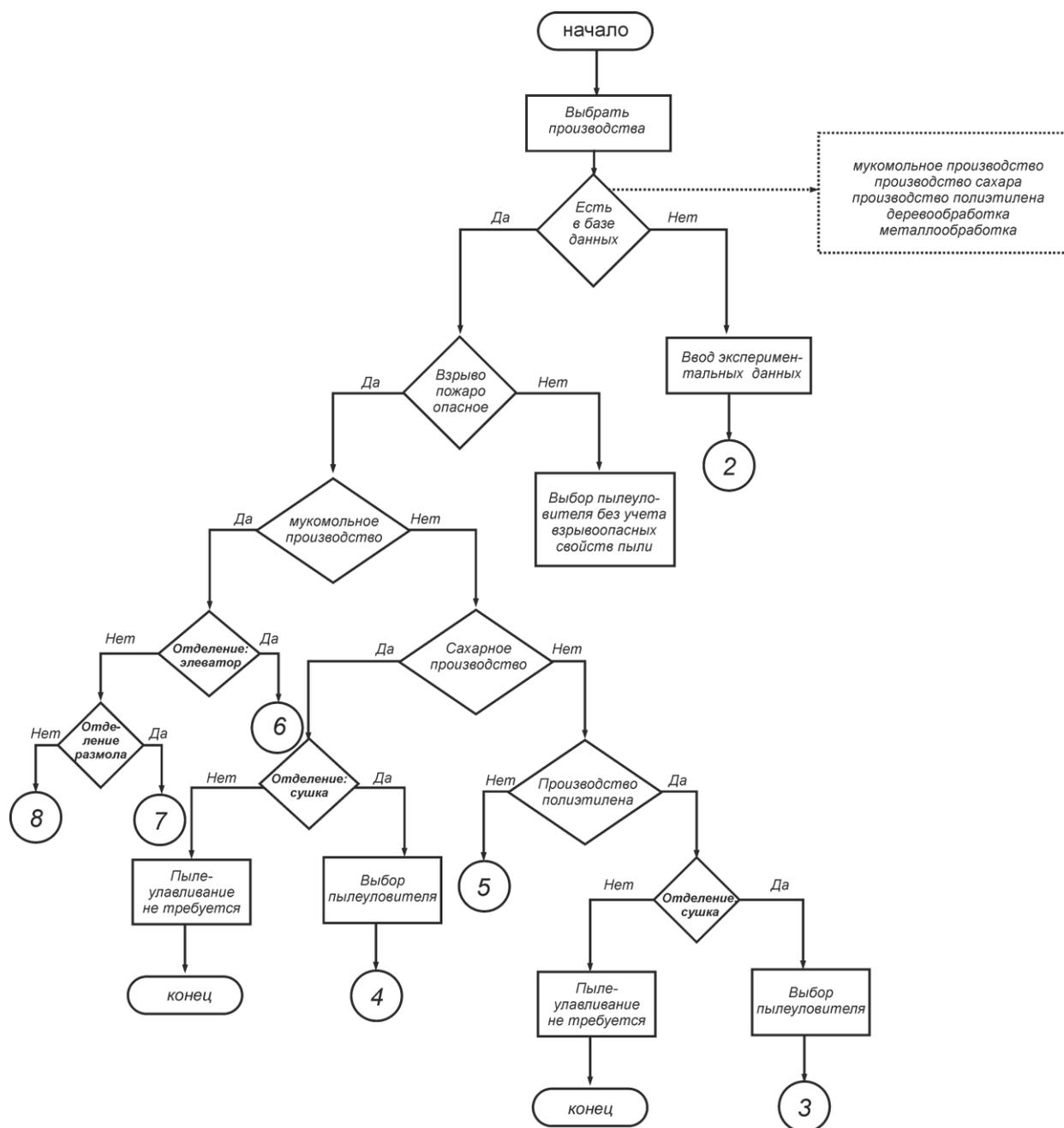


Рисунок 3 – Фрагмент блок-схемы алгоритма системы идентификации пылеуловителя

Несмотря на то, что спектр данных, учитываемых при пылеулавливании фильтрами, весьма широк, достаточным может быть управление и коррекция процесса при помощи общего перепада давлений на фильтрах. Для обеспечения противопожарной защиты используются данные о температуре воздуха, которые можно получать от датчиков давления. Схема обмена данными и управляющие воздействия в автоматизированной системе управления процессом фильтрования воздуха представлены на рис. 4. Согласно схеме автоматизированная система управления фильтрами на базе измерения и анализа показаний датчиков давления (давления и температуры) может быть разделена на следующие уровни:

Таблица 1 - Информационная матрица процесса управления\*

Способ регенерации		Вид фильтра			
		Горизонтальный плоский		Цилиндрический	
		однослойный	двухслойный	однослойный	двухслойный
Обратная продувка	КП:	$w, d_3, H, \tau, Z_n$	$w, \tau, H_1, H_2, d_{31}, d_{32}, \bar{d}_m, Z_n$	$W, d_3, H, R, \tau, Z_n$	$W, d_{31}, d_{32}, H_1, \tau, Z_n$
	УВ:	$\tau_{рег}, w_{рег}$	$\tau_{рег}, w_{рег}$	$\tau_{рег}, w_{рег}$	$\tau_{рег}, w_{рег}$
Встряхивание фильтрующего слоя	КП:	$w, d_3, H, \tau, Z_n$	$w, \tau, H_1, H_2, d_{31}, d_{32}, \bar{d}_m, Z_n$	$W, d_3, H, R, \tau, Z_n$	$W, d_{31}, d_{32}, H_1, \tau, Z_n$
	УВ:	$\tau_{рег}, F_в, A_в, A_z$	$\tau_{рег}, F_в, A_в, A_z$	$\tau_{рег}, F_в, A_в, A_z$	$\tau_{рег}, F_в, A_в, A_z$
Ворошение фильтрующего слоя	КП:	$w, d_3, H, \tau, Z_n$	$w, \tau, H_1, H_2, d_{31}, d_{32}, \bar{d}_m, Z_n$	$W, d_3, H, R, \tau, Z_n$	$W, d_{31}, d_{32}, H_1, \tau, Z_n$
	УВ:	$\tau_{рег}, v$	$\tau_{рег}, v$	$\tau_{рег}, v$	$\tau_{рег}, v$
Вращение фильтровально го элемента	КП:	$w, d_3, H, \tau, Z_n$	$w, \tau, H_1, H_2, d_{31}, d_{32}, \bar{d}_m, Z_n$	$W, d_3, H, R, \tau, Z_n$	$W, d_{31}, d_{32}, H_1, \tau, Z_n$
	УВ:	$\tau_{рег}, v'$	$\tau_{рег}, v'$	$\tau_{рег}, v'$	$\tau_{рег}, v'$
Вибрация фильтрующего слоя	КП:	$w, d_3, H, \tau, Z_n$	$w, \tau, H_1, H_2, d_{31}, d_{32}, \bar{d}_m, Z_n$	$W, d_3, H, R, \tau, Z_n$	$W, d_{31}, d_{32}, H_1, \tau, Z_n$
	УВ:	$\tau_{рег}, F_в, v_k, A_z, A_в$	$\tau_{рег}, F_в, v_k, A_z, A_в$	$\tau_{рег}, F_в, v_k, A_z, A_в$	$\tau_{рег}, F_в, v_k, A_z, A_в$

\*В матрице (таблице 1) КП – контролируемые параметры; УВ – управляющие воздействия;  $w$  - скорость пылегазового потока на входе в фильтр;  $\tau$  - продолжительность фильтрования;  $H$  - высота фильтровального слоя;  $H_1, H_2$  – высота первого и второго по ходу газа слоев;  $d_3$  - диаметр эквивалентный порового пространства;  $d_{31}, d_{32}$  - диаметр эквивалентный порового пространства первого и второго по ходу газа фильтровальных слоев;  $Z_n$  - концентрация пыли в пылегазовом потоке;  $\bar{d}_m$  - средний медианный диаметр частицы пыли;  $R$  - радиус фильтровального элемента;  $\tau_{рег}$  - время регенерации;  $w_{рег}$  - скорость потока продувочного воздуха;  $F_в$  - возмущающая сила;  $A_в, A_z$  - амплитуда колебаний в вертикальной горизонтальной плоскостях;  $v_k$  - частота колебаний и  $v'$  - частота вращения фильтровального элемента.

– уровень локальной САУ, предназначенный для получения и обработки данных о давлении до и после фильтра;

– уровень автоматизированной системы управления предупреждением аварий (АСУПА), предназначенный для срабатывания при ситуациях, граничащих с аварийными. Далее система этого уровня получила название страхующая или супервизорная;

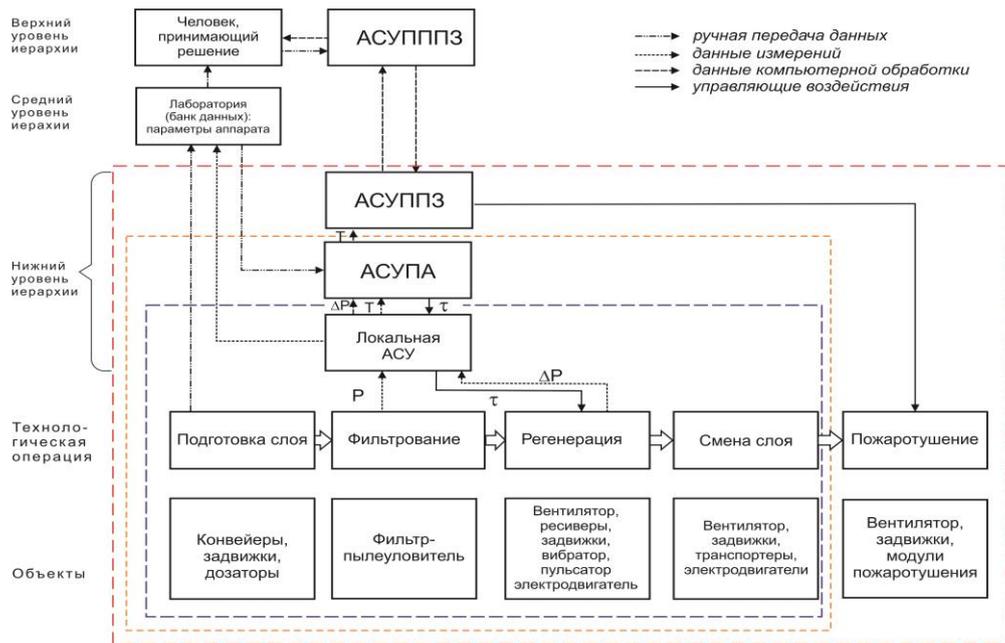


Рисунок 4 – Схема обмена данными и управляющие воздействия АСУПППЗ

– уровень автоматизированной системы противопожарной защиты (АСППЗ), срабатывающей на превышение нормального значения температуры пылегазового потока при поступлении сигнал от датчиков давления

– уровень автоматизированной системы управления предупреждением и противопожарной защитой (АСУПППЗ), получающей и анализирующей данные со всех подсистем и передающей их на более высокий уровень.

Принципы работы системы на основе получения данных и их анализа с датчиков давления показаны на примере диагностики работы фильтра пылеуловителя с цилиндрическим однослойным несвязанным фильтром и регенерацией его методом вращения – рис. 5.

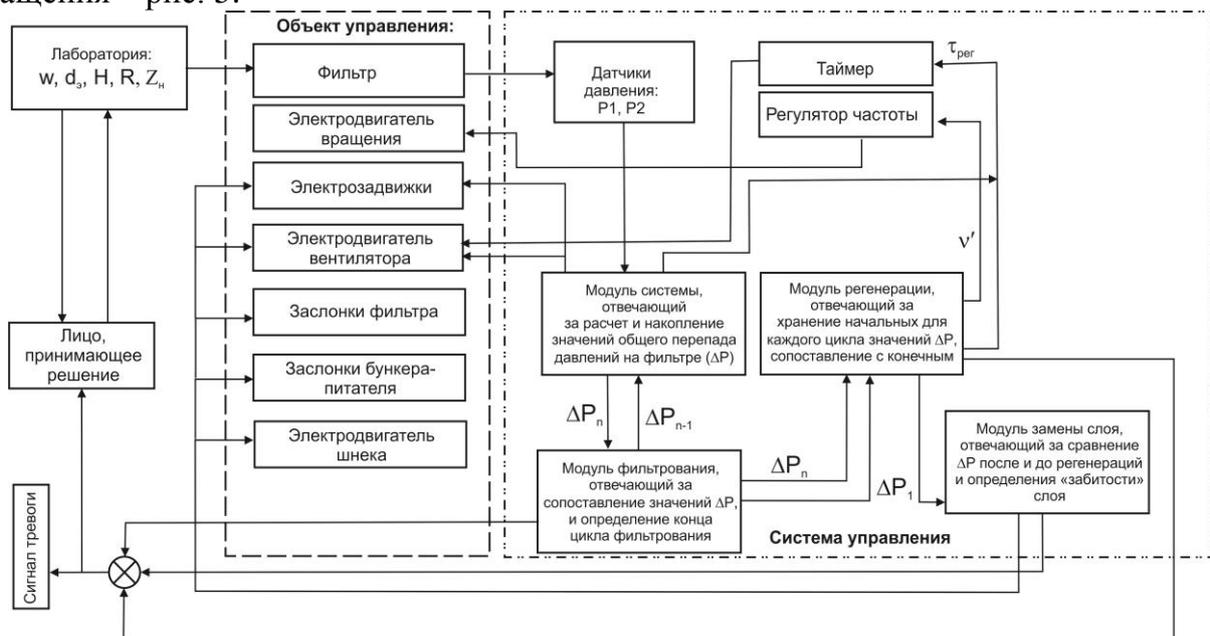


Рисунок 5 – Схема АСУПППЗ аспирации с фильтром-пылеуловителем с цилиндрическим однослойным несвязанным фильтром и регенерацией методом вращения фильтра

При управлении работой системы аспирации особое значение имеет возникновение аварийных ситуаций, поэтому для распознавания таких ситуаций и обеспечения работы АСУППЗ была разработана методика и алгоритм, представленные в работе и получившие патент на изобретение (патент на изобретение № 2743560 «Способ автоматизированного поддержания безаварийной работы фильтра-пылеуловителя»).

В третьей главе «**Разработка технического и программного обеспечения автоматизированной системы управления предупреждением и противопожарной защитой**» разработано и предложено техническое и программное обеспечение системы, дан унифицированный подход к его подбору на предприятиях различных профилей, имеющих пылегазовые потоки, свойства которых идентичны.

На рис. 6а представлена разработанная модульная фильтровальная установка (МФУ), имеющая лабораторное и промышленное назначение. Она выполнена таким образом, чтобы можно было легко менять фильтровальные среды, а также создавать модельные конструкции и испытывать их в рамках любого пылящего производства.

Данная установка была внедрена на Воронежском вагоноремонтном заводе (рис. 6б), прошла промышленную апробацию. Основным преимуществом МФУ является мобильность по отношению к различным пылегазовым потокам, а также легкость монтажа в любом из цехов.



а



б

Рисунок 6 – Общий вид модульной фильтровальной установки АСУ:  
а – МФУ; б – монтаж МФУ в производственную аспирационную систему

Измерения и оценку работы фильтра проводили с помощью системы мониторинга давления, общий вид которой представлен на рис. 7. В ее состав входят два датчика абсолютного давления 415-ДИВ, способные измерять давление и

температуру, преобразователь интерфейсов, USB-кабель для подключения к ПК и кабель для включения в сеть. При реализации системы на крупных промышленных объектах, удаленных объектах, передаче данных одновременно с нескольких систем аспирации целесообразно использовать Интернет или GPRS-связь. Для этого был разработан телеметрический модуль - рис. 8.



Рисунок 7 – Техническое обеспечение системы мониторинга давления: адаптер, датчики давления



Рисунок 8 – Телеметрический модуль.

Компьютерная программа, используемая в системе, предназначена для считывания информации через адаптер последовательного порта ПК с цифровых датчиков давления, поддерживающих протокол обмена ModBus RTU. Главное окно программы представлено на рис. 9 (свидетельство гос. регистрации № 2014610856).

Программа обеспечивает выполнение следующих функций: чтение текущих показаний двух измерительных каналов с датчиков, поддерживающих протокол обмена ModBus RTU; протоколирование получаемых данных с последующим их сохранением в формате CSV; расчет разности значений между показаниями любых двух подключенных датчиков; визуализацию полученных и расчетных величин в виде графиков с возможностью их сохранения в графическом файле, индикацию окна аварийной ситуации (свидетельства гос. регистрации № 2020612201) – рис. 10.

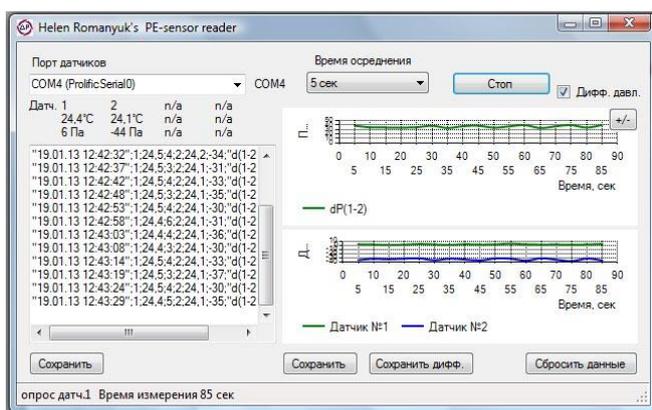


Рисунок 9 – Визуализация получения и обработки данных с датчиков давления

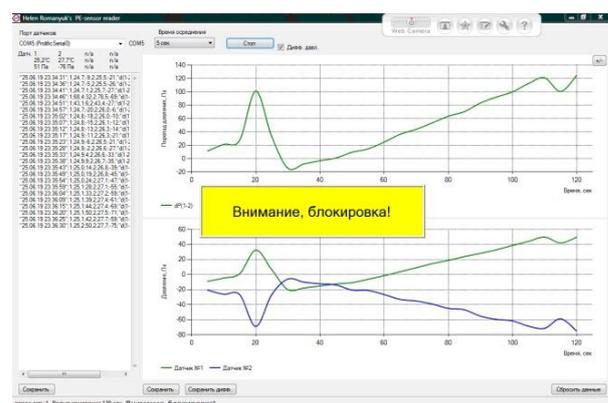


Рисунок 10 – Визуализация аварийных режимов в интерфейсе программы.

На рис.11 АСУППЗ представлена как трехуровневая иерархическая система управления. На нижнем уровне расположены датчики давления (415-ДИВ) и исполнительные механизмы (ИМ), которые могут отличаться в зависимости от вида фильтра и способа его регенерации, поэтому на схеме обозначены общей

аббревиатурой. Датчики и исполняющие механизмы позволяют контролировать объект управления (ОУ). Объекты управления поделены на три группы – объекты управления аспирации (ОУА), объекты управления технологического процесса (ОУТП) и объекты управления противопожарной системы (ОУППС). Каждая из групп объектов регулируется отдельной АСУ, так как это связано непосредственно со спецификой работы данной группы. Все три АСУ связаны между собой, так как управление системой аспирации невозможно без управления технологическим процессом, связанным с обращением горючей пыли.

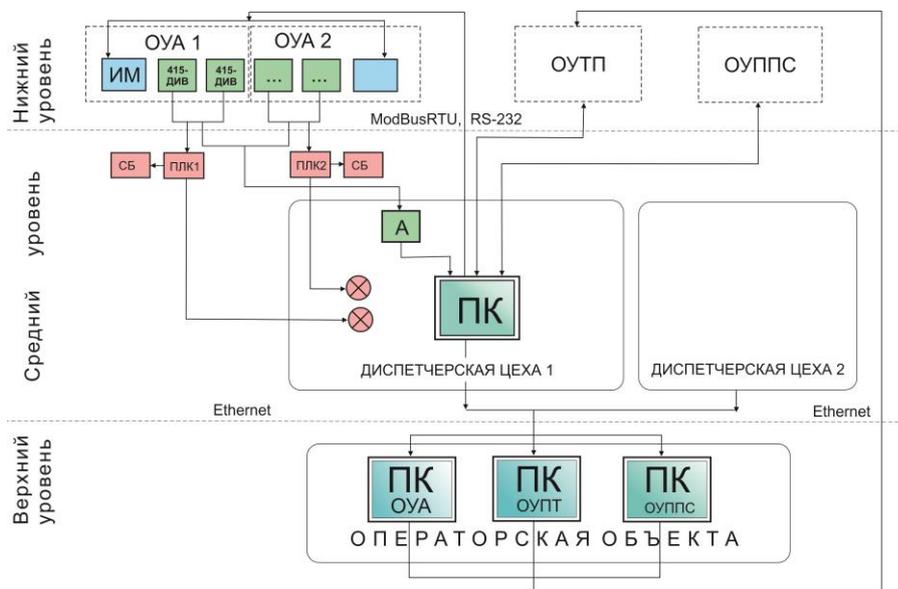


Рисунок 11 – Структурная схема АСУППЗ

Предложенное техническое оснащение АСУППЗ позволяет реализовывать автоматизированное управление для всех уровней системы с различным набором предложенных технических средств. МФУ в комплексе с системой мониторинга позволяет идентифицировать режимы работы аспирации с фильтром для экспериментальных пылегазовых потоков и фильтрующих сред. Система мониторинга, исполняющая функции текущего контроля локальной АСУ, может быть использована как в комплексе с МФУ, так и для систем аспирации с различными пылеулавливающими аппаратами, что было доказано при исследованиях инерционных и циклонных аппаратов, а также устройств пламяпреграждения. Оборудование системы мониторинга использовалось для оценки работы аспирации машиностроительного и мукомольного производств, а также при проведении замеров в условиях лаборатории, что подтверждает универсальность технического и программного обеспечения. Апробация системы мониторинга, в частности, программного обеспечения показала необходимость более детального экспериментального исследования кинетики процесса пылеулавливания наиболее перспективными фильтрами – зернистыми с несвязанной структурой – для прецизионного определения режимов работы как в условиях производства, так и при испытаниях новых фильтровальных материалов в условиях лаборатории. Данная информация позволила повысить эффективность и надежность АСУППЗ.

В четвертой главе «Экспериментальное определение взрывоопасных режимов работы системы аспирации с фильтрами» описаны экспериментальные исследования работы различных фильтровальных слоев для идентификации режимов работы и создания алгоритмического и программного обеспечения локальной АСУ и последующих уровней системы. Основной задачей было выявление общих закономерностей кинетики несвязанных фильтровальных слоев и их теоретическое описание.

Исследование работы аспирации в аварийных режимах было невозможно в условиях производства, поэтому для более длительных опытов была разработана лабораторная установка, представляющая собой модель аспирации с возможностью смены фильтрующего материала и систему мониторинга давления, описанную выше – рис. 12.



Рисунок 12 – Лабораторная экспериментальная установка:

- а – общий вид;  
 б - схема экспериментальной установки:  
 1 – фильтр; 2 – датчики давления; 3 – пылегенератор;  
 4 – преобразователь интерфейсов; 5 – компьютер;  
 6 – вентилятор; 7 - трубопровод.

Были проведены многочисленные опыты для различных фильтровальных слоев: металлических шариков, гаек, полимерных гранул, различных пищевых продуктов (горох, горох маш, зерно, пшено и др.). Данные материалы позволили моделировать фильтровальные материалы с различными параметрами (высотой слоя, размером и формой фильтрующего зерна) однослойной и двухслойной структуры. В качестве модельной пыли использовалась мучная пыль со средним медианным диаметром пыли  $\bar{d}_m = 55 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  и средней концентрацией в потоке  $(5-10) \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ . Полученные экспериментальные зависимости общего перепада давлений от продолжительности фильтрования для слоев с различными характеристиками позволили выявить общие закономерности протекания процесса. Достоверность полученных данных оценивалась методом однофакторного дисперсионного анализа, в результате была принята средняя зависимость общего перепада давлений от продолжительности фильтрования как отражающая суть процесса для одинаковых входных параметров эксперимента.

Схема изменения общего перепада давлений для однослойных фильтров, полученная путем анализа экспериментальных данных, представлена на рис. 13.

Согласно схеме при оценке общего перепада давлений при протекании процесса можно выделить следующие периоды.

1. Подготовка – период характерный для слоев, обладающих некоторой первоначальной запыленностью – названной «замусоренностью».

2. Стабильность – промежуток времени, когда общий перепад давлений остается постоянным. Слой продут от примесей, и накопление пыли происходит практически незаметно.

3. Фильтрация – период, изученный в классических работах по фильтрованию, представляет собой сначала медленный, а затем быстрый (кривая 1) рост общего перепада давления,

4. Закупорка фильтровального слоя – период, характеризующийся постоянным перепадом давлений. Слой забит. Фильтр не работает. Система аспирации работает в обратном режиме – пыль выходит из аспирации.

5. Вырывание – период, характеризующийся интенсивным, но не резким снижением общего перепада давлений. Данный период связан с вытягиваем пыли из структуры фильтровального слоя со стороны очищенного воздуха.

6. Вторичное фильтрование – период, характеризующийся ростом общего перепада давлений, забивание слоя преобладает над вытягиваем пыли из структуры слоя.

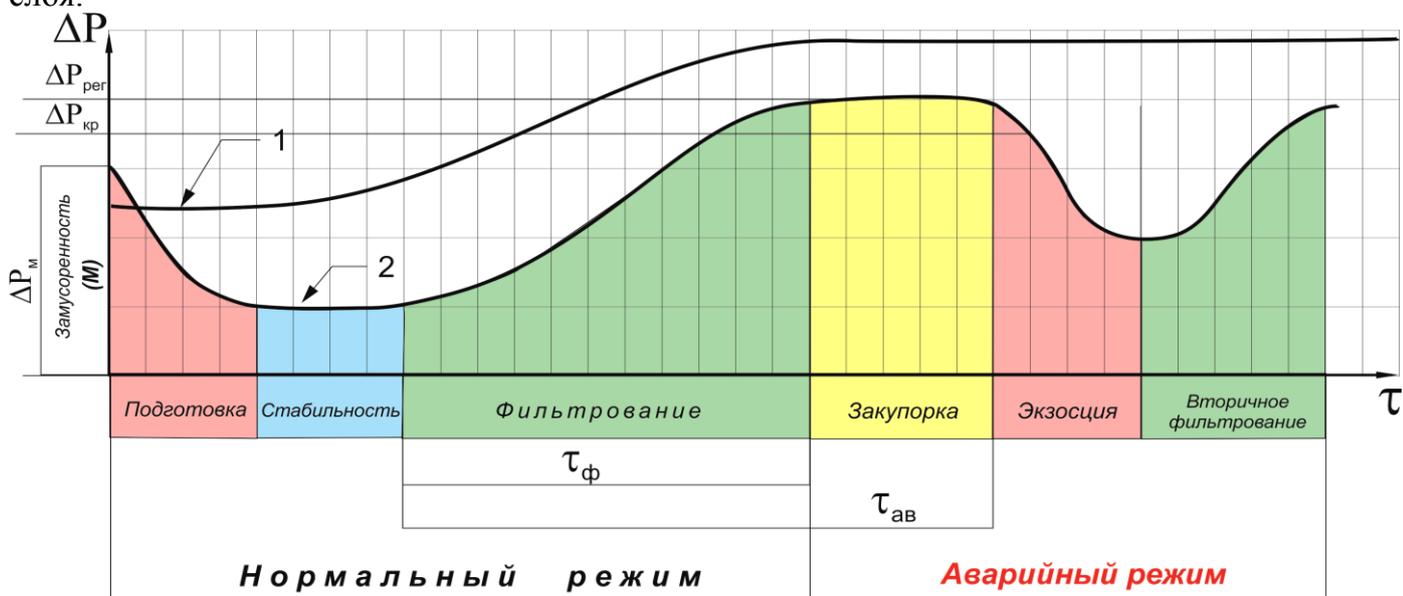


Рисунок 13 - Схема к описанию режимов фильтрования:

- 1 – кривая, отражающая традиционные представления о кинетике фильтрования;  
 2 – обобщенная кривая на основе экспериментальных данных

Аварийными режимами будут режим вырывания и режим подготовки, если он превысит установленную нормативную продолжительность.

Режим вырывания ранее не был описан в работах по фильтрованию, поэтому для удобства был назван «экзосцией» (от английского слова «exorcise» - изгонять, освобождать). Работа в данном режиме приводит к интенсивному выделению высокодисперсной пыли со стороны очищенного воздуха – рис.14 а, б.

В пятой главе «**Математические модели и аналитические зависимости для обеспечения систем автоматизированного контроля**» разрабатываются методы, математическое описание и алгоритмы для диагностирования работы системы

аспирации и прогнозирования аварийных режимов работы путем идентификации режимов работы установленных в них фильтров-пылеуловителей. Учитывая обнаруженные в четвертой главе закономерности, было предложено оценить первоначальное состояние фильтра с помощью безразмерного критерия

$$K = \frac{1000 \cdot \Delta P_{нач} \cdot \tau \cdot d_3^2}{m \cdot w}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{нач}$  – начальный общий перепад давлений на фильтровальном слое, Па;  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с;  $d_3$  – эквивалентный диаметр порового пространства зернистого слоя с несвязанной структурой, м;  $w$  – скорость пылегазового потока, м/с;  $m$  – масса чистого фильтровального слоя, кг.

Для характеристики процесса и диагностики режима экзосции использовали «темп фильтрования»  $T$  или темп нарастания разности давлений

$$T = \frac{\Delta P}{\Delta \tau}, \quad (2)$$

где  $T$  – темп нарастания разности давлений, Па/с;  $\tau$  – время фильтрования, с;  $P$  – давление, Па.

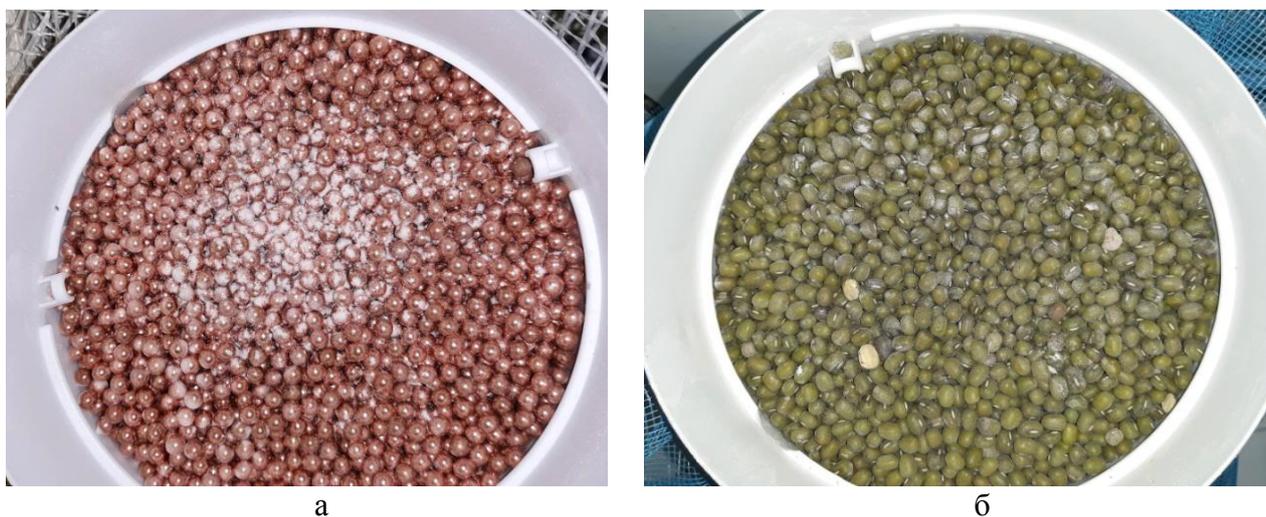


Рисунок 14 – Проявление режима «экзосции» на слоях различной природы:  
а – слой из металлических шариков; б – слой из гороха маш.

Экзосция в заданном промежутке времени, соответствующая началу проскока пыли, будет наблюдаться для идеального одинарного слоя при  $K \approx 30$ . Согласно экспериментальным данным  $T = 0,005-0,007$  считается обусловленной погрешностью измерений, что составляет приблизительно 1,9 % от всего изменения перепада давлений. При  $T = 0$  происходит забивание фильтра. При достижении темпа  $T$  значений менее 0 за период  $\tau_2 - \tau_1$  (при этом темп превышает 1,9 %) следует говорить про возникновение экзосции.

У неидеальных фильтровальных слоев (горох, зерно, пшено и др.) существует начальная запыленность слоя, которая определяет применимость слоя в качестве фильтровального. Целесообразность применения материала, а также возникающий в связи с этим период подготовки оценивали с помощью коэффициент  $E$

$$E = \frac{F \cdot S \cdot M}{F_{max} \cdot S_{max} \cdot M_{max}}, \quad (3)$$

где  $F, F_{max}$ - определяемая и максимально возможная бальная оценка формы зерна фильтровального слоя соответственно;  $S, S_{max}$  - определяемая и максимально возможная бальная оценка размера зерна фильтровального слоя соответственно;  $M, M_{max}$ - определяемая и максимально возможная бальная оценка замусоренности фильтровального слоя. Бальная оценка выставлялась от 1 до 10 баллов.

Для оценки аварийности периода подготовки слоя путем обработки экспериментальных данных получили уравнение регрессии

$$t = 2239,1E^3 - 4131,1E^2 + 2547,4E - 310. \quad (4)$$

Был разработан алгоритм диагностики для обеспечения работы локальной АСУ с использованием формул (1–4). Его блок-схема представлена на рис. 15а.

Для оценки первоначального состояния двухслойного фильтра использовался безразмерный параметр

$$k = \frac{K_1}{K_2} = \frac{1000 \cdot \Delta P_{нач} \cdot \tau \cdot d_{\text{э}1}^2 \cdot m_2 \cdot w}{1000 \cdot \Delta P_{нач} \cdot d_{\text{э}2}^2 \cdot m_1 \cdot w \cdot \tau} = \frac{d_{\text{э}1}^2 \cdot m_2}{d_{\text{э}2}^2 \cdot m_1}. \quad (5)$$

Здесь  $K_1$  и  $K_2$  параметры, определяемые по формуле (1) для каждого из подслоев.

Граничному значению критерия  $k$ , при котором период фильтрования приблизительно равен периоду экзосции, а период забивания самый короткий, отвечает значение равное 97.

Замусоренность двухслойного фильтра оценивали с помощью критерия  $\phi$

$$\phi = \frac{E_1}{E_2} = \frac{F_1 \cdot S_1 \cdot M_1}{F_{max} \cdot S_{max} \cdot M_{max}} \cdot \frac{F_{max} \cdot S_{max} \cdot M_{max}}{F_2 \cdot S_2 \cdot M_2} = \frac{F_1 \cdot S_1 \cdot M_1}{F_2 \cdot S_2 \cdot M_2}, \quad (6)$$

где  $F_1, F_2$  - определяемая бальная оценка формы зерна фильтровального слоя для первого и второго подслоев соответственно;  $S_1, S_2$  - бальная оценка размера зерна фильтровального слоя для первого по ходу потока слоя и второго соответственно;  $M_1, M_2$  - бальная оценка замусоренности первого по ходу потока слоя и второго соответственно.

Зависимость продолжительности периода подготовки от коэффициента  $E$  после компьютерной обработки согласно экспериментальным данным будет иметь вид в случае, если  $\phi < 1$

$$\tau_{nod} = 116,67E^3 - 835E^2 + 2188,3E - 970.$$

и в случае, если  $\phi > 1$

$$\tau_{nod} = -100E^2 + 118E + 100. \quad (7)$$

С учетом того, что интервал между замерами перепада давлений на фильтре составляет 10 секунд, можно записать условие для расчета количества замеров в период подготовки для двухслойного фильтра

$$t = \begin{cases} 0, \text{ при } \phi = 1, E_1 = E_2 \\ -10E^2 + 11,8E + 10, \text{ при } \phi > 1 \\ 11,7E_2^3 - 83,5E_2^2 + 218,8E_2 - 97 \text{ при } \phi < 1 \end{cases}. \quad (8)$$

Блок-схема алгоритма текущей диагностики двухслойной фильтровальной перегородки представлена на рис. 15б.

Для обеспечения прогнозирующих функций АСУППЗ и работы супервизора была разработана методика оценки продолжительности фильтрования до наступления режима экзоссии –  $\tau_{ав}$ . Для получения данного значения система получала данные о фильтровальной перегородке и характеристиках пылегазового потока и на их основе, используя выведенные аналитические формулы, определяла время наступления экзоссии для слоя.

Для выведения аналитических формул использовали модель забивания зернистого слоя, в которой гранула слоя представляла собой шар, а заполняющее пространство - куб. Была получена аналитическая формула для определения заполнения слоя частицами определенной фракции, содержащимися в пылегазовом потоке

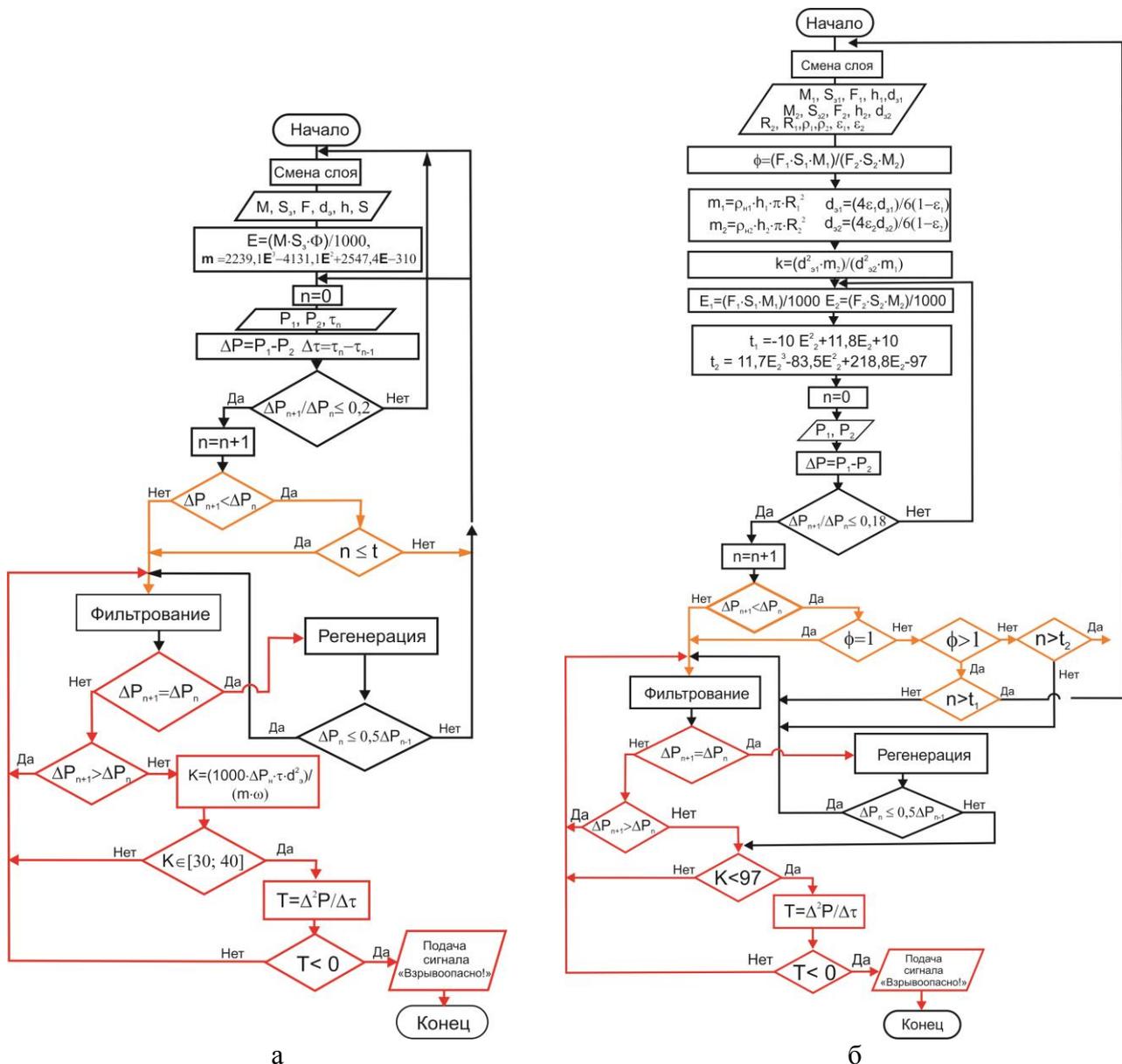


Рисунок 15 – Блок-схема алгоритма текущей диагностики фильтровальной перегородки: а – однослойной; б – двухслойной.

$$\tau_i = \frac{50 F h \rho_n r_3^3}{r_{ni}^3 V_p Z_n P_i} \quad (9)$$

Здесь  $\tau$  - время заполнения фильтровального слоя частицами  $i$ -го размера, с;  $F$  - поверхность фильтрования, м<sup>2</sup>;  $h$  - высота фильтровального слоя, м;  $\rho_n$  - плотность частицы пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $r_3$  - радиус зерна фильтровального слоя, м;  $r_{ni}$  - радиус частицы пыли  $i$ -го размера, м;  $V_p$  - расход пылегазового потока, м<sup>3</sup>/ч;  $Z_n$  - начальная концентрация пыли в пылегазовом потоке, кг/м<sup>3</sup>;  $P_i$  - содержание частиц  $i$ -го размера в потоке, %.

Время наступления экзосции рассчитывалось по формуле

$$\tau_{ag} = \sum_{i=1}^m \tau_i, \quad (10)$$

где  $i$  – размер частиц определенной фракции от большего к меньшему;  $m$  – количество фракций.

Так как количество фракций пыли в пылегазовом потоке может быть достаточно высоко, то решение данной задачи целесообразно только с помощью ПК, поэтому был создан алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 16а – для низкой концентрации пыли в потоке и 16б – для высокой.

При низкой дисперсности и высокой концентрации пыли в пылегазовом потоке экзосция будет проходить в основном за счет опадания осадка пыли с лобовой поверхности фильтра под действием силы тяжести. При этом механизм будет отличаться, и в этом случае продолжительность фильтрования до наступления экзосции определяется из условия

$$G > F_n + F_a, \quad (11)$$

где  $G$  – сила тяжести, Н;  $F_n$  – сила давления воздуха, Н;  $F_a$  – сила адгезии частиц пыли к поверхности фильтра, Н, и находится по формуле

$$\tau_z = \frac{\rho_n}{g^3 \rho_n V_p Z_n} \cdot 3,125 \cdot 10^{-23} \left( \frac{\left( \frac{8640000000 \ 0000006710 \ 8864 \ g^3}{\rho_n} + \frac{N^2 \left( -432 \cdot 10^{12} \ g - \frac{13824 \cdot 10^{18} \ N^2}{V_p^2 \rho_n} \right)}{V_p^2 \rho_n^2} \right)}{N \left( -432 \cdot 10^{12} \ g - \frac{13824 \cdot 10^{18} \ N^2}{L^2 \rho_n} \right)} \right), \quad (12)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>; насыпная плотность пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $N$  – мощность вентилятора, Вт;  $S$  – площадь частицы пыли, м<sup>2</sup>.

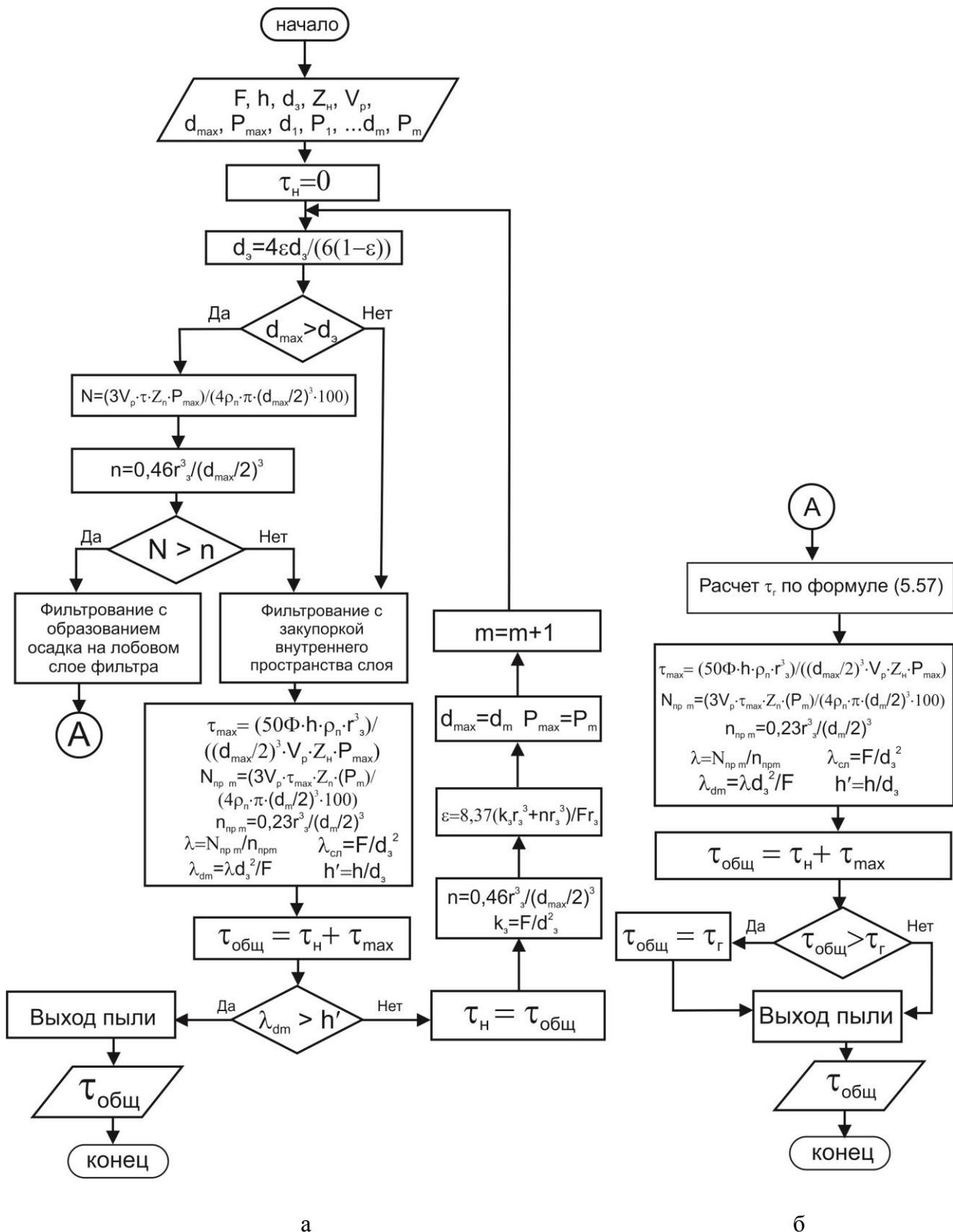


Рисунок 16 – Блок-схемы алгоритма прогнозирования:  
а – с закупориванием пор слоя; б – с образованием осадка на поверхности.

На основании выведенных аналитических закономерностей с учетом специфики фильтрования был разработан алгоритм для прогнозирования времени наступления аварийного режима для двухслойных фильтров, блок-схема которого приведена на

рис. 17. Таким образом, работа локальной АСУ и супервизорной осуществляется на основе двух параллельных алгоритмов, что позволяет повысить надежность АСУППЗ.

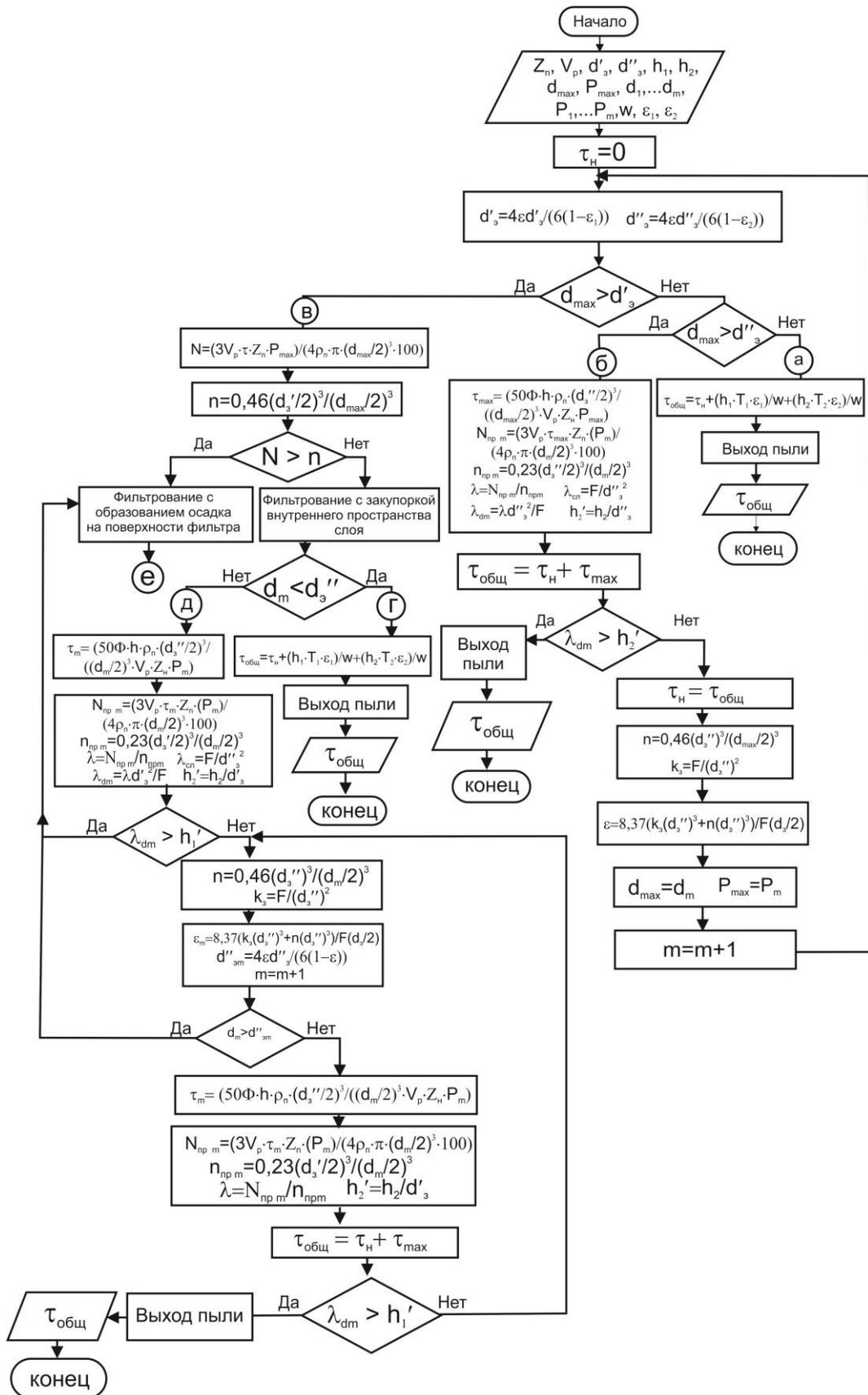


Рисунок 17 – Блок-схема алгоритма прогнозирования работы двухслойных зернистых фильтров



супервизорный контроль;  $P_8$  – системная авария. Множеству дуг графа  $\pi \in P \times P$  векторных переходов, соответствуют смены режимов или переход из одного состояния в другое.

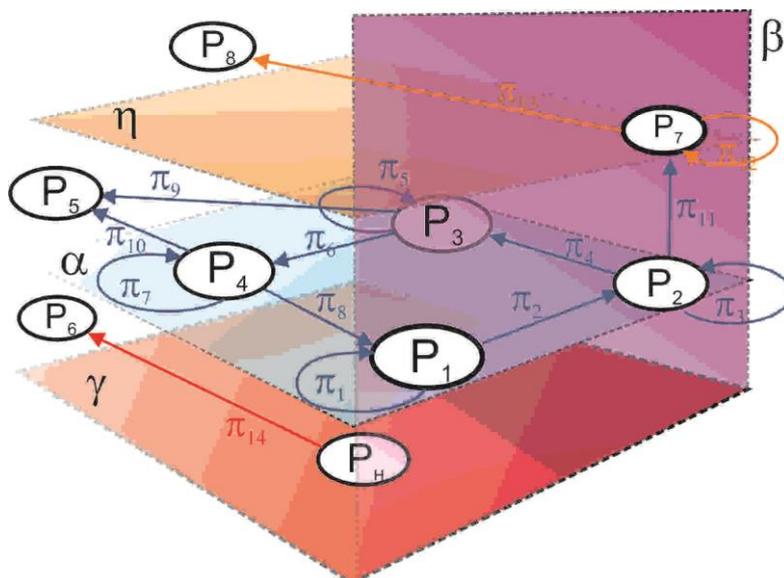


Рисунок 19 – Многомерная сеть Маркова для моделирования взаимодействий АСУПА

Выполняется условие непрерывной марковской цепи

$$\varphi(P_{i+1} = i_{n+1} / P_n = i_n, P_{n-1} = i_{n-1}, \dots, P_0 = l_0) = \varphi(P_{n+1} = i_{n+1} / P_n = i_n),$$

где  $P_n$  – множество состояний;  $i$  – номер шага.

Так как ключевой проблемой при автоматизированном управлении аспирацией является идентификация аварий и управление ими, то следует определить два состояния аварии:

- внешняя авария  $P_5$  – авария, связанная с неудовлетворительным качеством нового фильтровального материала.
- системная авария  $P_8$  – авария, связанная с отсутствием данных об общем перепаде давления или выходе из строя механизмов замены и регенерации слоя.

Если текущий контроль состояния системы может быть реализован на основе традиционной марковской сети, то обращение системы в режим «Пожар!» ( $P_6$ ) и супервизорный контроль невозможны, так как система может одновременно находиться в одном из режимов текущего контроля и параллельно в режимах противопожарной защиты и супервизорного контроля.

Состояния системы аспирации в многомерной цепи Маркова могут принадлежать одновременно нескольким плоскостям

$$\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\} \in \alpha. \quad (14)$$

$$\{P_1, P_2, P_7\} \in \beta, \quad (15)$$

$$\{P_7, P_8\} \in \eta \quad (16)$$

$$\{P_n, P_6\} \in \gamma \quad (17)$$

При этом сумма вероятностей всех состояний в каждой плоскости равна 1.

Рассмотрим взаимодействие плоскости текущей диагностики  $\alpha$  и супервизора  $\gamma$  через плоскость  $\beta$

$$\varphi(P_1)_{\alpha\beta} + \varphi(P_2)_{\alpha\beta} + \varphi(P_3)_{\alpha} + \varphi(P_4)_{\alpha} + \varphi(P_5)_{\alpha} = 1, \quad (18)$$

$$\varphi(P_1)_{\alpha\beta} + \varphi(P_2)_{\alpha\beta} + \varphi(P_7)_{\beta} = 1. \quad (19)$$

В случае необходимости перехода в функцию супервизорского контроля состояние  $P_7$  займет место состояний  $P_3, P_4$  и  $P_5$ .

Таким образом, если система достигла максимальной вероятности пребывания в определенном *состоянии фильтра* и не перешла в следующее его состояние, можно говорить о необходимости перехода в состояние *системы управления*, определяемое параллельной плоскостью через перпендикулярную связывающую плоскость.

$$\begin{aligned} \varphi(P_1) + \varphi(P_2) + \varphi(P_3) + \varphi(P_4) + \varphi(P_5) &= \\ = \varphi(P_1) + \varphi(P_2) + \varphi(P_7) &= \varphi(P_7) + \varphi(P_8) = 1 \end{aligned}$$

или  $\varphi_{\alpha} = \varphi_{\beta} = \varphi_{\eta} = 1$ ,

где  $\varphi_{\alpha}, \varphi_{\beta}, \varphi_{\eta}$  - вероятности пребывания в одном из состояний *системы управления*, обозначенных соответственно плоскостями  $\alpha, \beta$  и  $\eta$ .

С учетом изменения вероятности во времени

$$\begin{aligned} \varphi(P_1(\tau)) + \varphi(P_2(\tau)) + \varphi(P_3(\tau)) + \varphi(P_4(\tau)) + \varphi(P_5(\tau)) &= \\ = \varphi(P_1(\tau)) + \varphi(P_2(\tau)) + \varphi(P_7(\tau)) &= \varphi(P_7(\tau)) + \varphi(P_8(\tau)) = 1 \end{aligned}$$

Вероятность перехода в состояние супервизорского контроля будет рассчитываться по формуле

$$\varphi(P_7(\tau)) = 1 - \varphi(P_1(\tau)) - \varphi(P_2(\tau)),$$

при  $\varphi(P_3(\tau)) = 0 \varphi(P_4(\tau)) = 0 \varphi(P_5(\tau)) = 0$ .

Соответственно максимальная вероятность перехода в состояние супервизорского контроля для управления аспирацией с однослойным фильтром пылеуловителем

$$\varphi(P_7(\tau)) = 1 - 0,1 - 0,5 = 0,4, \quad (20)$$

при  $\varphi(P_3(\tau)) = 0 \varphi(P_4(\tau)) = 0 \varphi(P_5(\tau)) = 0$ .

Максимальная вероятность перехода в состояние супервизорского контроля для управления аспирацией с двухслойным фильтром пылеуловителем

$$\varphi(P_7(\tau)) = 1 - 0,05 - 0,74 = 0,21, \quad (21)$$

при  $\varphi(P_3(\tau)) = 0 \varphi(P_4(\tau)) = 0 \varphi(P_5(\tau)) = 0$ .

В выражениях (18-21) максимальные вероятности определены согласно экспериментальным данным, приведенным в четвертой главе.

На основании экспериментальных данных (рис. 20) получены закономерности изменения вероятностей пребывания фильтра в состояниях  $P_1$ - $P_5$  от времени для состояния подготовки  $P_1$

$$\varphi(P_1(\tau)) = -0,017 \ln \tau + 0,1386 ; \quad (22)$$

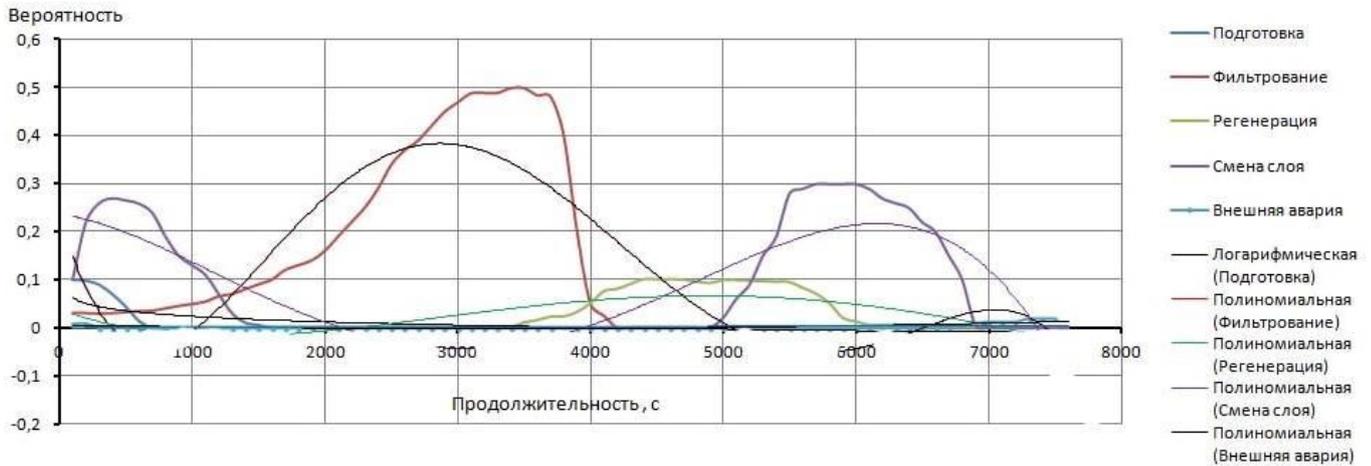


Рисунок 20 – Зависимость вероятности от продолжительности фильтрации для однослойного фильтра

для состояния фильтрации  $P_2$

$$\varphi(P_2(\tau)) = \begin{cases} 0 \text{ при } \varphi(P_2(\tau)) < 0 \\ -2 \cdot 10^{-18} \tau^5 - 5 \cdot 10^{-14} \tau^3 + 10^6 \cdot \tau^2 - 9 \cdot 10^{-4} \tau + ; \\ + 0,2301 \text{ при } \varphi(P_2(\tau)) > 0 \end{cases} \quad (23)$$

для состояния регенерации  $P_3$

$$\varphi(P_3(\tau)) = \begin{cases} 0 \text{ при } \varphi(P_3(\tau)) < 0, \\ 40^{-16} \tau^4 - 90^{-12} \tau^3 + 50^{-8} \tau^2 - 10^{-4} \tau + 0,0375 \text{ при } \varphi(P_3(\tau)) > 0 ; \end{cases} \quad (24)$$

для состояния смены слоя  $P_4$

$$\varphi(P_4(\tau)) = 0,009 \ln \tau + 0,0054 , \quad (25)$$

где  $\tau$  - время фильтрации, с.

Для двухслойного фильтра характер зависимости несколько отличается.

Вероятность состояния описывается выражениями для состояния подготовки  $P_1$

$$\varphi(P_1(\tau)) = -0,012 \ln \tau + 0,1197 ; \quad (26)$$

для состояния фильтрации  $P_2$

$$\varphi(P_2(\tau)) = \begin{cases} 0 \text{ при } \varphi(P_2(\tau)) < 0 \\ 10^{-21} \tau^5 - 6 \cdot 10^{-17} \tau^4 + 4 \cdot 10^{-13} \cdot \tau^3 + 10^{-8} \tau^2 - \\ + 9 \cdot 10^{-5} \tau + 0,1238 \text{ при } \varphi(P_2(\tau)) > 0 \end{cases} \quad (27)$$

для состояния регенерации  $P_3$

$$\varphi(P_3(\tau)) = \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi(P_3(\tau)) < 0, \\ 4 \cdot 10^{-26} \tau^4 - 4 \cdot 10^{-21} \tau^5 + 10^{-16} \tau^4 - 2 \cdot 10^{-12} \tau^3 + 10^{-8} \tau^2 - 3 \cdot 10^{-5} \tau + \\ + 0,0252 & \text{при } \varphi(P_3(\tau)) > 0 \end{cases} \quad (28)$$

для состояния смены слоя  $P_4$

$$\varphi(P_4(\tau)) = \begin{cases} 0 & \text{при } \varphi(P_3(\tau)) < 0, \\ 3 \cdot 10^{-26} \tau^6 - 3 \cdot 10^{-21} \tau^5 + 10^{-16} \tau^4 - 3 \cdot 10^{-12} \tau^3 + 2 \cdot 10^{-8} \tau^2 - 0,0001 \tau +, \\ + 0,1857 & \text{при } \varphi(P_3(\tau)) > 0 \end{cases} \quad (29)$$

где  $\tau$  - время фильтрования, с.

Выражения (19-21) могут быть обобщены следующим образом

$$\sum_{j=1}^m \varphi(P_{j\eta\beta}(\tau)) = 1 - \sum_{i=1}^n \varphi(P_{i\alpha\beta}(\tau)), \quad (30)$$

где состояния  $P_{j\eta\beta}$ ,  $P_{i\alpha\beta}$  - состояния, принадлежащие параллельным плоскостям  $\alpha$ ,  $\eta$  и пересекающей их плоскости  $\beta$  одновременно;  $m$ ,  $n$  - состояния в плоскостях  $\alpha$  и  $\eta$  соответственно.

Условием перехода в параллельное состояние является превышение вероятности пребывания в текущем состоянии максимального значения, если вероятности последующего после текущего состояния в заданной плоскости равны нулю, что можно записать следующим образом

$$\pi_{11} = (0.4, 0, 0)$$

для однослойного фильтра и

$$\pi_{11} = (0.2, 0, 0)$$

для двухслойного.

Предельное состояние системы управления однослойным фильтром при безаварийной работе с учетом экспериментальных данных характеризуется предельной матрицей переходных вероятностей в плоскости  $\alpha$  -  $P_\alpha$ , составленной на основе алгоритма, описанного во 2-ой главе, и предельных вероятностей состояний. При данном состоянии система функционирует в нормальном режиме и управляется системой текущего контроля. Необходимость включения супервизорного контроля определяется следующей предельной матрицей переходных вероятностей -  $P'_\alpha$

$$\varphi(P_\alpha) = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,89 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0,85 & 0,05 \\ 0,25 & 0 & 0 & 0,7 & 0,05 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \varphi(P'_\alpha) = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,89 & 0 & 0 & 0,01 \\ 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Вектор состояний плоскости  $\alpha$

$$\varphi(P_\alpha) = \{0,1, 0,5, 0,1, 0,7, 0\}.$$

В плоскость  $\beta$  попадают состояния  $P_1$  и  $P_2$ , следовательно, состояние объекта плоскости  $\beta$  характеризуется вектором

$$\varphi(P_\beta) = \{0,1, 0,5\}.$$

Предельная вероятность пребывания системы в состояниях  $P_1$ - $P_5$  определяется вероятностью циклических переходов: для  $P_1$  -  $\pi_1$ , для  $P_2$  -  $\pi_3$ ;  $P_3$  -  $\pi_9$ ;  $P_4$  -  $\pi_7$ . Для плоскости  $\beta$  при отсутствии переходов от  $P_2$  к последующим в плоскости  $\alpha$

предельная вероятность состояния определяется вероятностью перехода. Можем определить предельную вероятность состояния  $P_6$  для состояния системы в плоскости  $\beta$

$$\varphi(P_6) = 1 - (\varphi(P_1) + \varphi(P_2)) = 1 - 0,1 - 0,5 = 0,4.$$

Данная предельная вероятность состояния  $P_6$  является вероятностью циклического перехода  $\pi_{12}$  для состояний плоскости  $\eta$ . Учитывая это, можно составить матрицу предельных переходных вероятностей для плоскости  $\eta$ .

$$\varphi(P_\eta) = \begin{bmatrix} 0,4 & 0,6 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, АСУПА постоянно пересчитывает вероятности нахождения системы в режимах работы и сопоставляет их с данными локальной АСУ. Если возникли условия, описанные формулами (12-31), АСУПА включает супервизор, супервизор рассчитывает время фильтрования до аварийного режима и сопоставляет полученные данные с текущими данными локальной АСУ. При превышении времени и условиях (12-31), подается сигнал и реализуются нейтрализующие мероприятия.

При реализации нейтрализующих мероприятий учитываются дополнительные факторы информационной среды АСУТП, аспирации и АСУППЗ.

Анализ информационной среды системы аспирации реализуется с помощью сети Петри, представленной на рис. 21. Система создает следующие начальные маркеры (метки) сети, используя специальные критерии, относящиеся как к пылеуловителю, так и к аспирации в целом с помощью логических функций. К данным критериям относятся следующие.

1. Применяемое устройство пылеулавливания.

$$U = \begin{cases} 1, \text{ если инерционный пылеуловитель} \\ 1, \text{ если циклон;} \\ 1, \text{ если фильтр волокнистый;} \\ 1, \text{ если фильтр зернистый;} \\ 1, \text{ если электрофильтр;} \\ 0, \text{ если скруббер;} \\ 0, \text{ если мокрый фильтр.} \end{cases}$$

Условие перехода в сети Петри  $I(t_{3,6,9}) = \{P_{9,11-14}\}$  при  $U=1$ .

2. Способ управления состоянием фильтра-пылеуловителя.

$$A_A = \begin{cases} 1, \text{ если отсутствует;} \\ 1, \text{ если автономное автоматическое;} \\ 0, \text{ если автоматизированное централизованное.} \end{cases}$$

Условие перехода в сети Петри  $I(t_{4,5,26,27}) = \{P_{17,18,22,23}\}$  при  $U=1$ .

3. Применение устройств пламяпреграждения.

$$P_t = \begin{cases} 0, \text{ если установлены;} \\ 1, \text{ если не установлены} \end{cases}$$

Условие перехода в сети Петри  $I(t_{4,5,26,27}) = \{P_{12,15,17,18,21,22}\}$  при  $U=1$ .

5. Наличие модулей пожаротушения в системе аспирации.

$$Pt_A = \begin{cases} 1, \text{ если отсутствуют;} \\ 0, \text{ если установлены в системе аспирации} \end{cases}$$

Условие перехода в сети Петри  $I(t_{10,11,13,14,19,20}) = \{P_{17-23}\}$  при  $U=1$ .

Каждый из векторов запускает фактор неблагоприятной информационной среды, который усугубляет ситуацию при возникновении тревожного сигнала от подсистемы текущего контроля и супервизора. В этом случае на выходе из подсистемы анализа информационной среды получим состояние  $P$  – рис. 21.

Информационная среда производственного помещения и технологического процесса определяется с помощью сети Петри с приоритетами – рис. 22. Метка формируется при получении сигнала «1». Каждое из состояний системы обусловлено одной меткой, при получении хотя бы трех меток из положений  $P_{24}(K)$ ,  $P_{25}(B)$ ,  $P_{26}(B)$ ,  $P_{27}(A_T)$  осуществляется переход  $t_1$  в положение  $S$ , причем с приоритетом соответственно  $Pr_1$ ,  $Pr_2$ ,  $Pr_3$ ,  $Pr_4$ . Переход  $t_2$  из состояния  $S$  в состояние подачи тревожного сигнала  $P_{28}(A)$  срабатывает, если в состоянии  $S$  окажутся три конкурирующие метки.

Представленная сеть описана функцией

$$S = \langle P_i, T_i, I(t_i), O(t_i), M(P_i), \pi(P_i) \rangle,$$

где  $P_i$  – конечное множество состояний системы управления

$$P_i = \{P_1, P_2, P_4, P_5, P_6\};$$

$T$  – конечное множество дуг переходов

$$T = \{t_1, t_2\};$$

$E$  – конечное множество дуг переходов  $E \subseteq (P_i \times T_i) \cup (T_i \times P_i)$ ; или  $I$  и  $O$ , где

$$I(t_1) = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}, O(t_1) = \{P_5\} \quad I(t_2) = \{P_5\}, O(t_2) = \{P_6\};$$

Метки сети также служат сигналы, определяемые с помощью следующих логических функций.

1. Категория помещения по взрывопожарной и пожарной опасности.

$$K = \begin{cases} 1, \text{если } A \\ 1, \text{если } B \\ 0, \text{если } B \\ 0, \text{если } \Gamma - Д \end{cases}.$$

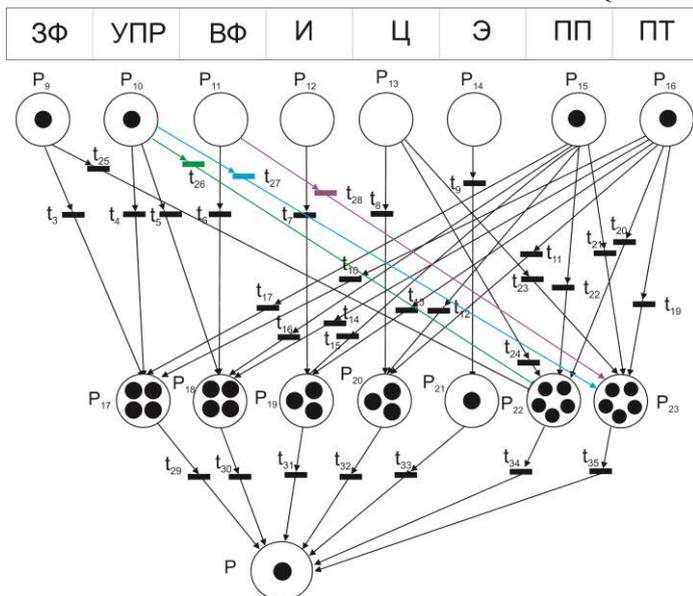


Рисунок 21 - Схема графов информационной среды АСУ аспирацией.

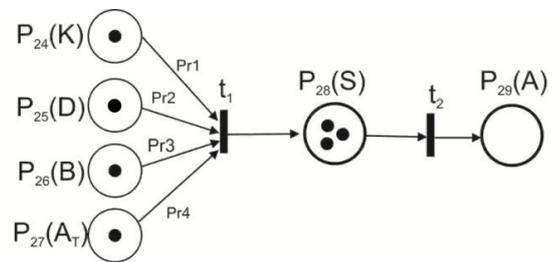


Рисунок 22 - Схема переходов

2. Дискретность технологического процесса

$$D = \begin{cases} 1, \text{при } n \in [0, 0,4] \\ 0, \text{при } n \in [0,5, \infty] \end{cases}$$

Критерий  $n$  определяется следующим образом

$$n = N \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{S \cdot \sum_{j=1}^m O g_j},$$

где  $N$  – количество производственных помещений, связанных технологическим процессом посредством трубопроводного, конвейерного, пневмотранспорта;  $t_i$  – количество единиц технологического оборудования, связанного между собой посредством трубопроводного, конвейерного, пневмотранспорта, при этом  $I \in [1, \infty]$ ;  $S$  – площадь помещения,  $m^2$ ;  $O g_j$  – количество единиц технических средств защиты, установленных в технологических коммуникациях, при этом  $j \in [1, \infty]$ . Если таких нет, то ставим 1.

3. Блокировка технологических процессов с аспирацией

$$B = \begin{cases} 0, \text{если заблокированы} \\ 1, \text{если не заблокированы} \end{cases}$$

4. Наличие средств автоматизации также кодируется логической функцией

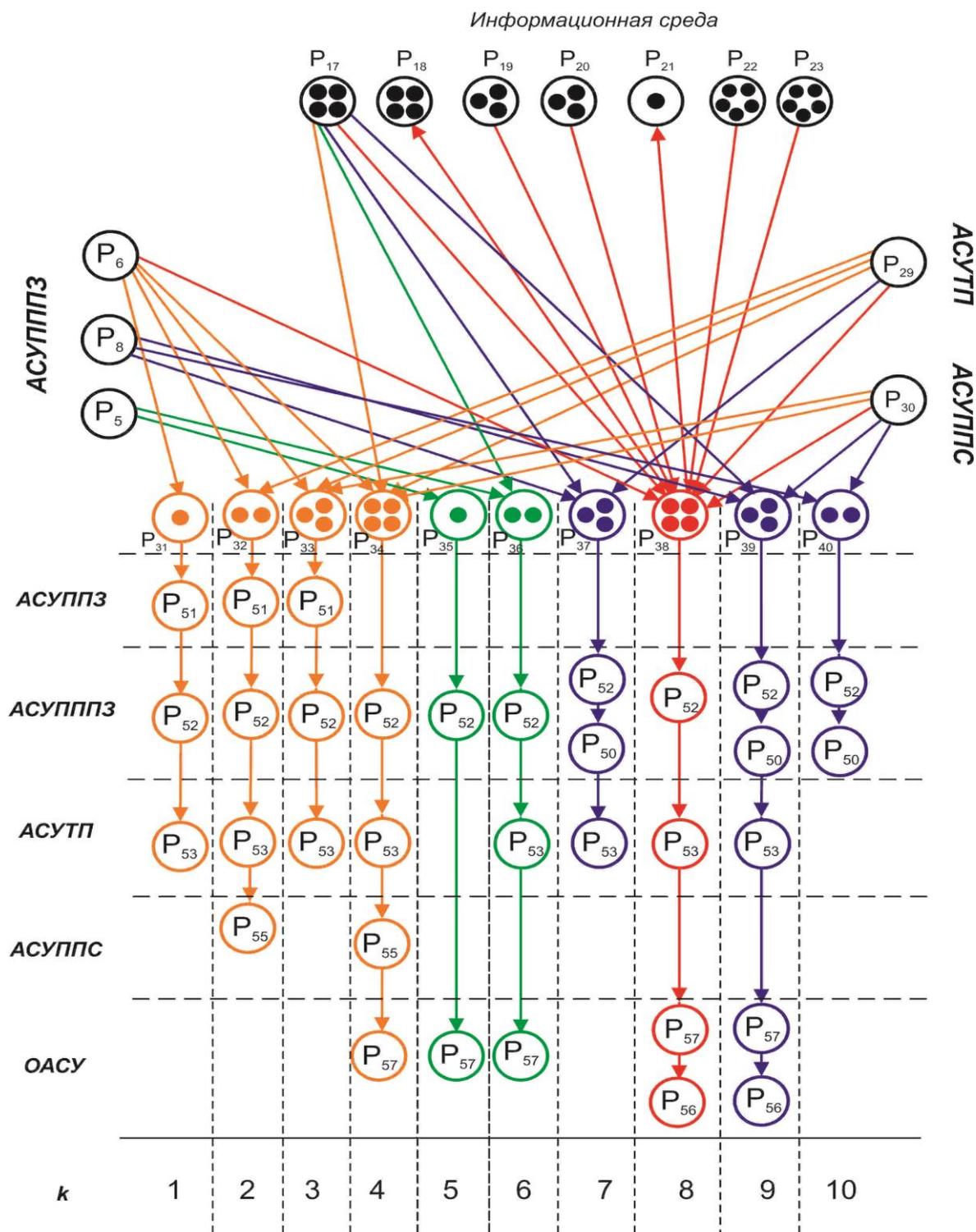
$$At = \begin{cases} 0, \text{если автоматизировано более 60\%}; \\ 1, \text{если менее 60\%}. \end{cases}$$

Взаимодействие АСУППЗ с АСУППЗ производственных помещений целесообразно при срабатывании тревожных сигналов, не относящихся непосредственно к аспирации. Информация о наличии или отсутствии возгорания в помещении задается в общей сети как состояние  $P_{30}$  и определяется с помощью логической функции

$$PPZ = \begin{cases} 1, \text{возгорание} \\ 0, \text{нет возгорания} \end{cases}$$

Комбинации указанных меток и последовательность срабатываний систем позволяет определить меру воздействия и вовлечения двух других подсистем АСУ в нейтрализацию аварийной или предаварийной ситуаций. В результате формируется единая комбинированная цепь, фрагмент которой представлен на рис. 23. Исполнение данной цепи позволяет реализовывать функции ИСУБП по обнаружению и нейтрализации аварийных ситуаций на производственных объектах, связанных с обращением горючей пыли.

Каждую из цепочек событий, обозначенных на схемах номером  $k$ , начиная от зарождения и развития аварийной ситуации, ее масштабирования с учетом особенностей информационной среды, управления технологическим процессом и противопожарной защиты и заканчивая регулирующими воздействиями, следует рассмотреть отдельно как маркированную сеть Петри для того, чтобы получить ее описание. Регулирующие воздействия, предназначенные для того, чтобы нейтрализовать ситуацию с максимальной эффективностью и минимальными потерями, на схемах обозначены



состояниями  $P_{50}-P_{57}$ :  $P_{50}$  – регенерация фильтровальной перегородки;  $P_{51}$  – локальное тушение в системе аспирации;  $P_{52}$  – блокировка системы аспирации;  $P_{53}$  – блокировка технологического процесса;  $P_{54}$  – срабатывание АУПТ в помещении;  $P_{55}$  – оповещение СОУЭ;  $P_{56}$  – эвакуация людей с производственного объекта;  $P_{57}$  – оповещение оператора общезаводской АСУ.

Состояния  $P_{31}-P_{48}$  – решающие состояния, содержащие различное количество меток, за которые одновременно могут конкурировать несколько состояний.

Например, цепочка событий с  $k=8$  описывается следующим образом.

$$I(t_{34}) = \{P_8, P_{30}, P_{29}, \{P_{18}, P_{19}, P_{20}, P_{21}, P_{22}, P_{23}\}\}, O(t_{34}) = \{P_{38}\},$$

причем переход  $t_{34}$  имеет конкурирующие метки, поэтому следует обозначить приоритеты меток. Так как конкурирующих меток более двух, то обозначим вес каждой из меток в диапазоне от 0 до 1. В зависимости от заданных условий формирования состояний  $P_{17}-P_{23}$

$$Pr_1 > Pr_2 > Pr_3 > Pr_4 > Pr_5 > Pr_6 > Pr_7 > Pr_8 > Pr_9 > Pr_{10},$$

где  $Pr_1=0,3; Pr_2=0,25; Pr_3=0,2; Pr_4=0,15; Pr_5=0,1; Pr_6=0,7; Pr_7=0,5; Pr_8=0,3; Pr_9=0,1; Pr_{10}=0$ .

При срабатывании более двух меток осуществляется сравнение веса приоритета метки и учитывается метка с большим весовым значением. Аналогично описывается реализация каждой из цепочек.

Каждой из  $k$ -ых цепочек присвоен ранг, что позволяет определить приоритетные реакции АСУП при срабатывании сразу нескольких цепочек.

Очевидно, что при повышении надежности систем, в том числе путем автоматизации их работы (выделено черным цветом, рис. 24), снижается количество состояний для проведения реабилитационных мероприятий (выделено фиолетовым цветом, рис. 24), поэтому целесообразна максимальная степень автоматизации, в том числе систем аспирации и пылеуловителей.

Использование инновационных конструкций фильтров-пылеуловителей позволяет не только снизить пожарную опасность, но и сократить ресурсы на реализацию нейтрализующих воздействий. Были разработаны конструкции фильтров (патенты №№ 2335954, 2629683), применение которых позволяет избежать остановок технологического и аспирационного процессов, переключения направления потоков и прочих операций, сопровождающих обычно регенерацию или смену фильтра, что существенно влияет на структуру и состав оборудования систем автоматики и более глобально на процесс автоматизации производства.

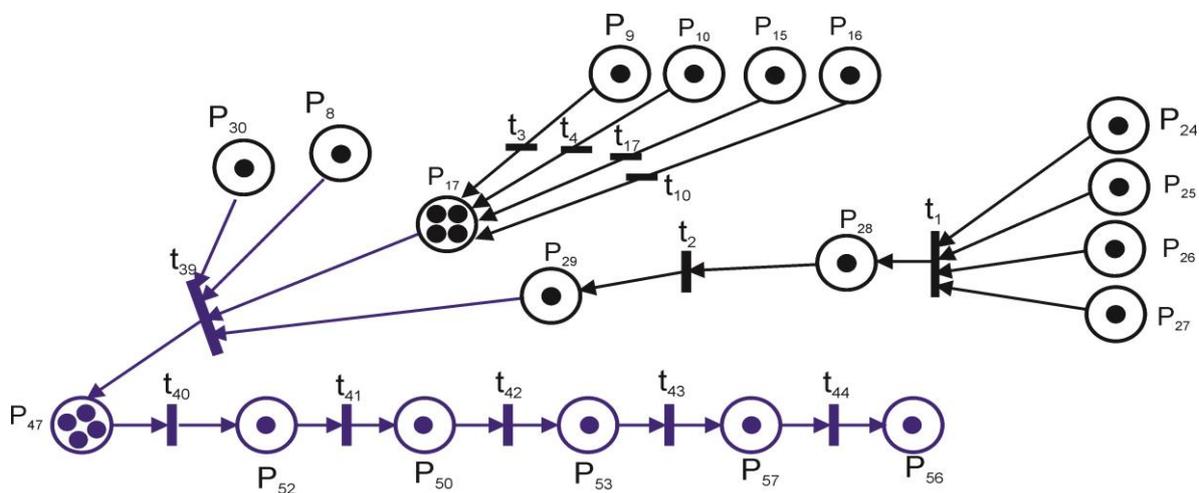


Рисунок 24 - Цепочка событий:  $k=17$

На рис. 25 а показаны схемы автоматической регенерации традиционного фильтра и одного из инновационных решений (заявка на патент на изобретение №2020121515 – рис. 26) - рис. 25б. Упрощение структуры системы автоматики достигается за счет использования фильтров, в которых возможно управление состоянием фильтровальной среды в ходе реализации основного технологического процесса.

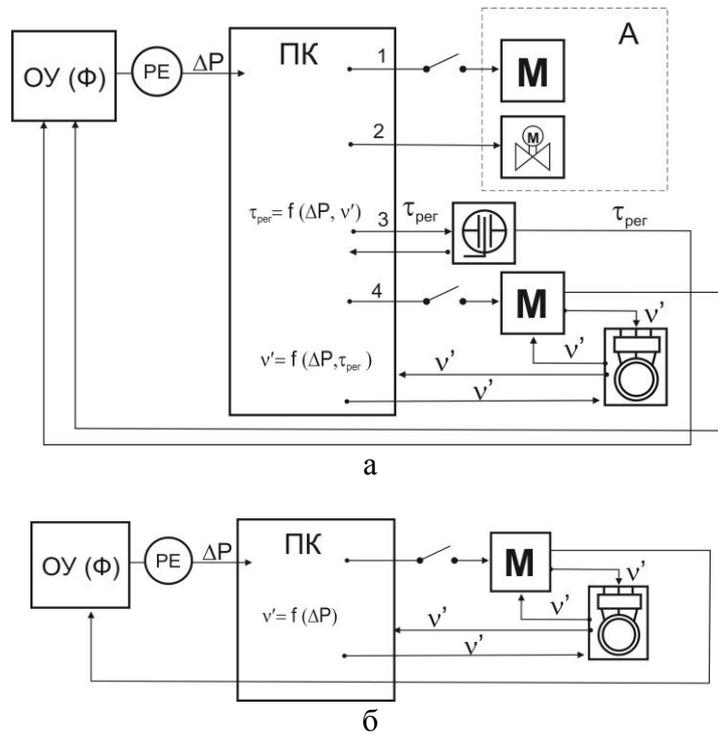


Рисунок 25 - Принципиальная схема автоматического управления системой аспирации с фильтром: ОУ – объект управления; РЕ – датчики давления; ПК - персональный компьютер; М - двигатель вентилятора; а – традиционные фильтры-пылеуловители; б – инновационные конструкции

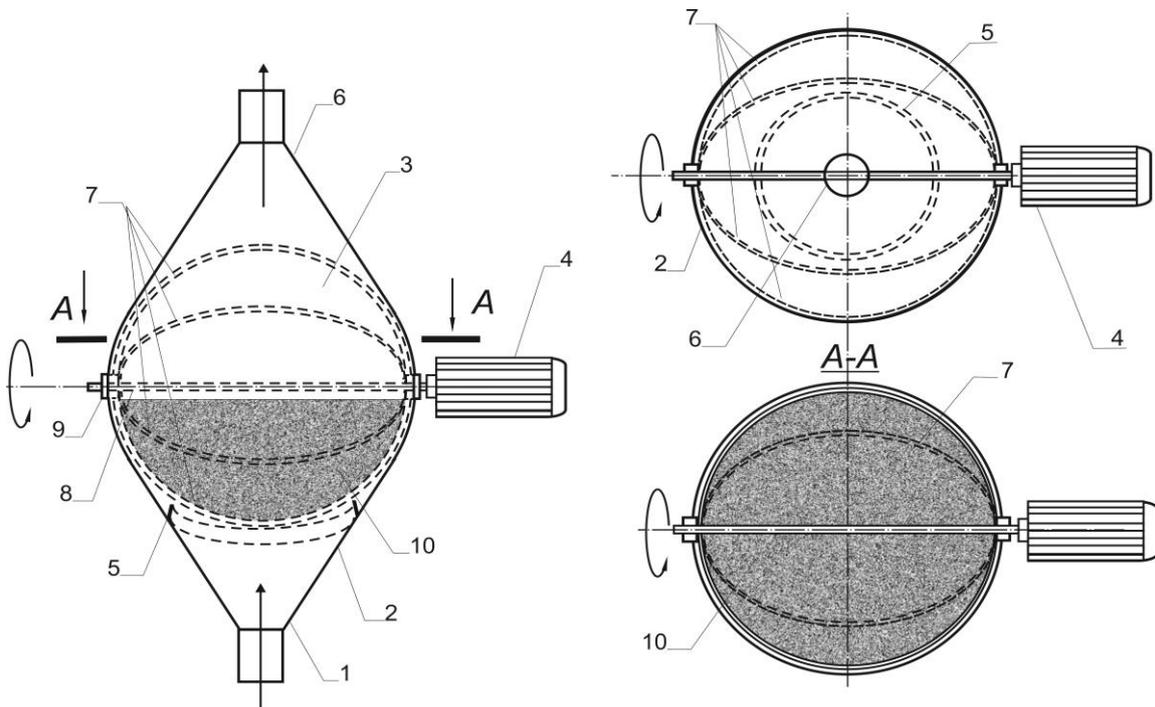


Рисунок 26 - Схема насыпного сферического фильтра с автоматической саморегенерацией:  
 1 – входной патрубок; 2 - сферический корпус; 3 – фильтровальная кассета;  
 4 – электродвигатель; 5 – направляющая; 6 – патрубок выхода очищенного газа; 7 - дуги жесткости кассеты; 8 - вал вращения фильтровальной кассеты; 9 - крепление вала;  
 10 - насыпной фильтровальный материал

Внедрение АСУППЗ, интегрированной в АСУП и реализующейся в виде ИСУБП, позволит обеспечить высокий уровень безопасности производственных

процессов, связанных с образованием и обращением горючих пылей. Годовой экономический эффект от реализации системы, рассчитанный на примере 5-го и 6-го этажей зерноочистительного отделения Воронежского мукомольного комбината, составляет до 104640 рублей; срок окупаемости составляет до 4,7 лет. Следует учесть, что при взрыве или пожаре, на предупреждение которых на данном участке направлена система, ущерб составит 10 923 100 рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами диссертационного исследования являются следующие положения:

1. Доказана актуальность разработки научных основ создания автоматизированных систем управления аспирацией на основе анализа пожарной опасности технологических процессов и производств, особенностей возникновения и развития пожароопасных и аварийных ситуаций на производствах, связанных с образованием и обращением горючей пыли, технических средств предупреждения, ликвидации и контроля таких ситуаций.

2. Разработаны научные основы создания АСУ аспирацией, представляющей собой комплекс методик, алгоритмов, справочных данных, экспериментального оборудования и решающей вопросы автоматизированного выбора пылеуловителя и автоматизированного поддержания его безаварийной работы с различным набором справочных и экспериментальных данных о параметрах производственных потоков и характеристиках пылеуловителя. Использование разработанных методик идентификации пылеуловителя позволило определить, что наилучшим пылеуловителем для производственных объектов, на которых обращается горючая пыль, является зернистый фильтр-пылеуловитель с несвязанной структурой слоя. Управление аспирацией с указанным фильтром позволяет управлять ее состоянием посредством различных методов регенерации фильтрующей среды.

3. Разработан принципиальный подход, структура и методическое обеспечение создания автоматизированной системы управления предупреждением и противопожарной защитой (АСУПППЗ), основными функциями которой является контроль аварийных, предаварийных и пожароопасных ситуаций в производственной системе аспирации. Контроль аварийных и предаварийных ситуаций осуществляется посредством создания подсистемы АСУПППЗ - автоматизированной системы предотвращения аварий (АСУПА), включающей:

- текущую диагностику на основе оценки общего перепада давлений на фильтре и температуры пылегазового потока;
- прогнозирующий контроль на основе расчетных моделей и исходных данных системы аспирации.

4. Создано и апробировано полупромышленное и лабораторное оборудование, включающее модели фильтровальных устройств, приборное оформление и программное обеспечение для оценки работы аспирации, на основании чего сформированы основные требования к техническому обеспечению АСУ аспирацией.

5. Проведены экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях с целью изучения кинетики управляющей функции системы (общего перепада давлений на фильтре) для обоснования алгоритмического и методического обеспечения АСУПА. Определены и описаны режимы работы фильтров-пылеуловителей, в том числе обнаружен и описан впервые аварийный

режим работы фильтра – *экзосция*. Методом предварительной экспертной оценки и последующего априорного ранжирования входных параметров определены наборы контролируемых входных переменных, оказывающих воздействие на управляющую функцию – перепад давлений.

6. Разработано методическое, математическое и алгоритмическое обеспечение локальной АСУ с учетом нормальных и аварийных режимов работы однослойных и двухслойных фильтров-пылеуловителей. Указанные материалы оформлены как следующие изобретения:

– способ автоматизированного поддержания безаварийной работы фильтра-пылеуловителя (патент № 2743560);

– способ автоматизированного управления процессом пылеулавливания в зернистых фильтрах с несвязанной структурой (патент № 2746369).

7. Разработано методическое, математическое и программное обеспечение АСУПА для прогнозирования режима экзоссии для однослойных и двухслойных зернистых фильтров-пылеуловителей с закупориванием пор слоя и образованием осадка на поверхности на основе исходных данных системы аспирации.

8. Впервые предложена и математически описана *многомерная полумарковская цепь*, позволяющая реализовать взаимодействие локальной АСУ текущей диагностики и супервизорной прогнозирующей подсистемы в составе АСУПА.

9. Разработаны научные основы создания интегрированной системы управления безопасностью производства (ИСУБП) на основе комбинированных сетей Маркова и сетей Петри, позволяющих учесть специфику управления системами аспирации с фильтрами-пылеуловителями, особенности процесса производства и его автоматизированного контроля – АСУТП, функциональность и состав автоматизированных систем противопожарной защиты АСППЗ.

10. На основе комбинированной сети Петри-Маркова сформирован подход к нейтрализации аварийных ситуаций различного масштаба и происхождения.

11. Предложен научный подход к регулированию работы аспирации путем модификации и управления состоянием фильтра-пылеуловителя. Предложены и апробированы конструкции фильтров-пылеуловителей, позволяющие реализовать предложенный подход и упростить процесс регулирования. Регулирование предложенным способом позволит осуществлять вывод аспирации из аварийных состояний, а также реализовать другие компенсирующие воздействия без остановки аспирации и технологических процессов.

12. Использование разработанной концепции ИСУБП, а также ее аппаратных решений позволяет повысить ресурс и эффективность АСУ аспирацией и самой производственной системы аспирации. Результатом является минимизация энергоемкости, потерь продукции, преждевременного износа оборудования, дополнительных выплат заработной платы, штрафов за нарушение норм ПДВ и пожарной безопасности, ущерба при пожаре.

### **Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:**

1. Романюк, Е.В. Математическая модель для расчета времени аварийного проскока частиц в фильтрах-пылеуловителях при высокой концентрации пыли в

потоке / Е.В. Романюк, А.В. Федоров, А.Н. Членов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – № 10. – С. 35-38.

2. Романюк, Е.В. Автоматизированная система управления производственной аспирацией с фильтрами-пылеуловителями / Е.В. Романюк // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 4. – С.21-25.

3. Romanyuk, E.V. Automated Control Of Aspiration Of Explosion-And Fire-Hazardous Industries With Filters-Dust Collectors / E.V. Romanyuk, A.V. Fedorov, A.L. Holostov, A.N. Denisov // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education. – 2021. – Vol.12 No. 5. – P. 1852-1860.

4. Романюк, Е.В. Математическая модель для прогнозирования режима работы аспирации с фильтрами-пылеуловителями / Е.В. Романюк // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. –2021 – № 4. – С. 42-48.

5. Романюк, Е.В. Интегрированная система управления безаварийной работой пылевыведяющих производств // Технологии техносферной безопасности. – 2020. – Вып. 2 (88). – 2020. – С. 87-98.

6. Романюк, Е.В. Особенности возникновения и предупреждения взрывоопасных режимов в системах аспирации с фильтрами-пылеуловителями / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Пожарная безопасность. – 2020. – № 1. – С. 89-96.

7. Романюк, Е.В. Особенности автоматизации систем аспирации с зернистыми фильтрами / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 8. – С. 61-66.

8. Романюк, Е.В. Особенности расчета общего перепад давления на зернистых фильтрах / Е.В. Романюк // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2019. – № II-1(38). – С. 61-68.

9. Романюк, Е.В. Предотвращение распространения пожара в системах вентиляции и аспирации производственных помещений / Е.В. Романюк, Д.В. Каргашилов, А.В. Федоров, Б.Г. Кажужев / Вестник Воронежского института ГПС МЧС России (Современные проблемы гражданской защиты). – 2018. – № 3(28). – С. 73-77.

10. Романюк, Е.В. Автоматизированная система контроля работы фильтров-пылеуловителей с несвязанной структурой зернистого слоя во взрывобезопасном режиме / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Автоматизация в промышленности. – 2018. – № 8. – С.13-16.

11. Романюк, Е.В. Система автоматизированного управления предупреждением пожаров в аспирационных системах с различным типом пылеулавливающего оборудования / Е.В. Романюк, Е.Л. Заславский, А.В. Фёдоров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 4. – С. 18-22.

12. Романюк, Е.В. Влияние специфики проектирования аспирационных систем на взрывопожарную опасность и расчетное значение пожарного риска / Е.В. Романюк, А.В. Федоров, Д.В. Каргашилов // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2017. – № 3(24). – С. 81-85.

13. Романюк, Е.В. Математическое описание движения частиц осажденной пыли высокоэффективного циклона-пылеуловителя для взрывопожароопасных производств / А.В. Некрасов, Е.В. Романюк, Д.В. Каргашилов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 3. – С.35-37.

14. Романюк, Е.В. Использование фильтровальных слоев с несвязанной структурой для очистки аспирационных пылегазовых потоков на производствах, связанных с обращением горючей пыли / Е.В. Романюк, М.А. Пинаев, Д.В. Каргашилов // Безопасность в техносфере. – 2016. – № 5. – С.45-47.
15. Романюк, Е.В. Прогнозирование максимального давления взрыва органических соединений на основе использования молекулярных дескрипторов и искусственных нейронных сетей / Д.С. Королев, А.В. Калач, Е.В. Романюк // Пожарная безопасность. – 2016. – № 3. – С.197-200.
16. Романюк, Е.В. Модернизация циклонов для повышения эффективности пылеулавливания / Е.В. Романюк, Д.В. Каргашилов, А.В. Некрасов // Безопасность жизнедеятельности. – 2016. – № 5. – С.18-22.
17. Романюк, Е.В. Универсальное устройство для снижения концентрации паров растворителей, красочных аэрозолей и предотвращения распространения пожара в системах вентиляции / Е.В. Романюк, Л.А. Морозов, Д.В. Каргашилов // Пожарная безопасность. – 2015. – № 4. – С. 154-157.
18. Романюк, Е.В. Циклоны высокой эффективности для очистки пылегазовых выбросов / Е.В. Романюк, Д.В. Каргашилов, А.В. Некрасов // Безопасность в техносфере. – 2014. – № 4. – С. 51- 55.
19. Романюк, Е.В. Комбинированные фильтровальные перегородки для очистки пылегазовых потоков в производстве огнеупоров / Е.В. Романюк, Ю.В. Красовицкий, А.А. Смирных, И.А. Чугунова// Новые огнеупоры. – 2014. - № 7. – С. 57-61.
20. Романюк, Е.В. Использование конусообразных фильтровальных элементов для снижения пылевидных выбросов производства по ремонту и обслуживанию железнодорожных вагонов / Е.В. Романюк, Н.В. Пигловский, Ю.В. Красовицкий // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2014. – №1(10). – С. 36-39.
21. Романюк, Е.В. Разработка циклона-пылеуловителя в мукомольном производстве / Д.В. Каргашилов, А.М. Гавриленков, А.В. Некрасов, Е.В. Романюк // Вестник ВГУИТ. – 2013. – № 3 – С. 13-17.
22. Романюк, Е.В. Теоретическое исследование движения частиц осажденной пыли по поверхности высокоэффективного циклона-пылеуловителя / Е.З. Матеев, А.В. Некрасов, Д.В. Каргашилов, Е.В. Романюк // Вестник алматинского гуманитарно-технического университета, 2013. - № 3(13). – С. 52-58.
23. Романюк, Е.В. Циклоны-фильтры для тонкой очистки пылегазовых потоков / Н.В. Пигловский, Е.В. Романюк, Ю.В. Красовицкий, А.В. Логинов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – №1. – С.22-25.
24. Романюк, Е.В. Фильтры для очистки пылегазовых потоков // Н.В. Пигловский, Е.В. Романюк, Ю.В. Красовицкий // Мир транспорта. – 2012. – № 2. – С.186-190.
25. Романюк, Е.В. Процессы регенерации зернистых фильтров-пылеуловителей / Красовицкий Ю.В., С.Ю. Панов, Е.В. Романюк, Н.Н. Лобачева, И.Д. Лютиков, А.С. Бурцева// Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – №1. – С.31-33.
26. Романюк, Е.В. Коагуляция частиц дисперсной фазы в пылегазовых потоках при производстве строительных материалов / Ю.В. Красовицкий, С.Ю. Панов, Е.В. Романюк, Е.В. Архангельская, З.С. Гасанов // Строительные материалы, 2012. – № 4. – С. 66-67.

27. Романюк, Е.В. Зернистые и комбинированные фильтры-пылеуловители в технологических и аспирационных системах / Ю.В. Красовицкий, С.Ю. Панов, Е.В. Романюк, Е.В. Архангельская, Н.Н. Лобачева, В.П. Мануковская, Ю.И. Макарова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 33-35.

28. Романюк, Е.В. Обеспыливание технологических газов при высоких температурах зернистыми фильтрами / Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, Н.В. Пигловский, Р.Ф. Галиахметов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 6. – С.26-28.

29. Романюк, Е.В. Интерполяционные модели для расчета эффективности пылеулавливания в производстве строительных материалов / Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, Н.В. Пигловский, Р.Ф. Галиахметов // Строительные материалы. – 2011. – №4. – С. 63-65.

30. Романюк, Е.В. Особенности эксплуатации пылеуловителей при производстве строительных материалов / Ю.В. Красовицкий, Н.В. Пигловский, Р.Ф. Галиахметов, Н.Н. Лобачева, Е.В. Романюк // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С.63-65.

31. Романюк, Е.В. Многоцелевые зернистые фильтры - пылеуловители для очистки технологических газов и аспирационных выбросов / И.А. Чугунова, Н.Н. Лобачева, Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, М.Н. Федорова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 1(6). – С. 163-167.

32. Романюк, Е.В. Состояние воздушной среды мегаполиса (на примере г. Воронежа) / Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, Е.Л. Заславский, Н.В. Пигловский // Финансы. Экономика. Стратегия. – 2010. – № 4. – С. 46-51.

33. Романюк, Е.В. Комбинированные фильтровальные структуры для тонкой очистки воздуха, направленного для аэрации смеси в дрожерастильные барабаны / Е.В. Романюк, Ю.В. Красовицкий, А.В. Логинов, М.Н. Федорова // Вестник ВГТА. – 2010. – № 1(43). – С. 58-62.

34. Романюк, Е.В. Экономические преимущества аэродинамической оптимизации систем и аппаратов пылеулавливания в производстве строительных материалов / И.А. Чугунова, Ю.В. Красовицкий, М.Н. Федорова, Е.В. Романюк // Строительные материалы. – 2009. – № 10. – С. 39-41.

35. Романюк, Е.В. Анализ механизма растекания пылегазового потока по распределительным устройствам пылеуловителей в производстве строительных материалов / И.А. Чугунова, Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, Р.А. Важинский, М.Н. Федорова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 10. – С. 43-46.

36. Романюк, Е.В. Техничко-экономические аспекты высокоэффективного обеспыливания зернистыми фильтровальными слоями / Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, И.А. Чугунова, М.Н. Федорова // Строительные материалы. – 2009. – № 12. – С. 39 - 42.

37. Романюк, Е.В. Комплексное решение проблемы пылеулавливания на зерноперерабатывающих предприятиях / Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, Р.А. Важинский // Вестник воронежской государственной технологической академии. – 2009. – № 1(39). – С.31-35.

38. Романюк, Е.В. Предварительная подготовка пылегазовых потоков к тонкой очистке на предприятиях пищевой промышленности / Е.В. Романюк, Ю.В. Красовицкий,

Р.А. Важинский, И.А. Чугунова // Вестник воронежской государственной технологической академии. – 2009. – № 1(39). – С. 74-78.

39. Романюк, Е.В. Техничко-экономические аспекты высокоэффективного обеспыливания зернистыми фильтровальными слоями / Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, И.А. Чугунова, М.Н. Федорова // Строительные материалы. – 2009. – № 12. – С. 62-65.

40. Романюк, Е.В. Унифицированный экспериментальный стенд и система мониторинга для оценки эффективности фильтровальных перегородок / Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, Е.Л. Заславский, Е.В. Архангельская, А.А. Маньков, Н.Н. Лобачева // Строительные материалы. – 2008. – №1. – С.66-67.

41. Романюк, Е.В. Определение удельной газовой нагрузки на зернистые фильтры / Е.В. Романюк, Ю. В. Красовицкий, Р. А. Важинский, Н. Н. Лобачева, Е. Л. Заславский, А. В. Логинов // Строительные материалы. – 2008. – № 7. – С. 73-76.

42. Романюк, Е.В. Определение запыленности газов и эффективности пылеулавливания в производстве стройматериалов / Ю.В. Красовицкий, Р.А. Важинский, А.А. Маньков, Е.В. Романюк, Н.Н. Лобачева, В.Г. Стогней // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т.4. – № 9. – С. 89-91.

43. Романюк, Е.В. Медико-экологический мониторинг пылегазовых выбросов промышленных предприятий в современном мегаполисе / Е.В. Романюк, Ю.В. Красовицкий, Е.Л. Заславский, Р.А. Важинский // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2009. – № 2. – С. 166-170.

44. Романюк, Е.В. Комбинированные фильтровальные структуры для высокоэффективного пылеулавливания / Ю.В. Красовицкий, Е.В. Романюк, И.А.Чугунова, М.Н. Федорова // Строительные материалы. – 2009. – № 9. – С. 70-71.

45. Романюк, Е.В. Новые конструктивные решения зернистых фильтров и перспективы их применения при тепловой сушке в химической и пищевой технологиях / Ю.В. Красовицкий, Р.А. Важинский, Н.Н. Лобачева, Е.В. Романюк, А.А. Маньков // Вестник тамбовского государственного технического университета. – 2008. – Т.14. – № 3 – С. 608-614.

46. Романюк, Е.В. Эксергетический анализ и выбор энергосберегающих параметров импульсной регенерации фильтров, улавливающих пыль из сушильного агента / Ю.В. Красовицкий, Р.А. Важинский, Н. Н. Лобачева, Р.А. Важинский, Е.В. Романюк, Е.В. Архангельская // Вестник тамбовского государственного технического университета. – 2008 – Т.14. – № 3. – С. 605-607.

47. Романюк, Е.В. Особенности применения фильтров со связанной структурой зернистого слоя при высокотемпературном пылеулавливании из технологических и аспирационных выбросов / Е.В. Романюк, Ю.В. Красовицкий, В.Г. Стогней, Д.Б. Трощенко, Н.Н. Лобачева, Е.В. Архангельская, А.А. Маньков // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т.4. – № 3. – С.51-54.

48. Романюк, Е.В. Анализ дисперсного состава промышленных пылей струйными осадителями (импакторами) / Р.А. Важинский, Ю.В. Красовицкий, А.А. Маньков, Е.В. Романюк, Е.В. Архангельская, В.Г. Стогней // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2008. – Т.4. – № 9. – С. 21-23.

49. Романюк, Е.В. Аэродинамические аспекты технологии и пылеулавливания в промэнергетике / Ю.В. Красовицкий, В.Г. Стогней, А.В. Логинов, Д.Б. Трощенко, Н.Н. Лобачева, Е.В. Романюк, Е.В. Архангельская, В.С. Железный // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2007. – Т.3. – № 12. – С.43-44.

#### **Патенты на изобретения и полезные модели РФ:**

50. Патент № 2746369 Российская Федерация, МПК В01D 46/30 (2006.01), 46/30 (2020.08). Способ автоматизированного управления процессом пылеулавливания в зернистых фильтрах с несвязанной структурой: 2020117725 : заявл. 19.05.2020 : опубл. 12.04.2021 / Романюк Е.В., Федоров А.В., Поляков Д.В.; заявитель Академия ГПС МЧС. – 2 с.

51. Патент № 2743560 Российская Федерация, МПК 51 В01D 46/02 (2006.01), 46/46 (2006.01). Способ автоматизированного поддержания безаварийной работы фильтра-пылеуловителя: № 2020121514 : заявл. 25.06.2020 : опубл. 19.02.2021 / Романюк Е.В.; заявитель Академия ГПС МЧС России. – 1с.

52. Патент № 2657692 Российская Федерация, МПК 51 А62С 4/00 (2006.01). Искрогаситель, пламепреградитель, конденсатор с форсунками для регенерации (ИПК 1.1): № 2016145697 : заявл. 22.11.2016 : опубл. 14.06.2018 / Романюк Е.В., Гаврилов А.М., Каргашилов Д.В., Шуткин А.Н., Калач А.В., Мирошниченко Д.И.; заявитель ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – 1с.

53. Патент № 2629683 Российская Федерация, МПК 51 В01D 53/00, 24/04(2006/01). Насыпной комбинированный фильтр с системой регенерации: № 2015141470: 29.09.2015 : опубл. 31.08.2017 / Романюк Е.В., Пинаев М.А.; заявитель Е.В. Романюк. – 1 с.

54. Патент № 169127 Российская Федерация, МПК51 В04С 9/00 (2006.01), 5/12(2006.01). Фильтр-циклон с конической вставкой и картриджным фильтром : № 2016138871 : заявл. 3.10.2016 : опубл. 3.03.2017 / Романюк Е.В., Гаврилов А.М., Каргашилов Д.В., Шуткин А.Н., Калач А.В.; заявитель ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России. – 3 с.

55. Патент № 105200 Российская Федерация, МПК51 В04С 9/00 (2006.01). Циклон-фильтр : № 2010146337/05 : заявл. 13.11.2010 : опубл. 10.06.2011 / Логинов А.В., Красовицкий Ю.В., Пигловский Н.В., Романюк Е.В., Федорова М.Н, Чугунова И.А. ; заявитель ГОУ ВПО ВГТА. – 3 с.

56. Патент № 2474463 Российская Федерация, МПК51 В01В 53/00(2006.01). Насыпной комбинированный фильтр : / № 2011139431 : заявл. 27.09.2011 : опубл. 10.02.2013 / Чугунова И.А., Романюк Е.В., Красовицкий Ю.В. ; заявитель ГОУ ВПО Воронежская государственная технологическая академия. – 3 с.

57. Патент № 2597535 Российская Федерация, МПК 51 А62С 4/00 (2006.01) Искрогаситель, пламягаситель, конденсатор (ИПК 1.0) : № 2014150378/12 : заявл. 11.12.2014 : опубл. 10.07.2016 / Морозов Л.А., Романюк Е.В., Каргашилов Д.В.; заявитель Романюк Е.В. – 2 с.

58. Патент № 164866 Российская Федерация, МПК51 В04С 9/00(2006.01), 5/107(2006.01). Фильтр-циклон с конической вставкой : № 2016103205/05 : заявл. 01.02.2016 : опубл. 20.09.2016 / Романюк Е.В., Усов А.А., Каргашилов Д.В., Калач А.В., Шуткин А.Н.; заявитель ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России. – 3 с.

59. Патент № 2701836 Российская Федерация МПК 51 В01D45/08, В01D45/06 (2019.02). Трубчатый пылеосадитель : 2701836 : заявл. 30.04.2018; опубл. 01.10.2019. / Романюк Е.В., Калиев О.С., Каргашилов Д.В. ; заявитель ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России.

60. Патент № 2019134810 Российская Федерация МПК 51 Е04В 1/94 (2006.01) F42D 5/045 (2006.01) (52) СПК Е04В 1/94 (2019.08) F42D 5/045 (2019.08). Пламевзрывозащитная конструкция ограждения от воздействия опасных факторов пожара: № 2019134810 : заявл. 29.10.2019 : опубл. 06.02.2020 / Каргашилов Д.В., Шевцов С.А., Зенин А.Ю., Романюк Е.В.; заявители Каргашилов Д.В., Шевцов С.А., Зенин А.Ю., Романюк Е.В.

61. Патент № 105200 Российская Федерация МПК51 В04С 9/00 (2006.01). Циклон-фильтр : № 105200 : заявл. 13.11.2010 : опубл. 10.06.2011 / Логинов А.В., Красовицкий Ю. В., Пигловский Н.В., Романюк Е.В., Федорова М.Н., Чугунова И.А.; заявитель ВГТА.

#### **Свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ:**

62. Свид. № 2020612201 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Мониторинг работы фильтра-пылеуловителя : № 2020611121 : заявл. 04.02.2020: опубл. 19.02.2020 / Романюк Е.В.; заявитель Романюк Е.В. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

63. Свид. № 2017614784 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет основных параметров зернистых фильтров : № 2017614784 : заявл. 31.01.2017 : опубл. 27.04.2017 / Романюк Е.В., Заславский Е.Л., Федоров А.В., Поляков Д.В.; заявитель Романюк Е.В. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

64. Свид. № 2014610850 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа считывания данных с цифровых датчиков давления : № 2014610850 : заявл. 15.11.2013 : опубл. 20.02.2014 / Романюк Е.В.; заявитель Романюк Е.В. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

#### **Монографии:**

65. Романюк Е.В. Совершенствование систем аспирации с использованием комбинированных фильтровальных структур: монография / Е. В. Романюк, Н.В. Пигловский, Ю.В. Красовицкий, Д.В. Каргашилов. – Воронеж, 2015. – 201 с.

66. Романюк, Е.В. Использование комбинированных фильтров для систем аспирации / Е.В. Романюк. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 220с. - ISBN: 978-3-330-00957-8.

#### **Публикации в других изданиях:**

67. Романюк, Е.В. Модель Марковской цепи для управления фильтром производственной аспирационной системы / Романюк Е.В. // Сборник статей XLII международной научно-практической конференции «Advances in Science and Technology». - Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2022. – С. 56-58. - Режим доступа: [http://актуальность.рф/AST-42\\_originalmaket\\_N.pdf](http://актуальность.рф/AST-42_originalmaket_N.pdf) ( дата обращения: 16.02.2022 ).

68. Романюк, Е.В. Аппаратурные решения фильтров для автоматизации процессов управления аспирацией / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Дальневосточная

весна – 2021: материалы 19-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности. - Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 208-210.

69. Романюк, Е.В. Поддержание безопасного режима работы аспирации производственных объектов, связанных с обращением горючей пыли / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Дальневосточная весна – 2021 : материалы 19-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 210-213.

70. Романюк, Е.В. Информационная среда для организации системы управления производственной аспирацией / Е.В. Романюк, А.В. Федоров, Е.Л. Заславский // «Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 228-231.

71. Романюк, Е.В. Диагностика работы систем аспирации с фильтрами-пылеуловителями / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Материалы двадцать девятой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2020» / Под общей редакцией д-ра техн. наук, профессора Топольского Н.Г. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. - С.192-195.

72. Романюк, Е.В. Схема автоматизированного управления аспирацией с зернистым цилиндрическим фильтром-пылеуловителем / Е.В. Романюк // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов IV международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России. Иваново, 15 октября 2020 г. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 257-258.

73. Романюк, Е.В. Математическое обеспечение режима подготовки к фильтрованию зернистого слоя для АСУ аспирации / Е.В. Романюк // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов IV международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России. Иваново, 15 октября 2020 г. – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 254-256.

74. Романюк, Е.В. Процесс пылеулавливания фильтрами как объект автоматизации / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Нефть и газ: технологии и инновации: материалы Национальной научно-практической конференции. В 3 томах. Том 2 / отв. ред. Н. В. Гумерова. – Тюмень: ТИУ, 2020. – С. 92-94

75. Романюк, Е.В. Идентификация и предупреждение взрывоопасных режимов работы систем аспирации с зернистыми фильтрами / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Материалы двадцать восьмой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2019» / Под общей редакцией д-ра техн. наук, профессора Топольского Н.Г. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 280-283.

76. Романюк, Е.В. Особенности выбора пылеуловителя для производств, на которых обращается горючая пыль / Е.В. Романюк // Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 24-27 сентября 2019 г.) : сборник докладов. - Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – С. 647- 650.

77. Романюк, Е.В. Использование зернистых фильтров-пылеуловителей для снижения взрывобезопасности систем аспирации / Е.В. Романюк // Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 24–27 сентября 2019 г.) :

сборник докладов). – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – С. 644-647.

78. Романюк, Е.В. Мониторинг работы фильтров-пылеуловителей в системах аспирации пылящих производств / Е.В. Романюк // Сборник материалов XIV международной научно-практической конференции, посвященной 370-й годовщине образования пожарной охраны России. – Иваново, 2019. – С. 77-79.

79. Романюк, Е.В. Идентификация взрывоопасных режимов в системе аспирации производственных помещений / Е.В. Романюк, Д.Н. Симанков, А.В. Федоров // Экологические проблемы промышленных городов: сборник научных трудов по материалам 9-й Международной научно-практической конференции. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2019. – С. 406- 409.

80. Романюк, Е.В. Система автоматического контроля взрывопожаробезопасной работы систем аспирации / Материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны «Гражданская оборона на страже мира и безопасности». – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 303-306.

81. Романюк, Е.В. Научные основы выбора пылеулавливающего оборудования с точки зрения взрывопожарной опасности системы аспирации / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Сборник материалов XII Международной научно-практической конференции «Пожарная аварийная безопасность». – Иваново, 2017. – С. 157-161.

82. Романюк, Е.В. Автоматизированная система подбора и мониторинга взрывобезопасной работы пылеуловителей / Е.В. Романюк, А.В. Федоров // Сборник статей по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». – Воронеж, 2017. – С. 941- 945.

Подписано в печать 20.04.2022. Формат 60x84/1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № 727.

Академия ГПС МЧС России.

129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4