

На правах рукописи



Мухина Анастасия Геннадьевна

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОГО
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬЮ ОБЪЕКТОВ
ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
ГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА**

Специальность:

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Научный руководитель: **Степин Юрий Петрович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Сагдатуллин Артур Маратович,**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», профессор

Абрамкин Сергей Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ имени В.И. Ульянова (Ленина), доцент

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Газпром ВНИИГАЗ»

Защита состоится «30» июня 2026 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета ДС 04.2.002.01 Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4, зал диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии Государственной противопожарной службы МЧС России и на сайте: <https://academygps.ru/upload/iblock/fe1/d6e81m41627smsn57ddag3iyoetgj6a0/Диссертация%20Мухиной%20А.Г.pdf>

Автореферат разослан «29» апреля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 04.2.002.01,
кандидат технических наук, доцент



Хабидулин Р.Ш.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Производительность функционирования технологических объектов и подсистем разработки и эксплуатации нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) в значительной степени определяется эффективностью их производственно-технического обслуживания (ПТО), в том числе включающего организационно-технологические мероприятия по обеспечению пожаровзрывобезопасности (ПВБ) критически важных технологических объектов газовых промыслов (ГП). Среди перечня проблем и задач ПТО (энергетическое обслуживание, техническое обслуживание и ремонт, геофизические исследования скважин и др.) применительно к опасным производственным объектам (ОПО) добычи и подготовки углеводородов в диссертации выделен и рассматривается комплекс задач, касающийся обеспечения ПВБ объектов ПТО газодобывающих комплексов (ГДК).

Неполнота и зашумленность промышленных данных затрудняет обеспечение ПВБ объектов ПТО ГДК. Более того, недостаток учета взаимодействия объектов ПТО ГДК и их территориальная распределенность также влияют на результаты обеспечения их ПВБ. В связи с этим возникает задача исследования, которая состоит в необходимости разработки моделей и алгоритмов для повышения эффективности тактического и оперативного адаптивного управления ПВБ объектов ПТО ГДК.

Осложненные условия разработки и эксплуатации НГКМ Арктического региона препятствуют повышению эффективности управления ПВБ объектов ПТО ГДК. Осложняет ситуацию и существенный недостаток в части разработки моделей и алгоритмов по выбору предпочтительных режимов функционирования установок комплексной подготовки газа (УКПГ) при применении способов низкотемпературной сепарации (НТС) и низкотемпературной абсорбции (НТА).

Далее, согласно технологическим регламентам эксплуатации УКПГ НГКМ Западной Сибири предъявлен ряд требований к содержанию зданий, сооружений и помещений, расположенных на территории УКПГ и представляющих собой взрывоопасные производственные объекты. Технологическим блокам УКПГ в большинстве случаев присваивается первая категория взрывоопасности. Здания, помещения и наружные установки УКПГ, СОГ и УПНК относятся к категориям А и А_н по

взрывопожарной и пожарной опасности. Поэтому с учетом изложенных выше положений необходима разработка математического и программного обеспечения автоматизированных систем управления (АСУ) функционированием пожароопасных объектов ПТО ГДК в системе «пласт – скважина – УКПП».

С учетом вышеизложенного актуальность данного диссертационного исследования заключается в необходимости совершенствования и разработки моделей и алгоритмов адаптивного управления ПВБ ОПО ГДК, а также разработки программно-вычислительного комплекса многоагентной адаптивной сетевидной системы поддержки принятия решений (МАССППР) для автоматизированного управления ПВБ объектов ПТО ГДК.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам моделирования, автоматизированного управления и оптимизации различных видов ПТО, в том числе ряду аспектов ПВБ, как в нефтегазовой отрасли, так и в других отраслях промышленности посвящено достаточно большое количество научных исследований:

1) вопросам построения компьютерной системы поддержки принятия решений (КСППР), в том числе автоматизации управления различными аспектами пожаровзрывобезопасности в нефтегазовой отрасли, применения марковских моделей для решения других прикладных задач нефтегазовой отрасли, – работы Э.А. Трахтенгерца, Ю.П. Степина, М.Г. Сухарева, В.В. Рыкова, Е.С. Вентцель, Л.А. Овчарова, Н.Г. Топольского, Д.В. Тараканова, В.П. Молчанова, И.М. Абдурагимова, А.В. Федорова, И.В. Самарина, А.Ю. Шебеко, Ю.В. Пруса, А.Н. Членова, Д.М. Гордиенко, Р.Ш. Хабибулина, В.Ч. Реутта, С.В. Гудина;

2) вопросам адаптивного управления производственными структурами, в том числе вопросам применения методов сетевидного управления, – работы Ф.Ф. Пашенко, Э.А. Трахтенгерца, Ю.П. Степина, А.В. Маслбоева, В.А. Путилова, С.В. Чупрова;

3) вопросам состояния разработки информационно-управляющих и автоматизированных систем управления технологическими процессами газопромысловых объектов НГКМ Крайнего Севера Российской Федерации – работы Р.А. Алиева, В.А. Истомина, А.В. Прокопова, С.Е. Душина, С.Е. Абрамкина, Г.А. Ланчакова;

4) вопросам применения моделей фильтрации, линейного оценивания и стохастического управления – работы Н. Винера, Р. Калмана, П.Л. Чебышева, А.Н. Колмогорова, А.Н. Ширяева, Р.Ш. Липцера, М.Х.А. Дэвиса, А.В. Балакришна.

Однако анализ публикаций по указанным выше направлениям исследований показывает, что в настоящее время отсутствуют научные работы по системному, комплексному применению современных методов сетцентрического управления и многоагентного моделирования для адаптивного управления ПТО ОПО ГДК, особенно в части обеспечения их пожаровзрывобезопасного состояния.

Объектом исследования является автоматизация процессов управления производственно-техническим обслуживанием пожароопасных объектов газодобывающего комплекса, функционирующих в условиях неопределённости и рисков.

Предметом исследования являются научные основы построения, математические модели, алгоритмы и технологии разработки программного обеспечения многоагентной адаптивной системы поддержки принятия решений для адаптивного управления пожаровзрывобезопасностью ОПО ГДК.

Целью работы является совершенствование моделей и алгоритмов повышения эффективности тактического и оперативного управления производственно-техническим обслуживанием ОПО ГДК, обеспечивающих ПВБ их функционирования. Для достижения поставленной цели необходимо поставить и решить следующие **научные задачи исследования**.

1. Выполнить анализ методов сетцентрического управления, адаптивного управления и агентного моделирования для осуществления тактического и оперативного управления пожаровзрывобезопасностью ОПО ГДК.

2. Разработать архитектуру, математические модели и алгоритмы расчётных модулей МАССПР по адаптивному управлению пожаровзрывобезопасностью ОПО ГДК с применением технологий многоагентного моделирования и принципов сетцентрического управления.

3. Разработать модели и алгоритмы многокритериального выбора и адаптивного прогнозирования показателей пожаровзрывобезопасности системы ОПО «пласт-скважина» (тактический уровень).

4. Для системы ОПО «УКПГ – СОГ – УПНК» разработать модели функционирования групп однородных (находящихся в одних и тех же состояниях) элементов для обеспечения адаптивного прогнозирования пожаровзрывобезопасности (тактический и оперативный уровень).

5. Для системы ОПО «УКПГ-СОГ-УПНК» разработать модели оптимизации рисков недополучения дохода при заданных затратах на

обеспечение пожаровзрывобезопасных состояний объектов ПТО ГДК (тактический уровень).

6. Разработать модели оптимизации выбора технологии очистки и осушки газа в условиях низкотемпературных режимов подготовки газа с учетом соблюдения требований пожарной безопасности объектов ПТО ГДК.

Методология и методы исследования. Для решения задач диссертации применены следующие **методы исследования**: основы обработки статистических данных, аппарат линейного стохастического оценивания, аппарат множественного ансамбля фильтра Калмана (АФК), аппарат марковских случайных процессов с дискретными состояниями, методы многокритериального анализа, методы оптимизации, методы многоагентного моделирования и сетцентрического управления.

Научная новизна диссертационной работы заключается в развитии методов и моделей адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью ОПО ПТО ГДК. При этом впервые получены следующие новые научные результаты, в частности:

1. Модели и алгоритмы многокритериального выбора и адаптивного прогнозирования на тактическом уровне показателей ПВБ системы ОПО «пласт-скважина», отличающиеся модифицированной системой показателей пожаровзрывобезопасности; многокритериальным выбором моделей аппроксимации исходных данных с применением нечёткого логического вывода; многокритериальным выбором и применением модификаций множественного ансамбля фильтра Калмана для адаптивного прогнозирования показателей пожаровзрывобезопасности.

2. Модели и алгоритмы для оценки на тактическом и оперативном уровне показателей пожаровзрывобезопасности системы ОПО «УКПГ», отличающиеся применением теории марковских случайных процессов в части динамики средних путем выделения однородных групп ОПО, блуждающих по одним и тем же состояниям и образующих взаимодействующие марковские случайные процессы.

3. Модели и алгоритмы многокритериальной оптимизации рисков недополучения дохода при заданных затратах на обеспечение пожаровзрывобезопасных состояний объектов ПТО ГДК, отличающиеся тем, что часть уравнений Колмогорова в стационарном режиме, записанных относительно средних численностей состояний, либо, принимающее решение (ЛПР), часть относит к критериям, а часть к ограничениям, а также

многокритериального выбора предпочтительной технологии подготовки газа на пожароопасных производственных объектах системы УКПГ.

4. Архитектура и технологии взаимодействия программных агентов многоагентной адаптивной сетевидческой СППР по управлению пожаровзрывобезопасностью объектов ПТО ГДК.

Теоретическая значимость полученных научных результатов состоит в развитии научных подходов к повышению эффективности тактического и оперативного адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью объектов ПТО ГДК. Результаты, полученные в диссертации, будут способствовать развитию научных основ, алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления ПВБ объектов ПТО ГДК.

Практическая значимость исследования состоит в возможности применения предложенных моделей и алгоритмов в разработанной МАССПР при определении ЛПР предпочтительных технологических режимов функционирования объектов УКПГ, предпочтительных типов технологий подготовки газа и газового конденсата. Результаты, полученные в исследовании, позволят обеспечить ЛПР информацией о динамике показателей пожаровзрывобезопасности ОПО ПТО ГДК, о работоспособных и неработоспособных пожароопасных состояниях групп однородных элементов системы УКПГ, об уровне рисков при функционировании групп технологических объектов с учетом их взаимодействия.

Степень достоверности научных результатов обоснована применением подходов к решению задач прогнозирования и управления (применительно к объектам системы «пласт – скважина» на тактическом уровне управления), методов оптимизации и аппарата случайных процессов (применительно к объектам УКПГ). Предложенный комплекс моделей и алгоритмов апробирован на основе промышленных данных при разработке и эксплуатации НГКМ Арктического региона.

Результаты исследования апробированы на основе производственной информации (Проект Уренгойского НГКМ (УНГКМ) на полное развитие, месячные эксплуатационные рапорты (МЭР) проекта эксплуатации Заполярного НГКМ, Технологический регламент). Полученные в работе показатели являются достоверными, а выводы не противоречат положениям государственных и международных стандартов и нормативных документов (ГОСТ Р 53713-2009, ГОСТ Р 55062-2012, ГОСТ

Р 27.102-2021, FIPA, MASIF, CORBA, Р Газпром 2-2.1-579-2011 «Автоматизированный газовый промысел. Основные требования к технологическому оборудованию и объемам автоматизации»).

На защиту выносятся:

1. Модели и алгоритмы для оценки на тактическом и оперативном уровне показателей пожаровзрывобезопасности системы ОПО УКПГ, построенные на базе применения теории марковских случайных процессов в части динамики средних, взаимодействующих марковских случайных процессов.

2. Модели и алгоритмы многокритериальной оптимизации рисков недополучения дохода при заданных затратах на обеспечение пожаровзрывобезопасных состояний объектов ПТО ГДК, а также многокритериального выбора предпочтительной технологии подготовки газа.

3. Модели и алгоритмы многоконтурного адаптивного управления объектами ПТО ГДК в системе ОПО «пласт-скважина» на тактическом и оперативном уровне.

4. Архитектура и технология взаимодействия компонентов программного комплекса многоагентной адаптивной сетевидной СППР по управлению пожаровзрывобезопасностью объектов ПТО ГДК.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, а именно п. 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСПП»; п. 16 «Средства и методы проектирования и разработки технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ»; п. 5 «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами».

Апробация работы. Основные результаты докладывались на следующих конференциях и семинарах: Международной научно-практической студенческой конференции «Нефть и газ – 2011» (2011, 2014, 2021 гг.); научном семинаре «45. Institutskolloquium 2015» (г. Циттау, Hochschule Zittau/Görlitz, департамент IPM, январь 2015 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2016, 2018 гг.); IX Международной научной конференции «ИТ-Стандарт 2019» (МИРЭА –

Российский технологический университет, 11–12 марта 2019 г.); 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ, секция математического моделирования и вычислительного эксперимента (г. Москва, 23–29 ноября 2020 г.); Ежегодном семинаре «16th International EnKF Workshop» (8–11 июня 2021 г., дистанционный формат); Международной научно-практической конференции «Computational Methods & Ocean Technology (COTech)» (г. Москва, ноябрь 2021 г.); Международной конференции Maple Conference (дистанционное участие, ноябрь 2021 г.); Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы нефти и газа» (г. Москва, ИПНГ РАН, 20–21 октября 2022 г., 16–18 октября 2024 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы» (г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 8–9 ноября 2022 г.); XIV Всероссийской конференции «Новые технологии в газовой промышленности» (г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 14–18 ноября 2022 г.); I Всероссийской научно-практической конференции «Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики» (г. Севастополь, Севастопольский государственный университет, 23 марта 2023 г.); Международной научно-практической конференции молодых ученых «Искусственный интеллект – возможности практического применения» (AIPRA 2024), (г. Алматы, Caspian University, 10–11 октября 2024 г.); Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (г. Москва, Академия государственной противопожарной службы, 22 апреля 2025 г.).

Публикации результатов. По результатам диссертации опубликовано 20 печатных работ, 11 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ВАК России) для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Получены свидетельства Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад. Результаты и выносимые на защиту научные положения диссертационного исследования получены автором. Постановка задач, структурирование глав диссертации, анализ и проверка полученных результатов выполнены с научным руководителем. В публикациях, написанных в соавторстве, автору принадлежат разработанные модели, алгоритмы, программное обеспечение и способы решения задач,

поставленных в диссертации. Все расчеты, приведенные в диссертации, получены лично автором.

Внедрение результатов работы. Результаты, представленные в диссертационной работе, рекомендованы к внедрению в Лабораторию подготовки газа и газового конденсата газодобывающего предприятия Западно-Сибирского региона, внедрены в направления научно-исследовательской деятельности и учебный процесс Академии ГПС МЧС России, а также в учебный процесс РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы из 198 наименований, изложена на 321 странице, содержит 61 рисунок и 74 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности диссертационной работы, определена цель и задачи для ее достижения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость научных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу проблематики адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью объектов ПТО ГДК.

В главе приведен анализ разработанности вопросов адаптивного управления пожаровзрывобезопасностью объектов и процессов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и разработки моделей и алгоритмов адаптивных систем поддержки принятия решений на опасных производственных объектах, в том числе добычи углеводородов.

На основании проведенного анализа проектов разработки и эксплуатации НГКМ Арктического региона, а также технологических регламентов эксплуатации газовых промыслов выявлено высокое количество пожароопасных объектов УКПГ, функционирование которых осложнено особенностями технологических циклов подготовки газа.

При этом класс пожароопасности объектов, приведенных в исследовании, соответствует уровню А, в связи с чем необходим непрерывный контроль производственных объектов и помещений в целях предотвращения выделения горючих газов, жидкостей или их паров. Кроме того, для определения необходимого пожаровзрывобезопасного режима функционирования объектов системы «пласт – скважина» и технологий подготовки газа на объектах УКПГ на основе анализа РД 08-200-98 «Правил безопасности в нефтяной и газовой промышленности» выявлена необходимость введения следующих показателей ПВБ: 1) для системы

«пласт-скважина»: уровень загазованности, температура на устье скважины, обводненность, дебит флюида, дебит воды, дебит жидкости; 2) для УКПГ: риск недополучения дохода при функционировании объектов ПТО ГДК, пребывающих в работоспособных и неработоспособных пожароопасных состояниях, риск затрат на обеспечение пожаровзрывобезопасности объектов УКПГ, влагосодержание газа, расход ингибитора гидратообразования и вязкость газа.

В этой главе показана необходимость создания МАССПР с применением разработанных и модифицированных моделей адаптивного прогнозирования показателей ПВБ объектов ПТО ГДК, разработанных алгоритмов и моделей оптимизации функционирования объектов ПТО ГДК в особых условиях среды, алгоритма адаптивной диагностики состояния ОПО ПТО ГДК в целях повышения эффективности оперативного и тактического управления ПВБ объектов ПТО ГДК.

Вторая глава посвящена разработке моделей и алгоритмов обеспечения пожаровзрывобезопасности групп объектов УКПГ с учетом пожароопасных состояний, а также алгоритмов многокритериального выбора предпочтительной пожаровзрывобезопасной технологии подготовки газа.

Для обеспечения пожаровзрывобезопасности объектов ПТО ГДК, выбора оптимальной технологии подготовки газа и газового конденсата в условиях низких температур предложен алгоритм оптимизации адаптивного управления объектами газоперерабатывающих систем НГКМ Крайнего Севера. Для описания переходов групп объектов УКПГ из состояния в состояние, как работоспособных, так и неработоспособных пожаровзрывоопасных состояний, используется аппарат марковских случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем, и в частности метод динамики средних.

Системы уравнений динамики средних (уравнений Колмогорова, записанных относительно средних численностей состояний) для исследуемых групп объектов рассматриваются в комплексе (Рисунок 1), поскольку марковские процессы, которые описаны с помощью указанных систем уравнений, являются зависимыми: интенсивности переходов одних состояний зависят от средней численности других состояний. Показано, что средние численности работоспособных состояний применительно к функционированию объектов ведущей группы УКПГ, для которых значения показателей ПВБ близки к критическим или характеризуются работой на максимально допустимую мощность, оказывают влияние на

интенсивность перехода зависимых групп объектов в неработоспособное состояние.

Для определения взаимодействия марковских процессов групп объектов УКПГ применительно к технологии ПНТА справедливы следующие отношения между интенсивностями переходов из состояния в состояние $\lambda_{ij(PC)}$ для следующих групп:

$$\lambda_{ij(PC)}^H = \frac{K_{PC}^{A,Tak}}{K_{PC}^{H,Tak}} \lambda_{wl(HC)}^A, \quad (1)$$

$$\lambda_{ij(PC)}^D = \frac{K_{PC}^{A,Tak}}{K_{PC}^{D,Tak}} \lambda_{wl(HC)}^A, \quad (2)$$

$$\lambda_{ij(PC)}^\Phi = \frac{K_{PC}^{A,Tak}}{K_{PC}^{\Phi,Tak}} \lambda_{wl(HC)}^A, \quad (3)$$

$$K_{HC}^{A,Tak} = \frac{M_{HC}^{A(Tak)}}{N_A}; K_{PC}^{GP,Tak} = \frac{M_{PC}^{GP(Tak)}}{N_{GP}}. \quad (4)$$

где $M_{HC}^{A(Tak)}$, $M_{PC}^{GP(Tak)}$ – средние численности неработоспособных состояний ведущей группы объектов $g_{вед}$ (абсорберов) и работоспособных состояний зависимой группы объектов g (насосов, дегазаторов, фильтров) на УКПГ; N_A , N_{GP} – общие численности для ведущей группы объектов $g_{вед}$ (абсорберов) и зависимой группы объектов g (насосов, дегазаторов, фильтров); i – неработоспособное состояние зависимой группы объектов; j – работоспособное состояние зависимой группы объектов; w – работоспособное состояние ведущей группы объектов; l – неработоспособное состояние ведущей группы объектов; H, Д, Ф, А – тип группы объектов (насосы, дегазаторы, фильтры, абсорберы); PC, HC – тип состояния (работоспособное и неработоспособное пожаровзрывоопасное состояние); $\lambda_{ij(PC)}^g$ – интенсивность перехода группы объектов g УКПГ в работоспособное состояние, которая будет определяться как

$$\lambda_{ij(PC)}^g = \frac{M_{HC}^{g_{вед}(Tk)} N_g}{N_{g_{вед}} M_{PC}^{g(Tk)}} \lambda_{wl(HC)}^{g_{вед}}. \quad (5)$$

Выражения (1)–(5), полученные для определения взаимосвязи функционирования групп объектов УКПГ, используются при решении задачи оптимизации рисков и при пересчете показателей эффективности применительно к функционированию групп объектов УКПГ для технологий очистки и осушки газа в условиях Крайнего Севера.

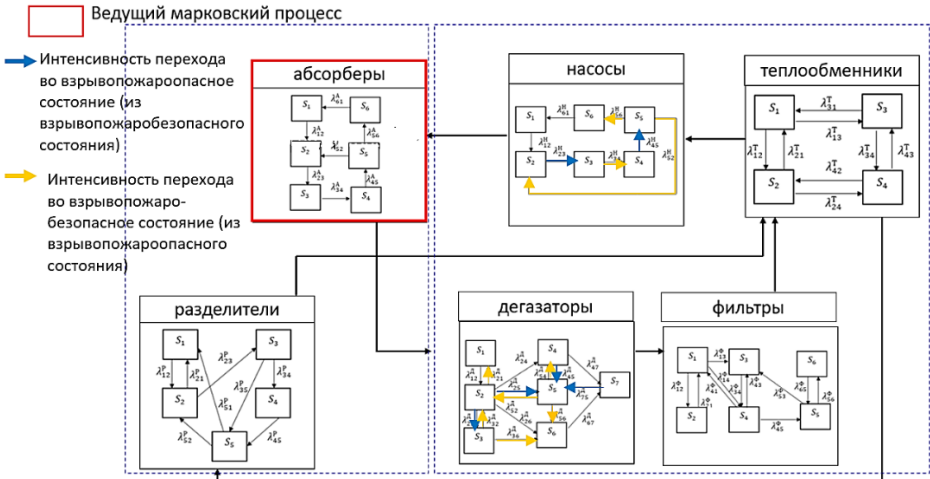


Рисунок 1 – Взаимодействие марковских моделей процессов функционирования групп объектов УКПГ

В работе определены ведущие группы объектов для каждого типа технологий подготовки газа. Так, для технологии ПНТА группа объектов «абсорберы» является ведущей. Для элементов всех групп объектов УКПГ составлены системы уравнений Колмогорова, записанные относительно средних численностей состояний каждой группы объектов УКПГ.

В целях определения ПВБ для групп объектов УКПГ разработаны модели оптимизации рисков недостаточного получения дохода при функционировании групп объектов, а также рисков непредвиденных затрат на восстановление и обслуживание объектов подготовки газа и газового конденсата. В диссертации предложено использовать дисперсионную модель рисков в широком смысле, связанная с функционированием групп объектов УКПГ (состояниями групп объектов), применительно к реализации технологий очистки и осушки газа, а именно: под риском подразумевается среднеквадратическое отклонение (СКО) оцениваемого параметра системы (средних численностей состояний групп объектов УКПГ) от его среднего значения. Определение показателя ПВБ (риска) $\sigma_{j(k)}(t)^{g(T_k)}$ на основании недостаточного получения дохода в результате функционирования групп объектов УКПГ выполняется согласно выражению:

$$\sigma_{j(k)}(t)^{g(T_k)} = c_{j(k)}^{g(T_k)} \sqrt{M_j^{g(T_k)} \left(1 - \frac{M_j^{g(T_k)}}{N_g} \right)}, \quad (6)$$

где $M_j^{g(T_k)}$ – средняя численность состояния j для группы объектов g ; T_k – тип технологии очистки или осушки газа, причем T – способ очистки или осушки газа с помощью НТС или НТА, k – номер варианта технологии НТС или НТА; N_g – численность группы объектов g ; $c_{j(k)}^{g(T_k)}$ – доход (при $k = Д$), который обеспечивается работой активных компонентов группы g объектов УКПГ, пребывающей в работоспособном состоянии j , или затраты (при $k = З$), обусловленные проведением восстановительных работ и ПТО группы объектов УКПГ, пребывающей в неработоспособном пожаровзрывоопасном состоянии; $c_{j(k)}^{g(T_k)}$ оценивается в условных единицах (баллах) по 100-балльной шкале, которые определяются из реальных размерных значений показателей с помощью метода базовых шкал.

Критерии оптимальности функционирования объектов группы g на УКПГ при применении технологии НТС или НТА вида T_k будут описаны с помощью следующих выражений:

$$1) F_1(x_j) = \sum_{j=t}^p c_{j(Д)}^{g(T_k)} x_{j(PC)}^{g(T_k)} \rightarrow \max,$$

где $x_{j(PC)}^{g(T_k)}$ – величина, эквивалентная средней численности работоспособного состояния j объектов группы (ГР) при применении технологии T_k ; при этом $j \in [t, \dots, p]$, где t, \dots, p – индекс работоспособного состояния объектов группы (ГР);

$$2) F_2(x_j) = \sum_{j=t}^p c_{j(Д)}^{g(T_k)} \sqrt{D(x_{j(PC)}^{g(T_k)})} \rightarrow \min,$$

где $x_{j(PC)}^{g(T_k)}$ – интенсивности и средние численности состояний групп объектов УКПГ; $D(x_{j(PC)}^{g(T_k)})$ – дисперсия, определяемая согласно

$$D(x_{j(PC)}^{g(T_k)}) = M_j^{g(T_k)} \left(1 - \frac{M_j^{g(T_k)}}{N} \right);$$

$$3) F_3(x_j) = \sum_{j=t}^p c_{j(З)}^{g(T_k)} \sqrt{D(x_{j(НС)}^{g(T_k)})} \rightarrow \min;$$

$$4) F_4(x_j) = \left(\sum_{j=t}^p c_{j(Д)}^{g(T_k)} \sqrt{D(x_{j(PC)}^{g(T_k)})} \right) + \left(\sum_{j=t}^p c_{j(З)}^{g(T_k)} \sqrt{D(x_{j(НС)}^{g(T_k)})} \right) \rightarrow \min.$$

Величина рисков определяется с опорой на комбинации $M_j^{g(T_k)}$ и интенсивности перехода $\lambda_{ij(T_k)}^g$ групп объектов из состояния в состояние. Таким образом, критериями оптимизационной задачи приняты критерии минимизации рисков (и максимизации дохода), а ограничения –

соответствующие алгебраические уравнения, в том числе динамики средних. Модель оптимизации содержит следующие обозначения: $M_{i(k)}^A(t)$ – количество абсорберов, которые в момент времени t пребывают в состоянии S_i с учетом типа состояния k ; N_A – общее количество абсорберов на всех технологических линиях УКПГ; A – величина верхней границы для интенсивности перехода объекта группы «абсорберы»; B_c – величина верхней границы для интенсивности перехода объекта группы «абсорберы»; V_c – величина верхней границы для численности группы объектов «абсорберы». При этом, ограничения этой модели многокритериальной оптимизации линейного математического программирования с учетом переобозначений следующие:

$$\left\{ \begin{array}{l} -x_1 \cdot x_6 + x_5 \cdot x_{10} = 0, \\ x_1 \cdot x_6 - x_2 \cdot x_7 = -\lambda_{52}^A M_5^A(t), \\ x_2 \cdot x_7 - x_3 \cdot x_8 = 0, \\ x_3 \cdot x_8 - x_4 \cdot x_9 = 0, \\ -x_4 \cdot x_9 = -(\lambda_{56}^A + \lambda_{52}^A) M_5^A(t), \\ x_5 \cdot x_{10} = \lambda_{61}^A M_6^A(t), \\ \sum_{i=1}^6 M_i^A = N_A, \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10} > 0, \\ 0 \leq \lambda_{52}^A \leq A, \\ 0 \leq \lambda_{56}^A \leq B_c, \\ 0 \leq M_{5(\text{HC})}^{A, T1} < V_c, \end{array} \right. , \quad (7)$$

где $x_1 = \lambda_{12}^{A, T1}$, $x_2 = \lambda_{23}^{A, T1}$, $x_3 = \lambda_{34}^{A, T1}$, $x_4 = \lambda_{45}^{A, T1}$, $x_5 = \lambda_{61}^{A, T1}$,
 $x_6 = M_{1(\text{PC})}^{A, T1}$, $x_7 = M_{2(\text{PC})}^{A, T1}$, $x_8 = M_{3(\text{HC})}^{A, T1}$, $x_9 = M_{4(\text{HC})}^{A, T1}$, $x_{10} = M_{6(\text{PC})}^{A, T1}$.

Разработанное математическое обеспечение (главы 2 и 3) по адаптивному автоматизированному управлению пожаровзрывобезопасностью объектов ПТО ГДК используется в рамках для построения МАССППР для контроля пожаровзрывоопасных состояний объектов УКПГ, изменения технологических режимов эксплуатации объектов подготовки газа и конденсата и снижения затрат на восстановление и ТО объектов подготовки газа. Кроме того, применение разработанных моделей позволяет получить основы рекомендаций для поддержки принятия решений при прогнозировании (оценивании) готовности к использованию оборудования, средств и ресурсов АСПВБ третьего уровня условно-расчетных объектов топливно-энергетических комплексов.

Во третьей главе изложены основные проблемы в области адаптивного управления и прогнозирования показателей пожаровзрывобезопасности объектов системы «пласт – скважина» ГДК. Приведен разработанный алгоритм многокритериального выбора модели адаптивного прогнозирования показателей ПVB объектов ПТО ГДК, отличающийся встроенным алгоритмом многокритериального выбора модели аппроксимации. Приведена постановка и решена задача адаптивного прогнозирования производственных показателей ПVB с применением модифицированного множественного АФК (с учетом этапа корректировки среднего по ансамблю показателя ПVB и определением числа подансамблей для иерархического множественного АФК). По результатам применения модификации иерархического АФК получена минимальная величина среднеквадратического отклонения для среднего по начальному ансамблю показателя ПVB от среднего по финальному ансамблю.

При решении задачи адаптивного прогнозирования выполняется многокритериальная аппроксимация показателей ПVB. Показано, что оптимальной моделью аппроксимации показателей ПVB, рассмотренных в работе, является полиномиальная модель второго порядка.

Для многокритериального выбора модели аппроксимации показателей ПVB определены следующие показатели: среднеквадратическое отклонение фактического значения показателя от расчетного, среднее абсолютное отклонение, выраженное в процентах (*MAPE*), среднее абсолютное отклонение (*MAE*).

В итоге в задаче адаптивного прогнозирования вектора состояния пластовой системы в диссертации предложена следующая динамическая модель (8):

$$\frac{du(t)}{dt} = F(u; m) + \varepsilon^m(t), \quad (8)$$

$$u = \{W_{sat}, G_{sat}, P\}, \quad m = \{k_{poros}, k_{perm}, NTG\}, \quad g = \{q, P_{BH}, W\},$$

где u – динамические характеристики (W_{sat} – водонасыщенность; G_{sat} – газонасыщенность; P – пластовое давление); m – статические параметры, $m \in R^{N_m}$ (k_{poros} – коэффициент пористости; k_{perm} – коэффициент проницаемости; NTG – песчанистость); g – расчетные данные (q – дебит; P_{BH} – забойное давление; W – обводненность); $\varepsilon^m(t)$ – динамический нелинейный компонент.

Для адаптивного прогнозирования используются полученные в представленной выше модификации фильтра Калмана: множественный

АФК ($EnKF$), сглаженный множественный АФК со сглаживанием ($SEnKF$) и модифицированный иерархический множественный АФК ($SHEnKF$).

Система критериев и результаты выбора модели адаптивного прогнозирования показателей ПVB объектов ПТО ГДК разделена на три группы, где Р – группа статистических критериев, А – технологические критерии, отражающие особенности и требования к процессу адаптации модели месторождения, П – критерии, определяющие практическую применимость модели адаптивного прогнозирования. В Таблице 1 заливкой показаны критерии, по которым выполнен многокритериальный выбор модели адаптивного прогнозирования показателей ПVB объектов ПТО ГДК, K_i^D - действительное значение i – ого критерия в баллах (среднее).

Результаты многокритериальной оценки подтверждают предпочтительность выбора сглаженного множественного (модифицированного) АФК для решения задачи адаптивного прогнозирования показателей добычи для скважин объекта газового промысла (ГП). Для реализации решения на базе иерархического АФК с применением сглаживания требуются дополнительные затраты.

Таблица 1 - Балльная оценка критериев для многокритериального выбора модели адаптивного прогнозирования показателей ПVB ОПО ПТО ГДК

Критерий выбора аппарата адаптивного прогнозирования показателей ПVB ОПО ГДК	Тип	Реализация расчета согласно альтернативам			
		№ 1	№ 2	№ 3	K_i^D
СКО для ряда значений дебита флюида (δ)	Р	3,44	5,2	6,64	5,09
Разность между средними начального и конечного ансамблей для динамики дебита ($\Delta moil_rate$)	Р	5,3	6,62	7,63	6,51
Среднее значение абсолютного отклонения (МАРЕ, %)	Р	9,56	9,73	9,81	9,7
Среднее абсолютное отклонение (MAE)	Р	6,42	4,96	3,77	5,05
Корреляция среднего значения дебита для начального и конечного ансамблей (η_{oil_rate})	Р	9,51	9,51	9,51	9,51
Балл, влияющий на получение неточных результатов при увеличении выборки ($R_N, \%$)	А	7,3	6,4	4,6	6,1
Балл, влияющий на получение неточных результатов из-за влияния неполной исходной информации ($R_{IN}, \%$)	А	6,4	4,15	5,05	5,2

Продолжение таблицы 1

Балл, влияющий на получение неточных результатов из-за влияния шума (R_{NS} , %)	A	4,6	3,7	2,8	3,7
Балл оценки вычислительной сложности при увеличении выборки (R_{EV} , %)	A	5,5	6,4	8,2	6,7
Балл оценки уровня применимости на крупномасштабных месторождениях (R_{APP} , %)	П	5,5	8,2	7,3	7
Балл оценки затрат на дополнительное моделирование (R_M , %)	П	3,7	3,7	6,4	4,6
Ресурсы, затрачиваемые на процесс адаптации гидродинамической модели месторождения с помощью симулятора (T_{SIM} , мин)	П	5,5	2,5	4	4

В этой главе также предложена и реализована многоконтурная модель адаптивного управления и комплексной оценки показателей ПVB объектов системы «пласт – скважина», включающая контуры параметрической и алгоритмической адаптации (Рисунок 2).

Разработанные модели и алгоритм многокритериального выбора оптимального модифицированного АФК позволяет получить уточненные показатели ПVB объектов ПТО ГДК в систем «пласт-скважина» и способствует снижению затрат на управление ПVB объектов ГДК.

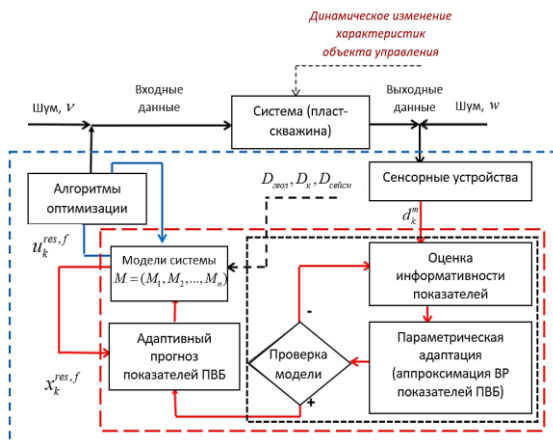


Рисунок 2 - Многоконтурная структурная модель адаптивного управления пожаровзрывобезопасностью объектов ПТО ГДК

Четвертая глава посвящена разработке программно-вычислительного комплекса МАССПР с применением методов сетецентрического управления и технологий многоагентного моделирования.

Разработанная МАССПР является многоагентной многоуровневой системой, в основе которой заложена деятельность мобильных агентов, характеристики которых описывают стандарты MASIF и FIPA. Архитектура разработанной МАССПР представлена также в нотации UML, компоненты отображены в виде диаграммы классов (учитывая уровень базы данных, уровень моделей компонентов МАССПР и уровень графического интерфейса пользователя). На Рисунке 3 представлена укрупненная архитектура МАССПР, использующая принципы сетецентрического управления.

Модули ПВК МАССПР реализованы с использованием среды разработки многоагентных систем JADE (с применением стандартов FIPA для взаимодействия интеллектуальных программных агентов). При реализации компонентов базы моделей МАССПР использованы библиотеки вычислительной среды Scilab и Matlab&Simulink, языки программирования Python и Java.

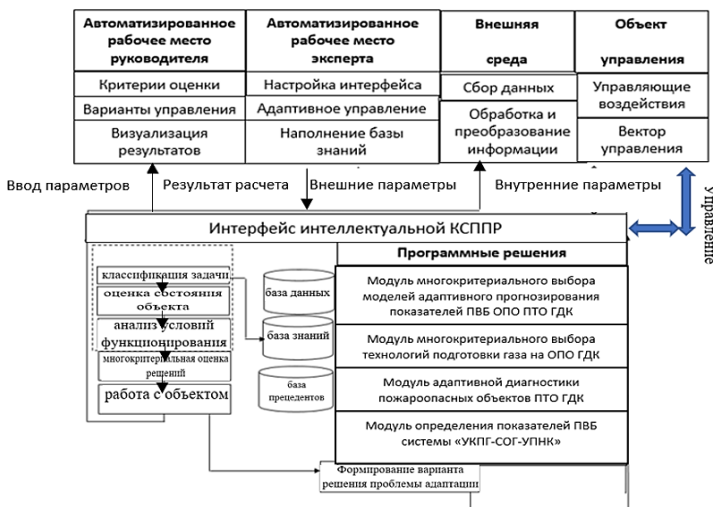


Рисунок 3 - Архитектура многоуровневой МАССПР по управлению объектами системы «пласт-скважина-УКПГ»

В структуре многоуровневой МАССПР реализовано пять программных агентов, причем один из них является управляющим агентом (координатором), а четыре – агентами, выполняющими поставленные задачи

оптимизации управления ПВБ объектов ПТО ГДК: модуль многокритериального выбора моделей адаптивного прогнозирования показателей ПВБ объектов системы «пласт – скважина – УКПГ», модуль определения показателей ПВБ объектов подготовки газа и газового конденсата, модуль адаптивной диагностики пожароопасных объектов ПТО ГДК; модуль определения информативности показателей ПВБ объектов ПТО ГДК.

В приложении представлены акты о внедрении и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны алгоритмы и модели адаптивного прогнозирования показателей пожаровзрывобезопасности объектов ПТО ГДК, обеспечивающих пожарную безопасность объектов ГДК.

2. Разработаны модели многокритериальной оценки и выбора моделей адаптивного прогнозирования показателей ПВБ объектов ПТО ГДК, которые реализованы в расчётном модуле адаптивного прогнозирования и используются при определении комплексных показателей пожаровзрывобезопасности объектов ПТО ГДК.

3. Получена и реализована модификация сглаженного иерархического ансамбля множественного фильтра Калмана (АФК) с возможностью выбора количества подансамблей и учётом этапа корректировки среднего по ансамблю, что повышает точность результатов и близость полученных величин показателей среднему начальному ансамблю. Применение реализованного сглаженного АФК позволяет достигнуть снижения СКО среднего по финальному ансамблю показателя ПВБ от среднего по начальному ансамблю на 1,03 ($\Delta\delta=1,03$). Применение усовершенствованной модели ансамбля фильтра Калмана с учётом корректировки среднего позволяет снизить СКО на 1,08 ($\Delta\delta=1,08$).

4. Предложена и реализована структурная схема и алгоритм многоуровневого адаптивного управления ОПО ПТО ГДК.

5. Разработаны марковские модели функционирования однородных групп объектов УКПГ в части динамики средних с учетом их взаимодействия. Выявлены и предложены зависимости интенсивностей переходов групп объектов УКПГ работоспособных и неработоспособных пожаровзрывоопасных состояний от средних численностей состояний ведущей группы объектов УКПГ. Разработан алгоритм многокритериального выбора оптимальной технологии подготовки газа и газового конденсата в условиях низкотемпературных режимов.

6. Разработаны модели оптимизации рисков недостаточного получения дохода при функционировании групп объектов, а также рисков затрат на восстановление и обслуживание объектов подготовки газа, которые:

- для технологии НТС с дросселированием приводят к снижению суммарного риска недополучения дохода и затрат на восстановление и обслуживание объектов УКПГ при функционировании группы объектов «сепараторы» на 30%, «теплообменники» - на 16%, «разделители жидкости» - на 5%;

- для технологии ПНТА приводят к снижению суммарного риска недополучения дохода и затрат на восстановление и обслуживание объектов УКПГ при функционировании группы объектов «абсорберы» на 21,35%, «дегазаторы» - на 30%, «фильтры» - на 4 %, «насосы» - на 21,53%.

7. Разработана архитектура и технология взаимодействия компонентов многоуровневой многоагентной адаптивной сетевидрической КСППР, обеспечивающая пожаровзрывобезопасность объектов ПТО ГДК

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Мухина, А.Г. Перспективные направления использования модели фильтра Калмана для решения задач прогнозирования и управления / А.Г. Мухина // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2011. – № 9. – С. 4–12.
2. Мухина, А.Г. Формирование модели «Жизнь пласта» для повышения эффективности управления разработкой месторождения / Л.И. Григорьев, А.Г. Мухина, Б.Д. Изюмов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2015. – № 4. – С. 6–15.
3. Мухина, А.Г. Анализ особенностей природной неопределенности месторождений углеводородов для совершенствования автоматизированного управления добычей нефти и газа / А.Г. Мухина // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2018. – № 7. – С. 39–45. – DOI: 10.30713/0132-2222-2018-7-39-45.
4. Мухина, А.Г. Разработка компонентов интегрированного решения для системы управления добычей углеводородов / А.Г. Мухина // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2020. – № 10(567). – С. 18–23. – DOI: 10.33285/0132-2222-2020-10(567)-18-23.

5. Мухина, А.Г. Разработка расчетного модуля для управления многокомпонентными системами добычи нефти и газа / А.Г. Мухина // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 6(575). – С. 6–12. – DOI: 10.33285/0132-2222-2021-6(575)-6-12.
6. Мухина, А.Г. Аналитическое решение для системы управления разработкой и эксплуатацией месторождений углеводородов / А.Г. Мухина, М.М. Аметова // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 10(579). – С. 14–20. – DOI: 10.33285/0132-2222-2021-10(579)-14-20.
7. Мухина, А.Г. Разработка интерактивного решения для контроля и анализа технологических процессов подготовки газа / А.Г. Мухина, Н.Д. Шеляго, С.С. Саломатин // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2022. – № 9(590). – С. 5–12. – DOI: 10.33285/2782-604X-2022-9(590)-5-12.
8. Мухина, А.Г. Моделирование и оптимизация выбора технологии комплексной подготовки газа / А.Г. Мухина, Ю.П. Степин, А. Жаманкина // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2023. – № 9(602). – С. 20–33. – DOI: 10.33285/2782-604X-2023-9(602)-20-33.
9. Мухина, А.Г. Модели и алгоритмы адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью объектов подготовки газа и газового конденсата нефтегазоконденсатных месторождений Крайнего Севера / А.Г. Мухина // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 7(624). – С. 21–31.
10. Мухина, А.Г. Разработка моделей и алгоритма многокритериального выбора аппарата адаптивного прогнозирования показателей пожаровзрывобезопасности объектов производственно-технического обслуживания газодобывающего комплекса. Модели аппроксимации показателей пожаровзрывобезопасности / Ю.П. Степин, А.Г. Мухина // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 11(628). – С. 5–14.
11. Мухина, А.Г. Разработка моделей и алгоритма многокритериального выбора аппарата адаптивного прогнозирования показателей пожаровзрывобезопасности объектов производственно-технического обслуживания газодобывающего комплекса. Ансамбль фильтра Калмана / Ю.П. Степин, А.Г. Мухина // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 12(629). – С. 7–19.

Публикации в других научных изданиях

1. Мухина, А.Г. Разработка моделей адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью на объектах системы подготовки газа в условиях низких температур / А.Г. Мухина, И.В. Самарин,

Ю.П. Степин // Проблемы техносферной безопасности: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – М. : Академия государственной противопожарной службы, 2025. – № 14. – С. 43–48.

2. Мухина, А.Г. Многокритериальная оптимизация эффективности и пожаровзрывобезопасности на объектах системы подготовки газа в условиях низких температур / А.Г. Мухина, Ю.П. Степин // Проблемы техносферной безопасности: материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. – М. : Академия государственной противопожарной службы, 2025. – № 14. – С. 49–56.

3. Мухина, А.Г. Многоагентные адаптивные системы в освоении нефтегазоконденсатных месторождений арктического региона / А.Г. Мухина // Искусственный интеллект – возможности практического применения : сборник трудов 2-й Международной научно-практической конференции молодых ученых (AIRPA 2024), г. Алматы, Республика Казахстан, Caspian University, 10–11 октября 2024 г.

4. Мухина, А.Г. Моделирование и оптимизация выбора предпочтительной технологии подготовки газа и нестабильного конденсата в условиях Крайнего Севера / Ю.П. Степин, А.Г. Мухина // Актуальные проблемы нефти и газа : труды VII Всероссийской молодежной научной конференции. – М. : ИПНГ РАН, 2024. – С. 379–382.

5. Mukhina, A.G. Analytical software development for industrial processes management of oil and gas production using artificial intelligence technologies / D.A. Egorychev, A.G. Mukhina, D.A. Volkov // XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, Novosibirsk, Russian Federation, 10–12 November 2023 : Proceedings. – IEEE Computer Society, 2023. – P. 1290–1294. – DOI: 10.1109/APRPEIE59731.2023.10347669.

6. Мухина, А.Г. Разработка аналитического решения для интегрированного автоматизированного управления процессами добычи нефти и газа / А.Г. Мухина // Актуальные проблемы нефти и газа : сборник трудов V Всероссийской молодежной научной конференции. – М. : ИПНГ РАН, 2022. – С. 208–211.

7. Mukhina, A.G. Integrated computer digital decision for Offshore production automated management / A.G. Mukhina, D.A. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1201. – Article No. 012027. – 6 p. – DOI: 10.1088/1757-899X/1201/1/012027.

8. Мухина, А.Г. Цифровые технологии обработки данных в задачах

нефтегазовой промышленности / А.Г. Мухина // Прикладная математика и информатика: труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ. – М. : МФТИ, 2020. – С. 256–258.

9. Мухина, А.Г. Системная интеграция на примере управления многоуровневыми структурами в нефтегазовом производстве / А.Г. Мухина, Н.Д. Шеляго // Стандартизация, сертификация, обеспечение эффективности, качества и безопасности информационных технологий (ИТ-Стандарт 2019): сборник трудов IX Международной научной конференции. – М.: Проспект, 2019. – С. 129–140.

Свидетельства Роспатента о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025666016. Программный модуль для определения показателей пожаровзрывобезопасности объектов подготовки газа и газового конденсата / А.Г. Мухина. – № 2025665088; заявл. 21.06.2025; опубл. 22.06.2025, Бюл. № 7.

2. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690924. Программный модуль для определения информативности показателей пожаровзрывобезопасности объектов ПТО ГДК / А.Г. Мухина. – № 2025690610; заявл. 12.11.2025; опубл. 12.11.2025, Бюл. № 11.

3. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025696213. Программный модуль для многокритериального выбора предпочтительных технологий очистки и осушки газа на пожароопасных производственных объектах газодобывающего комплекса / А.Г. Мухина. – № 2025695633; заявл. 17.12.2025; опубл. 17.12.2025, Бюл. № 12.

4. Свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025696201. Программный модуль адаптивной диагностики оборудования опасных производственных объектов системы «установка комплексной подготовки газа – система охлаждения газа – установка подготовки нестабильного конденсата» / А.Г. Мухина. – № 2025695602; заявл. 16.12.2025; опубл. 16.12.2025, Бюл. № 12.

Подписано в печать 22.04.2026 г. Формат 60×90 1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
119991, Москва, Ленинский проспект, д. 65, корп. 1