

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Нефть и газ (НИУ) имени И.М. Губкина

к.т.н., доцент

П.К. Калашников

«01» апреля 2026 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Диссертация «Модели и алгоритмы адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью объектов производственно-технического обслуживания газодобывающего комплекса» выполнена на кафедре автоматизированных систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

В период подготовки диссертации соискатель Мухина Анастасия Геннадьевна обучалась в аспирантуре по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

В 2012 году окончила магистратуру РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина по направлению «Информатика и вычислительная техника», программе «Интеллектуальные системы» с присуждением степени магистра техники и технологии.

Справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности № СП-948-156106 выдана 18 февраля 2025 г. в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина». Справка о сдаче кандидатских экзаменов по дисциплинам «Иностранный язык» и «История и философия науки» № СП-948-131382 выдана 20 марта 2025 г. в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Степин Юрий Петрович, профессор кафедры автоматизированных систем управления федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

По результатам рассмотрения диссертации Мухиной Анастасии Геннадьевны «Модели и алгоритмы адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью объектов производственно-технического обслуживания газодобывающего комплекса» принято следующее заключение.

Общая оценка работы

Кандидатская диссертация Мухиной Анастасии Геннадьевны представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи по разработке моделей и алгоритмов адаптивного управления (прогнозирования и оценки) пожаровзрывобезопасности (ПВБ) опасных объектов (ОПО) производственно-технического обслуживания (ПТО) газодобывающего комплекса (ГДК) - «пласт-скважина-УКПГ», что вносит значительный вклад в теоретические основы по комплексному (системному) управлению указанными мероприятиями для подтверждения готовности (пожаровзрывобезопасности) оборудования на всех уровнях работы ГДК.

Объем диссертации составляет 311 страниц машинописного текста. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых сокращений, списка литературы из 190 наименований и 3 приложений на 15 листах.

Актуальность исследования

Составной частью отечественной промышленности являются объекты топливно-энергетического комплекса, состояние пожарной безопасности которых является наиболее важной целью их защиты.

Приоритетные направления государственной политики и мероприятия в области пожарной безопасности определены Указом Президента РФ от 1 января 2018 г. № 2 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области пожарной безопасности на период до 2030 года». Одним из них является разработка и внедрение инновационных технологий обнаружения пожаров в начальной фазе их развития. В связи с этим создание новых средств и технологий предотвращения и обнаружения пожаров представляется актуальной задачей.

Одним из стратегически важных объектов энергетической отрасли является газодобывающий комплекс (ГДК), на котором в процессе разных

технологических цепочек хранится и используется масса пожаровзрывоопасных продуктов и сырья, что, в свою очередь, создает существенную опасность возникновения крупных техногенных аварий. Важно при этом непрерывно обеспечивать сохранность находящихся на данных объектах защиты материальных средств и совершенствовать методы предотвращения опасных ситуаций на протяжении всего технологического цикла на предприятии. Производительность же 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 добычи и подготовки углеводородов в диссертации выделен и рассматривается комплекс задач, касающийся обеспечения ПВБ объектов ПТО газодобывающих комплексов (ГДК).

Проблема исследования заключается в том, что 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 всего комплекса объектов ПТО ГДК, а это газоносный пласт, скважины и установки комплексной подготовки газа (УКПГ).

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 – УКПГ».

Таким образом, с учетом вышеизложенного, актуальность данного диссертационного исследования заключается как в необходимости совершенствования и разработки моделей и алгоритмов адаптивного управления ПVB ОПО ГДК, так и разработки программно-вычислительного комплекса многоагентной адаптивной сетевидческой системы поддержки принятия решений (МАССППР) для автоматизированного управления ПVB объектов ПТО ГДК.

Степень разработанности темы исследования

Проблемам моделирования, автоматизированного управления и оптимизации различных видов ПТО, в том числе ряду аспектов ПVB, 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, Д.М. Гордиенко, Р.Ш. Хабибулина, В.Ч. Реутта, С.В. Гудина;

2) вопросам адаптивного управления производственными структурами, в том числе вопросам применения методов сетевидческого управления, – работы Ф.Ф. Пащенко, 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 газопромисловых 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. Чебышева, М.Х.А. Дэвиса, А.В. Балакришнана.

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

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту научные положения разработаны автором лично. Все публикации, в том числе подготовленные в соавторстве, в которых отражено основное содержание диссертационной работы, были инициированы и спланированы автором. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежат разработанные модели, алгоритмы и методы решения поставленных в исследовании задач. Расчеты, представленные в диссертации, получены автором лично на основе применения разработанных моделей и программ.

Результаты, полученные соискателем лично:

1. Проведен анализ методов сетецентрического управления, адаптивного управления и агентного моделирования для осуществления тактического и оперативного управления пожаровзрывобезопасностью ОПО ГДК. Решены задачи моделирования и оптимизации для адаптивного управления ПТО ГДК (в зависимости от объекта управления).
2. Разработаны алгоритмы и модели адаптивного прогнозирования показателей пожаровзрывобезопасности объектов ПТО ГДК, обеспечивающих пожарную безопасность объектов ГДК.
3. Разработаны модели многокритериальной оценки и выбора моделей адаптивного прогнозирования показателей пожаровзрывобезопасности объектов ПТО ГДК, которые реализованы в расчётном модуле адаптивного прогнозирования и используются при определении комплексных показателей *пожаровзрывобезопасности объектов ПТО ГДК*.
4. 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 среднеквадратического отклонения среднего по финальному ансамблю показателя ПВБ (обводненность, дебит флюида, дебит воды, температура на устье скважины) от среднего по начальному ансамблю на 1,03. Применение усовершенствованной модели ансамбля фильтра Калмана с учётом

корректировки среднего позволяет снизить среднеквадратическое отклонение на 1,08.

5. Предложена и реализована структурная схема и алгоритм многоуровневого адаптивного управления пожароопасными объектами ПТО ГДК.

6. 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.

7. Разработаны модели оптимизации рисков недостаточного получения дохода при функционировании групп объектов, а также рисков затрат на восстановление и обслуживание объектов подготовки газа и газового конденсата, 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%.

В рамках диссертационного исследования был выполнен комплекс теоретических и научно-технических работ, что позволило обеспечить достижение основной цели — повышения эффективности ПТО ГДК «пласт-скважина-УКПГ», системно обеспечивающей ПВБ сложной структуры «пласт-скважина-УКПГ» ГДК, за счёт разработки новых моделей и алгоритмов адаптивного прогнозирования функционирования и технического состояния элементов в системы «пласт-скважина-УКПГ».

Научная новизна диссертации

В процессе выполнения диссертационной работы впервые были получены следующие научные результаты:

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, лицо, принимающее решение (ЛПР), 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 сетевидной СППР по управлению пожаровзрывобезопасностью объектов ПТО ГДК.

Теоретическая и практическая значимость работы

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.

Результаты внедрения

Результаты, представленные в диссертационной работе, использованы и внедрены:

- в целях увеличения объема услуг, оказываемых ООО «Газпром добыча Ямбург» в области мониторинга, анализа и внедрения новых технологий, в виде комплекса рекомендаций при разработке и утверждении плановых графиков технического обслуживания ГДК;
- при обновлении одного из модулей корпоративной системы поддержки принятия решений при определении лицом, принимающим решение, состояния объектов установок комплексной подготовки газа (УКПГ) газовых промыслов ООО «Газпром добыча Ямбург», которое состоит в появлении возможности передачи оператору информации о работоспособных и неработоспособных пожаровзрывоопасных состояниях групп объектов технологических линий УКПГ; в возможности передачи лицам, принимающим решение о выборе типа технологии подготовки газа, информации о расчете критериев по выбору предпочтительной технологии подготовки газа с учетом технических характеристик объектов УКПГ и требований СТО к компонентному составу газа; в возможности передачи лицам, принимающим решение о выборе типа технологии подготовки газа, информации о рисках недополучения дохода при заданных затратах на обеспечение пожаровзрывобезопасных состояний объектов ПТО ГДК;
- в научной работе, посвященной разработке и внедрению моделей и алгоритмов адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью объектов ПТО ГДК применительно к системе «пласт-скважина-УКПГ» для нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ), расположенных в Арктическом регионе Российской Федерации;
- при изучении дисциплин кафедры пожарной автоматики Академии ГПС МЧС России «Информатика в техносферной безопасности» и «Основы производственной и пожарной автоматики», а также дисциплины кафедры информационных технологий УНК АСИТ Академии ГПС МЧС России «Системы поддержки принятия решений»;
- для развития методологии проектирования автоматизированных информационных систем поддержки принятия управленческих решений в области предотвращения и ликвидации пожаров и ЧС, являющейся одним из направлений научно-технической деятельности кафедры информационных технологий УНК АСИТ Академии ГПС МЧС России;
- в учебной деятельности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина при разработке рабочих программ дисциплин «Математическое моделирование объектов и систем управления», «Проектирование автоматизированных систем управления. Интегрированные системы» в виде применения разработанных моделей и алгоритмов адаптивного прогнозирования

показателей пожаровзрывобезопасности (ПВБ) объектов (ПТО ГДК) применительно к системе «пласт-скважина-установка комплексной подготовки газа (УКПГ)», а также в виде описания и применения моделей оптимизации функционирования групп однородных объектов УКПГ с определением взаимодействующих марковских случайных процессов, дисциплин «Проектирование автоматизированных систем управления. Промышленные реализации», «Многоагентные адаптивные интегрированные информационно-управляющие системы», «Управление и идентификация» в части применения разработанных алгоритмов многокритериального выбора предпочтительной пожаровзрывобезопасной технологии подготовки газа, применения алгоритма оптимизации рисков недополучения дохода при заданных затратах на обеспечение пожаровзрывобезопасных состояний объектов ПТО ГДК, а также применения результатов функционирования и выбора технологий взаимодействия программных модулей программно-вычислительных комплексов многоагентных адаптивных интегрированных систем, а также в виде учебно-методических указаний к нескольким лабораторным работам.

Полнота опубликования основных научных результатов, полученных автором

Все основные научные результаты, полученные автором, достаточно полно опубликованы в научных журналах и материалах научных и научно-практических конференций. По теме диссертационного исследования опубликовано 20 работ в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России (включая 11 работ, индексируемых в международных базах данных). Получено 4 свидетельства Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные результаты докладывались на следующих конференциях и семинарах, среди которых:

- 1) Международная научно-практическая студенческая конференция «Нефть и газ – 2011» (2011, 2014, 2021 гг.);
- 2) Научный семинар «45. Institutskolloquium 2015» (г. Циттау, Hochschule Zittau/Görlitz, департамент IPM, январь 2015 г.);
- 3) Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2016, 2018 гг.);
- 4) IX Международная научная конференция «ИТ-Стандарт 2019» (МИРЭА – Российский технологический университет, 11–12 марта 2019 г.);

- 5) 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, секция математического моделирования и вычислительного эксперимента (г. Москва, 23–29 ноября 2020 г.);
- 6) Ежегодный семинар “16th International EnKF Workshop” (8–11 июня 2021 г., дистанционный формат);
- 7) Международная научно-практическая конференция «Computational Methods & Ocean Technology (COTech) (г. Москва, ноябрь 2021 г.);
- 8) Международная конференция Maple Conference (дистанционное участие, ноябрь 2021 г.);
- 9) Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа» (г. Москва, ИПНГ РАН, 20–21 октября 2022 г., 16–18 октября 2024 г.);
- 10) II Всероссийская научно-практическая конференция «Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы» (г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 8–9 ноября 2022 г.);
- 11) XIV Всероссийская конференция «Новые технологии в газовой промышленности» (г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 14–18 ноября 2022 г.);
- 12) I Всероссийская научно-практическая конференция «Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики» (г. Севастополь, Севастопольский государственный университет, 23 марта 2023 г.);
- 13) Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Искусственный интеллект – возможности практического применения» (AIRPA 2024), (г. Алматы, Caspian University, 10–11 октября 2024 г.);
- 14) Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (г. Москва, Академия государственной противопожарной службы, 22 апреля 2025 г.).

Диссертационная работа соответствует всем требованиям, установленным пунктом 14 о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендована к защите

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), а именно:

п. 5 «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами»;

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».

Диссертация «Модели и алгоритмы адаптивного автоматизированного управления пожаровзрывобезопасностью объектов производственно-технического обслуживания газодобывающего комплекса» Мухиной Анастасией Геннадьевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Заключение принято на заседании профессорско-преподавательского состава кафедры автоматизированных систем управления РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Присутствовало на заседании кафедры 15 чел. Результаты голосования: "за" – 15 чел., "против" – нет, "воздержалось" – нет. Протокол №8 от 01 апреля 2026 года.

Заведующий кафедрой автоматизированных систем управления РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, доктор технических наук, профессор

/
/

А.Ф. Максименко