

На правах рукописи



Пожаркова Ирина Николаевна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ
ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ В
ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Красноярск – 2026

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Научный консультант: **Ченцов Сергей Васильевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного управления и проектирования ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Официальные оппоненты: **Стрижак Павел Александрович**
доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией тепломассопереноса ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Копылов Николай Петрович
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник отдела специальных исследований ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»

Филяев Михаил Петрович
доктор технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского института военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации ФГКВОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва» Министерства обороны Российской Федерации

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится 22 декабря 2026 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.02 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243702-d-21229803/pozharkova-irina-nikolaevna>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, просим высылать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.437.02. Телефон для справок: 8 (351) 267-94-21.

Автореферат разослан «__» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н., доцент



А.В. Голлай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Оценка целевых характеристик (ЦХ) газовых и жидкостных свободных струй, к которым относятся, в том числе, потоки огнетушащего вещества (ОТВ) из ствольной пожарной техники, рабочего тела в технологических процессах, атмосферные выбросы, является основой решения различных задач, в частности разработки алгоритмов автоматизации соответствующих систем управления (например, системы наведения пожарных роботов). Данные потоковые процессы являются высокосложными объектами с точки зрения теоретического описания, численного моделирования и экспериментального изучения. Это обусловлено рядом факторов, связанных с нелинейностью, многофазностью и турбулентным характером течения. В результате их влияния траектория свободных струй может быть нестабильна, подвержена изгибам, волнообразным деформациям, раздроблению и распылу.

Методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) позволяют с достаточно высокой точностью производить математическое моделирование движения свободных струй с учетом влияния на них разнообразных факторов: сопротивления воздуха, гравитации, ветра, процессов теплопередачи и т.д. Основным недостатком данного подхода является значительная вычислительная сложность, которая не позволяет использовать его в режиме реального времени, что может быть критически важным для отдельных прикладных областей. В частности, при разработке алгоритмов наведения потоков ОТВ на цель (при тушении пожара, охлаждении строительных конструкций или сооружений, осаждении облаков ядовитых или радиоактивных газов, пылей) в противопожарных роботизированных системах (ПРС). Характерными особенностями свободных струй в данной прикладной области являются большие (десятки метров) геометрические размеры, высокие начальные скорости движения и пр. Перемещение окружающих воздушных масс, например, ветер, может оказывать значительное влияние на траекторию потока ОТВ, особенно на излете, когда его скорость снижается. При этом обратная связь, на основе которой осуществляется управление пожарным роботом, реализованная на базе систем технического зрения, в условиях визуального зашумления может быть неэффективной. Использование машинного обучения (Machine Learning – ML) позволяет обеспечить высокое быстродействие и точность проведения соответствующих расчетов. Однако применение данного подхода в указанной прикладной области имеет ряд сложностей. Например, проведение натурных испытаний (НИ) для получения эмпирических данных (обучающей и тестовой выборки), которые описывают поведение свободной струи в широком диапазоне параметров внешних факторов, соответствующих различным сценариям их использования, крайне затруднительно. Кроме того, применение существующих технологий компьютерного зрения (Computer Vision – CV) для построения по результатам эксперимента трехмерных моделей исследуемых потоковых процессов, имеющих различную оптическую плотность и изменяющиеся границы, малоэффективно. Поэтому разработка методов и алгоритмов высокоточной и высокоскоростной оценки характеристик газожидкостных потоков (ГЖП), в частности ОТВ при возмущающих воздействиях, является актуальной задачей, которая соответствует перечню критических технологий Российской Федерации.

Степень разработанности.

Проектированию систем управления ПРС посвящены работы российских и зарубежных исследователей, таких как: Горбань Ю.И., Немчинов С.Г., Цариченко С.Г., Мешман Л.М. (стационарные дистанционно и программно-управляемые пожарные роботы ПР-ЛСД-С20У/С40У и их модификации), Ченг Х., Жу Д., Пан Л. (мобильные роботы RXR-M50BD, Thermite 3.0 и пр.), Меженев В.А., Ольховский И.А. (общие исследования динамики струй пожарных лафетных стволов) и др. Существенная часть разработок в данной области сосредоточена преимущественно на распознавании струй из стволов пожарных роботов в бортовых CV-системах. Основными недостатками используемых решений является их низкая эффективность на участках значительного снижения оптической плотности потока за счет раздробления и распада, что существенно затрудняет его идентификацию особенно в условиях задымления или зашумления внешними объектами. В работах, посвященных сокращению времени расчета характеристик ГЖП на основе методов CFD, используются различные подходы. Говардхан А., Пардьяк Е. и др. разработали методику применения расчетных сеток с крупными ячейками, что позволяет значительно ускорить процесс численного моделирования, однако точность полученных при этом результатов может существенно ухудшиться, что в рамках рассматриваемой прикладной области неприемлемо. Вerveкен Л., Кампс Д. предложили понижение порядка модели на основе метода Арнольди, который дает возможность сократить время решения дифференциальных уравнений CFD. Ошибка при этом увеличивается незначительно, однако на сложных задачах данный метод не обеспечивает быстрое действие, соответствующее режиму реального времени. Ченг Х., Жу Д. и др. предложили метод определения траектории струи на основе снимков с беспилотных летательных аппаратов с использованием обучаемых векторов подсказок, однако применимость данного подхода ограничена отслеживанием потока ОТВ без учета ветра и возможного зашумления изображения дымом в условиях пожара. Жу Д., Пан Л. разработали технологию прогнозирования траектории свободной струи на основе CV-системы ближнего радиуса действия. Предложенный метод может использоваться в условиях задымления, однако при сильном боковом ветре и большой дальности наведения прогноз положения пятна контакта на основе компактной части струи может иметь низкую точность, т.к. на сплошном участке поток ОТВ отклоняется от исходного направления незначительно, а потому соответствующая оценка изменения траектории на большом расстоянии может существенно отличаться от реального смещения. Жанг С., Жанг Р. и др. разработали метод прогнозирования положения точки падения струи воды с учетом ветра на основе нейросетевой модели, обучение которой производилось с использованием выборки, построенной при помощи инструментальных измерений положения контактного пятна. Эффективность данного подхода была показана только при использовании водяной пушки с небольшой дальностью, на которой факторы, осложняющие решение поставленной задачи, проявляются в меньшей степени по сравнению с ПРС с большим расходом ОТВ. Кроме того, для обеспечения наведения струи в любую точку пространства в радиусе действия пожарного робота требуется информация о положении потока ОТВ на всей длине его траектории, что потребует для обучения прогнозной модели соответствующей обучающей выборки, что затруднительно обеспечить в рамках инструментальных измерений. Таким образом, возникает **проблема** оценки

характеристик газожидкостных потоков с точностью и скоростью, необходимыми для эффективного управления противопожарными роботизированными системами в сложных свойственных для пожаров условиях: возможность сильного задымления окружающего пространства, наличие возмущающих воздействий, оказывающих влияние на движение огнетушащего вещества, большие расстояния до защищаемых объектов. Указанная **научная проблема** имеет важное хозяйственное значение, т.к. ее решение направлено на повышение безопасности и эффективности противопожарной защиты с использованием пожарных роботов, снижение рисков для жизни людей и материальных потерь, а также на импортозамещение применяемого в данной прикладной области программного обеспечения.

Целью диссертационной работы является разработка новых методов и алгоритмов оценки в режиме реального времени характеристик газожидкостных потоков, учитывающих их большую дальность, а также влияние возмущающих воздействий и направленных на повышение эффективности решения задач обеспечения пожарной безопасности на основе противопожарных роботизированных систем.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Разработка методологии оценки характеристик газожидкостных потоков в режиме реального времени.
2. Разработка методики проведения натурных испытаний противопожарных роботизированных систем для формирования валидационных выборок.
3. Разработка алгоритма построения целевых характеристик газожидкостных потоков по результатам эксперимента на основе методов фотограмметрии.
4. Разработка алгоритма построения по результатам моделирования целевых характеристик газожидкостных потоков, согласованных с экспериментальными.
5. Разработка алгоритма объемной аппроксимации газожидкостных потоков по результатам моделирования.
6. Разработка технологии выбора методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков.
7. Разработка расчетной модели оценки характеристик газожидкостных потоков при возмущающих воздействиях в режиме реального времени на основе методов машинного обучения.
8. Разработка метода синтеза закона управления пожарными роботами на основе методологии оценки характеристик газожидкостных потоков.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационное исследование соответствует направлениям пунктов 4, 5, 11, 12 паспорта специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Научная новизна:

В рамках разработки методов и алгоритмов решения задач системного анализа (пункт 4):

1. Разработана новая методология оценки в режиме реального времени характеристик газожидкостных потоков, основанная на методах машинного обучения, вычислительной гидродинамики и натурных испытаний, отличающаяся от известных использованием численного моделирования для генерации обучающих и верификационных выборок в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий, а натурных испытаний для генерации

валидационных выборок, позволяющая применять обученную на их основе модель для повышения скорости и точности расчета характеристик в противопожарных роботизированных системах.

В рамках разработки методов и алгоритмов решения задач обработки информации (пункт 4):

2. Разработана новая методика проведения натурных испытаний противопожарных роботизированных систем, основанная на многокамерной синхронизированной цифровой съемке, отличающаяся от известных учетом влияния ветра на движение газожидкостного потока, позволяющая оценивать на всей длине траектории характеристики струй, которые имеют значительную дальность (десятки метров) и находятся под возмущающими воздействиями, а также формировать валидационные выборки для проверки адекватности расчетных моделей.

В рамках визуализации, трансформации и анализа информации на основе компьютерных методов обработки информации (пункт 12):

3. Разработан новый алгоритм расчета целевых характеристик газожидкостных потоков, основанный на методах перспективных преобразований синхронизированных по времени цифровых изображений с трех различных ракурсов, отличающийся от известных фотограмметрических подходов на основе триангуляции применением итеративного построения модели траектории с учетом формы струи и положения ее соседних точек относительно камер, позволяющий проводить трехмерную реконструкцию потоков огнетушащего вещества, которые имеют значительную дальность (десятки метров) и находятся под возмущающими воздействиями, по результатам натурных испытаний с точностью, необходимой для построения валидационных выборок.

В рамках разработки алгоритмического обеспечения систем обработки информации (пункт 5):

4. Разработан новый алгоритм построения целевых характеристик газожидкостных потоков (по результатам численного моделирования), основанный на предложенном методе определения границы свободной струи по максимальным скоростям, отличающийся от известных согласованностью с соответствующими кривыми, полученными с использованием трехмерной реконструкции по результатам натурных испытаний пожарных лафетных стволов, позволяющий проводить валидацию вычислительных моделей на всей длине траектории, а также применять численные методы для генерации обучающих и верификационных выборок, которые требуются для машинного обучения расчетной модели оценки характеристик, в широком диапазоне значений параметров управляющих и возмущающих воздействий.

5. Разработан новый алгоритм объемной аппроксимации газожидкостных потоков (по результатам численного моделирования), основанный на предложенном методе представления струи в виде эллиптических сечений, отличающийся от известных меньшим количеством параметров, требующихся для описания потоков, позволяющий оценивать форму и размеры контактного пятна, а также интенсивность орошения на всей длине траектории движения огнетушащего вещества.

В рамках разработки методов и алгоритмов решения задач принятия решений (пункт 5):

6. Разработана технология выбора методов вычислительной гидродинамики

для моделирования газожидкостных потоков, основанная на поэтапном повышении вычислительной сложности моделей, отличающаяся от известных применением согласованных целевых характеристик, которые описывают верхнюю границу свободной струи по результатам численного расчета и натурных испытаний, позволяющая обеспечить генерацию обучающих и верификационных выборок в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий с требуемыми для машинного обучения точностью и объемом.

В рамках разработки методов и алгоритмов решения задач искусственного интеллекта (пункт 4):

7. Разработана расчетная модель, основанная на новой архитектуре машинного обучения – сети Колмогорова – Арнольда, позволяющая оценивать характеристики газожидкостных потоков при возмущающих воздействиях со скоростью и точностью, которые требуются в противопожарных роботизированных системах, отличающаяся использованием для обучения и верификации выборок, сгенерированных по результатам численного моделирования, а для валидации – по результатам натурных испытаний, также отличающаяся от нейросетей на базе многослойного персептрона: меньшим количеством параметров и, соответственно, объемом памяти, требуемым для хранения обученной модели; более высокой точностью, в том числе на сценариях, выходящих за пределы обучающей выборки; более высокой устойчивостью к дообучению на дополнительных исходных данных.

В рамках разработки методов и алгоритмов решения задач оптимизации, управления (пункт 4); методов и алгоритмов оценки эффективности функционирования сложных систем управления и их элементов (пункт 11):

8. Разработан новый метод синтеза закона управления пожарными роботами, основанный на предложенной расчетной модели с использованием сети Колмогорова – Арнольда, а также разработанном алгоритме оптимизации, который предназначен для расчета углов наведения, обеспечивающих прохождение струи через заданную точку. Разработанный метод отличается от известных учетом геометрических особенностей и параметров струи огнетушащего вещества на всей ее длине и позволяет осуществлять построение временных диаграмм изменения углов наведения, которые обеспечивают орошение защищаемого объекта, а также проводить сравнительный анализ и предварительную оценку эффективности создаваемых алгоритмов на основе численного моделирования.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что доказана перспективность разработанного методологического аппарата оценки характеристик газожидкостных потоков в режиме реального времени для решения прикладных задач управления в противопожарных роботизированных системах; обосновано совместное использование методов вычислительной гидродинамики, машинного обучения, компьютерного зрения, проведения натурных испытаний для разработки новых алгоритмов, предназначенных для решения задачи оценки характеристик струй огнетушащего вещества; представлен принцип согласования целевых характеристик газожидкостных потоков, построенных по результатам численного моделирования и натурных испытаний, позволяющий выполнять валидацию и обоснованно применять методы вычислительной гидродинамики для генерации обучающих и верификационных выборок, соответствующих динамике исследуемых струй в широком диапазоне значений параметров управляющих и возмущающих воздействий; показана применимость модели переноса объемной доли жидкости

(VOF) совместно с k - ϵ моделью турбулентности (в модификации RNG) для решения задач численного моделирования струй огнетушащего вещества из ствола пожарного робота, имеющих большую дальность и находящихся под возмущающими воздействиями; исследованы средства повышения скорости и точности расчета характеристик струй огнетушащего вещества, в том числе на основе новой архитектурной модели машинного обучения – сети Колмогорова – Арнольда; проведена модернизация методологического аппарата оценки характеристик газожидкостных потоков с получением новых теоретических результатов.

Практическая значимость работы заключается в способе построения траектории струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола при воздействии ветра, позволяющем оценивать ее характеристики в режиме реального времени на аппаратном обеспечении современных пожарных роботов; способе построения трехмерной модели траектории струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола для оценки ее характеристик по результатам натурных испытаний; импортозамещающем программном обеспечении, которое реализует разработанные алгоритмы оценки характеристик свободных струй на основе сети Колмогорова – Арнольда, численного моделирования, натурных испытаний и предназначено для совершенствования противопожарных роботизированных систем, а также оценки их эффективности на основе имитационного моделирования.

Полученные результаты диссертационной работы и патент на изобретение RU 2830398 C1 внедрены в процесс проектирования противопожарных роботизированных систем в ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР» для синтеза и оценки эффективности алгоритмов управления пожарными роботами.

Разработанные методика проведения натурных испытаний пожарных стволов, методы и алгоритмы расчета целевых характеристик газожидкостных потоков внедрены в деятельность ООО «КОРУФАЙЕР» для решения задач определения параметров струй огнетушащего вещества по результатам натурных испытаний ствольной пожарной техники.

Результаты диссертационного исследования приняты к использованию в ИБРАЭ РАН в качестве научно-методической основы при проработке вопросов противопожарной защиты и обоснования безопасности подземных сооружений в рамках проекта создания подземной исследовательской лаборатории и пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов на участке Енисейский.

Разработанные методы и алгоритмы синтеза законов управления пожарными роботами имеют практический интерес для Главного управления МЧС России по Красноярскому краю при обосновании и оценке эффективности применения средств противопожарной защиты на основе роботизированных установок пожаротушения для обеспечения безопасности различных объектов.

Методология и методы исследования включают в себя методы системного анализа, вычислительной гидродинамики, машинного обучения, цифровой обработки изображений, фотограмметрии, планирования эксперимента, объектно-ориентированного программирования и математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология оценки характеристик газожидкостных потоков, основанная на методах машинного обучения, численного моделирования и натурных

экспериментов, позволяет производить построение расчетных моделей, обеспечивающих вычисление траекторий движения огнетушащего вещества при различных значениях параметров управляющих и возмущающих воздействий со скоростью, соответствующей режиму реального времени, и точностью, требуемой в противопожарных роботизированных системах.

2. Методика проведения натурных испытаний противопожарных роботизированных систем, основанная на многокамерной синхронизированной цифровой съемке, позволяет производить оценку характеристик струй огнетушащего вещества, которые имеют дальность десятки метров и находятся под возмущающими воздействиями, а также формировать валидационные выборки, используемые для проверки адекватности расчетных моделей исследуемых газожидкостных потоков.

3. Алгоритм расчета целевых характеристик газожидкостных потоков, основанный на методах перспективных преобразований, позволяет проводить по результатам натурных испытаний трехмерную реконструкцию свободных струй огнетушащего вещества, которые имеют переменные оптическую плотность и форму границ, а также находятся под возмущающими воздействиями, с точностью, необходимой для построения валидационных выборок.

4. Алгоритм построения целевых характеристик газожидкостных потоков (по результатам численного моделирования), основанный на предложенном методе определения границы свободной струи по максимальным скоростям, позволяет: формировать границы свободных струй, согласованные с соответствующими экспериментальными данными; проводить валидацию вычислительных моделей на всей длине траектории; применять численные методы для генерации обучающих и верификационных выборок в широком диапазоне значений параметров управляющих и возмущающих воздействий; производить построение указанных выборок в требуемом для машинного обучения объеме.

5. Алгоритм объемной аппроксимации газожидкостных потоков (по результатам численного моделирования), основанный на предложенном методе представления струи в виде эллиптических сечений, позволяет оценивать форму и размеры контактного пятна, а также интенсивность орошения на всей длине траектории движения огнетушащего вещества, а также сократить количество параметров, требуемых для их описания.

6. Технология выбора методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков, основанная на поэтапном повышении вычислительной сложности моделей и разработанных методах построения согласованных целевых характеристик по результатам численного расчета и натурных испытаний, позволяет обеспечить формирование обучающих и верификационных выборок в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий с требуемыми для машинного обучения точностью и объемом.

7. Расчетная модель, основанная на сети Колмогорова – Арнольда, позволяет оценивать характеристики газожидкостных потоков при возмущающих воздействиях в режиме реального времени и обеспечивает точность, необходимую для функционирования противопожарных роботизированных систем.

8. Метод синтеза закона управления пожарными роботами, основанный на предложенной расчетной модели, а также разработанном алгоритме оптимизации,

предназначенном для расчета углов наведения, при которых струя проходит через заданную точку, позволяет осуществлять построение временных диаграмм изменения углов наведения, обеспечивающих орошение защищаемой поверхности по заданному циклу, с учетом геометрических особенностей и параметров струи огнетушащего вещества на всей ее длине, а также проводить сравнительный анализ и предварительную оценку эффективности создаваемых алгоритмов на основе численного моделирования.

Достоверность результатов работы подтверждается корректной постановкой проблемы и задач, использованием для их решения современных методов машинного обучения, компьютерного зрения, численного моделирования; строгой аргументацией разработанных методов и алгоритмов; валидацией полученных результатов на основе экспериментальных исследований, воспроизводимость которых подтверждена в рамках различных натуральных испытаний с использованием сертифицированного оборудования; применением разработанных методов и алгоритмов на отечественных предприятиях, производящих и внедряющих ствольную пожарную технику и противопожарные роботизированные системы; качественным совпадением результатов, полученных для отдельных сценариев, с данными, представленными в других исследованиях в рассматриваемой прикладной области.

Апробация результатов.

Научные положения и разработки автора, а также основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 26 всероссийских и международных конференциях: VII Всероссийская конференция: Системы управления, информационные технологии и математическое моделирование (Омск, 2025); 89-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием): Информационные технологии. Физика и математика (Минск, Беларусь, 2025); Международная научно-практическая конференция: Информационные технологии, искусственный интеллект, большие данные: актуальные тенденции, перспективные исследования (ITAIB 2024) (Минск, Беларусь, 2024); VIII Международная научно-практическая конференция: Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте (Кемерово, 2024); International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (Красноярск, 2023); Международная научно-практическая конференция: Актуальные проблемы пожарной безопасности (Москва, 2024, 2023); Международная научно-практическая конференция: Пожарная и аварийная безопасность (Иваново, 2024, 2018); Всероссийская научно-практическая конференция: Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций (Железногорск, 2023, 2022, 2020, 2019); Международная научно-практическая конференция: Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций (Красноярск, Железногорск, 2025, 2023, 2019, 2022); Всероссийская научная конференция с международным участием: Енисейская теплофизика (Красноярск, 2023); Всероссийская научно-практическая конференция: Проблемы и перспективы развития IT- и VR-технологий в области комплексной безопасности (Екатеринбург, 2023); Computer Science On-line Conference (Злин, Чехия, 2022); II International scientific conference on metrological support of innovative technologies (Санкт-Петербург, 2021); III International conference

on advanced technologies in materials science, mechanical and automation engineering (Красноярск, 2021); IX Международная научная конференция: Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности (Волгоград, 2021); 4th Computational Methods in Systems and Software (Всетин, Чехия, 2020); II International scientific conference on applied physics, information technologies and engineering (Красноярск, 2020); XI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: Робототехника и искусственный интеллект (Железногорск, 2019).

Публикация результатов работы.

Основные научные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, опубликованы в 60 научных работах, среди которых 21 статья в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ по специальности диссертации (из них 11 статей в журналах категории K1, 10 – категории K2), 4 публикации в журналах, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science (из них 1 статья в журнале квартиля Q1, 2 – квартиля Q3, 1 – квартиля Q4); 2 патента РФ на изобретения; 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ; 1 монография.

В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично автором получены следующие результаты: разработаны основные аспекты методологии решения задач оценки характеристик газожидкостных потоков в режиме реального времени [22; 23; 28], исследованы возможности использования методов вычислительной гидродинамики для моделирования потоковых процессов, в том числе, в задачах проектирования и оценки эффективности систем противопожарной защиты [20; 33; 34], разработана и апробирована методика проведения натурных испытаний противопожарных роботизированных систем, а также методы и алгоритмы построения по их результатам целевых характеристик свободных струй значительных геометрических размеров, имеющих переменную оптическую плотность и форму границ [17; 27; 32], разработана и апробирована технология выбора численных методов для моделирования свободных струй [24], исследованы основные аспекты применения методов машинного обучения для решения задач оценки характеристик газожидкостных потоков в режиме реального времени [9], разработаны методы и алгоритмы для повышения эффективности решения различных задач предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, в том числе на основе автоматизации обработки результатов моделирования с использованием методов вычислительной гидродинамики [15].

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных источников (259 наименований). Работа изложена на 293 страницах машинописного текста, содержит 92 рисунка, 33 таблицы и 14 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика диссертационного исследования, обоснована его актуальность, сформулированы научная проблема, цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведены результаты реализации работы.

В первой главе выполнен системный анализ задачи оценки характеристик ГЖП в различных прикладных областях, в том числе при разработке ПРС. При этом на основе проведенных предварительных натурных испытаний показано, что: боковой ветер на открытых пространствах может приводить к отклонению от исходного направления траектории и распаду струи ОТВ из ствола пожарного робота; низкие температуры снижают ее высоту и дальность, что в конечном итоге также может вызвать значительное смещение пятна контакта. Указанные явления существенно осложняют управление наведением соответствующего ГЖП на цель: очаг пожара, охлаждаемый объект и т.д. При этом определение ЦХ струи ОТВ с требуемой точностью на основе CV-систем может быть затруднено из-за ее значительных геометрических размеров, переменной оптической плотности, а также визуального зашумления (дымом, распыленными фрагментами потока).

Представленный в главе анализ решений, позволяющих оценивать характеристики ГЖП на основе моделирования, показал, что требуемую точность в рамках исследуемой прикладной области могут обеспечить методы CFD. Однако значительная сложность данных моделей не позволяет использовать их в режиме реального времени, при котором расчет производится со скоростью протекания соответствующих процессов, что критически важно с точки зрения эффективности функционирования ПРС. Также в первой главе были выявлены факторы, затрудняющие применение ML для обеспечения требуемого быстродействия и точности, в частности: необходимость проведения большого количества натурных испытаний для получения эмпирических данных (обучающей и тестовой выборок), описывающих поведение свободной струи в широком диапазоне параметров внешних факторов (направление и скорость ветра, температура воздуха и т.д.); низкая эффективность имеющихся технологий CV для построения по результатам эксперимента трехмерных моделей газожидкостных потоковых процессов, имеющих различную оптическую плотность и изменяющиеся границы. Указанные особенности существенно затрудняют измерение исследуемых характеристик на основе натурных испытаний. Совместное использование методов ML и CFD позволит решить данную проблему. Отличия такого подхода заключаются в следующем. Численное моделирование газожидкостных потоковых процессов применяется для формирования выборок в широком диапазоне значений управляющих и возмущающих параметров. Полученные таким образом данные далее используются для обучения и верификации нейросетевых моделей, предназначенных для оценки в режиме реального времени соответствующих характеристик свободных струй. Валидационные выборки формируются на основе натурных испытаний ПРС или их исполнительных механизмов – пожарных лафетных стволов (ПЛС). Реализация данного подхода возможна только при согласовании ЦХ, описывающих динамику исследуемых потоковых процессов, как по результатам моделирования, так и по результатам экспериментов.

В первой главе предложена разработанная с учетом выявленных в ходе проведенного анализа недостатков существующих решений методология оценки характеристик ГЖП из пожарного лафетного ствола ПРС в режиме реального времени (патент на изобретение RU 2830398 C1). Ее основу представляет обученная расчетная модель (рисунок 1). Построение данной модели (рисунок 1, блок A1) состоит из четырех основных этапов: формирования исходных данных, машинного обучения, верификации и валидации (рисунок 2).

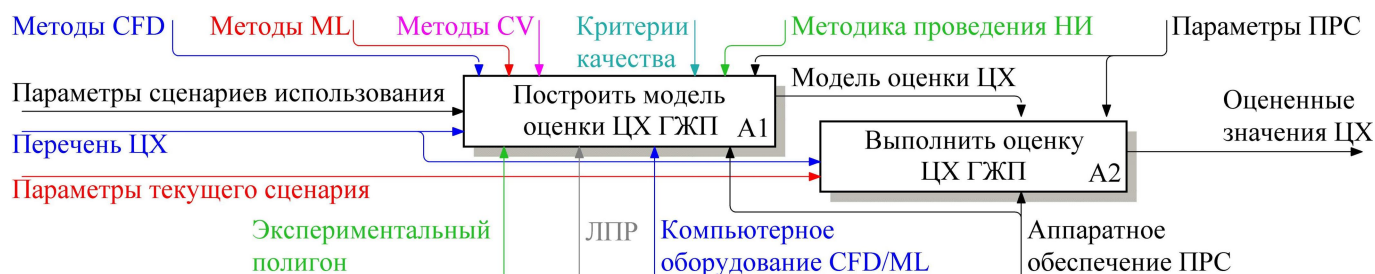


Рисунок 1 – Функциональная диаграмма методологии оценки характеристик ГЖП (ЛПР – лицо, принимающее решение)

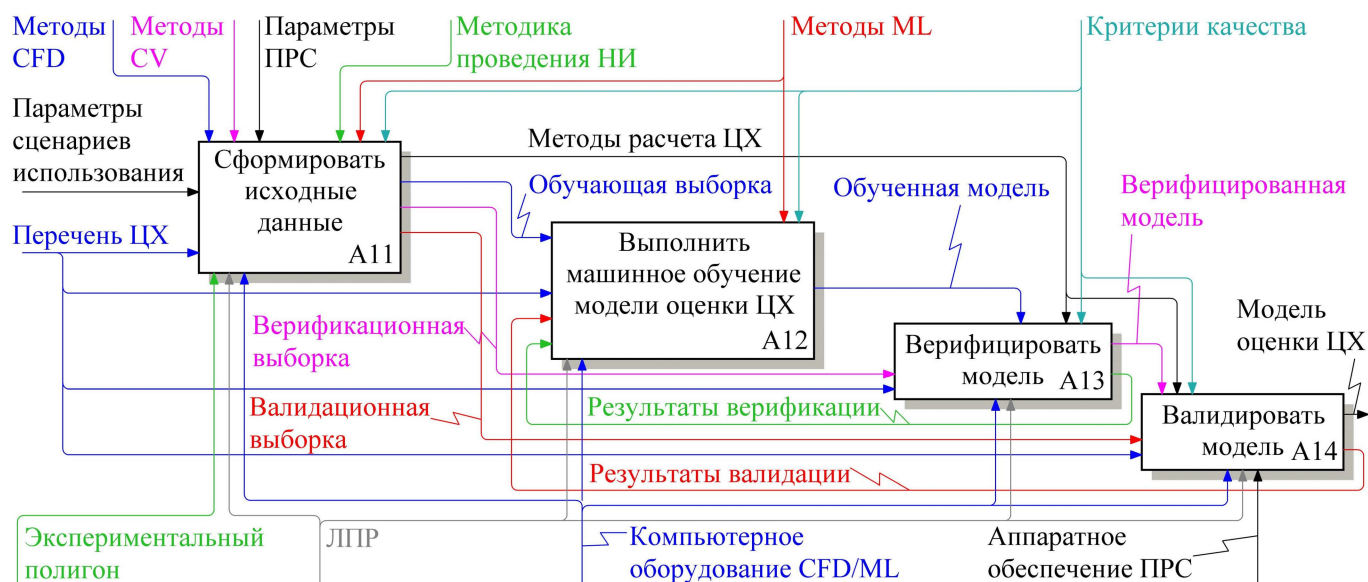


Рисунок 2 – Функциональная диаграмма задачи построения модели оценки характеристик ГЖП

Формирование исходных данных (рисунок 2, блок A11) производится на основе сценариев использования исследуемого объекта, которые в рамках прикладной области данного исследования (управление ПРС) описываются совокупностью следующих параметров: температур окружающего воздуха (T); направлений (γ) и скоростей ветра (v_B); углов возвышения выходного патрубка (α) ствола ПРС; расхода ОТВ (q_0).

С учетом указанных параметров производится выбор наборов сценариев (рисунок 3, блок A113) для машинного обучения, верификации и валидации расчетной модели оценки характеристик ГЖП, исходя из следующих принципов:

1. Наборы обучающих и верификационных / валидационных сценариев не должны пересекаться, т.е. сценарии, которые используются для проверки адекватности построенной модели относительно результатов, полученных на основе методов CFD (верификации) / НИ (валидации), не участвуют в ее обучении.

2. Границы диапазонов значений основных параметров набора для обучения должны соответствовать сценариям использования исследуемых ПРС.

3. Набор валидационных сценариев может формироваться и изменяться по результатам проведенных натурных испытаний, т.к. обеспечение точных значений основных физических параметров эксперимента не всегда реализуемо.

На базе сформированных наборов сценариев генерируются соответствующие выборки: обучающая и тестовая (верификационная) по результатам моделирования (рисунок 3, блок A115) движения ОТВ с использованием методов CFD, а также экспериментальная (валидационная) – по результатам НИ (рисунок 3, блок A112). Каждая такая выборка представляет собой множество данных, описывающих целевые характеристики ГЖП при различных сценариях.

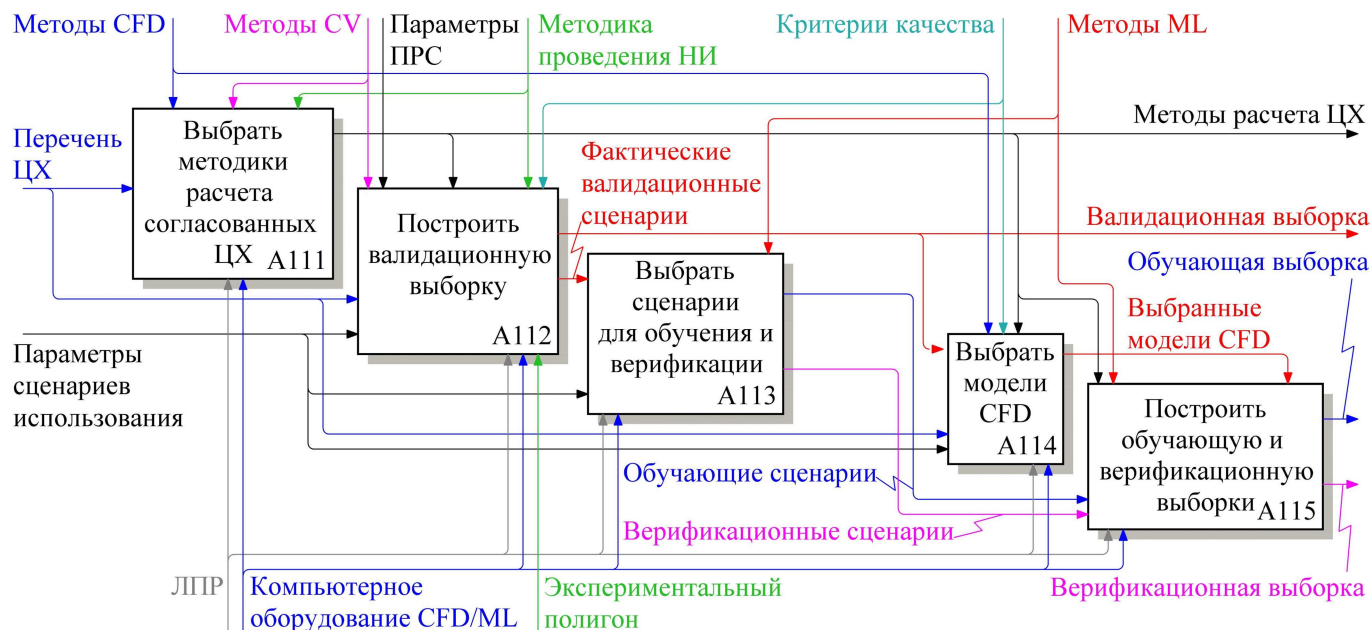


Рисунок 3 – Функциональная диаграмма задачи формирования исходных данных

Среди ЦХ, представляющих наибольший интерес в исследуемой прикладной области, можно выделить (рисунок 4): высоту (H), дальность (L_X), верхнюю границу (траекторию движения точек переднего фронта) струи ОТВ, размеры пятна контакта, смещение пятна контакта (L_Z).

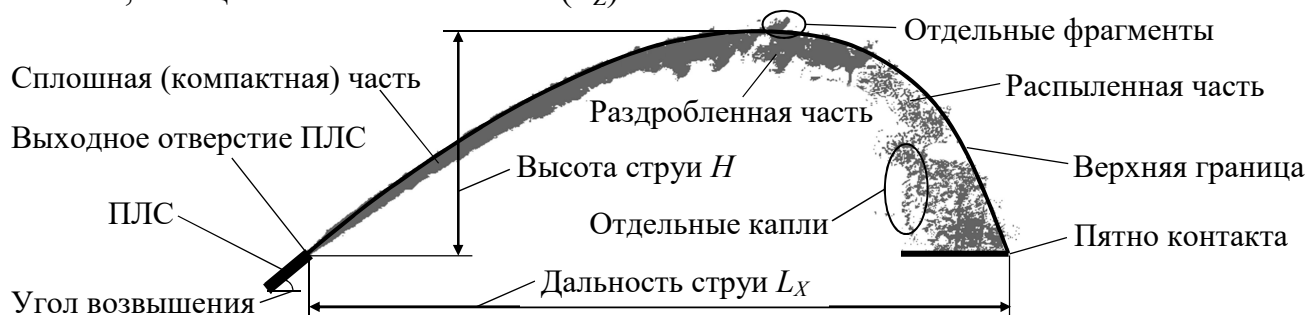


Рисунок 4 – Схема потока ОТВ из ствола ПРС

Результаты моделирования движения ГЖП с использованием методов CFD представляют собой большой массив данных, состоящий из множества физических параметров в различных точках трехмерного пространства и моментах времени. Для формирования обучающих и верификационных выборок на базе указанных массивов (рисунок 3, блок A115), а также валидации используемых моделей применяется согласование ЦХ (рисунок 3, блок A111), описывающих динамику исследуемых потоковых процессов, как по результатам расчета, так и по результатам натурных испытаний. Разработке соответствующих методов и алгоритмов посвящены вторая и третья главы диссертационного исследования.

Машинное обучение расчетной модели (рисунок 2, блок A12) производится на основе построенной обучающей выборки, а ее верификация (рисунок 2, блок A13) заключается в оценке точности вычисления целевых характеристик ГЖП относительно соответствующих параметров, полученных по результатам моделирования с использованием методов CFD при различных сценариях (верификационная выборка). Валидация (рисунок 2, блок A14) производится аналогичным образом, но при этом используются результаты натурных испытаний (валидационная выборка). В случае получения неудовлетворительных показателей качества (в частности, значений среднеквадратических отклонений) выполняется повторное машинное обучение модели с другими настройками параметрами.

Вторая глава посвящена разработке методики проведения натурных испытаний ПРС для формирования валидационных выборок (рисунок 3, блок A112), а также методов и алгоритмов построения целевых характеристик ГЖП по результатам эксперимента на основе цифровой съемки исследуемых процессов (патент на изобретение RU 2843123 C1).

Проведенный анализ актуальных решений показал, что фотограмметрия является одним из наиболее эффективных способов трехмерной реконструкции реальных объектов. В настоящее время существуют готовые соответствующие методики и их программные реализации, позволяющие на основе множества фотографий, сделанных с различных ракурсов, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), с высокой точностью создавать 3D-модели различных предметов, зданий, сооружений и т.д. Однако применимость указанных методов ограничена преимущественно статичными объектами, форма и положение которых в процессе «сканирования» является стабильной. А потому соответствующие алгоритмы фотограмметрии могут иметь низкую эффективность при построении трехмерных моделей свободных струй, границы которых в процессе их движения существенно изменяются под влиянием различных факторов, в частности турбулентности. Кроме того, указанная задача может осложняться следующими особенностями исследуемых потоковых процессов: зависимость оптической плотности от ракурса фотосъемки и участка струи; слабая различимость на близком по яркости и цвету фоне; визуальное зашумление внешними объектами; ограниченное время существования; значительные размеры струи. Данные факторы могут усложнять получение синхронизированных изображений исследуемых процессов в достаточном качестве и количестве различных ракурсов, выделение границ, выделение особых точек, ректификацию и т.д. Причем в значительной степени ряд указанных особенностей проявляется на участках распада и распыления струи, которые, как правило, представляют наибольший исследовательский интерес.

Во второй главе представлены методы и алгоритмы, разработанные с учетом указанных проблем для трехмерной реконструкции траекторий ГЖП огнетушащего вещества,двигающегося в гравитационном поле при возмущающих воздействиях. Технология построения 3D-моделей и целевых характеристик струй ОТВ на основе натурных испытаний включает следующие этапы: предварительный выбор валидационных сценариев, подготовку экспериментального полигона и оборудования, проведение эксперимента и расчет по его результатам ЦХ.

На этапе подготовки оборудования производится, в том числе, калибровка камер, заключающаяся в определении их внутренних параметров, на основе которых осуществляются перспективные преобразования. Оценка точности построенных трехмерных моделей выполняется путем сравнения полученных на их основе ЦХ с измеренными при проведении натурных испытаний.

Подготовка экспериментального полигона при исследовании траекторий струй ОТВ с учетом возмущающих воздействий заключается в разметке координатных осей и расстановке маяков в точках, являющимися ориентирами для размещения камер и исследуемого ПЛС. На рисунке 5 представлена соответствующая схема. Подготовка полигона осуществляется с учетом особенностей местности, параметров управляющих (α , q_0) и возмущающих воздействий (ν_B , γ), характеристик используемых цифровых камер и т.д. Разметка (определение положения точек A , B , C , D) производится при помощи геодезического оборудования.

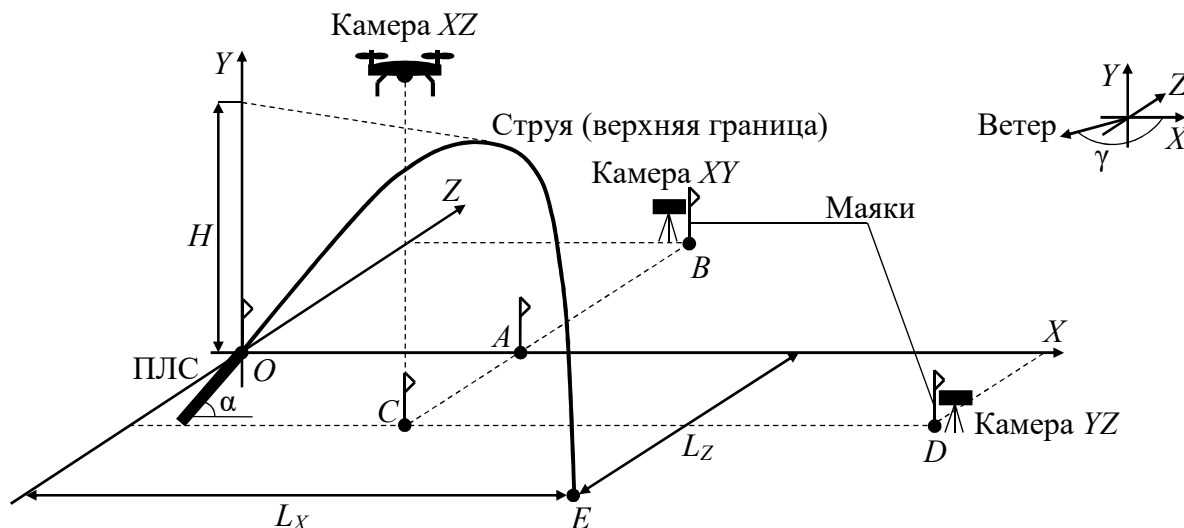


Рисунок 5 – Схема экспериментального полигона

При этом в каждой точке устанавливаются маяки – хорошо заметные вертикальные объекты известной высоты, которые используются для быстрого размещения и настройки (ориентации) оборудования, а также уточнения на основе полученных цифровых изображений геометрических параметров эксперимента.

Проведение эксперимента включает три основных этапа: подготовительные работы (установка и настройка камер, исследуемого ПЛС и т.д.), тестовый запуск струи, по результатам которого определяется соответствие расстановки оборудования параметрам исследуемых процессов и основной ход натурных испытаний. Реализация каждого из указанных этапов подробно описана во второй главе диссертационной работы. По результатам эксперимента формируется протокол, в который заносятся параметры, измеренные при проведении и подготовке НИ. На его основе производится расчет положений камер в координатной системе полигона.

Распознавание траекторий свободных струй по результатам эксперимента, которое в данном случае заключается в построении массивов положения точек, лежащих на границах исследуемого вещества, в координатной системе матриц камер (рисунок 5), производится на основе цифровых изображений, сформированных из полученных в ходе НИ видеозаписей. При этом синхронизация видеопотоков с различных камер осуществляется по звуковым сигналам. Выделение границ струй на изображениях выполняется с использованием разработанной во второй главе технологии, которая включает, в том числе, предварительную обработку, позволяющую повысить яркостный перепад между ОТВ и фоном.

Ниже представлены разработанные во второй главе алгоритмы, используемые для построения трехмерных моделей и ЦХ изучаемых процессов по результатам НИ (программы для ЭВМ № 2025618500 и № 2024667572). Блок-схемы и поясняющие схемы к алгоритмам представлены на рисунках 6–9.

Алгоритм первичного выделения контуров границ ГЖП.

Вход: массивы координат множества точек изображения ГЖП x, y ; разрешающая способность по полярному углу $\Delta\varphi$ и радиусу Δr ; ограничение на увеличение полярного радиуса между соседними точками границы ГЖП ΔR .

Выход: массивы координат точек верхней и нижней границ изображения ГЖП x_u, y_u, x_d, y_d .

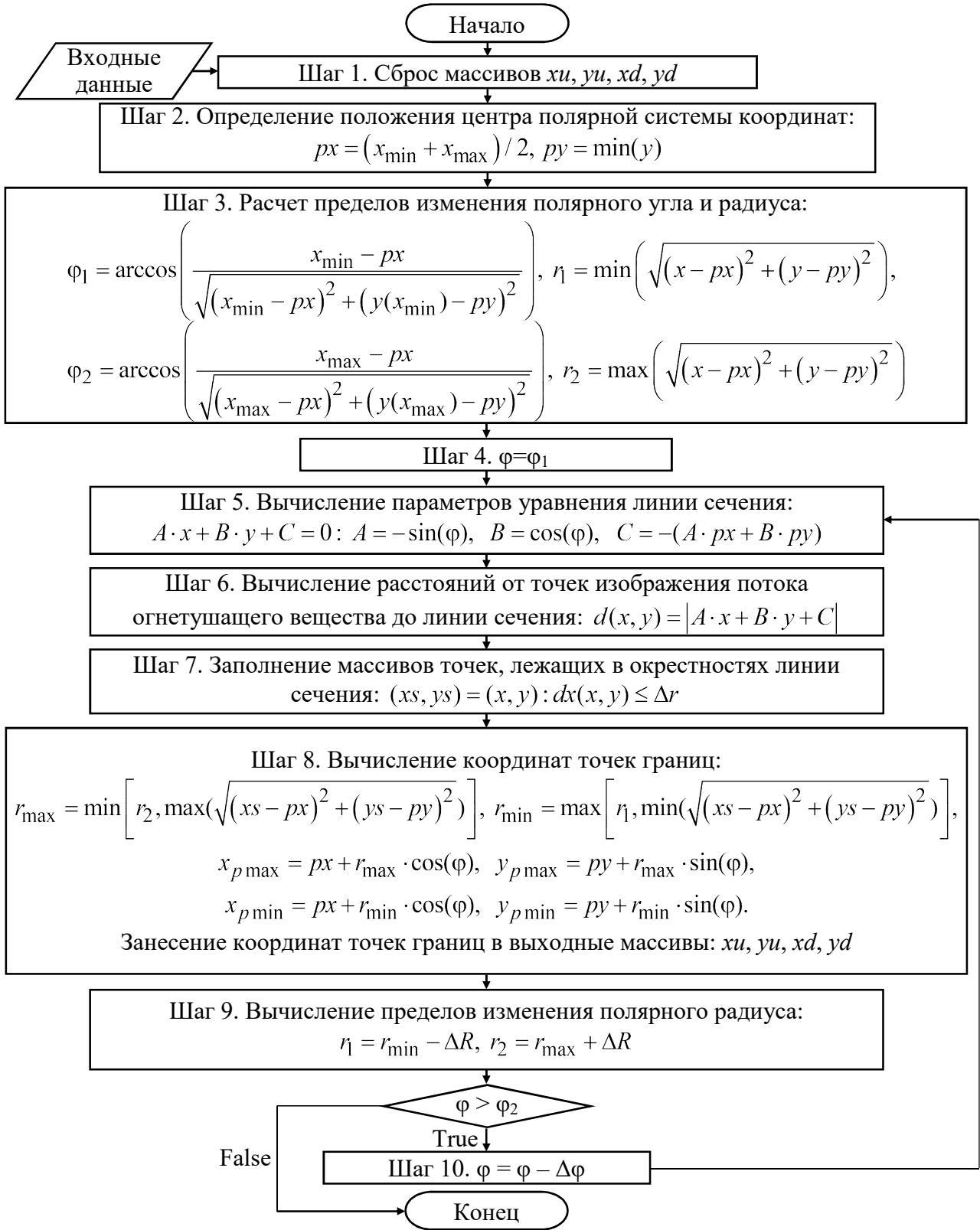


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма первичного выделения контуров границ ГЖП

Алгоритм построения трехмерной модели ГЖП.

Вход: массив индексов камер C_m , где m соответствует координатным плоскостям (рисунок 5, камеры XY, YZ, XZ); массивы точек изображений границ ГЖП tp_m ; калибровочные матрицы K_m , матрицы вращения R_m и перемещения камер $T_m = [X_{0,m} \ Y_{0,m} \ Z_{0,m}]^T$; координаты центра выходного отверстия ПЛС $S = [X_s \ Y_s \ Z_s]^T$; индекс начальной главной камеры mC ; минимальный шаг $MinStep$; минимально допустимое расстояние между соседними точками траектории ϵ .

Выход: массив точек траектории ГЖП в системе координат полигона P .

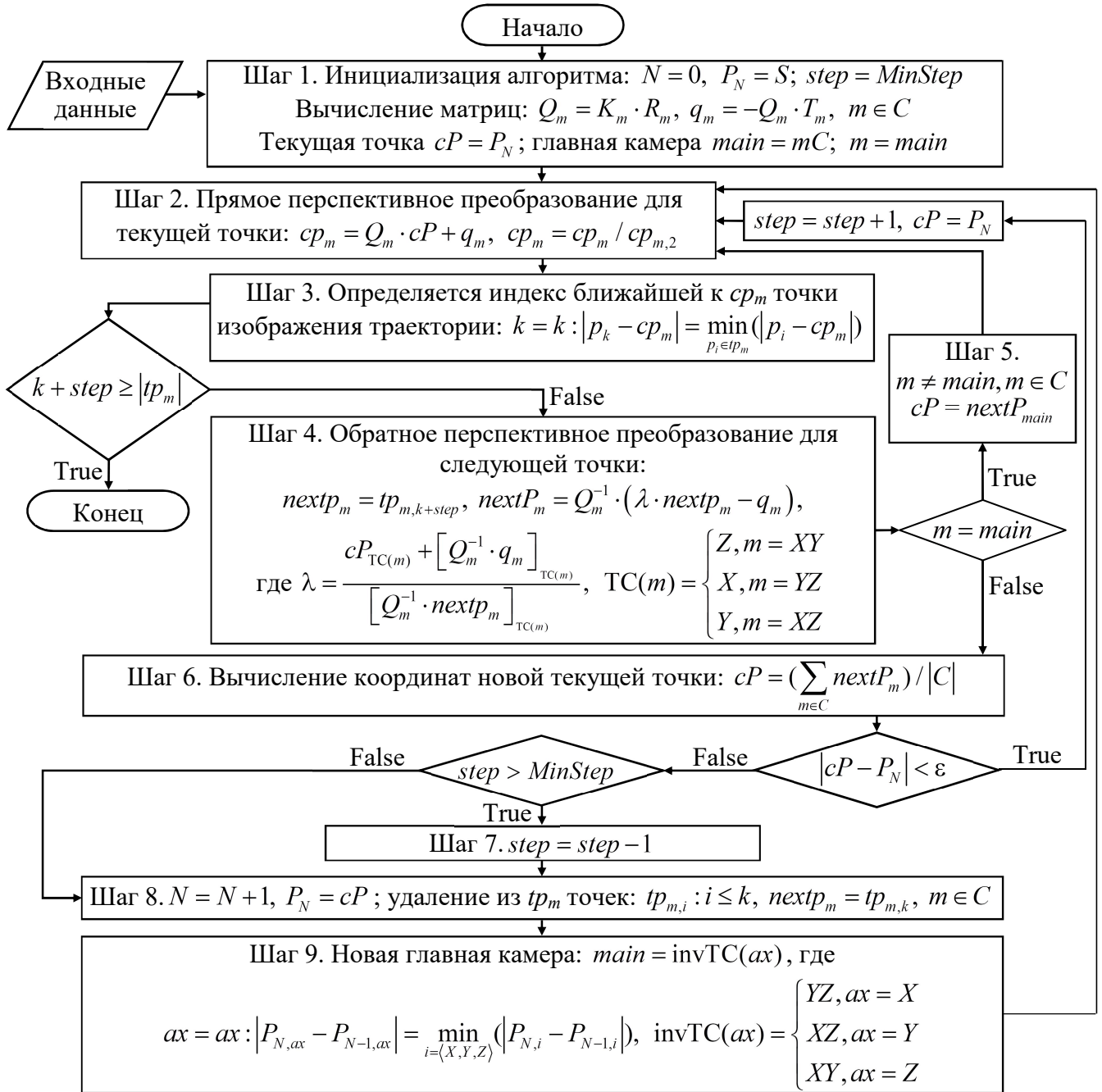


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма построения трехмерной модели ГЖП

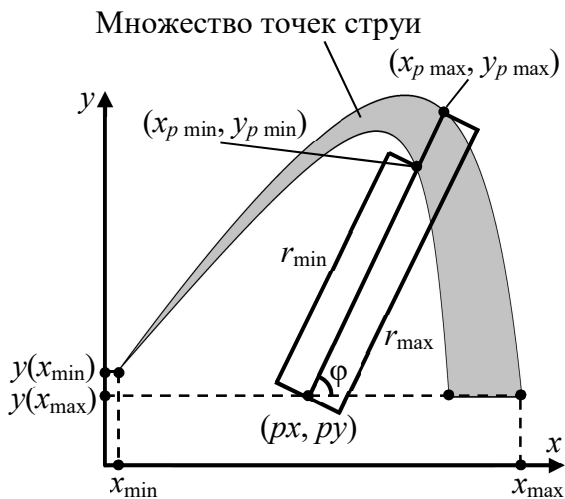


Рисунок 8 – Поясняющая схема к алгоритму первичного выделения контуров границ ГЖП

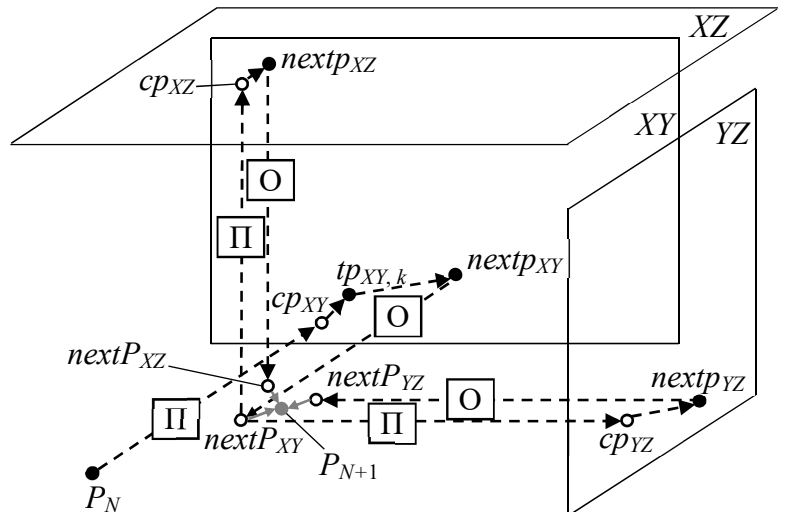


Рисунок 9 – Поясняющая схема к алгоритму построения трехмерной модели ГЖП (П – операция прямого перспективного преобразования, О – обратного)

Во второй главе также описаны результаты оценки эффективности разработанной технологии на основе НИ. Рисунок 10 содержит фрагменты исходных изображений, полученные в один и тот же момент времени на основе синхронизированных по звуковому сигналу видеозаписей с трех камер, а также соответствующие результаты их предварительной обработки и выделения верхних и нижних границ струи. На рисунке 11 и в таблице 1 представлены результаты построения трехмерной модели потока ОТВ, а также приведены контрольные точки, полученные на ее основе и по результатам измерений: начальная точка струи, положение наивысшей точки струи, наиболее удаленная от выходного патрубка точка струи. Максимальное среди указанных в таблице 1 характеристик относительное отклонение составило 3.7 %, что говорит о достаточно высокой точности предлагаемой технологии.

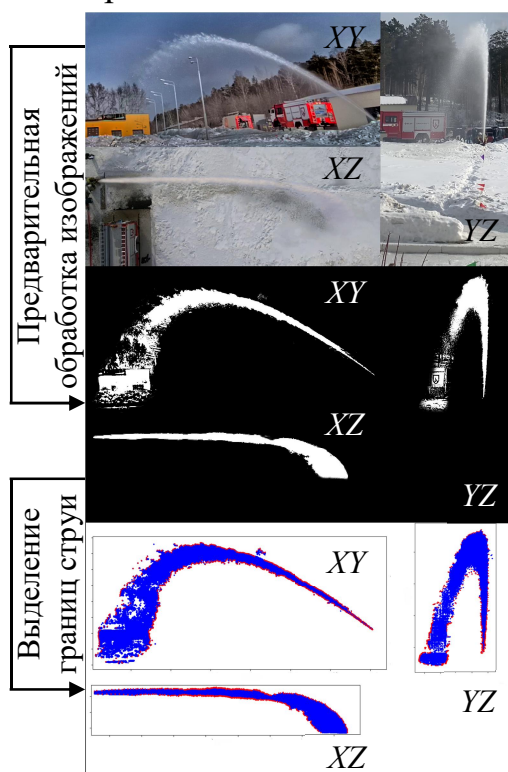


Рисунок 10 – Результаты выделения границ струи

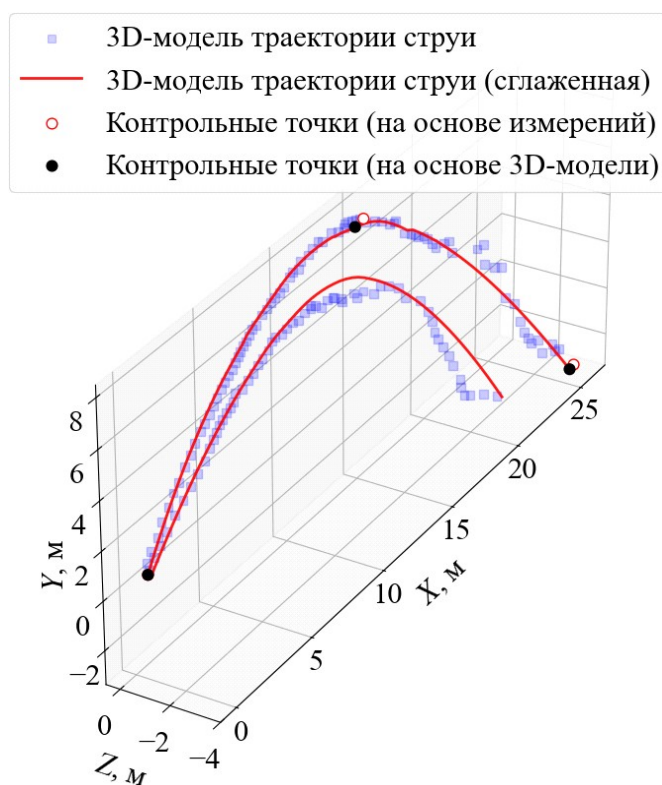


Рисунок 11 – Результаты построения трехмерной модели струи

Таблица 1 – Сравнительный анализ геометрических характеристик струи

Наименование ЦХ	Измеренное значение, м	Модельное значение, м	Абсолютное отклонение, м	Относительное отклонение, %
Дальность струи	25.2	24.9	0.3	1.2
Высота струи	7.65	7.37	0.28	3.7
Смещение пятна контакта	3.58	3.57	0.01	0.3

В третьей главе разработаны методы и алгоритмы построения по результатам моделирования целевых характеристик ГЖП, согласованных с экспериментальными. Результаты численного расчета с использованием методов CFD для каждого момента модельного времени представляют собой большой массив данных, описывающих состояние исследуемого пространства в различных точках, в частности, в узлах или ячейках расчетной сетки при использовании сеточных методов решения соответствующих дифференциальных уравнений. Оценка точечных ЦХ (L_x , L_z , H) по результатам моделирования, как правило, не вызывает затруднений. Однако в исследуемой прикладной области требуется

вычисление параметров свободных струй, описывающих их динамику по всему заполненному ими объему пространства. Построение соответствующих ЦХ может быть осложнено геометрическими размерами моделируемых ГЖП, что значительно затрудняет определение параметров. Одними из наиболее распространенных характеристик, используемых для описания динамики ГЖП на всей их протяженности, являются линии тока. Однако при исследовании свободных струй данные подходы не всегда применимы.

Так, верхняя граница струи ОТВ, определяемая в CV-системах ПРС визуально по ее наиболее «плотной» на данном участке области, которая соответствует частицам, движущимся с максимальными скоростями, может значительно отличаться от кривых, получаемых на основе линий тока (рисунок 12).

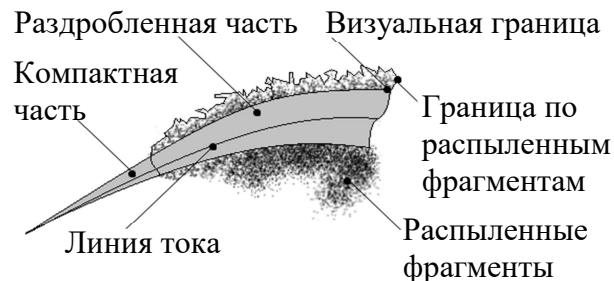


Рисунок 12 – Схема свободной струи ОТВ

Применение пороговых значений объемной доли жидкости (VF) для исключения распыленных фрагментов из расчета характеристик малоэффективно, т.к. на излете значительная часть струи за счет распада имеет малые величины VF , однако их требуется учитывать при построении границы потока. Кроме того, при моделировании движения на основе VOF и задании достаточно крупных ячеек с целью сокращения времени расчета полученные линии тока в распыленной части струи могут существенно выходить за ее границы.

Учитывая указанные проблемы, были разработаны следующие методы и реализованные на их основе алгоритмы (программа для ЭВМ № 2025618499): метод построения линии максимальных скоростей (ЛМС) потока, которая соответствует визуально наиболее «плотной» части струи и определяется фрагментами вещества, движущимися с максимальными скоростями; метод аппроксимации потока эллиптическими сечениями, используемый для объемного представления струй, имеющих соответствующую форму пересечений с секущими плоскостями.

Алгоритм построения линии максимальных скоростей потока.

Вход: массивы координат узлов сетки $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ и векторов скоростей $V_i = [Vx_i \ Vy_i \ Vz_i]^T$, $i = 1..n$; множество узлов, формирующих входную область исследуемого потока, $Inlet$; длина шага $step$; ширина сечения $width$; пороговое значение, определяющее близость скорости к нулевой, ϵ .

Выход: массив координат ЛМС потока TP .

Поясняющая схема к алгоритму построения ЛМС потока и его блок-схема представлены на рисунках 13–14, а на рисунках 15–16 приведены ЛМС и линии тока, построенные по результатам моделирования движения ОТВ из ПЛС при боковом ветре с использованием модели переноса объемной доли жидкости. Точками обозначены узлы расчетной сетки, в которых объемная доля ОТВ превышает заданное граничное значение.

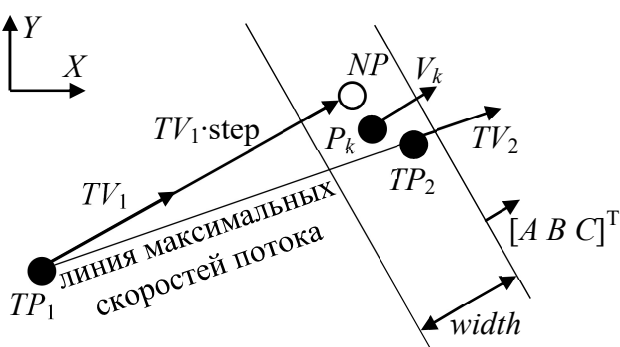


Рисунок 13 – Поясняющая схема к алгоритму построения ЛМС потока



Рисунок 14 – Поясняющая схема к алгоритму построения ЛМС потока

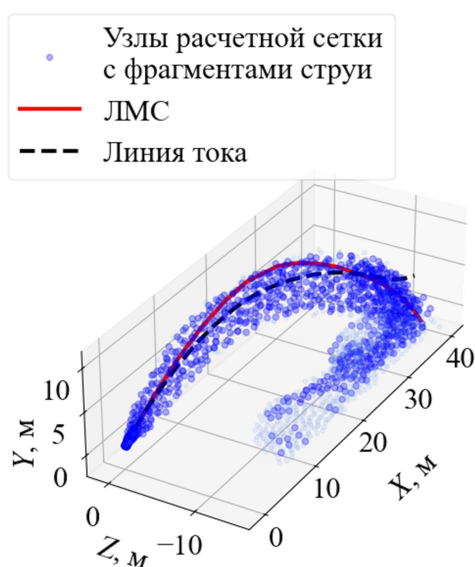


Рисунок 15 – Результаты построения ЛМС и линии тока

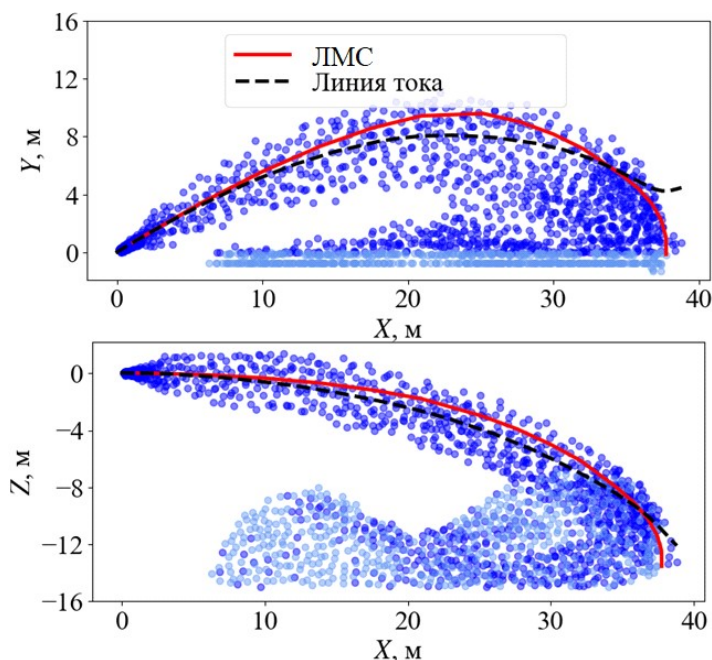


Рисунок 16 – Графики ЛМС и линии тока в плоскостях XY и XZ

На рисунках 15–16 ЛМС огибает основную часть промоделированного потока. Значения объемной доли жидкости в узлах сетки, выходящих за указанную кривую, незначительные, т.е. данная линия формирует границу свободной струи. График линии тока проходит ближе к центральной части струи, а в распыленной области выходит за ее пределы. Такое поведение объясняется тем, что при построении линии тока учитываются ячейки, в которых объемная доля жидкости отлична от нуля. Однако на излете струи распыленные фрагменты ОТВ двигаются практически вертикально вниз, а соседние участки воздуха, разогнанные основным потоком и содержащие незначительное количество жидкости, продолжают преимущественно горизонтальное движение. Поэтому соответствующая кривая, построенная с их учетом, выходит за границу свободной струи. Стоит отметить, что отличием предлагаемого метода является отсутствие указанного недостатка.

Алгоритм аппроксимации потока эллиптическими сечениями.

Вход: массивы координат узлов сетки P_i и значений объемной доли жидкости в узлах сетки VF_i , $i=1..n$; массивы координат точек опорной кривой (ЛМС) TP_j и векторов скоростей в точках ЛМС TV_j , $j=1..m$; ширина сечения $width$; коэффициент объемной доли жидкости, формирующей основной поток, dVF .

Выход: массивы координат точек, лежащих на границах эллипсов, которые охватывают поток sE ; массивы параметров, описывающих эллипсы, CEP , $r1$, $r2$.

Поясняющие схемы и блок-схема алгоритма приведены на рисунках 17–19.

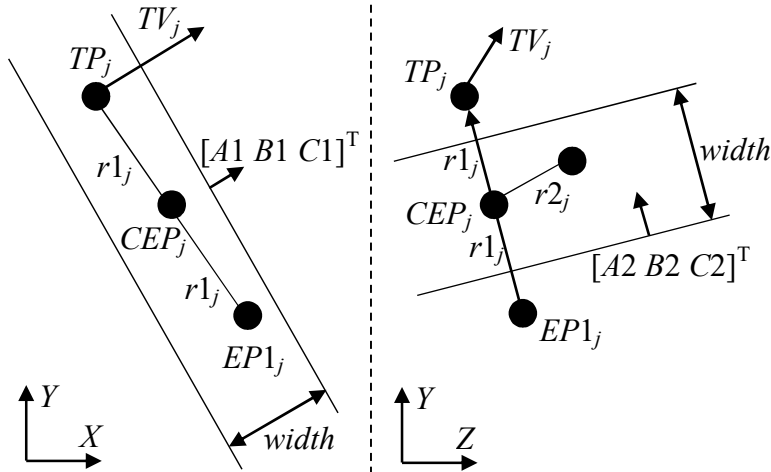


Рисунок 17 – Поясняющая схема к алгоритму определения параметров эллиптического сечения

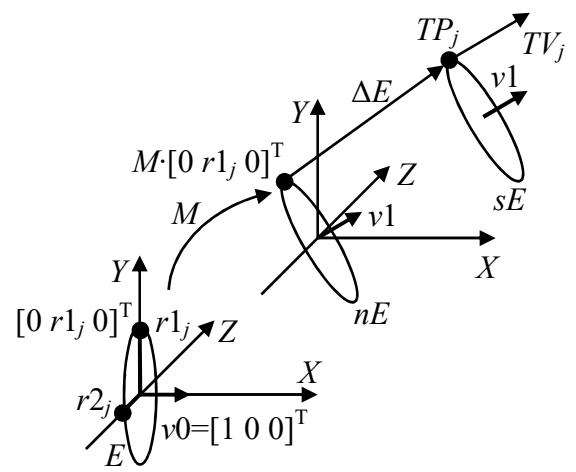


Рисунок 18 – Поясняющая схема к алгоритму построения эллиптического сечения



Рисунок 19 – Блок-схема алгоритма эллиптических сечений

На рисунке 20 представлена аппроксимация потока свободной струи эллиптическими сечениями, построенная по результатам моделирования. Полученная фигура охватывает основной поток жидкости. На участке компактной части струи размеры сечений минимальны и постепенно увеличиваются до существенных величин при удалении от выходного патрубка за счет раздробления и распыления ОТВ, что соответствует результатам НИ. При этом вертикальные радиусы эллипсов заметно больше горизонтальных. Это объясняется тем, что распад вдоль вертикальной оси происходит, в том числе, и под действием силы тяжести.

Как показал анализ результатов экспериментальных исследований сечений струй ОТВ лазерными плоскостными проекциями, основная часть потока сосредоточена внутри фигур, ограниченных эллипсами, что согласуется с разработанным методом объемной аппроксимации. При этом отличием такого представления от подходов на основе изоповерхностей является меньший набор данных, требуемых для параметрического описания каждого сечения: координаты центров и радиусы, что позволяет эффективно применять данный алгоритм для разработки и оценки циклов орошения защищаемых поверхностей, в том числе с использованием данных о направлении и скорости движения ГЖП, а также объемной доли жидкости.

Глава 4 посвящена разработке технологии выбора методов CFD для моделирования ГЖП. Характерными особенностями исследуемых струй являются большие геометрические размеры траекторий, высокие начальные скорости, раздробление и распыл сплошного потока на отдельные фрагменты и капли различного размера (рисунок 4), а также обратные процессы: слияние капель, что существенно повышает вычислительную сложность задачи моделирования. Исследуемые в рамках прикладной области диссертации свободные струи с точки зрения численного моделирования представляют собой многофазные потоки: воздух (первичная фаза) – ОТВ (вторичная фаза). Если обеспечить значительное превышение характерным размером межфазной границы соответствующих размеров ячеек расчетной сетки на участке сплошной струи, то для его описания можно применять модель переноса объемной доли жидкости (VOF), которая позволяет сократить время расчета. Однако в случаях, когда раздробление и распыл жидкости оказывают существенное влияние на ее траекторию, необходимо учитывать не только сплошную, но и дисперсную фазу, а также переходы между ними.

Для этого задействуются различные подходы, обладающие значительной вычислительной сложностью, что может существенно увеличивать время расчета, особенно в характерных для исследуемой прикладной области геометрических масштабах. При этом оценка степени влияния переходов между фазами на траекторию свободной струи представляет довольно сложную проблему. Поэтому в четвертой главе была разработана технология выбора вычислительных моделей, а

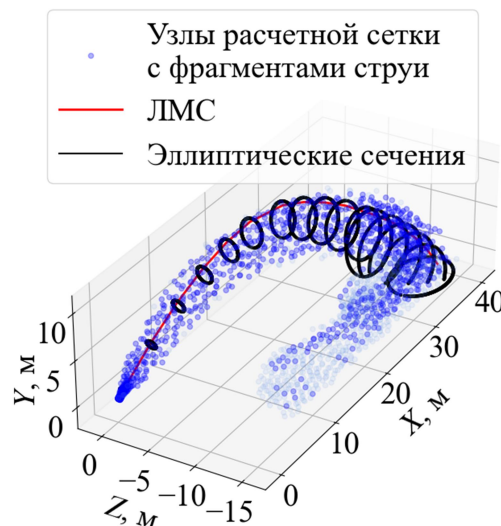


Рисунок 20 – Результаты аппроксимации потока эллиптическими сечениями

также их параметров, обеспечивающих высокую относительно решаемых задач точность и скорость расчета (рисунок 21).

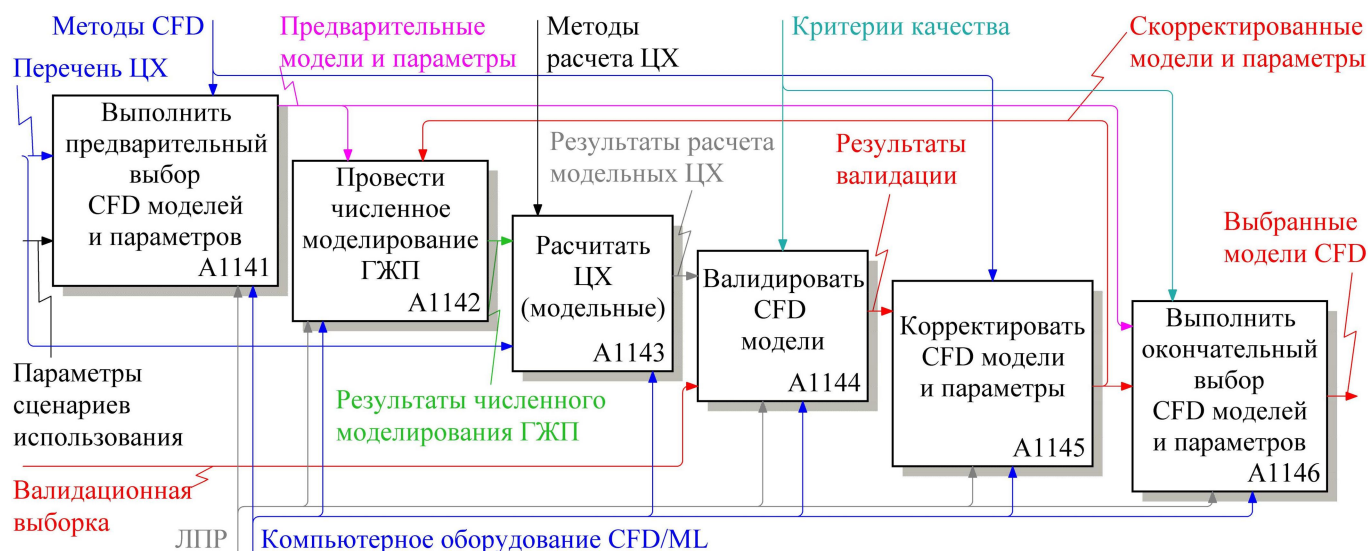


Рисунок 21 – Функциональная диаграмма технологии выбора методов CFD

Выбор моделей (рисунок 3, блок A114), а также их параметров для описания свободных струй ОТВ с целью обеспечения достижения одного из критериев качества (приемлемой скорости расчета) осуществляется в рамках разработанной технологии от наиболее простых с вычислительной точки зрения к более сложным, т.е. требующим решения большего количества уравнений. Важной особенностью ЦХ, выделенных ранее, является отсутствие необходимости учитывать процессы перехода из дисперсной фазы в сплошную. Это позволяет в качестве предварительных моделей CFD (рисунок 21, блок A1141) использовать наиболее простые: VOF для описания фаз и $k-\epsilon$ для описания турбулентности. Валидация (рисунок 21, блок A1144) моделей CFD производилась путем оценки отклонений результатов расчетов относительно экспериментальных. Для этого было произведено согласование используемых ЦХ (таблица 2).

Таблица 2 – Согласование ЦХ, определяемых по результатам моделирования и эксперимента

Наименование ЦХ	Способ оценки	
	Моделирование	Эксперимент
Высота струи	Расстояние по оси OY от выходного отверстия ПЛС до наивысшей точки ЛМС	Вычисленное на основе верхней границы струи расстояние H на рисунке 5
Дальность струи	Расстояние по оси OX от выходного отверстия ПЛС до наиболее удаленной от него точки линии ЛМС	Измеренное в ходе эксперимента расстояние L_X на рисунке 5
Смещение пятна контакта	Расстояние по оси OZ от выходного отверстия ПЛС до наиболее удаленной от него точки ЛМС	Измеренное в ходе эксперимента расстояние L_Z на рисунке 5
Верхняя граница струи	ЛМС (множество точек) потока ОТВ (глава 3)	Верхняя граница визуально наиболее плотной части струи (глава 2)

Точность моделирования по сравнению с результатами, полученными экспериментально, оценивается в рамках представленной технологии на основе относительного отклонения (1) для простых характеристик (L_X , L_Z , H) и среднеквадратического отклонения (2) – для сложных (верхние границы струй).

$$RD = |X_e - X_m| / X_e \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $X_e \neq 0$, X_m – значения простой ЦХ, полученные соответственно по результатам эксперимента и моделирования.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |P_{e,i} - P_{m,i}|^2}, \quad (2)$$

где N – количество точек верхней границы струи, построенной по результатам эксперимента;

$P_{e,i}$, $P_{m,i}$ – координаты i -й точки верхних границ струи, построенных соответственно по результатам натурных испытаний и моделирования.

Решение об изменении (усложнении) моделей CFD или их параметров (рисунок 21, блок A1145) принимается в зависимости от значений указанных отклонений. В данном исследовании в качестве критериев достижения приемлемой точности использовалось выполнение условий (3)–(4):

$$RD \leq 10 \%, \quad (3)$$

$$RMSD \leq 1 \text{ м}. \quad (4)$$

При невыполнении данных условий, согласно предлагаемой технологии (рисунок 21, блок A1145), производится коррекция используемых моделей или их параметров и повторное выполнение операций численного моделирования, расчета ЦХ и валидации.

Современные ПЛС, позволяющие регулировать угол распыления струи ОТВ, в том числе и роботизированные, имеют достаточно сложную геометрию насадков, что может значительно увеличивать количество ячеек расчетной сетки в соответствующей области моделируемого пространства, и, как следствие, время, требуемое для вычислений. Поэтому выбор численных моделей и их параметров производился в несколько этапов: первичный выбор моделей CFD и их параметров для решения задачи расчета движения воды из пожарного ствола с простой геометрией и малым расходом ОТВ (РС-70) с валидацией на основе L_X и H ; оценка точности выбранных методов при моделировании траектории струи воды из ПЛС со сложной геометрией ЛС-П20У (переносной аналог ствола ЛС-С20У, на базе которого реализованы пожарные роботы ПР-ЛСД-С20У и их модификации) и высоким расходом ОТВ без учета (с валидацией на основе L_X , H и верхней границы траектории струи) и с учетом ветра (с валидацией также на основе L_Z).

В четвертой главе представлены результаты выполнения перечисленных этапов. В рамках первичного выбора моделей CFD был проведен расчет траекторий струй воды из пожарного ствола РС-70 ($\alpha = 30^\circ$, $q_0 = 7.4$ л/с). Соответствующие значения L_X и H по экспериментальным замерам составляют 32 м и 6.7 м. В таблице 3 представлены полученные результаты с использованием различных наборов моделей CFD:

а – VOF с неявным учетом объемных сил и пороговым ограничением объемной доли жидкости $\alpha_{\min} = 10^{-8}$, k - ϵ (здесь и далее RNG модификация с демпфированием турбулентности);

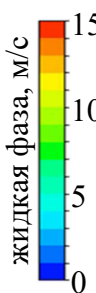
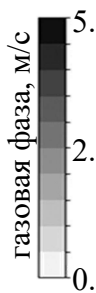
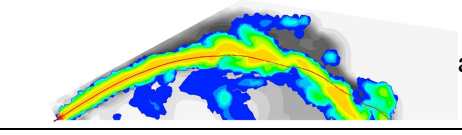
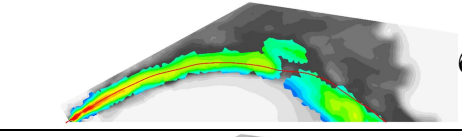
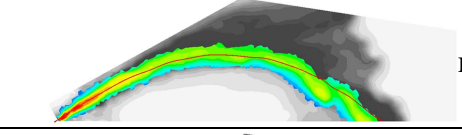
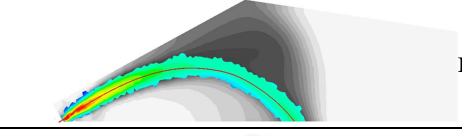
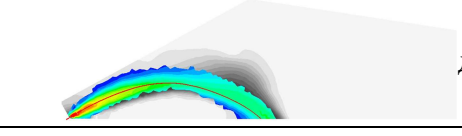
б – VOF с неявным учетом объемных сил и $\alpha_{\min} = 10^{-6}$, k - ϵ ;

в – VOF без использования неявного учета объемных сил и $\alpha_{\min} = 10^{-6}$, k - ϵ ;

г – VOF с неявным учетом объемных сил и $\alpha_{\min} = 10^{-6}$, k - ω SST;

д – Эйлера, k - ϵ .

Таблица 3 – Результаты моделирования траектории ОТВ из пожарного ствола РС-70

Поля скоростей фаз в сечении вертикальной плоскости		Время расчета, ч	L_X , м / RD, %	H , м / RD, %
 жидкая фаза, м/с  газовая фаза, м/с	 а	11.5	30.5 / 4.7	6.9 / 3
	 б	10.5	29.5 / 7.8	6.8 / 1.5
	 в	11.5	29.5 / 7.8	6.8 / 1.5
	 г	11.5	22.3 / 30.3	5.9 / 11.9
	 д	13	19.2 / 40	4.9 / 26.9

Время расчета в таблице 3 указано при использовании персонального компьютера с процессором AMD Ryzen 3 2200U и 4 Гб ОЗУ и соответствует модельному времени 7 с, выбранному с запасом, исходя из момента достижения струей устойчивого режима, при котором отсутствуют значительные изменения ЦХ.

Из полученных результатов (таблица 3) можно сделать вывод, что условию (3) удовлетворяют только траектории, построенные на основе совместного использования моделей VOF и $k-\varepsilon$ с различными настроечными параметрами. Минимальное время расчета обеспечивается для схемы с $\alpha_{\min} = 10^{-6}$ и с неявным учетом объемных сил (таблица 3, б), поэтому она была выбрана в качестве базовой для дальнейших вычислений. Стоит отметить, что существенные отклонения ЦХ, полученные с использованием моделей $k-\omega$ и Эйлера (таблица 3, г, д), можно объяснить подбором их параметров, не соответствующих особенностям исследуемых процессов. Однако, даже для таких настроек при достаточно большом времени расчета наблюдаются слабо выраженные турбулентность и явления распада сплошного потока вследствие значительного снижения скоростей движения жидкой фазы на начальном участке. Изменение параметров, устраняющее указанные недостатки, приведет к увеличению продолжительности моделирования, что не соответствует целевому критерию приемлемой скорости.

Оценка точности выбранных моделей при построении траектории струи из ПЛС со сложной геометрией производилась на основе НИ. В таблице 4 представлены результаты оценки точности для траектории струи воды из ЛС-П20У без учета ветра ($\alpha = 57^\circ$, $q_0 = 10.2$ л/с).

Таблица 4 – Оценка точности моделирования относительно эксперимента без учета ветра

Наименование ЦХ	Значения, м		Отклонение RD / RMSD	Выполнение условий (3)–(4)
	Эксперимент	Моделирование		
Дальность струи	17.2	17.9	4.4 %	$4.4 \% \leq 10 \%$
Высота струи	4.7	4.5	5.2 %	$5.2 \% \leq 10 \%$
Верхняя граница струи	–	–	0.27 м	$0.27 \text{ м} \leq 1 \text{ м}$

На рисунках 22–23 и в таблице 5 приведены результаты оценки точности выбранных методов при моделировании движения потока ОТВ из ЛС-П20У с учетом ветра ($\alpha = 44.5^\circ$, $q_0 = 12.1$ л/с, $v_B = 1.4$ м/с, $\gamma = 104^\circ$).

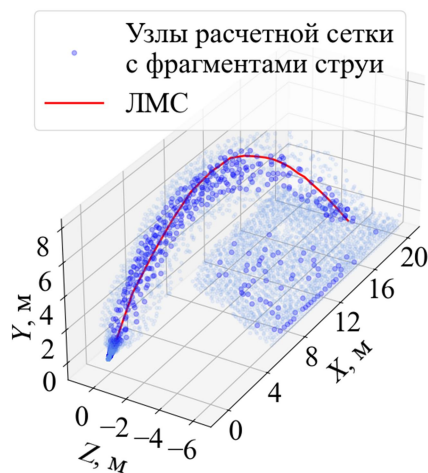


Рисунок 22 – Результаты моделирования и потоковые характеристики, построенные на их основе

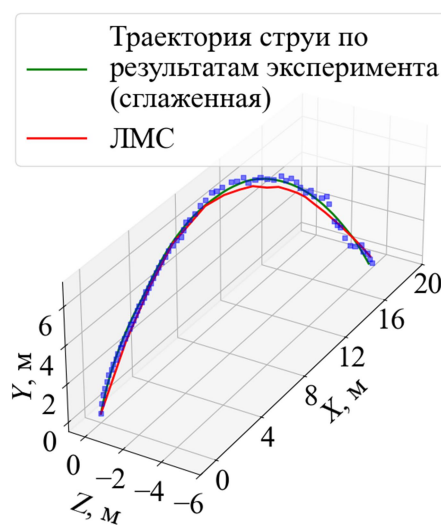


Рисунок 23 – Верхние границы струи по результатам эксперимента и моделирования с учетом ветра

Таблица 5 – Оценка точности моделирования относительно эксперимента с учетом ветра

Наименование ЦХ	Значение ЦХ, м		Отклонение RD / RMSD	Выполнение условий (3)–(4)
	Эксперимент	Моделирование		
Дальность струи	17.7	18.3	3.4 %	$3.4 \% \leq 10 \%$
Высота струи	6.5	6.4	1.5 %	$1.5 \% \leq 10 \%$
Смещение пятна контакта	4.2	4.0	4.7 %	$4.7 \% \leq 10 \%$
Верхняя граница струи	–	–	0.29 м	$0.29 \text{ м} \leq 1 \text{ м}$

Как следует из таблиц 4–5, условия (3)–(4) выполняются для всех представленных характеристик, что соответствует приемлемой точности. При этом время расчета 10 секунд движения ГЖП в обоих случаях составило 10 часов, что также удовлетворяет заданным критериям качества.

В пятой главе выполнен анализ возможностей использования методов ML для синтеза расчетной модели оценки характеристик ГЖП при возмущающих воздействиях в режиме реального времени. По результатам сравнения в качестве базовых были выбраны наиболее простые с точки зрения реализации и обучения архитектуры: регрессионное дерево решений, многослойный персептрон, градиентный бустинг. Предварительная оценка качества решения задачи оценки потоковых характеристик ОТВ из ствола ПРС показала, что наименьшие значения RMSD имеют обученные модели на основе персептрона.

В ходе проведенного системного анализа задачи оценки характеристик ГЖП при управлении ПРС выявлено, что важным свойством разрабатываемых решений относительно элементной базы, используемой в указанной прикладной области, является размер программных модулей. При этом, как было установлено в рамках предварительного исследования, обученные нейросетевые модели расчета траектории и отдельных характеристик свободных струй в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий могут занимать относительно большой объем памяти. Поэтому поиск решений, позволяющих снизить соответствующие аппаратные требования является актуальной в данной проблемной области задачей. Анализ наиболее распространенных методик

уменьшения размеров нейронных сетей (прунинг, квантование, тензорная декомпозиция, дистилляция знаний) выявил ряд недостатков данных подходов относительно решаемой задачи, в частности снижение точности модели, сложности в ее точной настройке, изменение архитектуры и т.д. при не всегда высокой степени сжатия. Для устранения указанной проблемы было предложено использование сетей Колмогорова – Арнольда (Kolmogorov Arnold Network – KAN), главное отличие которых от нейросетей на основе многослойных персептронов (Multi Layer Perceptron – MLP) заключается в том, что функции активации, аппроксимируемые сплайнами, находятся не в нейронах, а в связях между ними. Это позволяет при точности, сопоставимой с MLP, на порядки уменьшить количество узлов, что дает значительное снижение размера памяти, требуемой KAN модели. Однако такая архитектура сетей влияет на их быстродействие, что при решении соответствующих задач может носить критический характер, и время обучения. В пятой главе представлены результаты проведенной оценки возможности использования сетей Колмогорова – Арнольда для оценки характеристик ГЖП в ПРС. Для этого был проведен сравнительный анализ эффективности решения на основе MLP и KAN моделей задачи оценки верхней границы потока ОТВ из ПЛС при различных значениях α : ЛС-С20У без учета ветра с использованием непересекающихся обучающих и тестовых выборок (249 и 63 сценария), построенных на основе эмпирических данных ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР»; ЛС-П20 под воздействием бокового ветра и низкой температуре воздуха (параметры непересекающихся выборок, полученных в рамках диссертационного исследования по результатам численного моделирования и НИ, перечислены в таблице 6).

Таблица 6 – Основные параметры выборок для оценки ЦХ с учетом ветра

Наименование параметра	Обучающая	Верификационная	Валидационная
Размер выборки, количество сценариев / точек	588 / 58800	147 / 14700	48 / 4800
Способ формирования	CFD со случайным разбиением (4:1)		Натурные испытания (4 серии)
Диапазон α	[30°, 35°, ..., 60°]		[30.8°, 44.5°, 46.8°, 57°, 60.3°]
Диапазон q_0 , л/с	[12, 14, ..., 20, 25, 26]		[10.2, 12.1, 14.3, 16.1, 17.1, 26]
Диапазон γ	[60°, 65°, ..., 120°]		[62°, 75°, 104°, 118°]
Диапазон v_B , м/с	[0, 0.5, ..., 5]		[0, 1.4, 2, 2.7, 3.8, 5]

Для реализации MLP и KAN моделей, а также алгоритмов обучения, критериев точности применялись библиотеки Python: scikit-learn, pyTorch и pyKAN (программа для ЭВМ № 2026660615).

Кроме того, было проведено исследование возможности дообучения нейросети на базе MLP и KAN при появлении новых ранее не использовавшихся данных, полученных на основе натурных испытаний или моделирования. Для этого по результатам решения задачи оценки верхней границы свободной струи без учета возмущающих воздействий был выбран угол возвышения выходного патрубка ПЛС, не использовавшийся для обучения и имеющий максимальное RMSD. Массив координат точек экспериментальной траектории для соответствующего значения α был добавлен к обучающей выборке, после чего произведена настройка параметров MLP и KAN моделей без изменения их структуры.

Результаты сравнительного анализа MLP и KAN моделей, обученных для расчета границ потоков ОТВ при различных значениях управляющих параметров α и q_0 , представлены в таблице 7. Время расчета характеристик на основе каждой из

моделей отличается в 2 раза. Однако среднеквадратическое отклонение KAN вдвое ниже по сравнению с MLP, а требуемый объем памяти меньше в 10 раз. При этом для обучения KAN модели необходимо в 4 раза больше времени.

Таблица 7 – Основные параметры MLP и KAN моделей (без учета возмущающих воздействий)

Наименование параметра	MLP	KAN
Среднее время обучения / дообучения, с	582 / 148	2184 / 342
Среднее время расчета характеристик, мс	1	2
Размер обученной сети, КБ	125	12
RMSD исходное / после дообучения, м	0.4 / 0.24	0.18 / 0.12

Максимальное значение RMSD по обеим моделям наблюдается при $\alpha = 75^\circ$: 1.5 м для MLP и 0.76 м для KAN. Поэтому к обучающей выборке были добавлены экспериментальные точки траектории, полученные для указанного угла возвышения, и произведено дообучение моделей. Соответствующие результаты представлены в таблице 7 и на рисунке 24.

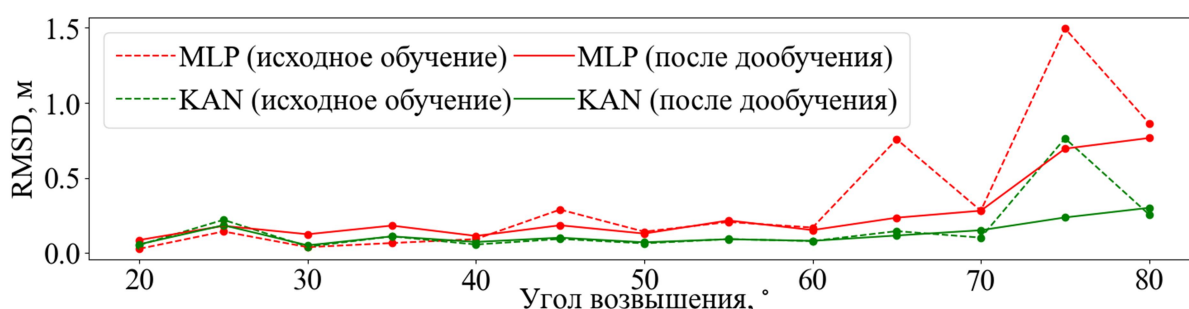


Рисунок 24 – Среднеквадратические отклонения моделей для различных углов возвышения после первичного обучения и дообучения

Дообучение моделей MLP и KAN с использованием экспериментальных данных для $\alpha = 75^\circ$ позволило снизить RMSD соответственно до 0.69 м и 0.24 м. При этом, как следует из таблицы 7, значение RMSD по всей валидационной выборке также уменьшилось (до 0.24 м и 0.12 м). Для дообучения MLP потребовалось 148 секунд, что составляет 25 % от времени исходного обучения модели. Аналогичные показатели для KAN составляют 342 секунды и 16 % соответственно. Из рисунка 24 следует, что RMSD для KAN модели на углах возвышения отличных от 75° после дообучения существенно не изменились, а для MLP в диапазоне $\alpha = [20^\circ, 35^\circ]$ увеличились. Т.е. использование дополнительных данных может привести к частичному ухудшению качества расчета MLP.

Как показало проведенное исследование, при использовании MLP также возможно критическое снижение точности расчета на сценариях, существенно отличающихся от применяемых для обучения. Сети Колмогорова – Арнольда продемонстрировали незначительное увеличение RMSD при выходе за границы диапазонов значений параметров обучающей выборки. Соответствующие результаты представлены на рисунке 25. Кривая, построенная на основе MLP, существенно отклоняется от реальной траектории ГЖП после выхода за границы обучающих сценариев. Значение RMSD на соответствующем участке для MLP составляет 1.2 м, что более чем вдвое превышает аналогичный показатель для KAN (0.5 м). Поэтому на стадии подготовки обучающих данных для MLP необходимо обеспечить охват потенциальных сценариев использования, что может потребовать большого объема выборки.

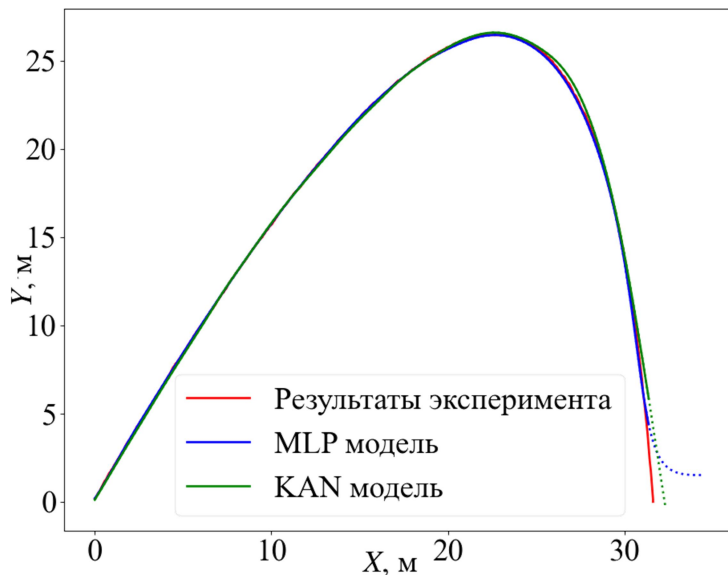


Рисунок 25 – Верхние границы ГЖП, построенные в пределах (сплошные линии) и за пределами (пунктирные линии) обучающих сценариев

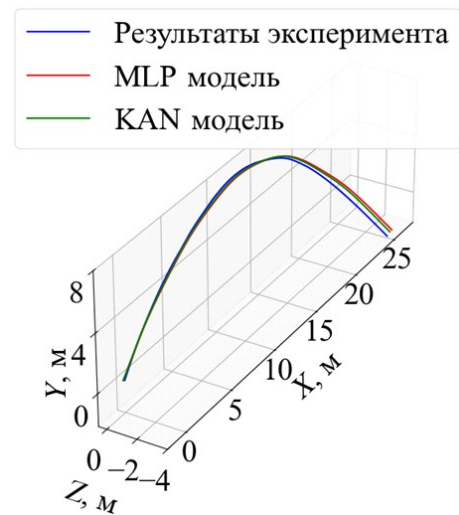


Рисунок 26 – Верхние границы ГЖП при боковом ветре, полученные на основе эксперимента, MLP и KAN

На рисунке 26 и в таблице 8 представлены результаты расчета в трехмерном пространстве верхней границы потока ОТВ из ПЛС при боковом ветре.

Таблица 8 – Основные параметры MLP и KAN моделей, обученных для оценки верхней границы потока ОТВ с учетом возмущающих воздействий

Наименование параметра	MLP	KAN
Среднее время обучения, с	1086	4397
Среднее время расчета, мс	1	4
Размер обученной сети, КБ	198	32
RMSD верификационная / валидационная выборка, м	0.14 / 0.52	0.11 / 0.43

Как следует из представленных данных, KAN модель имеет более высокую точность. При этом время, требуемое для обучения и расчета, при использовании MLP примерно в 4 раза меньше по сравнению с KAN. Однако объем памяти, необходимый для хранения MLP модели, в 6 раз больше аналогичного параметра KAN модели.

Полученные результаты говорят о том, что несмотря на большие (в 4–6 раз, что не является критичным) относительно MLP сетей временные затраты на первичное обучение, KAN отличается рядом преимуществ, существенных с точки зрения решения рассмотренных задач оценки характеристик ГЖП. Во-первых, меньший (в 4–10 раз на исследованных задачах) объем памяти, требуемый для хранения обученной модели, достигаемый за счет значительного упрощения ее структуры. Продемонстрированный результат превышает степень сжатия, обычно, обеспечиваемую распространенными методами компрессии нейронных сетей. Во-вторых, в среднем более высокая по сравнению с MLP моделями точность при использовании одинаковых стратегий обучения. В-третьих, высокая устойчивость к дообучению на дополнительных исходных данных KAN моделей, что позволяет при необходимости адаптировать алгоритмы, построенные на их основе, к новым условиям, используя соответствующие результаты эксперимента или моделирования. В-четвертых, меньшее снижение точности оценки ЦХ на сценариях, значительно отличающихся от применяемых для обучения. При этом скорость построения расчета на основе KAN с существенным запасом обеспечивает

соответствие их работы режиму реального времени, т.е. снижение быстродействия по сравнению с MLP не критично. Указанные преимущества говорят о достаточно высокой эффективности применения KAN моделей для решения задач оценки ГЖП в ПРС с учетом возможных ограничений со стороны используемой элементной базы на размеры соответствующих программных модулей.

В шестой главе был разработан метод расчета углов наведения ГЖП, формируемого ПЛС, на заданную цель с использованием предложенной расчетной модели. Алгоритм, реализующий данный метод, можно применять в системе управления пожарными роботами – для автоматической генерации управляющих воздействий, обеспечивающих прохождение расчетной траектории струи ОТВ через цель.

Алгоритм расчета углов наведения ГЖП на цель.

Вход: координаты цели в системе трехмерного пространства защищаемого объекта X, Y, Z ; координаты ПЛС X^R, Y^R, Z^R ; расход ОТВ q_0 ; параметры возмущающих воздействий v_B, γ ; расчетная модель струи $[x', y', z'] = f(\alpha_i, q_0, v_B, \gamma)$ ($[x', y', z']$ – координаты точек траектории); начальные величины множителей приращений по углам наведения и их уменьшающие коэффициенты: $d\alpha_0, d\beta_0, s\alpha, s\beta$; точность по углам наведения $\varepsilon\alpha, \varepsilon\beta$ (на каждой итерации производится соответствующее округление углов α, β); точность наведения ε ; количество итераций для вычисления изменения точности n .

Выход: угол возвышения α и угол ориентации (азимута) β .

Блок-схема алгоритма, а также результаты его применения для наведения струи воды из ствола пожарного робота ПР-ЛСД-С20У на заданную цель при боковом ветре приведены на рисунках 27–29. Основу предлагаемого метода составляет итеративное изменение углов наведения с учетом геометрических особенностей струй ОТВ. При этом направления и величины соответствующих приращений на каждом шаге определяются адаптивно – на основе текущего отклонения струи от цели, что обеспечивает высокую сходимость решения. В частности, для представленного сценария расчет углов наведения ГЖП на цель с отклонением $\varepsilon = 0.1$ м потребовал 3 итерации (рисунок 28) и менее 0.1 с, что соответствует требуемому для использования в ПРС быстродействию.

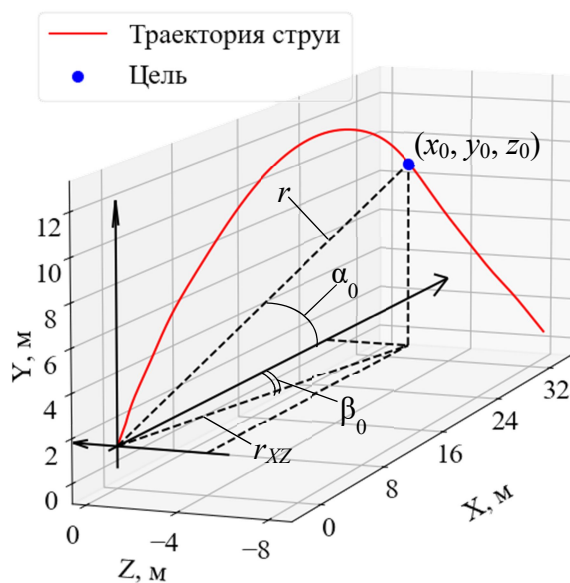


Рисунок 27 – Визуализация наведения струи на цель

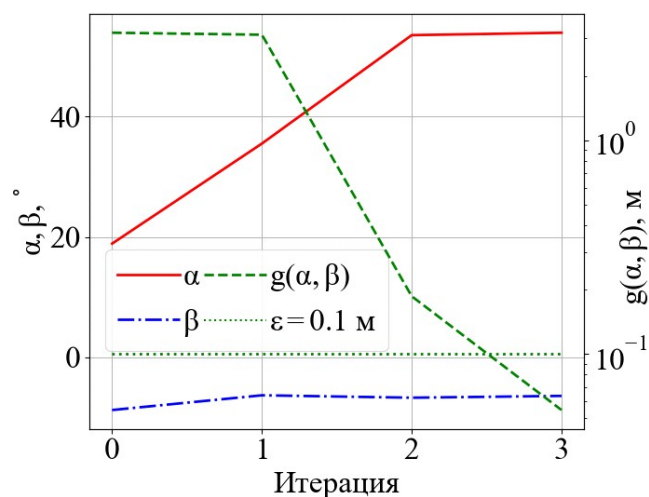


Рисунок 28 – Расчет углов наведения струи на цель

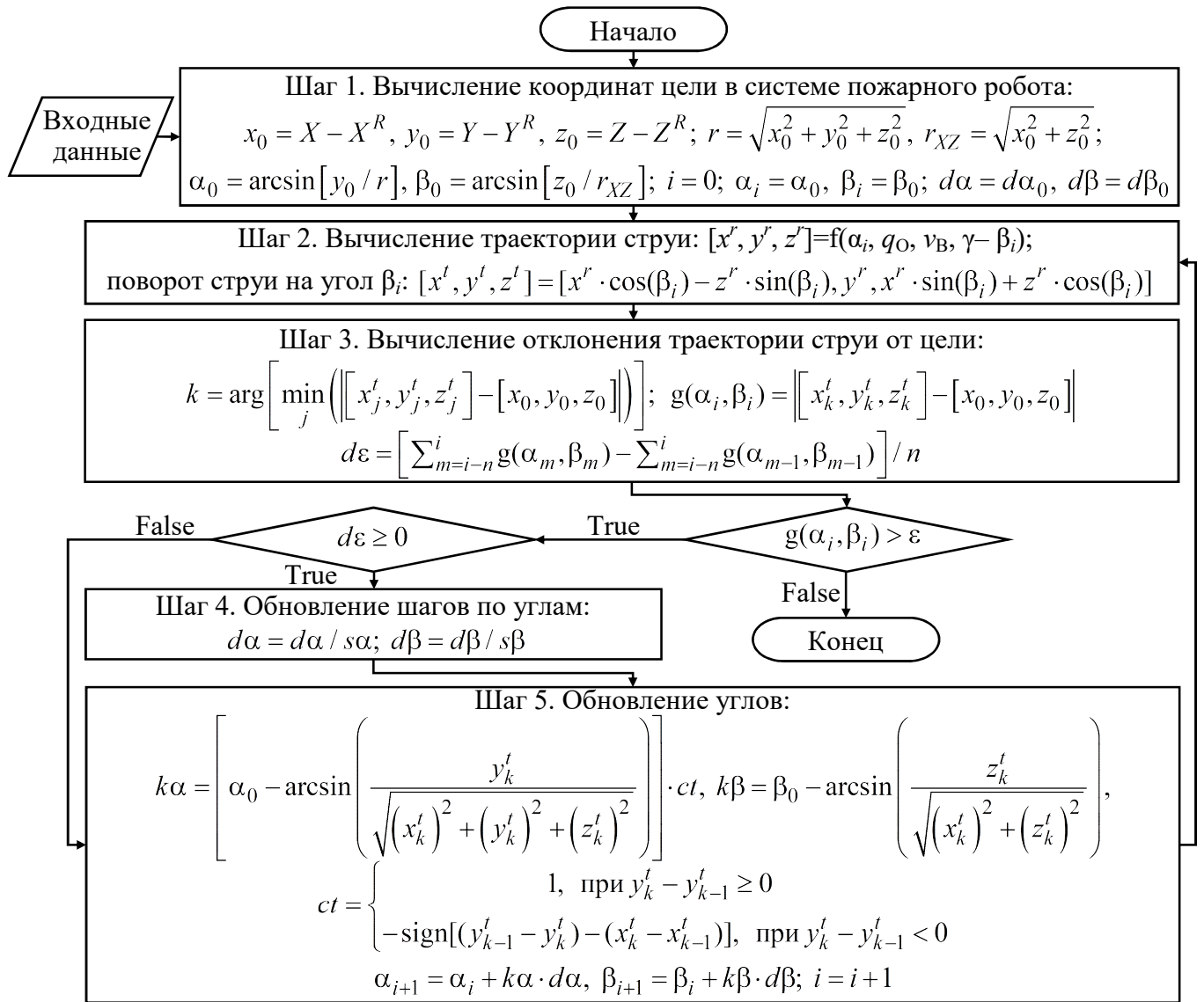


Рисунок 29 – Блок-схема алгоритма расчета углов наведения ствола пожарного робота

На основе данного подхода был также разработан метод синтеза закона управления пожарными роботами для орошения поверхностей защищаемых объектов, в частности при охлаждении струями ОТВ строительных конструкций и технологического оборудования во время пожара для предотвращения их прогрева до критических температур. Основная проблема при решении указанной задачи заключается в том, что графики изменения углов наведения зависят от геометрии защищаемой поверхности, ее положения относительно выходного патрубка, расхода ОТВ и т.д. При этом, размеры пятна контакта и интенсивность орошения также находятся в достаточно сложной с вычислительной точки зрения зависимости от множества параметров, что затрудняет решение задачи наведения струи на заданную позицию. Отличие предложенного метода и его алгоритмических реализаций заключается в том, что они позволяют учитывать указанные особенности за счет использования разработанной расчетной модели.

Алгоритм синтеза закона управления пожарными роботами при орошении защищаемых поверхностей.

Вход: массивы координат точек орошаемой поверхности (цикл орошения) $X_i, Y_i, Z_i, i=1..N$; скорости перемещения ствола пожарного робота по углу возвышения и азимуту ν_α, ν_β ; входные параметры алгоритма расчета углов наведения (рисунок 29): $X^R, Y^R, Z^R; q_O; \nu_B, \gamma; f; d\alpha_0, d\beta_0; s_\alpha, s_\beta; \epsilon; \epsilon_\alpha, \epsilon_\beta; n$.

Выход: временные диаграммы изменения управляющих параметров, обеспечивающих орошение поверхности по заданному циклу α, β, t .

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 30.

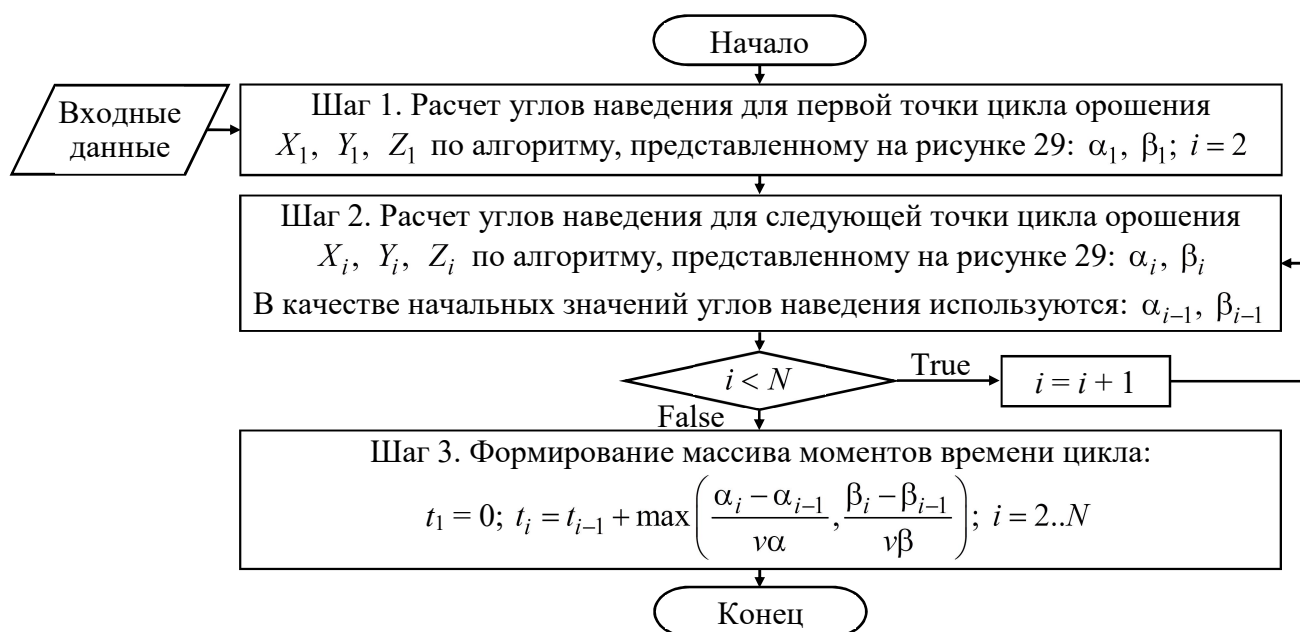


Рисунок 30 – Блок-схема алгоритма синтеза закона управления

Для данного алгоритма в главе 6 также была разработана модификация на основе аппроксимации ГЖП эллиптическими сечениями, которая позволяет определять размеры и форму пятна контакта в зависимости от геометрических особенностей орошаемых поверхностей. На рисунках 31–32 представлены результаты апробации разработанного метода на примере охлаждения свода тоннельного сооружения (подземной исследовательской лаборатории), в котором синтез и оценка эффективности закона управления осложнены его криволинейной формой, а также влиянием на траекторию струи системы вентиляции (обозначения циклов орошения: а – контурный, б – спиральный, в – радиальный).

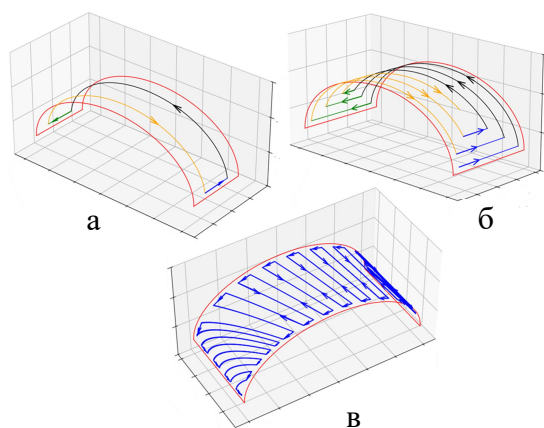


Рисунок 31 – Циклы орошения защищаемой поверхности

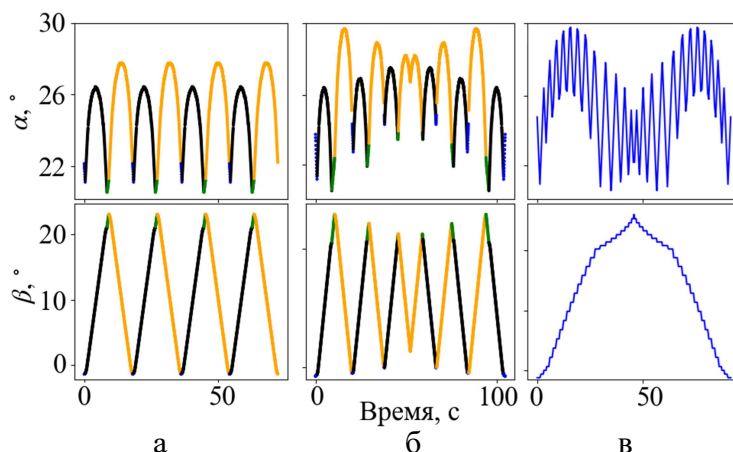


Рисунок 32 – Временные диаграммы изменения углов наведения ствола пожарного робота

На рисунках 33–34 приведены визуализация синтезированного закона контурного орошения для пожарного робота ПР-ЛСД-С20У и результаты оценки его эффективности при пожаре на основе численного моделирования. Согласно представленным на рисунке 34 графикам температуры на поверхности T_w и внутри T_s ограждений тоннеля использование ПРС для охлаждения по синтезированному

закону позволяет предотвратить нагрев конструкции до температуры 300 °С, при которой наблюдается изменение прочностных характеристик материалов свода.

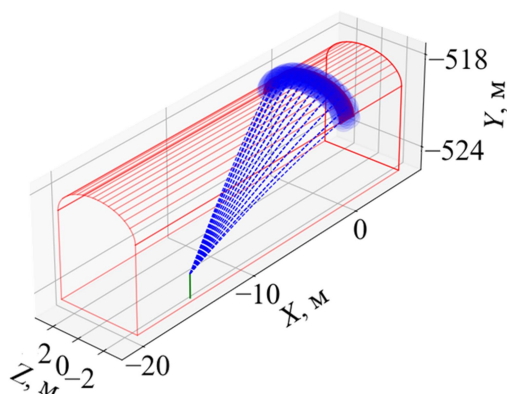


Рисунок 33 – Визуализация цикла орошения по синтезированному закону

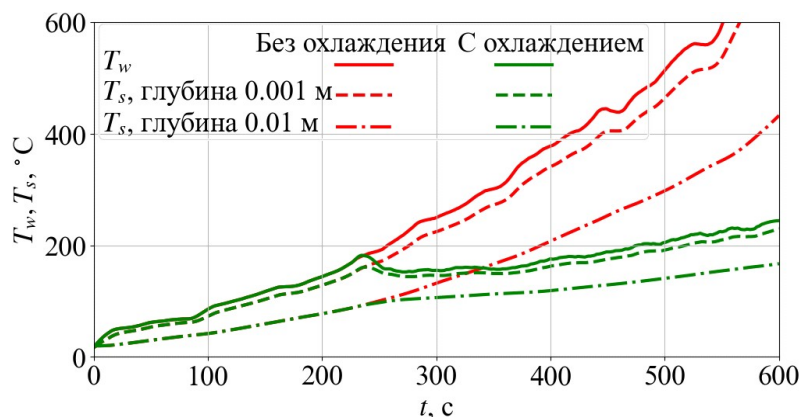


Рисунок 34 – Оценка эффективности охлаждения с использованием пожарного робота

Разработанный метод позволяет выполнять: синтез закона управления с учетом геометрических особенностей и параметров ГЖП, ограничений на точность и скорость перемещения ствола пожарного робота; сравнительный анализ различных циклов орошения по длине траектории движения контактного пятна, по охвату наиболее проблемных с точки зрения перегрева участков; оценку эффективности охлаждения по синтезированным законам на основе численного моделирования с учетом динамики развития пожара.

В **заключении** диссертации обобщаются результаты, полученные в ходе исследования, делаются выводы об их применимости, а также намечаются пути продолжения исследований по теме диссертации.

В **приложениях** представлены блок-схемы разработанных алгоритмов (приложение А), патенты на изобретения (приложения Б, В), свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (приложения Г, Д, Е, Ж, И, К, Л), копии полученных актов внедрения результатов работы (приложения М, Н, П, Р).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были разработаны новые методы и алгоритмы оценки в режиме реального времени характеристик газожидкостных потоков, учитывающие их большую дальность, а также влияние возмущающих воздействий и направленные на повышение эффективности решения задач обеспечения пожарной безопасности на основе противопожарных роботизированных систем. Основные выводы и результаты состоят в следующем:

1. Разработана новая методология оценки характеристик газожидкостных потоков, основанная на совместном использовании методов машинного обучения, численного моделирования и натурных экспериментов. Ее основным отличием от существующих в данной прикладной области подходов является использование численного моделирования для генерации обучающих и верификационных выборок в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий, а натурных испытаний для генерации валидационных выборок, что позволяет применять обученную на их основе модель для повышения скорости и точности расчета характеристик в противопожарных роботизированных системах. Проведенная апробация предлагаемого подхода показала, что он позволяет производить вычисления со скоростью, соответствующей режиму реального

времени, и точностью, требуемой в противопожарных роботизированных системах.

2. Разработана новая методика проведения натурных испытаний противопожарных роботизированных систем с использованием многокамерной синхронизированной цифровой съемки, отличающаяся от известных подходов учетом влияния ветра на движение газожидкостного потока. Данный подход предназначен для формирования валидационных выборок, на основе которых производится проверка адекватности расчетных моделей исследуемых потоков огнетушащего вещества. Экспериментально показано, что разработанная методика позволяет оценивать характеристики струй, которые имеют значительную дальность (десятки метров) и находятся под возмущающими воздействиями.

3. Разработан новый алгоритм расчета по результатам натурных испытаний целевых характеристик газожидкостных потоков, находящихся под возмущающими воздействиями. В его основе лежат методы перспективных преобразований синхронизированных по времени цифровых изображений с трех различных ракурсов. Новизна данного подхода заключается в использовании итеративного построения модели траектории с учетом формы струи и положения ее соседних точек относительно камер, что позволяет осуществлять трехмерную реконструкцию потоков огнетушащего вещества, которые имеют переменную оптическую плотность и форму, значительную дальность (десятки метров). Также разработано импортозамещающее программное обеспечение, которое реализует указанный алгоритм. Для результатов, полученных с его использованием при исследовании струй под ветровой нагрузкой, экспериментально подтверждено обеспечение точности, требуемой для построения валидационных выборок.

4. Разработан новый алгоритм построения по результатам численного моделирования целевых характеристик газожидкостных потоков на основе предложенного метода определения границы свободной струи по максимальным скоростям, отличающийся от известных согласованностью с соответствующими кривыми, полученными с использованием трехмерной реконструкции по результатам натурных испытаний пожарных лафетных стволов. Также разработано импортозамещающее программное обеспечение, которое реализует данный алгоритм. Показано отсутствие выхода расчетной кривой за пределы исследуемого потока, который наблюдается при использовании подходов на базе линии тока (для модели переноса объемной доли жидкости). Разработанный алгоритм позволяет согласовать результаты моделирования движения огнетушащего вещества и натурных испытаний противопожарных роботизированных систем или их отдельных устройств и дает возможность проводить валидацию используемых моделей на всей длине траектории свободных струй, что значительно эффективнее применяемых, обычно, в данной области точечных оценок. Согласование целевых характеристик позволяет обоснованно применять численные методы для генерации обучающих и верификационных выборок, соответствующих динамике исследуемых газожидкостных потоков в широком диапазоне значений параметров управляющих и возмущающих воздействий, что, в свою очередь, дает возможность производить построение указанных выборок в требуемом для машинного обучения объеме.

5. Разработан новый алгоритм объемной аппроксимации газожидкостных потоков по результатам моделирования на основе предложенного метода представления струй в виде эллиптических сечений, позволяющий оценивать форму и размеры контактного пятна, а также интенсивность орошения на всей длине

траектории огнетушащего вещества, отличающийся меньшим по сравнению с другими подходами количеством параметров, требуемых для описания потока, что дает возможность эффективно использовать полученные данные для разработки и отладки алгоритмов управления противопожарными роботизированными системами. Разработано импортозамещающее программное обеспечение, которое реализует данный алгоритм. Показано, что полученная на его основе фигура охватывает основной поток жидкости, при этом ее изменение вдоль траектории струи соответствует результатам натурных испытаний.

6. Разработана технология выбора методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков, основанная на поэтапном повышении вычислительной сложности моделей. Отличие технологии от известных заключается в применении согласованных целевых характеристик, которые описывают верхнюю границу свободной струи по результатам численного расчета и натурных испытаний. Показано, что на основе данной технологии можно формировать обучающие и верификационные выборки в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий с требуемыми для машинного обучения точностью и объемом. Подтверждена применимость модели переноса объемной доли жидкости (VOF) совместно с k - ϵ моделью турбулентности (в модификации RNG) для решения задач численного моделирования струй огнетушащего вещества из ствола пожарного робота, имеющих большую дальность и находящиеся под возмущающими воздействиями.

7. Разработана расчетная модель оценки характеристик газожидкостных потоков при возмущающих воздействиях в режиме реального времени на основе сети Колмогорова – Арнольда. Отличием построенной модели от существующих является использование для обучения и верификации выборок, сгенерированных по результатам численного моделирования, что позволяет расширить диапазон значений параметров управляющих и возмущающих воздействий; использование для валидации выборок, сформированных по результатам натурных испытаний, что позволяет обеспечить требуемую точность; использование сети Колмогорова – Арнольда – новой архитектуры машинного обучения, которая в рамках данной работы была впервые задействована для решения задач оценки характеристик струй огнетушащего вещества. Разработано импортозамещающее программное обеспечение, которое реализует расчетную модель, ее обучение, верификацию и валидацию. Подтверждено, что данная модель обеспечивает точность и скорость вычислений, требуемые для функционирования противопожарных роботизированных систем. Также на исследованном наборе сценариев показано, что указанная архитектура отличается от нейросетей на базе многослойного персептрона рядом преимуществ, существенных с точки зрения рассматриваемой прикладной области: более высокой точностью, в том числе на сценариях, выходящих за пределы обучающей выборки; меньшим количеством параметров и, соответственно, объемом памяти, требуемым для хранения обученной модели; более высокой устойчивостью к дообучению на дополнительных исходных данных, что позволяет при необходимости адаптировать расчетную модель к новым условиям.

8. Разработан новый метод синтеза закона управления пожарными роботами, основанный на предложенной расчетной модели оценки целевых характеристик газожидкостных потоков с использованием сети Колмогорова – Арнольда, а также разработанном алгоритме оптимизации, который предназначен для расчета углов

наведения, обеспечивающих прохождение струи через заданную точку. Отличие данного подхода от существующих заключается в учете геометрических особенностей и параметров потока огнетушащего вещества на всей его длине. Разработано импортозамещающее программное обеспечение, которое реализует указанный метод. Показано, что его применение позволяет осуществлять построение временных диаграмм изменения углов наведения, обеспечивающих орошение защищаемой поверхности по заданному циклу, а также проводить сравнительный анализ и предварительную оценку эффективности создаваемых алгоритмов на основе моделирования.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Результаты диссертационного исследования могут применяться для разработки систем автоматизированного управления противопожарными роботизированными системами, предназначенными для функционирования в сложных условиях: большие расстояния до защищаемых объектов, возможность сильного задымления окружающего пространства, наличие возмущающих воздействий, оказывающих влияние на движение ОТВ. Перспективным направлением для дальнейших исследований является использование разработанной методологии в системах компьютерного зрения пожарных роботов для предиктивного расчета траектории струи по ее детектируемым визуальным фрагментам. Возможно расширение области применения в исследованиях различных свободных струй, в частности, разработанные методы можно использовать для построения моделей, описывающих динамику изучаемых процессов, а также их валидации, например, при решении задач прогнозирования атмосферных загрязнений под влиянием различных факторов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК по специальности диссертации (категории K1):

1. **Пожаркова, И. Н.** Формирование исходных данных для машинного обучения моделей оценки параметров газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2026. – № 3. – С. 14–20.

2. **Пожаркова, И. Н.** Выбор численных методов для моделирования свободных струй из пожарного ствола // Онтология проектирования. – 2025. – Т. 15, № 2(56). – С. 270–280.

3. **Пожаркова, И. Н.** Синтез алгоритма движения ствола пожарного робота при охлаждении поверхностей строительных конструкций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2025. – № 2. – С. 34–43.

4. **Пожаркова, И. Н.** Алгоритмы построения потоковых характеристик свободных струй по результатам численного моделирования // Информационные технологии. – 2024. – Т. 30, № 9. – С. 443–448.

5. **Пожаркова, И. Н.** Оценка эффективности применения сетей Колмогорова-Арнольда в задачах управления пожарными роботами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 7. – С. 33–41.

6. **Пожаркова, И. Н.** Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность. – 2024. – Т. 33, № 4. – С. 22–35.

7. **Пожаркова, И. Н.** Распознавание траекторий струй огнетушащего вещества из пожарного ствола на основе цифровых изображений // Программные продукты и системы. – 2024. – № 2. – С. 262–269.

8. **Пожаркова, И. Н.** Технология оценки прогрева горной породы при пожаре в подземной исследовательской лаборатории // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 9. – С. 71–83.

9. **Пожаркова, И. Н.** Использование машинного обучения в задачах управления пожарными роботами / **И. Н. Пожаркова, С. Г. Цариченко, С. Г. Немчинов** // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2023. – № 12. – С. 19–25.

10. **Пожаркова, И. Н.** Имитационное моделирование развертывания противопожарного экрана при оценке эффективности его защитных свойств // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2022. – № 10. – С. 45–51.

11. **Пожаркова, И. Н.** Использование метода контекстно-зависимого аннотирования в информационных системах мониторинга чрезвычайных ситуаций // Информационные технологии. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 43–47.

Публикации в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК по специальности диссертации (категории К2):

12. **Пожаркова, И. Н.** Автоматизация оценки прогрева конструкций при пожаре в промышленных помещениях значительного геометрического объема // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2026. – № 2. – С. 34–43.

13. **Пожаркова, И. Н.** Имитационное моделирование автоматического охлаждения пожарными роботами криволинейных ограждений тоннельного сооружения // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2025. – № 3. – С. 3–12.

14. **Пожаркова, И. Н.** Математическое моделирование процессов теплообмена в ограждениях при пожаре в горной выработке // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 3. – С. 15–24.

15. **Пожаркова, И. Н.** Методика автоматизированной оценки времени срабатывания пожарного извещателя по результатам моделирования пожара / **И. Н. Пожаркова, В. В. Ценер** // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 4(124). – С. 292–300.

16. **Пожаркова, И. Н.** Автоматизация обработки результатов численного моделирования развития пожара // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 2(122). – С. 292–300.

17. **Пожаркова, И. Н.** Автоматизация обработки результатов натурных испытаний пожарной ствольной техники на основе распознавания изображений / **И. Н. Пожаркова, А. А. Мельников** // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 4. – С. 23–29.

18. **Пожаркова, И. Н.** Прогнозирование распространения атмосферных загрязнений с учетом рельефа на основе моделей вычислительной гидродинамики // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 8. – С. 55–58.

19. **Пожаркова, И. Н.** Анализ задач и методов математического моделирования пожаров в тоннельных сооружениях // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 5(113). – С. 1–15.

20. Анализ процессов протекающих при свободной конвекции огнетушащего вещества в напорном пожарном рукаве / **В. П. Малый, И. Н. Пожаркова,**

С. О. Куртов, С. В. Бабенышев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12, № 4(64). – С. 64–71.

21. **Pozharkova, I. N.** Efficiency improving of emergency monitoring and forecasting based on the information system // *Siberian Journal of Science and Technology*. – 2020. – Vol. 21, No. 3. – P. 323–332.

Публикации в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Scopus, Web of Science:

22. **Pozharkova, I., Chentsov, S.** Real-Time Forecasting of a Fire-Extinguishing Agent Jet Trajectory from a Robotic Fire Monitor Under Disturbances // *Robotics*. – 2025. – Vol. 14, No. 12). – 188. **(квартиль Q1)**

23. Методика прогнозирования траектории струи огнетушащего вещества из ствола пожарного робота в режиме реального времени / **И. Н. Пожаркова**, С. В. Ченцов, С. Г. Цариченко [и др.] // *Безопасность труда в промышленности*. – 2025. – № 3. – С. 14–20. **(квартиль Q3)**

24. **Пожаркова, И. Н.** Моделирование траектории струи огнетушащего средства из пожарного лафетного ствола при возмущающих воздействиях / **И. Н. Пожаркова**, С. Г. Цариченко, С. Г. Немчинов // *Безопасность труда в промышленности*. – 2022. – № 11. – С. 7–13. **(квартиль Q3)**

25. **Пожаркова, И. Н.** Технология трехмерной реконструкции траектории свободной струи на основе фотограмметрии // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2026. – Т. 26. – № 3. – С. 587–596. **(квартиль Q4)**

Монография:

26. **Пожаркова, И. Н.** Методы численного моделирования и машинного обучения для автоматизации решения задач техносферной безопасности. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2026. – 160 с.

Патенты:

27. Патент № 2843123 С1 Российская Федерация, МПК А62С 37/00, А62С 37/50, А62С 31/00. Способ построения трехмерной модели траектории струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола : заявл. 03.02.2025 : опубл. 07.07.2025 / **И. Н. Пожаркова**, С. В. Ченцов, А. С. Климов, Ю. В. Краснобаев.

28. Патент № 2830398 С1 Российская Федерация, МПК А62С 37/50. Способ прогнозирования траектории струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола при воздействии на нее ветра на базе нейросетевой модели и математического моделирования : № 2024106218 : заявл. 11.03.2024 : опубл. 18.11.2024 / **И. Н. Пожаркова**, Ю. И. Горбань, С. Г. Немчинов [и др.].

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

29. Программа для оценки характеристик газожидкостных потоков на основе сети Колмогорова-Арнольда: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026660615 Рос. Федерация / **И. Н. Пожаркова**. – № 2026619519; заявл. 02.04.2026; опубл. 14.04.2026.

30. Программа для построения потоковых характеристик по результатам численного моделирования свободных струй: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618499 Рос. Федерация / **И. Н. Пожаркова**. – № 2025617328; заявл. 04.04.2025; опубл. 04.04.2025.

31. Программа для трехмерной реконструкции свободных струй на основе фотограмметрии: свидетельство о государственной регистрации программы для

ЭВМ № 2025618500 Рос. Федерация / **И. Н. Пожаркова**. – № 2025617329; заявл. 04.04.2025; опубл. 04.04.2025.

32. Программа для распознавания струи огнетушащего вещества из ствола пожарного робота на основе цифровых изображений: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667572 Рос. Федерация / **И. Н. Пожаркова**, А. А. Мельников. – № 2024665098; заявл. 02.07.2024; опубл. 26.07.2024.

33. Программа для прогнозирования распространения выбросов ТЭЦ с учетом окружающего ландшафта и застройки: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615784 Рос. Федерация / **И. Н. Пожаркова**, А. В. Гапоненко. – № 2023614978; заявл. 20.03.2023; опубл. 20.03.2023.

34. Программа для оценки эффективности пожарных роботов с использованием имитационного моделирования: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619451 Рос. Федерация / **И. Н. Пожаркова**, Е. А. Мельников, И. Ю. Сергеев. – № 2022618747; заявл. 16.05.2022; опубл. 23.05.2022.

35. Программа генерации FDS-кода, имитирующего развертывание противопожарного экрана: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680889 Рос. Федерация / **И. Н. Пожаркова**. – № 2021680624; заявл. 16.12.2021; опубл. 16.12.2021.

Подписано в печать 16.09.2026. Печать плоская
Формат 60x84/16 Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,0
Тираж 100 экз. Заказ № 27301

Отпечатано в Библиотечно-издательском комплексе
Сибирского федерального университета
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел. (391) 206-26-16; <https://bik.sfu-kras.ru>
E-mail: publishing_house@sfu-kras.ru