

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор С.В. Ченцов

Красноярск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ	22
1.1 Системный анализ задачи оценки характеристик газожидкостных потоков	22
1.2 Методология оценки характеристик газожидкостных потоков.....	42
1.3 Выводы по главе 1.....	49
ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ ВАЛИДАЦИОННЫХ ВЫБОРОК НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ	51
2.1 Обзор методов трехмерной реконструкции объектов.....	51
2.2 Упрощенная технология распознавания траектории струи огнетушащего вещества без учета ветра по результатам натурных испытаний	60
2.2.1 Алгоритм первичного выделения контуров границ потока огнетушащего вещества	69
2.2.2 Метод обратного перспективного преобразования.....	73
2.3 Методика проведения натурных испытаний противопожарных роботизированных систем для формирования валидационных выборок	80
2.4 Алгоритм трехмерной реконструкции траектории газожидкостного потока по результатам натурных испытаний	88
2.5 Оценка эффективности разработанной технологии	92
2.6 Выводы по главе 2.....	97
ГЛАВА 3. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ, СОГЛАСОВАННЫХ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ	100
3.1 Обзор методов построения целевых характеристик газожидкостных потоков по результатам моделирования.....	100

3.2 Алгоритм построения линии максимальных скоростей потока	108
3.3 Алгоритм аппроксимации потока эллиптическими сечениями.....	111
3.4 Апробация разработанных алгоритмов	115
3.5 Выводы по главе 3.....	118
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫБОРА МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ.....	120
4.1 Обзор методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков.....	120
4.2 Разработка технологии выбора методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков.....	133
4.3 Сравнительный анализ методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков	142
4.4 Выводы по главе 4.....	150
ГЛАВА 5. МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ	152
5.1 Анализ архитектур машинного обучения	152
5.2 Предварительный анализ эффективности методов машинного обучения для решения задачи оценки характеристик газожидкостных потоков	163
5.3 Сравнительный анализ многослойного персептрона и сетей Колмогорова – Арнольда.....	171
5.3.1 Сравнение многослойного персептрона и сети Колмогорова – Арнольда при решении задач оценки характеристик струи огнетушащего вещества без учета возмущающих воздействий.....	173
5.3.2 Сравнение многослойного персептрона и сети Колмогорова – Арнольда при решении задачи оценки характеристик потока огнетушащего вещества с учетом возмущающих воздействий.....	178

5.4 Выводы по главе 5.....	189
ГЛАВА 6. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ РОБОТАМИ	191
6.1 Способы управления пожарными роботами с использованием расчетной модели оценки целевых характеристик газожидкостных потоков	191
6.2 Решение задачи наведения газожидкостного потока на цель	198
6.3 Метод синтеза закона управления пожарными роботами	206
6.4 Технология оценки эффективности охлаждения защищаемых поверхностей на основе синтезированного закона управления.....	220
6.5 Выводы по главе 6.....	233
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	236
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	241
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	242
Приложение А. Блок-схемы алгоритмов	274
Приложение Б. Патент на изобретение № 2830398.....	281
Приложение В. Патент на изобретение № 2843123	282
Приложение Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026660615	283
Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618500	284
Приложение Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618499	285
Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667572	286
Приложение И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615784	287
Приложение К. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619451	288

Приложение Л. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680889	289
Приложение М. Акт внедрения ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР».....	290
Приложение Н. Акт внедрения ООО «КОРУФАЙЕР».....	291
Приложение П. Справка о внедрении ИБРАЭ РАН.....	292
Приложение Р. Акт внедрения ГУ МЧС России по Красноярскому краю	293

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Оценка целевых характеристик газовых и жидкостных свободных струй, к которым относятся, в том числе, потоки огнетушащего вещества из ствольной пожарной техники [208], рабочего тела в технологических процессах [180], атмосферные выбросы [217], является основой решения различных задач, в частности разработки алгоритмов автоматизации соответствующих систем управления (например, системы наведения пожарных роботов [225]). Данные потоковые процессы являются высокосложными объектами с точки зрения теоретического описания, численного моделирования и экспериментального изучения [224]. Это обусловлено рядом факторов, связанных с нелинейностью, многофазностью и турбулентным характером течения [187]. В результате их влияния траектория свободных струй может быть нестабильна [198], подвержена изгибам, волнообразным деформациям, раздроблению и распылу.

Методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) [125; 201] позволяют с достаточно высокой точностью производить математическое моделирование движения свободных струй с учетом влияния на них разнообразных факторов [224; 248]: сопротивления воздуха, гравитации, ветра, процессов теплопередачи [219; 249] и т.д. Основным недостатком данного подхода является значительная вычислительная сложность [181], 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 огнетушащего вещества на цель [28; 202; 212; 222] (при тушении пожара, охлаждении строительных конструкций или сооружений, осаждении облаков ядовитых или радиоактивных газов, пылей) в противопожарных роботизированных системах. Характерными особенностями свободных струй в данной прикладной области являются большие (десятки метров) геометрические размеры, высокие начальные скорости движения

[9; 13; 221] и пр. Перемещение окружающих воздушных масс, например, ветер, может оказывать значительное влияние на траекторию потока огнетушащего вещества, особенно на излете, когда его скорость снижается [9; 224]. При этом обратная связь, на основе которой осуществляется управление пожарным роботом, реализованная на базе систем технического зрения, в условиях визуального зашумления (внешние объекты, задымление) может быть неэффективной [221].

Использование машинного обучения (Machine Learning – ML) [67; 139; 208] позволяет обеспечить высокое быстродействие и точность проведения соответствующих расчетов. Однако применение данного подхода в указанной прикладной области имеет ряд сложностей. Например, проведение натурных испытаний [221] 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) [146; 198; 206; 216] для построения по результатам эксперимента трехмерных моделей исследуемых потоковых процессов, имеющих различную оптическую плотность и изменяющиеся границы, малоэффективно [246]. Поэтому разработка методов и алгоритмов высокоточной и высокоскоростной оценки характеристик газожидкостных потоков, в частности огнетушащего вещества при возмущающих воздействиях, является актуальной задачей, которая соответствует перечню критических технологий Российской Федерации, в частности: технологии информационных, управляющих, навигационных систем, технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, а также Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (направление Н1 переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанным на применении интеллектуальных производственных решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем, новых материалов и

химических соединений, результатов обработки больших объемов данных, технологий машинного обучения и искусственного интеллекта).

Степень разработанности.

Проектированию систем управления противопожарных роботизированных систем посвящены работы российских и зарубежных исследователей, таких как: Горбань Ю.И., Немчинов С.Г., Цариченко С.Г., Мешман Л.М. [2–4; 7–11; 31; 33] (стационарные дистанционно и программно-управляемые пожарные роботы ПР-ЛСД-С20У/С40У и их модификации), Ченг Х., Жу Д., Пан Л. [67; 99; 146; 198] (мобильные роботы RXR-M50BD, Thermite 3.0 и пр.), Меженев В.А., Ольховский И.А. [5; 19; 24–26] (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 [102; 146; 149; 198].

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 газожидкостных потоков 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 [39], однако точность полученных при этом результатов может существенно ухудшиться, что в рамках рассматриваемой прикладной области неприемлемо.

Вервекен Л., Кампс Д. предложили понижение порядка модели на основе метода Арнольди [178], который дает возможность сократить время решения дифференциальных уравнений CFD. Ошибка при этом увеличивается незначительно, однако на сложных задачах данный метод не обеспечивает быстроедействие, 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 [87], однако применимость данного подхода ограничена отслеживанием потока огнетушащего вещества 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 [146; 198]. 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 огнетушащего вещества 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 [139], 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 противопожарными роботизированными системами с большим расходом огнетушащего вещества. Кроме того, для обеспечения наведения струи в любую точку пространства в радиусе действия пожарного робота требуется информация о положении потока огнетушащего вещества по 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.

Объектом исследования являются характеристики газожидкостных потоков, на основе которых осуществляется управление в противопожарных роботизированных системах.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационное исследование соответствует пунктам 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 (Красноярский край).

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 натурных 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 следующих всероссийских и международных научно-технических и практических 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 [200–210], 10 – категории K2 [211–220]), 4 публикации в журналах, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science [221–224] (из них 1 статья в журнале квартиля Q1 [222], 2 – квартиля Q3 [223; 224], 1 – квартиля Q4 [221]); 1 монография [225]; 2 патента РФ на изобретения [226; 227] (приложения Б, В) и 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ [228–234] (приложения Г, Д, Е, Ж, И, К, Л).

Из статей, опубликованных в ведущих российских рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего

образования РФ, в том числе в рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами данных и/или RSCI, 18 единоличных. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в списке литературы лично автором получены следующие результаты: разработаны основные аспекты методологии решения задач оценки характеристик газожидкостных потоков в режиме реального времени [222; 223; 227], исследованы возможности использования методов вычислительной гидродинамики для моделирования потоковых процессов, в том числе, в задачах проектирования и оценки эффективности систем противопожарной защиты [219; 232; 233; 235; 236; 239; 249; 255; 259], 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 [216; 226; 231], разработана и апробирована технология выбора численных методов для моделирования свободных струй [224], исследованы основные аспекты применения методов машинного обучения для решения задач оценки характеристик газожидкостных потоков в режиме реального времени [208], 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 [214; 240].

Автор выражает глубокую признательность руководству и коллективу ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России за поддержку в проведении натурных экспериментов и предоставленное оборудование.

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ

Глава посвящена анализу задачи оценки характеристик газожидкостных потоков при управлении противопожарными роботизированными системами. Представлены основные проблемы, возникающие при ее решении. Разработана методология оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах в режиме реального времени с учетом выявленных проблем.

1.1 Системный анализ задачи оценки характеристик газожидкостных потоков

Газожидкостные (двухфазные) потоки являются частью управляемых процессов в различных прикладных областях: энергетика [137], нефтегазовая промышленность [51], химические производства [152], сельскохозяйственные системы ирригации [36], системы пожаротушения [224] и т.д. Их характерные особенности: турбулентность, изменчивость структуры течения, наличие межфазных взаимодействий, высокая чувствительность к внешним воздействиям и пр. Указанные факторы существенно осложняют решение задач управления газожидкостными потоками. Свободные струи [107], которые не ограничены твердыми поверхностями и взаимодействуют с окружающей средой, могут подвергаться влиянию внешних возмущений в большей степени и большем диапазоне описывающих их параметров по сравнению с ограниченными струями, что повышает сложность управляющих алгоритмов.

В рамках прикладной области данного исследования рассматриваются противопожарные роботизированные системы, т.е. автоматические устройства, которые манипулируют пожарным стволом в сферической системе координат, осуществляя наведение струи огнетушащего вещества (газожидкостного потока)

на очаг пожара, охлаждаемый объект и т.д. К указанным системам относятся: пожарные роботы [12], стационарные пожарные роботизированные стволы [32], роботизированные установки пожаротушения [32], а также мобильные пожарные роботы с реализацией на базе колесных [169], гусеничных платформ [198] и беспилотных летательных аппаратов [183].

Наведение потока огнетушащего вещества в заданную точку на открытых пространствах, как было показано в [224], при определенных условиях существенно осложняется влиянием турбулентности и внешних факторов. В частности, воздействие ветра может приводить к изменению траектории струи и к ее распаду, а низкие температуры снижают высоту и дальность струи за счет изменения физических параметров окружающего воздуха и огнетушащего вещества, что в конечном итоге может вызвать значительное смещение пятна контакта (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Смещение пятна контакта струи воды из пожарного лафетного ствола под воздействием бокового ветра

Турбулентность оказывает существенное влияние на решение задач управления наведением струи огнетушащего вещества. Поток на выходе из пожарного ствола имеет высокую скорость, что вызывает образование завихрений на его границах. Это приводит к перемешиванию огнетушащего вещества с воздухом, через который оно двигается, и, как следствие, к постепенному распаду струи на фрагменты (раздроблению) и отдельные капли (распылению), увеличению ее поперечного сечения, замедлению ее ядра [9].

Раздробленная и распыленная части потока огнетушащего вещества в существенно большей степени по сравнению с компактной частью подвержены

влиянию возмущающих воздействий, в частности ветра. Как видно из рисунка 1.1, отклонение на начальном участке струи практически отсутствует, а после ее распада смещение пятна контакта достигает значительной величины.

Распад потока огнетушащего вещества и его перемешивание с воздухом под действием турбулентности затрудняют наведение струи на цель и могут снижать эффективность пожаротушения или охлаждения конструкций из-за существенного уменьшения интенсивности орошения (расхода огнетушащего вещества на единицу площади орошаемой поверхности). Схожие проблемы, связанные с взаимодействием газожидкостных потоков с окружающей средой, могут усложнять решение задачи управления свободными струями в других прикладных областях.

В общем виде схему управления газожидкостными потоками можно представить диаграммой, изображенной на рисунке 1.2.

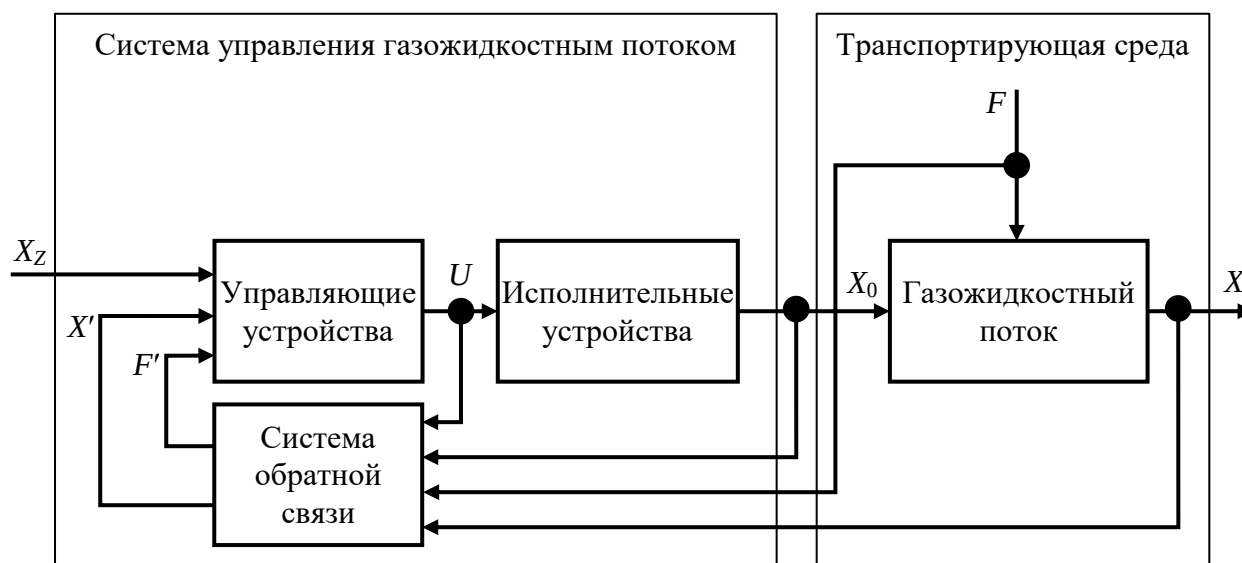


Рисунок 1.2 – Схема управления газожидкостными потоками

Обозначения на рисунке 1.2:

X_z – заданные значения целевых характеристик газожидкостного потока, которые определяются целями и задачами управления. При наведении огнетушащего вещества на заданную область в качестве целевых характеристик используются соответствующие координаты трехмерного пространства.

X_0 – параметры, которые описывают управляемый газожидкостный поток на выходе из исполнительных устройств. В противопожарных роботизированных системах это основные физические характеристики струи: начальные скорости, температуры, давления огнетушащего вещества и т.д.

X – фактические значения целевых характеристик, которые описывают газожидкостный поток после его взаимодействия с транспортирующей средой. При наведении огнетушащего вещества на заданную область в таком качестве могут выступать координаты положения контактного пятна.

X' – фактические значения целевых характеристик, которые оцениваются на основе используемой системы обратной связи. В противопожарных роботизированных системах это могут быть устройства визуального контроля (в том числе компьютерного зрения).

U – управляющие воздействия на исполнительные устройства, формирующиеся на основе заданных значений целевых характеристик X_z , оцененных фактических значений целевых характеристик X' . Для генерации U могут также применяться оцененные системой обратной связи параметры возмущающих воздействий F' . В качестве управляющих воздействий в противопожарных роботизированных системах используются: углы наведения, угол распыла струи, расход огнетушащего вещества и т.д.

F – параметры возмущающих воздействий на газожидкостный поток со стороны транспортирующей среды. В задаче управления наведением струи огнетушащего вещества на цель F включает в себя направление и скорость ветра, температуру воздуха и т.д.

F' – параметры возмущающих воздействий, которые оцениваются на основе используемой системы обратной связи. Это могут быть, как прямые измерения (термометры, анемометры, ветроуказатели – в противопожарных роботизированных системах), так и косвенные – оцениваемые на основе управляющих воздействий U , выходных параметров X_0 и фактических значений целевых характеристик X газожидкостного потока.

Управляющие устройства – оборудование, которое формирует управляющие воздействия U на исполнительные устройства в соответствии с заданным законом, который в общем виде можно представить формулой:

$$U = f_U(X_Z, X', F'). \quad (1.1)$$

Исполнительные устройства – оборудование, которое генерирует и/или непосредственно воздействует на управляемый газожидкостный поток (в противопожарных роботизированных системах – пожарный ствол, подающий насос, генератор пены и т.д.), формируя на выходе свободную струю с начальными параметрами X_0 :

$$X_0 = f_X(U). \quad (1.2)$$

Транспортирующая среда – пространство, в котором движется газожидкостный поток, оказывающее на него влияние. Для противопожарных роботизированных систем это окружающий воздух, при взаимодействии с которым возникают явления турбулентности, распада и распыла струи, изменения ее траектории под влиянием ветра и гравитации:

$$X = f_F(X_0, F). \quad (1.3)$$

Система обратной связи – совокупность устройств, предназначенная для оценки фактических значений целевых характеристик газожидкостного потока X' , а также (в некоторых случаях) параметров возмущающих воздействий F' . Как было указано выше, в противопожарных роботизированных системах это могут быть системы визуального контроля, в т.ч. и компьютерного зрения, измерительные приборы (для параметров возмущающих воздействий), а также подсистемы косвенной оценки с использованием параметров управляющих воздействий, начальных параметров газожидкостного потока и фактических значений его целевых характеристик:

$$X' = g_X(F, U, X_0, X), \quad (1.4)$$

$$F' = g_F(F, U, X_0, X). \quad (1.5)$$

Цель управления при такой постановке задачи заключается в общем случае в минимизации отклонения фактических значений целевых характеристик X' от заданных X_Z :

$$\Delta(X', X_Z) = \min, \quad (1.6)$$

где Δ – выбранная при решении соответствующей задачи функция для вычисления отклонения фактических значений целевых характеристик от заданных.

В управлении наведением огнетушащего вещества одним из критериев достижения цели могут выступать отклонения положения пятна контакта от заданного, не превышающие некоторой доли, определяющей эффективность орошения, его характерных размеров по соответствующим координатным осям:

$$\Delta_C(X', X_Z) = |(X_Z - X')_C| \leq \delta \cdot R_C, \quad (1.7)$$

где Δ_C – отклонение положение пятна контакта по координатной оси C ;

δ – доля характерного размера пятна контакта, определяющая эффективность орошения;

R_C – характерный размер пятна контакта вдоль оси C .

Кроме того, в качестве критерия может применяться абсолютное отклонение положения пятна контакта от цели, не превышающее заданного значения:

$$\Delta(X', X_Z) = |(X_Z - X')| \leq \varepsilon, \quad (1.8)$$

где ε – максимально допустимое отклонение положения пятна контакта от цели.

Как следует из представленной схемы и выражения (1.1) воздействия U генерируются на основе информации о фактических значениях целевых характеристик газожидкостного потока, а потому качество решения задачи их оценки во многом определяет эффективность управления. В противопожарных роботизированных системах обратная связь, обычно, реализуется на основе визуального контроля [3; 4], в том числе с применением компьютерного зрения [33] (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Обзор основных способов управления наведением в различных противопожарных роботизированных системах

Наименование	Тип	Способ управления наведением струи на цель
ПР-ЛСД-С20У/С30У/С40У и их модификации [11]	Стационарный	Программный (подача ОТВ осуществляется на основе заранее заданной программы по координатам цели) – обратная связь не используется; Дистанционный (управление наведением производится оператором с пульта на основе изображения с цифровых камер, в т.ч. в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазоне); Ручной (наведение производится вручную с использованием органов ручного управления пожарного робота на основе визуального контроля)
FR-Mini [11]	Стационарный, потолочный	Программный; Дистанционный
ЛУФ-60, Ель-4 [21], АНТ-1000ПМ [35], RXR-M20B/M40B/M50B (и их модификации), Thermite 3.0 [183] и др.	Мобильный, наземный	Дистанционный
RXR-M40B с прототипом системы автоматического наведения [198]	Мобильный, наземный	Дистанционный; Автоматический (на основе прогнозирования точки падения струи по начальному участку ее траектории, определяемому с использованием систем компьютерного зрения – область применения ограничена малой дальностью и отсутствием возмущающих воздействий)
БАС «Грузовик М500» + Natisk [27], Seneca, SUHAIL [183] и др.	Мобильный на базе БПЛА	Дистанционный; Автоматический (на малой дальности, без возмущающих воздействий)

Решения с визуальным контролем для роботов с небольшой дальностью струи, на которой явления, вызванные турбулентностью или внешними воздействиями, оказывают незначительное влияние на траекторию движения огнетушащего вещества, позволяют оценивать фактическое положение пятна контакта с достаточно высоким качеством. Однако при увеличении радиуса действия противопожарной системы и/или скорости ветра точность таких систем может существенно снижаться, приводя в критических случаях к полной неэффективности систем наведения на их основе, когда ошибка превышает размеры контактного пятна (несоответствие критерию (1.7)).

На основе проведенных в рамках диссертационного исследования предварительных натурных испытаний показано, что: боковой ветер на открытых пространствах может приводить к отклонению от исходного направления траектории и распаду струи огнетушащего вещества из ствола пожарного робота; низкие температуры снижают ее высоту и дальность, что в конечном итоге также может вызвать значительное смещение пятна контакта [248]. Указанные явления существенно осложняют управление наведением соответствующего газожидкостного потока на цель: очаг пожара, охлаждаемый объект и т.д. При этом определение целевых характеристик струи огнетушащего вещества с требуемой точностью на основе алгоритмов компьютерного зрения может быть затруднено из-за ее значительных геометрических размеров, переменной оптической плотности, а также визуального зашумления дымом, внешними объектами, распыленными фрагментами потока (рисунок 1.3).

Одним из широко используемых подходов, обеспечивающим высокую точность оценок параметров газожидкостных потоков при низкой эффективности прямых или косвенных измерений, является моделирование на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD) [187]. Ниже представлен краткий обзор опыта решения соответствующих задач.



- Слабая различимость струи на фоне неба
- Переменная оптическая плотность
- Распад и раздробление струи
- Значительные размеры струи
- Зашумление изображения струи внешними объектами
- Зависимость оптической плотности одного и того же фрагмента струи от ракурса

Рисунок 1.3 – Проблемы оценки целевых характеристик струи огнетушащего вещества в системах компьютерного зрения

В статье [129] проведено исследование точности моделирования процесса снижения давления в криогенном топливном баке с жидким водородом с распылительной форсункой при управлении топливом. Решение поставленной задачи в работе опирается на следующие методы CFD: двухфазный решатель Loci-Stream-VOF (моделирование жидкого и газообразного водорода как Эйлеровых фаз) [190]; модель Лагранжа для описания субсеточных капель распыла с двусторонним взаимодействием [116]; модели фазового перехода – модель термического равновесия и модель Герца – Кнудсена – Шраге [101]; модель турбулентности – улучшенная вихревая модель (IDDES) [69]; асимметричная модель переноса турбулентности на межфазной границе [188]; модели дробления, коалесценции и рассеяния капель [186]. Относительные отклонения исследуемых характеристик потока, полученные по результатам моделирования, от экспериментальных не превышают 10 %.

Авторами [30] описано моделирование адиабатных двухфазных потоков в вертикальных каналах для оценки радиальных профилей локального

газосодержания, скорости жидкости и сопротивления трения для пузырьковых потоков в вертикальном цилиндрическом канале. Для решения указанной задачи были выбраны следующие методы CFD: многофазная модель Эйлера [182] (моделирование межфазного взаимодействия); $k-\omega$ SST [194] (моделирование турбулентности); модель Томиямы [172] (моделирование подъемной силы); FAD [84] (моделирование рассеивания турбулентности). Полученная по результатам моделирования точность оценки целевых характеристик квалифицирована авторами исследования как приемлемая с точки зрения решаемых на основе численного расчета задач.

В публикации [112] представлены результаты валидации двухфазной модели для адиабатных пузырьковых течений, которая показала высокую точность различных моделей CFD для оценки целевых характеристик.

Работа [70] посвящена моделированию течения природного газа через трубу Вентури. В качестве целевых характеристик исследуемых двухфазных потоков выступали распределения давлений и скоростей. Относительные отклонения изучаемых параметров, полученные по результатам моделирования, от экспериментальных составили 0.8–6.3 % для газовой фазы и 0.3–22.1 % для жидкой.

В [176] проведена валидация моделей вычислительной гидродинамики для оценки параметров газожидкостных потоков в барботажных резервуарах. Для решения поставленной задачи в работе предложены следующие методы CFD: метод решеточных уравнений Больцмана [52]; модели дробления и коалесценции для барботажных систем [186]. Сравнение экспериментальных и расчетных характеристик исследуемого газожидкостного потока показало их совпадение с $R^2 \geq 0.90$, что соответствует высокой точности с точки зрения решаемой задачи.

На базе Инженерного центра пожарной робототехники «ЭФЭР» в рамках данного диссертационного исследования были проведены предварительные испытания для получения фото-видеоматериалов отклонения струи ветром для последующей разработки математической модели [224] (рисунок 1.4).

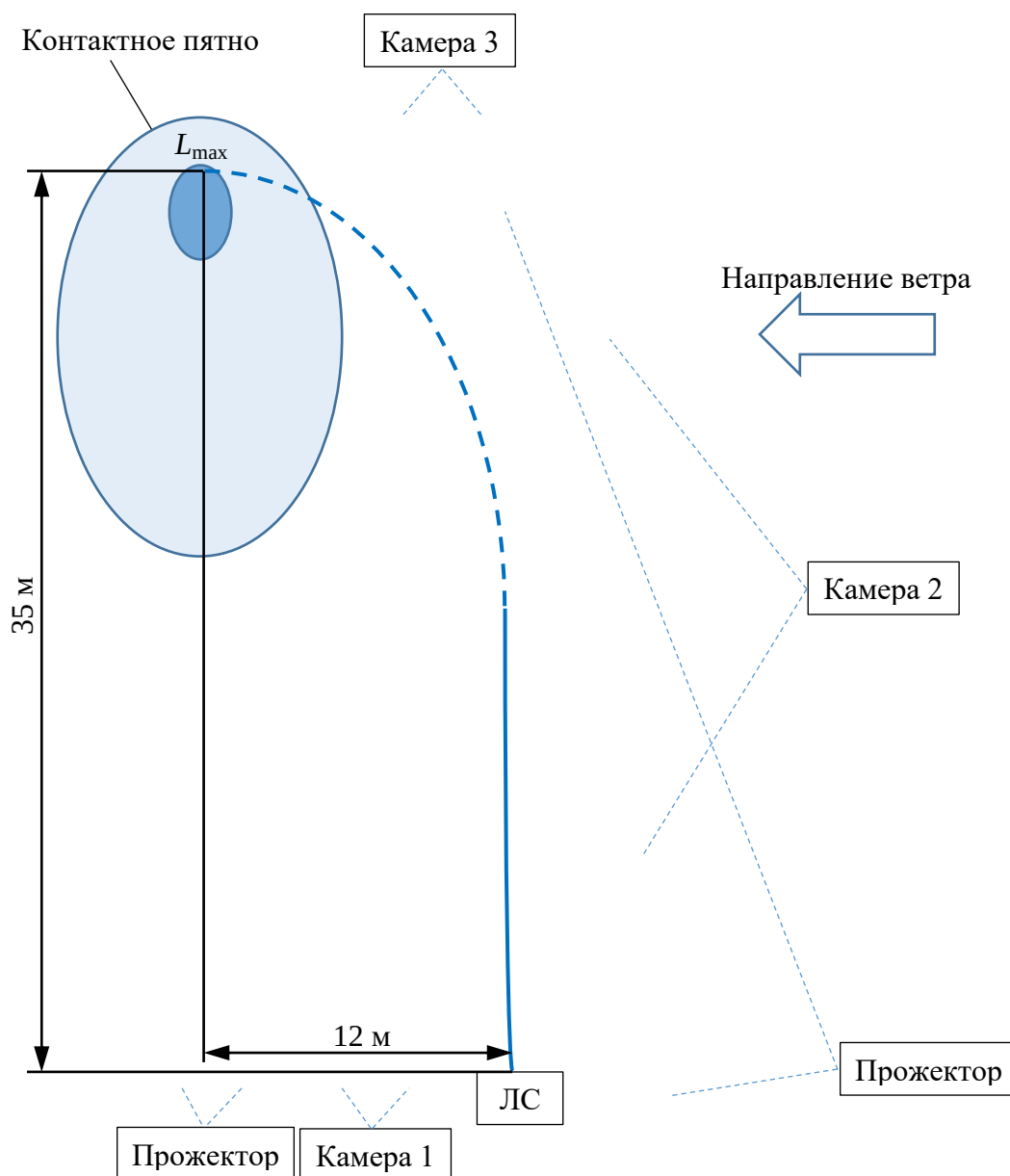


Рисунок 1.4 – Схема проведения натурных испытаний

Испытания проводились в сумеречное время с использованием стационарного лафетного ствола ЛС-С40У [9], который является исполнительным механизмом в пожарных роботах ПР-ЛСД-С40У и их модификациях.

Основные параметры сценария испытаний:

- расход воды 40 л/с;
- рабочее давление 0.6 МПа;
- угол возвышения выходного парубка 30° ;
- температура воздуха минус 3°C ;
- ветер 5 м/с, направление указано на рисунке 1.4.

Подсветка струи осуществлялась двумя прожекторами мощностью 1.5 кВт для получения контрастного изображения. На рисунках 1.5–1.7 представлены результаты фотофиксации струи во время натурных испытаний.



Рисунок 1.5 – Снимок с камеры 1



Рисунок 1.6 – Снимок с камеры 3



Рисунок 1.7 – Снимок с камеры 2

Полученные результаты:

- дальность струи $L_{\max}$ (по положению зоны наибольшей интенсивности контактного пятна) – 35 м;
- смещение струи относительно направления выходного патрубка (по положению зоны наибольшей интенсивности контактного пятна) – 12 м;
- максимальная высота струи – 11 м;
- размеры контактного пятна не менее 6 м х 10 м.

По результатам натурных испытаний был произведен предварительный выбор CFD модели и построение на ее основе траектории струи при тех же исходных параметрах. Для расчета распространения струи воды в воздушной среде на основе сравнительного анализа была выбрана модель переноса объемной доли жидкости (Volume of Fluid – VOF) [181] для учета свободной поверхности (поверхности раздела между водой и воздушной средой) и $k-\varepsilon$ [16] модель турбулентности, которая при относительно небольшой вычислительной сложности показала высокую точность. Расчет при использовании персонального компьютера с процессором AMD Ryzen 3 2200U и 4 Гб ОЗУ потребовал 12 часов, что на порядки превышает время формирования устойчивой струи (~ 10 с) и не соответствует режиму реального времени.

Построение траектории струи на основе выбранной модели производилось согласно схеме, представленной на рисунке 1.4.

Трехмерная модель экспериментального полигона была построена в соответствии с натурными испытаниями так, чтобы с запасом охватить пространство, в котором движется струя, с соблюдением всех геометрических особенностей лафетного ствола и его положения (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Основные характеристики модели экспериментального полигона

Характеристика	Значение
Высота (по вертикальной оси – Y), м	15
Ширина (по горизонтальной оси перпендикулярной направлению выходного патрубка – Z), м	18
Длина (по горизонтальной оси параллельной направлению выходного патрубка – X), м	40
Направление ветра	Вдоль горизонтальной оси перпендикулярной направлению выходного патрубка (справа налево)
Скорость ветра, м	5
Угол возвышения выходного патрубка	30°

Для проведения вычислительных экспериментов были построены тетраэдрические расчетные сетки с различными ограничениями на максимальные линейные размеры ячеек. При этом, в области пространства, находящемся в непосредственной близости от выходного патрубка задавалось высокое разрешение сетки, а на значительном удалении от него – низкое.

На рисунке 1.8 представлены сечения использованной расчетной сетки по различным координатным плоскостям. Стоит отметить, что уменьшение количества узлов и, соответственно, увеличение линейных размеров ячеек приводило к увеличению отклонения модельной траектории от экспериментальной, но практически не влияло на положение контактного пятна.

По результатам моделирования была получена траектория струи из лафетного ствола. На рисунке 1.9 выполнена ее визуализация в трехмерном модельном пространстве экспериментального полигона. Темные области соответствуют высокой концентрации воды в соответствующем конечном объеме пространства, светлые – низкой.

На рисунке 1.10 представлены две проекции изображения траектории струи с нанесенными геометрическими метками, которые согласованы с измеренными по результатам натурных испытаний параметрами: максимальная высота, дальность и смещение струи относительно направления выходного патрубка. Рисунок 1.10, а также дополнен схемой натурных испытаний (рисунок 1.4).

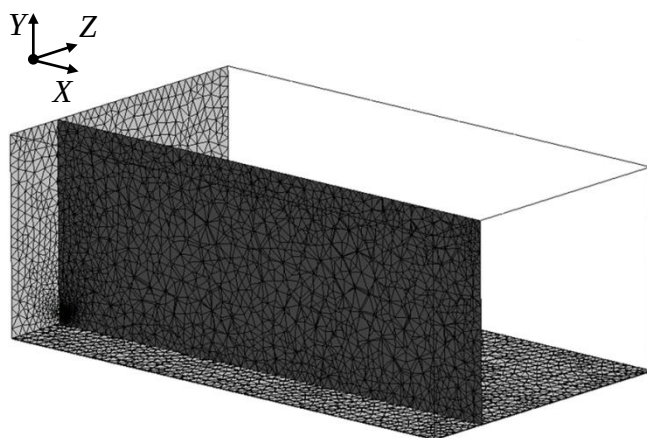


Рисунок 1.8 – Сечения расчетной сетки по координатным плоскостям

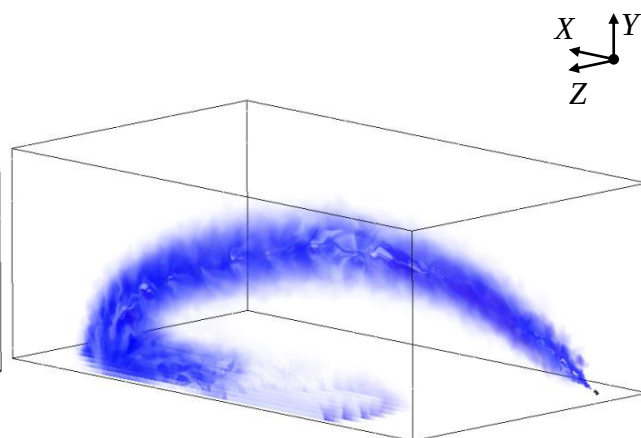


Рисунок 1.9 – Визуализация траектории струи по результатам моделирования

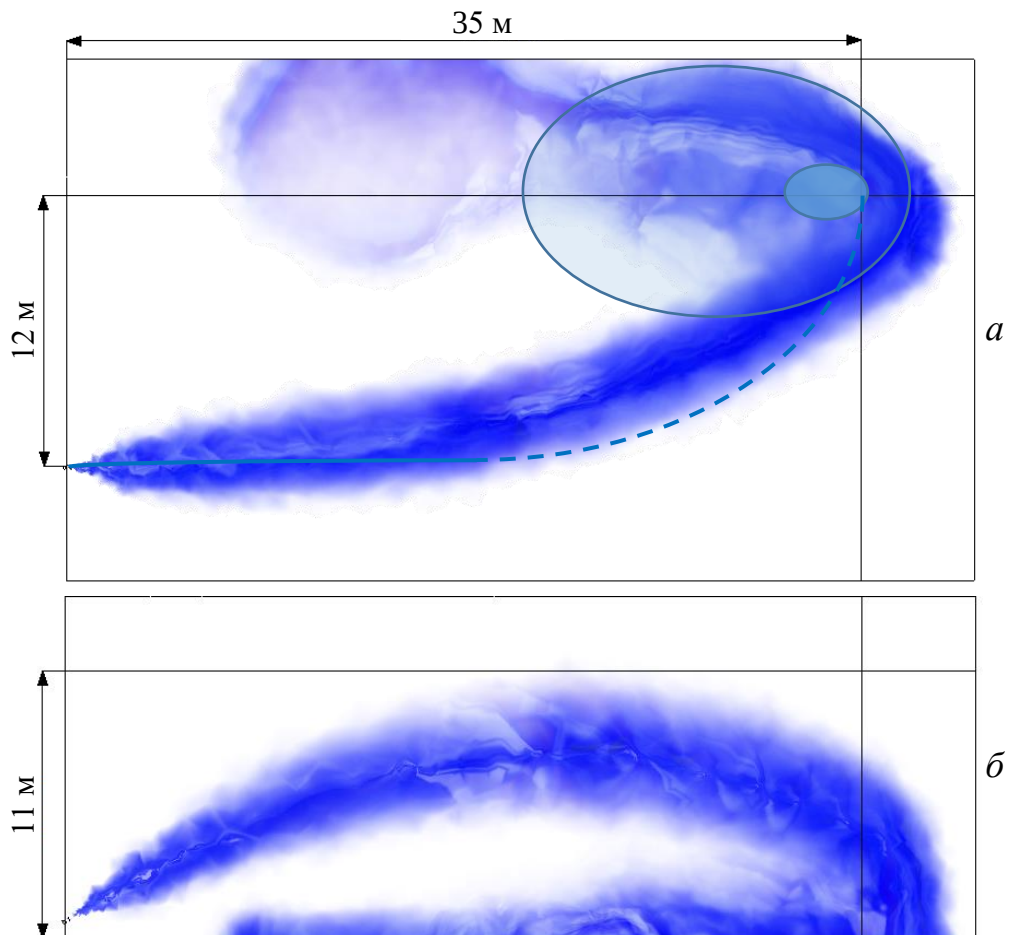


Рисунок 1.10 – Проекция траектории струи в плоскостях XZ (a) и XY ($б$)

Стоит отметить отсутствие распада смоделированной струи на начальном участке траектории, которое наблюдалось при натурных испытаниях. Это является следствием выбора относительно крупных ячеек расчетной сетки, что в свою очередь позволило значительно снизить вычислительную сложность модели.

Для имитации распада струи применяются, в том числе, динамические расчетные сетки с малыми линейными размерами ячеек, сопоставимыми с размерами капель (доли миллиметра), а также прямое численное моделирование турбулентности (DNS) [20], что, учитывая геометрические параметры моделируемого пространства, потребует значительных вычислительных ресурсов. Однако для решения задач, связанных с определением положения контактного пятна и основных параметров струи (высота, дальность, смещение), задание крупноразмерных ячеек позволяет получить приемлемую точность.

Представленный обзор решений, позволяющих оценивать характеристики газожидкостных потоков на основе моделирования, показал, что требуемую точность в рамках исследуемой прикладной области могут обеспечить методы вычислительной гидродинамики. 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 противопожарных роботизированных систем.

При этом применение машинного обучения для обеспечения требуемого быстродействия и точности осложнено влиянием следующих факторов:

- 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 компьютерного зрения для построения по результатам эксперимента трехмерных моделей газожидкостных потоковых процессов, на основе которых можно формировать обучающие и тестовые выборки, в том числе с учетом возмущающих воздействий.

Как было указано выше, решение задачи наведения при задействовании визуальной обратной связи в таких условиях может осложняться влиянием следующих факторов: задымление и зашумление потока огнетушащего вещества внешними объектами, слабая различимость его раздробленной части на близком по яркости и цвету фоне (рисунок 1.3).

При наведении на цель компактного (сплошного) участка струи или струи с небольшой дальностью можно учитывать данные о ее траектории, полученные по результатам натурных испытаний при различных управляющих параметрах без учета ветра, т.к. в данном случае влияние возмущающих воздействий проявляется в меньшей степени. Однако при управлении навесной струей большой дальности указанный подход может быть неэффективным.

Проведение натурных испытаний для получения эмпирических данных, описывающих поведение струи из ствола пожарного робота в широком спектре значений параметров внешних факторов, соответствующих различным сценариям его функционирования, крайне затруднительно. Кроме того, траектория движения потока огнетушащего вещества при воздействии ветра, представляет собой геометрически достаточно сложную фигуру, которая может иметь значительные размеры.

Фотограмметрия [105; 165] является одним из наиболее доступных способов трехмерной реконструкции реальных объектов. В настоящее время существуют готовые соответствующие методики и их программные реализации [42; 110], позволяющие на основе множества фотографий, сделанных с различных ракурсов, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [161], с высокой точностью создавать трехмерные 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:

- различная оптическая плотность струи на разных ее участках;
- зависимость оптической плотности одного и того же фрагмента струи от ракурса съемки;
- слабая различимость струи на близком по яркости и цвету фоне (например, поток воды из пожарного ствола на фоне облачного неба);
- визуальное зашумление полупрозрачной струи внешними объектами, на фоне которых она движется;

– ограниченное время существования струи (например, при проведении натурных испытаний в полевых условиях без доступа к источнику исследуемой жидкости);

– значительные размеры струи (например, десятки метров при натурных испытаниях пожарного ствола).

Перечисленные особенности могут усложнять решение таких задач, как получение синхронизированных изображений исследуемых процессов в достаточном качестве и количестве различных ракурсов, выделение границ, выделение особых точек [60], ректификация [121] и т.д. Причем в значительной степени сложности, связанные с оптической плотностью, визуальным зашумлением и слабой различимостью струи, проявляются на участках ее распада и распыления, которые, как правило, представляют наибольший интерес с точки зрения задачи управления наведением на большой дальности.

На рисунке 1.11 представлен пример использования для определения границ потока огнетушащего вещества метода выделения динамического объекта на основе вычитания фона [195]. Как следует из рисунка 1.11, указанные выше особенности исследуемых процессов существенно снижают эффективность применяемых для решения соответствующих задач методов компьютерного зрения.

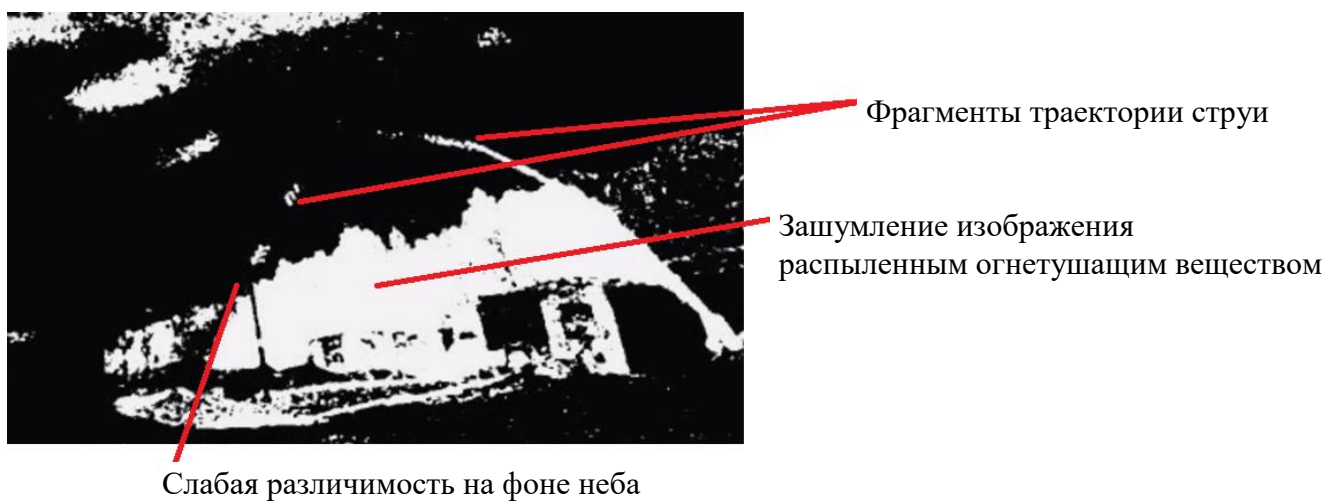


Рисунок 1.11 – Пример использования для определения границ потока огнетушащего вещества метода выделения динамического объекта на основе вычитания фона

В исследовании [87] представлен метод определения траектории струи на основе снимков с БПЛА с помощью обучаемых векторов подсказок. Данный метод показал высокую эффективность в отслеживании потока огнетушащего вещества без учета ветра и возможного зашумления изображения дымом в условиях пожара.

Ряд авторов [146; 198] предлагают способ прогнозирования траектории струи на основе системы компьютерного зрения ближнего радиуса действия. Предложенный подход может использоваться в условиях задымления, однако при сильном боковом ветре и большой дальности наведения точность прогноза положения пятна контакта на основе компактной части струи снижается, т.к. на сплошном участке поток огнетушащего вещества отклоняется от исходного направления незначительно, а потому соответствующая оценка изменения траектории на большом расстоянии может существенно отличаться от реального.

В работе [139] описан метод прогнозирования положения точки падения струи воды с учетом ветра на основе нейросетевой модели, который показал достаточно высокую точность. Однако в указанном исследовании была использована водяная пушка с небольшой дальностью, а положение пятна контакта прогнозировалось только в одной горизонтальной плоскости. При этом для того, чтобы обеспечить наведение струи в любую точку пространства в радиусе действия пожарного робота требуется информация о положении потока огнетушащего вещества по всей длине его траектории.

Статья [248] посвящена обоснованию технологии прогнозирования траектории струи огнетушащего вещества при ветровой нагрузке на основе моделей вычислительной гидродинамики, а также опыту использования указанного метода с учетом влияния отрицательных температур. Основным недостатком данного подхода в контексте задачи управления пожарными роботами является его значительная вычислительная сложность, которая не позволяет применять технологию в режиме реального времени, при котором моделирование производится со скоростью протекания соответствующих процессов.

Для решения этой проблемы в настоящее время используются различные подходы, в частности:

– Упрощение модели путем увеличения размера ячеек расчетных сеток [39], что дает возможность существенно сократить время моделирования за счет снижения точности результатов расчета. Такой подход применительно к задаче вычисления траектории огнетушащего вещества малоэффективен, т.к. затруднительно обеспечить приемлемую погрешность и скорость прогноза, соответствующую реальному масштабу времени.

– Повышение скорости численного решения дифференциальных уравнений за счет уменьшения количества итераций на основе метода Арнольди [178]. При этом, как правило, обеспечивается несущественное увеличение погрешности. Однако при решении задачи прогнозирования траектории огнетушащего вещества при возмущающих воздействиях подобная модификация не позволяет повысить быстродействие до режима реального времени.

– Сокращение времени моделирования за счет применения параллельных вычислений для решения уравнений вычислительной гидродинамики [48] при сохранении высокой точности. Однако выбор данного способа применительно к пожарным роботам существенно ограничивается соответствующей элементной базой, которая не позволяет обеспечить приемлемую скорость расчета.

– Расчет отдельных характеристик, в частности положения пятна контакта, исследуемых процессов на основе машинного обучения [139]. Использование такого подхода может обеспечить требуемую скорость вычислений. Однако построение обучающих и валидационных выборок в достаточном количестве и качестве для настройки соответствующих моделей является достаточно сложной проблемой, т.к. струи огнетушащего вещества имеют значительные геометрические размеры, изменяющиеся под воздействием различных факторов границы, переменную оптическую плотность и т.д. Указанные особенности существенно затрудняют измерение исследуемых характеристик на основе натурных испытаний.

Гипотеза данной работы заключается в том, что совместное использование методов машинного обучения и вычислительной гидродинамики [143; 145] позволит решить указанную проблему. При таком подходе численное моделирование газожидкостных потоковых процессов применяется для формирования выборок в широком диапазоне значений управляющих и возмущающих параметров. Полученные таким образом данные далее задействуются для обучения и верификации нейросетевых моделей, предназначенных для оценки в режиме реального времени соответствующих параметров струи. Валидационные выборки формируются на основе натурных испытаний противопожарных роботизированных систем или их исполнительных механизмов (пожарных лафетных стволов).

Реализация обозначенного подхода возможна только при согласовании целевых характеристик, описывающих динамику исследуемых потоковых процессов, как по результатам моделирования, так и по результатам экспериментов. В рамках настоящего исследования в качестве основной целевой характеристики струи огнетушащего вещества из пожарного ствола используется траектория его движения, которая описывается верхней границей изучаемого газожидкостного потока. Подобный выбор обусловлен тем, что на ее основе можно определить инструментально измеряемые параметры струи: дальность, высоту, координаты наиболее удаленной точки пятна контакта. Эти характеристики можно применять для экспериментальной валидации полученных результатов.

1.2 Методология оценки характеристик газожидкостных потоков

Исходя из проведенного в предыдущем параграфе анализа задачи оценки целевых характеристик газожидкостных потоков, можно выделить решения основных проблем в исследуемой прикладной области, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Предлагаемые решения выявленных проблем

Основание	Проблема	Предлагаемое решение
Высокая сложность газожидкостного потока с точки зрения теоретического описания	Отсутствие точных и быстродействующих моделей, описывающих их характеристики	Использование машинного обучения для оценки
Высокая сложность газожидкостного потока с точки зрения экспериментального изучения	Сложность построения обучающих выборок в широком диапазоне воздействующих факторов	Использование для построения обучающих выборок численного моделирования
		Разработка методики проведения натурных испытаний для формирования валидационных выборок
Высокая сложность газожидкостного потока с точки зрения численного моделирования	Отсутствие согласованных характеристик газожидкостного потока,	Разработка методов и алгоритмов построения целевых характеристик газожидкостного потока по результатам эксперимента
	определяемых по результатам эксперимента и моделирования	Разработка методов и алгоритмов построения целевых характеристик газожидкостного потока по результатам моделирования
	Высокая вычислительная сложность моделей, большое время расчета	Разработка технологии выбора методов CFD для моделирования газожидкостного потока с оценкой точности на основе валидационных выборок

С учетом предлагаемых решений (таблица 1.3), а также выявленных в результате проведенного анализа недостатков существующих подходов в рамках диссертационного исследования была разработана методология оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах в режиме реального времени [208; 222; 223; 227]. Соответствующая функциональная диаграмма приведена на рисунке 1.12.

Основу методологии представляет обученная расчетная модель (рисунок 1.13). Построение данной модели (рисунок 1.13, блок А1) состоит из четырех основных этапов (рисунок 1.14): формирования исходных данных, машинного обучения, верификации и валидации.

Обозначения на рисунках 1.12–1.14: CFD – вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics); ML – машинное обучение (Machine Learning); CV – компьютерное зрение (Computer Vision); ПРС – противопожарная роботизированная система; НИ – натурные испытания; ЦХ – целевые характеристики; ЛПР – лицо, принимающее решение; ГЖП – газожидкостный поток.



Рисунок 1.12 – Функциональная диаграмма IDEF0 методологии оценки характеристик газожидкостного потока в режиме реального времени

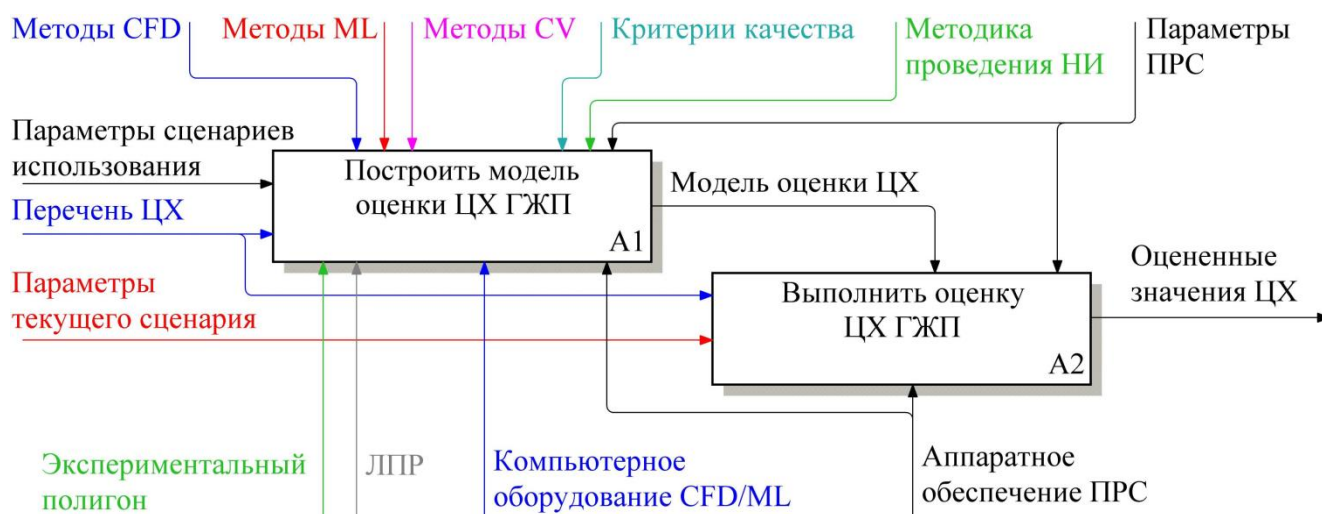


Рисунок 1.13 – Функциональная диаграмма IDEF0 методологии оценки характеристик газожидкостного потока в режиме реального времени

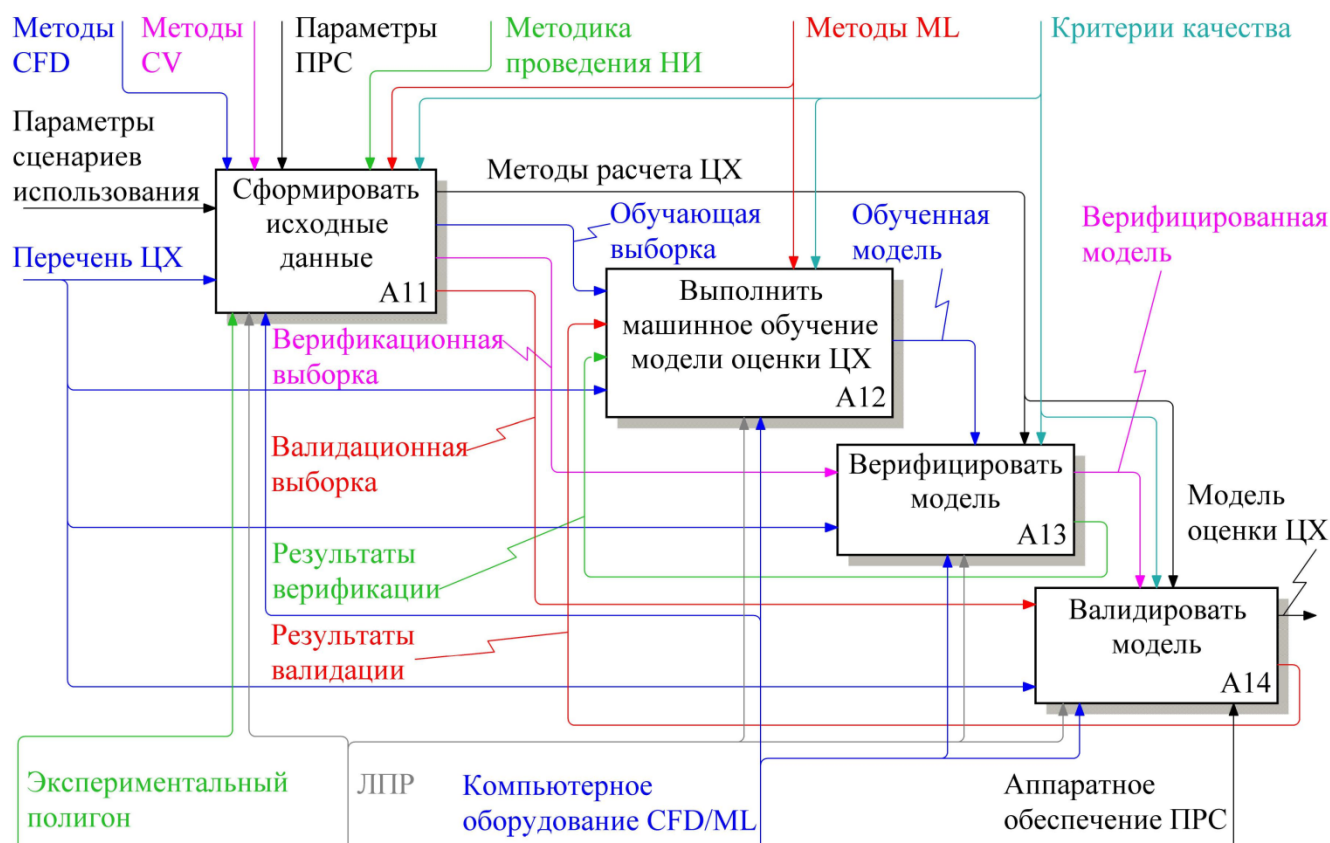


Рисунок 1.14 – Функциональная диаграмма IDEF0 декомпозиции задачи построения модели оценки характеристик газожидкостного потока в режиме реального времени

Формирование исходных данных (рисунок 1.14, блок A11) производится на основе сценариев использования исследуемого объекта, которые в рамках прикладной области настоящего исследования (управление противопожарными роботизированными системами) описываются совокупностью следующих параметров:

- диапазон температур окружающего воздуха (T);
- диапазон углов направления (γ) и скоростей (v_B) ветровой нагрузки;
- диапазон углов возвышения выходного патрубка ствола пожарного робота (α);
- диапазон фактического расхода огнетушащего вещества (q_0) или диапазоны устанавливаемых расходов огнетушащего вещества и рабочих давлений [10].

На рисунке 1.15 приведена функциональная диаграмма IDEF0 декомпозиции задачи формирования исходных данных (рисунок 1.14, блок A11) для машинного обучения, верификации и валидации модели оценки характеристик газожидкостного потока в режиме реального времени.

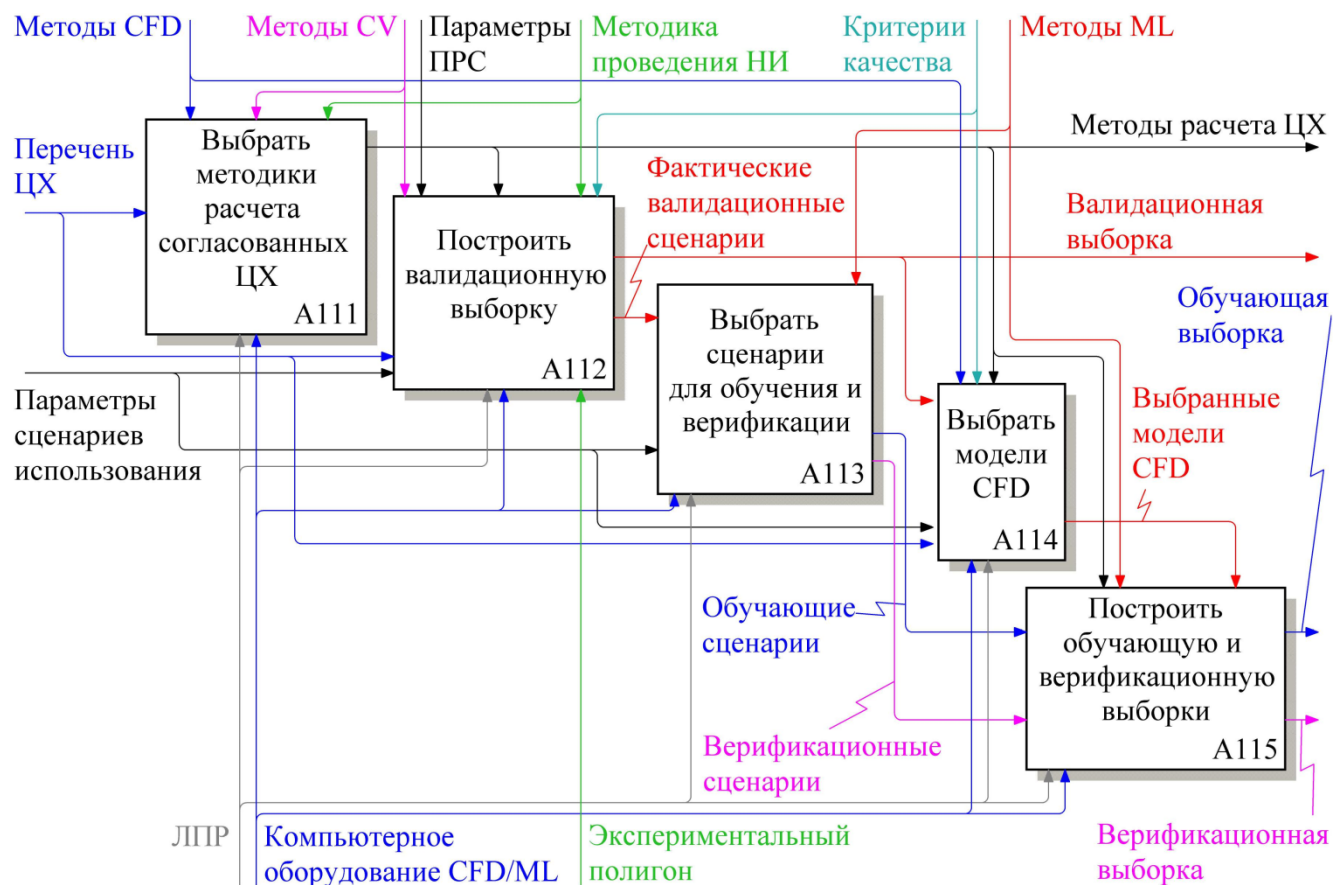


Рисунок 1.15 – Функциональная диаграмма IDEF0 декомпозиции задачи формирования исходных данных для машинного обучения, верификации и валидации модели оценки характеристик газожидкостного потока в режиме реального времени

С учетом указанных выше параметров производится выбор наборов сценариев для машинного обучения, верификации и валидации расчетной модели оценки характеристик газожидкостных потоков, исходя из следующих принципов:

– наборы обучающих и верификационных сценариев не должны пересекаться, т.е. сценарии, которые используются для проверки адекватности

построенной модели относительно результатов, полученных на основе методов вычислительной гидродинамики (верификации), не участвуют в ее обучении;

- наборы обучающих и валидационных сценариев также не должны пересекаться, т.е. сценарии, которые используются для проверки адекватности построенной модели относительно результатов, полученных на основе натурных испытаний (валидации), не участвуют в ее обучении;

- границы диапазонов значений основных параметров набора для обучения должны соответствовать сценариям использования исследуемых противопожарных роботизированных систем;

- 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 1.15, блок A115) с использованием методов вычислительной гидродинамики движения огнетушащего вещества, а также экспериментальная (валидационная) – по результатам натурных испытаний (рисунок 1.15, блок A112). Каждая такая выборка представляет собой множество данных, описывающих целевые характеристики газожидкостных потоков при различных значениях основных физических параметров. Среди характеристик, представляющих наибольший интерес в исследуемой прикладной области, можно выделить: высоту, дальность, верхнюю границу (траекторию движения точек переднего фронта) струи огнетушащего вещества, размеры пятна контакта, смещение пятна контакта (рисунок 1.16).

Результаты моделирования движения газожидкостного потока с использованием методов вычислительной гидродинамики представляют собой большой массив данных, состоящий из множества физических параметров (координаты, векторы скорости, плотность, объемная доля вещества и т.д.) в различных точках трехмерного пространства и моментах времени.

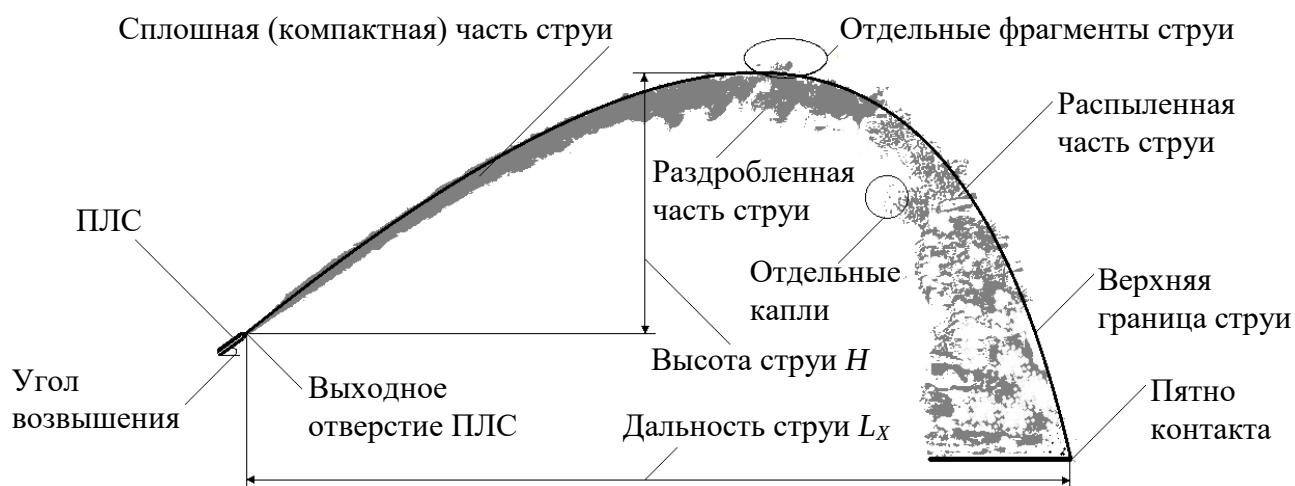


Рисунок 1.16 – Схема потока огнетушащего вещества из ствола
противопожарной роботизированной системы

Для формирования обучающих и верификационных выборок на базе указанных массивов (рисунок 1.15, блок A115), а также валидации используемых моделей применяется согласование целевых характеристик (рисунок 1.15, 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 диссертации.

Машинное обучение расчетной модели (рисунок 1.14, блок A12) выполняется на основе построенной обучающей выборки, а ее верификация (рисунок 1.14, блок A13) заключается в оценке точности вычисления целевых характеристик газожидкостного потока относительно соответствующих параметров, полученных по результатам моделирования с использованием методов вычислительной гидродинамики при различных сценариях (верификационная выборка). Валидация (рисунок 1.14, блок A14) производится аналогичным образом, но при этом задействуются результаты натурных испытаний (валидационная выборка). В случае получения неудовлетворительных показателей качества (в частности, значений среднеквадратических отклонений) выполняется повторное машинное обучение модели с другими настроечными параметрами.

Разработка методов и алгоритмов, реализующих основные блоки функциональных диаграмм предлагаемой методологии оценки характеристик газожидкостных потоков в режиме реального времени представлена в следующих главах.

1.3 Выводы по главе 1

В ходе проведенного исследования, которому посвящена первая глава, были получены следующие результаты и выводы:

1) Показано, что газожидкостные потоки, находящиеся под влиянием турбулентности и возмущающих воздействий являются сложными объектами с точки зрения: теоретического описания (отсутствуют точные и быстродействующие модели, описывающие их характеристики в зависимости от влияния различных факторов), экспериментального изучения (сложность получения экспериментальных данных, описывающих их поведение в широком диапазоне воздействующих факторов), численного моделирования (высокая вычислительная сложность моделей, большое время расчета, проблемы согласования характеристик газожидкостных потоков, определяемых по результатам эксперимента и моделирования, необходимого для валидации моделей), что может делать неэффективными существующие методы оценки их целевых характеристик.

2) С учетом выявленных проблем предложена методология оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах в режиме реального времени. Ее основу составляют методы машинного обучения, вычислительной гидродинамики и натурных испытаний. Отличием методологии от существующих в данной прикладной области является:

– использование машинного обучения для построения модели для оценки целевых характеристик, обеспечивающей требуемую скорость и точность вычислений;

- использование методов вычислительной гидродинамики для построения обучающих и верификационных выборок в требуемых диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий;

- использование результатов натурных испытаний для выбора и настройки расчетных моделей, а также построения валидационных выборок;

- использование согласования характеристик газожидкостных потоков, определяемых по результатам эксперимента и моделирования, для обоснованного применения методов вычислительной гидродинамики с целью формирования обучающих и верификационных выборок.

Предложенная методология позволяет применять обученную на основе указанных выборок модель для повышения скорости и точности расчета характеристик в противопожарных роботизированных системах.

ГЛАВА 2. ПОСТРОЕНИЕ ВАЛИДАЦИОННЫХ ВЫБОРОК НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Глава посвящена разработке методов и алгоритмов построения экспериментальных валидационных выборок, описывающих целевые характеристики газожидкостных потоков из лафетных стволов, которые являются исполнительными устройствами пожарных роботов. Разработана соответствующая методика проведения натурных испытаний, позволяющая с высоким пространственным разрешением оценивать характеристики струй огнетушащего вещества, имеющих значительные геометрические размеры и находящихся под возмущающими воздействиями. Представлен метод и его алгоритмическая реализация для выделения границ струи огнетушащего вещества на цифровых изображениях с учетом особенностей исследуемых потоков, которые снижают эффективность существующих в этой прикладной области подходов. Разработан алгоритм, предназначенный для трехмерной реконструкции траектории струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола по результатам натурных испытаний с учетом характерных особенностей исследуемых потоковых процессов, затрудняющих применение существующих методов фотограмметрии для построения их моделей. Приведены результаты апробации.

2.1 Обзор методов трехмерной реконструкции объектов

В настоящее время для трехмерной реконструкции различных объектов применяются следующие методы:

- 1) Методы фотограмметрии, в основе которых лежит принцип восстановления трехмерной геометрии по множеству двумерных фотографий объекта, сделанных с разных ракурсов [133], с использованием анализа параллакса и сопоставления общих точек на изображениях.

Примеры реализаций: SfM (Structure from Motion) [154] – восстановление структуры сцены, объекта и траектории движения камеры на основе видеопотока, MVS (Multi-view Stereo) уточнение геометрии по результатам SfM и пр.

Оборудование: цифровые камеры (в т.ч. и смартфоны с камерами высокого разрешения), калибровочные мишени, световые установки [154].

Программное обеспечение: Agisoft Metashape [171], RealityCapture [88], Pix4D [103] (коммерческое), COLMAP [68], Meshroom [81], OpenMVG + OpenMVS [37] (открытое), библиотеки OpenCV [191] и др.

Преимущества: относительно низкая стоимость, подходит для объектов различного масштаба.

Недостатки: необходимость хорошего освещения, снижение эффективности на однородных, прозрачных и полупрозрачных объектах, к которым относятся потоки огнетушащего вещества.

2) Метод структурированной подсветки, которая заключается в проецировании известного светового паттерна на объект и анализ искажения этого паттерна для расчета геометрии [122].

Примеры реализации: линейно-полосная подсветка (фазовый сдвиг полос) [132], цифровая обработка полос (FTP) (анализ частотных характеристик) [184], временное и пространственное модулирование [83] и пр.

Оборудование: DLP/LCD проекторы с высокой частотой обновления, высокоскоростные синхронизированные камеры, системы GOM ATOS [138] и др.

Программное обеспечение: специализированные приложения производителей систем.

Преимущества: высокая точность, скорость сканирования.

Недостатки: чувствительность к внешнему свету, ограниченный рабочий объем, что не позволяет выбирать данный подход для объектов значительных геометрических размеров, в частности струй огнетушащего вещества.

3) Методы лазерного сканирования, опирающиеся на различные технологические решения:

– лидары (измерение расстояния по времени движения луча (ToF – Time of Flight) [38] или фазовому сдвигу [132]).

Примеры реализации: наземные стационарные лазерные сканеры (TLS) [155], воздушные лидары, в частности установленные на БПЛА [124], наземные мобильные системы, портативные на базе смартфонов с лидарами, GeoSLAM [75].

– триангуляционные сканеры [77] (расчет геометрии на основе треугольников, образованных лазерным лучом, точками поверхности объекта и изображений камеры).

Оборудование: стационарные (Kreon, Hexagon), ручные (Artec Eva, Shining 3D) сканеры.

Преимущества: высокая скорость и точность, работа в сложных условиях освещения.

Недостатки: высокая стоимость оборудования, низкая эффективность на прозрачных и полупрозрачных объектах.

Среди прочих методов можно выделить: томографические [47] (компьютерная томография, оптическая когерентная томография), контактные [78] (координатно-измерительные машины), которые также неэффективны для трехмерной реконструкции струй огнетушащего вещества из-за рассмотренных ранее особенностей исследуемых газожидкостных потоков.

В таблице 2.1 приведены основные характеристики перечисленных методов трехмерной реконструкции.

Актуальные тенденции развития методов трехмерной реконструкции различных объектов заключаются в создании гибридных систем, использовании нейросетевых подходов, облачных вычислений для увеличения эффективности обработки больших объемов данных, интеграции в портативные устройства для повышения мобильности.

Таблица 2.1 – Основные характеристики методов трехмерной реконструкции различных объектов

Метод	Точность	Скорость	Стоимость	Типичное применение
Фотограмметрия	Высокая	Средняя	Низкая	Археология, картография, компьютерное зрение
Структурированная подсветка	Высокая	Высокая	Средняя, высокая	Обратное проектирование, контроль качества
Лазерное сканирование	Высокая	Очень высокая	Высокая	Строительство, топография, инженерия
Томографические	Высокая	Низкая	Очень высокая	Медицина, материаловедение, электроника
Контактные	Высокая	Низкая	Высокая	Прецизионное производство, эталонирование

Как было указано выше, исследуемые в данной работе газожидкостные потоки имеют ряд особенностей, которые могут снижать эффективность существующих методов трехмерной реконструкции. Поэтому построение моделей подобных объектов в различных прикладных областях выполняется посредством представленных ниже подходов.

1) Гибридное лазерное сканирование с использованием трассеров [189] (введение в газожидкостный поток трассирующих частиц, в частности флуоресцентных или светоотражающих, которые отслеживаются сканирующей системой).

Примеры реализации: планарная лазерно-индуцированная флуоресценция (PLIF: последовательные сечения потока лазерной плоскостью; фиксация свечения флуоресцентного красителя высокоскоростной камерой; формирование трехмерной структуры в виде совокупности срезов) [189], стерео PIV (Particle Image Velocimetry: в исследуемый поток добавляются микрочастицы, движение которых отслеживается синхронизированными высокоскоростными камерами, по смещению частиц оценивается их положение, а также скорость) [45].

Преимущества: высокая точность, возможность оценки структуры и скоростей в различных точках исследуемого газожидкостного потока.

Недостатки: дорогостоящее и сложное лабораторное оборудование, трассеры могут оказывать влияние на динамику потока, изменяя его физические свойства, низкая эффективность на струях значительных геометрических размеров.

2) Многокамерная фотограмметрия с синхронизацией и подсветкой [108] (подсветка исследуемого объекта мощными, в том числе импульсными, источниками света и синхронная съемка с различных ракурсов). Для повышения эффективности применяются контрастный однородный фон (съемка в темноте) и контровое освещение, что позволяет решить проблемы, связанные с прозрачностью струи. Данный подход был использован в рамках предварительных испытаний, результаты которых представлены в первой главе (рисунки 1.4–1.7).

Примеры реализации: специализированное программное обеспечение для фотограмметрии, в том числе свободно распространяемые библиотеки (OpenCV) [191] и т.д.

Преимущества: полноценная трехмерная реконструкция, относительно невысокая стоимость, возможность использования для струй большой дальности.

Недостатки: высокая чувствительность к настройкам освещения и калибровке камер, сложности, связанные с установкой камер для полного охвата струи с различных ракурсов, обработкой полученных данных из-за особенностей динамики исследуемых потоков.

Из прочих гибридных подходов можно выделить: комбинацию структурированной подсветки с высокоскоростной съемкой [118], которая применительно к исследуемым потокам имеет низкую эффективность, т.к. проецируемый паттерн на участках с высокой прозрачностью и мелкодисперсными фрагментами будет не отражаться, а преломляться и рассеиваться, искажая результат; методы на основе оптической томографии [127], которые потребуют создания сложной установки с десятками камер и мощными

алгоритмами реконструкции для быстро меняющегося газожидкостного потока, что сложно реализуемо в полевых условиях; нейросетевые методы (NeRF, Gaussian Splatting) трехмерной реконструкции [147], имеющие потенциально высокую эффективность, однако для их обучения требуются выборки соответствующего объема и качества, построение которых осложняется указанными выше особенностями исследуемого объекта.

Основой многих методов трехмерной реконструкции объектов является выделение на изображениях их границ. Данная операция применительно к полупрозрачным газожидкостным потокам – это сложная задача компьютерного зрения, поскольку такие объекты не имеют собственной текстуры, частично пропускают фон. Традиционные методы поиска перепадов яркости в этом случае зачастую неэффективны, так как граница может быть размытой или иметь низкий контраст. Среди современных подходов к решению указанной задачи можно выделить следующие:

- 1) Классические методы выделения границ (дифференциальные операторы), реализующие поиск перепадов яркости на изображении. Они эффективны для контрастных границ, но плохо работают с полупрозрачными объектами из-за слабого и размытого сигнала на краях. Оператор Шарра [50] основан на оптимизированных ядрах свертки, что обеспечивает лучшую вращательную симметрию и чувствительность к ориентации контуров. Это позволяет находить более мелкие и слабые границы по сравнению с классическим оператором Собеля [95]. Однако из-за повышенной чувствительности требуется тщательная предварительная фильтрация изображения. Градиентный метод [166] предполагает вычисление модуля градиента функции яркости. Для цифрового изображения используются дискретные разности, которые аппроксимируют частные производные. Результирующее изображение имеет повышенную яркость только в точках ее резких перепадов, формируя контуры. Главный недостаток такого подхода – появление разрывов контура, если перепад яркости недостаточно сильный, что является ключевой проблемой для полупрозрачных объектов.

2) Нейросетевые методы: на основе сегментации с добавлением специализированных модулей для обработки границ, например, DeeplabV3+ с модулем сегментации границ (Boundary Segmentation Module) [54]; матирующие методы, предназначенные для выделения прозрачных объектов с четкими границами, TransLab (Boundary-Aware Segmentation) [159], TOM-Net (Transparent Object Matting Network) [82] (обученная нейросеть отделяет объект от фона на основе анализа преломления, в том числе, при сильном искажении изображения заднего плана), UIM (Unified Interactive Image Matting) [177] (сегментация переднего плана с последующим предсказанием прозрачности объекта); трансформерные модели [113], которые анализируют глобальный контекст [210] сцены, что дает возможность адаптировать метод сегментации под исследуемый объект. Указанные подходы демонстрируют высокую точность при выделении контуров прозрачных объектов с четкой границей, в частности различных стеклянных текстур [96]. Однако для струй огнетушащего вещества с переменной прозрачностью данные методы имеют низкую эффективность, в том числе из-за размытых границ в распыленной части.

В таблице 2.2 представлен сравнительный анализ рассмотренных подходов.

Таблица 2.2 – Сравнительный анализ методов выделения границ полупрозрачных объектов

Метод	Принцип действия	Преимущества для полупрозрачных границ	Ограничения
1	2	3	4
Классические (Шарп, градиент)	Сверточный поиск перепадов яркости	Простота, скорость вычислений, хорошая чувствительность оператора Шарпа	Не работают на слабоконтрастных, размытых границах; чувствительны к шуму
Сегментация с улучшением границ (DeeplabV3+)	Двухэтапное обучение: для объекта и границ	Целенаправленное обучение на границах, учет глобального контекста объекта	Требуют размеченных данных с прозрачными объектами

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4
Матирование (UIM, Translab, TOM-Net)	Специализированные подходы с учетом прозрачности объекта	Попиксельная точность, работа с рефракцией света, интерактивность для уточнения результата	Сложные архитектуры, требуют больших вычислительных ресурсов
Трансформерные модели	Моделирование связей между пикселями и контекст сцены	Способность понимать сложную структуру сцены и взаимосвязи на границах	Высокая сложность разработки и внедрения

Как следует из проведенного анализа, существующие методы выделения границ полупрозрачных объектов имеют ряд ограничений критически важных для прикладной области данной работы. Поэтому в рамках диссертационного исследования (параграф 2.2) был разработан метод распознавания траектории движения огнетушащего вещества, учитывающий его особенности, позволяющий с высокой точностью решать поставленную задачу без задействования специализированного оборудования и алгоритмов с высокой вычислительной сложностью.

Из представленных выше методов трехмерной реконструкции наибольший потенциал в прикладной области данной работы имеет многокамерная фотограмметрия с синхронизацией изображений, в том числе включающая контрольную подсветку в сочетании со съемкой в темное время суток.

Однако опыт применения указанного способа в работах [108; 118] ограничивается непрозрачными, неподвижными объектами. Его использование для построения трехмерных моделей струй огнетушащего вещества имеет ряд проблем, которые снижают точность реконструкции (таблица 2.3). Кроме того, применяемые при этом программные реализации соответствующих алгоритмов, являются зарубежными разработками, доступ к которым может быть ограничен.

Таблица 2.3 – Основные проблемы применения многокамерной фотограмметрии для трехмерной реконструкции потоков огнетушащего вещества

Особенности струй огнетушащего вещества	Проблемы	Решение в рамках существующих подходов	Предлагаемое решение
Различная оптическая плотность струи на разных ее участках	Некорректное выделение границ	Отсутствует	Применение для выделения границ разработанного и описанного в параграфе 2.2 метода с использованием предварительной обработки (для повышения различимости границ), системы полярных координат (для повышения разрешающей способности алгоритма и снижения влияния разрывов границ), постобработки (для снижения влияния разрывов границ).
Слабая различимость струи на близком по яркости и цвету фоне		Контрольная подсветка (эффективна только в темное время суток)	
Разрывы границ струи из-за ее распада		Отсутствует	
Переменная форма границ струи	Некорректное выделение сопряженных (особых) точек		Совместное применение разработанного метода для выделения границ (параграф 2.2) и алгоритма трехмерной реконструкции (параграф 2.4) с использованием итеративного (последовательного) построения модели траектории с учетом формы струи и положения ее соседних точек относительно камер, расставленных согласно разработанной методике проведения натурных испытаний (параграф 2.3)
Зависимость оптической плотности одного и того же фрагмента струи от ракурса съемки			
Значительные размеры струи	Снижение разрешения исходных изображений	Использование дополнительных камер, что может усложнить процесс реконструкции	Совместное применение разработанной методики проведения натурных испытаний с многокамерной съемкой струи (параграф 2.3), метода выделения границ (параграф 2.2) и алгоритма трехмерной реконструкции (параграф 2.4)

Поэтому в рамках настоящего исследования были разработаны методы и алгоритмы трехмерной реконструкции газожидкостного потока [206; 216; 221] с учетом выявленных проблем (таблица 2.3), а также их программные реализации, которые направлены на импортозамещение существующего в данной области программного обеспечения [230; 231]. Получаемые на их основе данные могут служить для: измерения параметров струй огнетушащего вещества по результатам натурных испытаний ствольной пожарной техники, валидации моделей вычислительной гидродинамики, а также обучения нейросетевых моделей, применяемых для оценки характеристик соответствующих потоковых процессов, разработки и отладки алгоритмов управления ими, в частности на базе противопожарных роботизированных систем.

2.2 Упрощенная технология распознавания траектории струи огнетушащего вещества без учета ветра по результатам натурных испытаний

Оценка различных параметров струй ствольной пожарной техники осуществляется, как правило, на основе натурных испытаний [9]. При этом определение положения в пространстве точек, находящихся на траектории движения, на основе инструментальных измерений представляет собой довольно сложную проблему. Поэтому, обычно, оценивается дальность струи по крайним каплям, которые лежат на одной горизонтальной плоскости с испытываемым стволом, при определенных углах возвышения ствола [25].

Однако, как показано выше, для решения некоторых задач наведения ствольной техники может потребоваться информация о траектории движения огнетушащего вещества в каждой ее точке, например, расстановка пожарных лафетных стволов, в т.ч. роботизированных, на объектах со сложной геометрией, защищаемые поверхности которых находятся на различных вертикальных отметках, разработка и отладка алгоритмов автоматического управления пожарными роботами и т.д. Дополнительная сложность заключается в том, что исследуемые явления могут иметь значительные линейные размеры, в частности,

высота и дальность струи из пожарных лафетных стволов измеряются в десятках метров.

Одним из способов решения указанной проблемы является оценка требуемых параметров исследуемых потоковых процессов на основе распознавания их цифровых изображений, получаемых в результате натурных испытаний [245]. При этом могут возникать дополнительные задачи, связанные с геометрическими искажениями [199], «зашумлением» струи распылёнными фрагментами огнетушащего вещества или внешними объектами, ее слабой различимостью, например, на фоне неба и т.д. В данном параграфе рассмотрена технология, разработанная для высокоточного распознавания траектории струи на основе ее цифровых изображений [246], полученных в условиях, при которых основной поток огнетушащего вещества движется в одной вертикальной плоскости без существенных отклонений от нее, что соответствует безветренной погоде или небольшой скорости ветра [224]. При этом учитывается негативное влияние факторов, характерных для соответствующих натурных испытаний: перспективные искажения, наложение на изображение струи внешних объектов, распад струи в результате движения и пр.

Функциональная диаграмма предлагаемой технологии распознавания траектории струи по результатам натурного эксперимента представлена на рисунке 2.1.

Калибровка (рисунок 2.1, блок А1) внутренних параметров применяемой камеры по методу Жанга [196] заключается в построении на основе множества тестовых снимков в различных ракурсах калибровочных маркеров матрицы вида:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

где f_x , f_y – фокусные расстояния соответственно в горизонтальной и вертикальной осях изображения [196];

c_x , c_y – координаты главной точки [196];

γ – коэффициент асимметрии изображения.

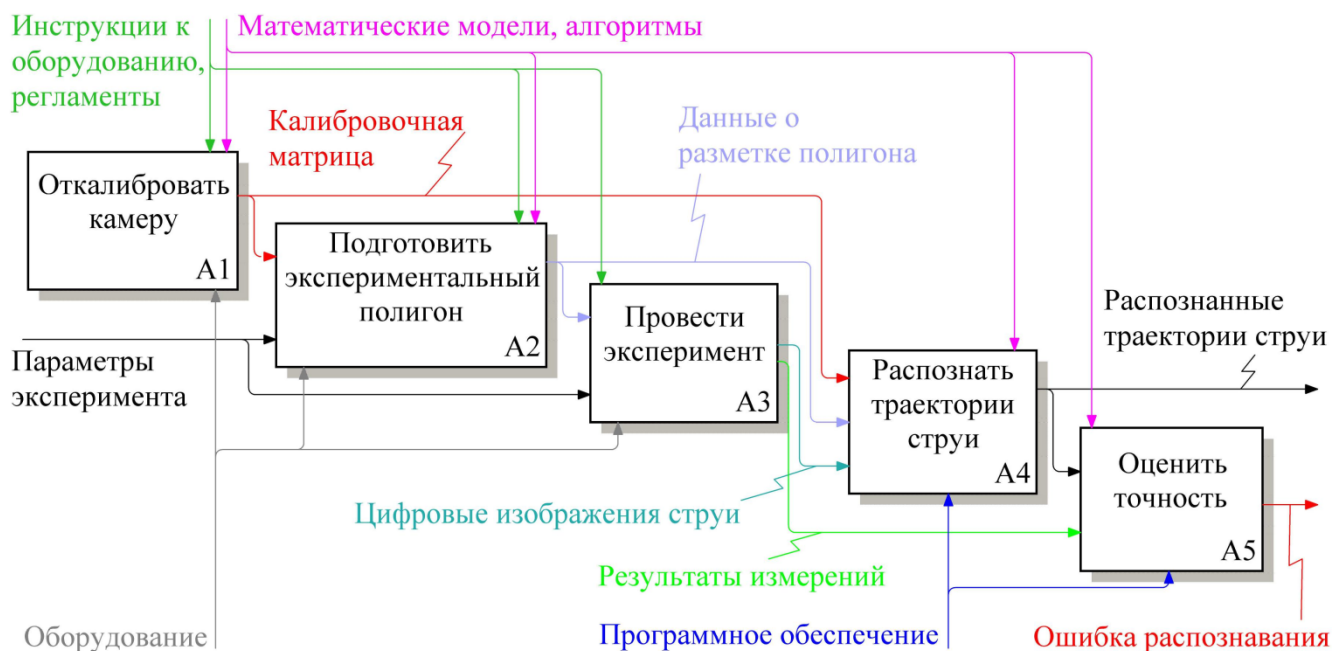


Рисунок 2.1 – Функциональная диаграмма IDEF0 технологии распознавания траектории струи по результатам натурного эксперимента

Указанные параметры рассчитываются путем решения системы уравнений, построенной на основе тестовых снимков согласно [196]. Для калибровки камеры существуют готовые решения, в частности, библиотека OpenCV [191].

В случае, если возможность калибровки камеры отсутствует, то можно использовать матрицу для упрощенной модели, в которой принимаются следующие значения параметров: $f_x = f_y = f$, $c_x = c_y = 0$, $\gamma = 0$:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

где f – фокусное расстояние используемого объектива, м.

Результаты калибровки камеры в рамках данной технологии служат для распознавания струй на полученных цифровых снимках. Кроме того, она может применяться для предварительного определения положения камеры на полигоне так, чтобы обеспечить попадание всей траектории основного потока огнетушащего вещества в область изображения при различных дальностях и высотах струи.

Подготовка экспериментального полигона (рисунок 2.1, блок А2) заключается в его разметке и расстановке оборудования и вспомогательных приспособлений так, чтобы обеспечить высокую точность результатов исследования с учетом влияния различных факторов: перспективные искажения, перепад высот на поверхности полигона и т.д.

Проведение эксперимента (рисунок 2.1, блок А3) заключается в запуске струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола при заданных углах возвышения выходного патрубка с фото и, при необходимости, видеофиксацией получаемой траектории на цифровую камеру с известной калибровочной матрицей K . Стоит отметить, что при наличии соответствующей технической возможности целесообразно проводить эксперимент в темное время суток с подсветкой струи прожекторами [224] для формирования ее четкой границы за счет существенного перепада яркостей между огнетушащим веществом и неосвещенным окружающим пространством (рисунки 1.4–1.7).

Распознавание траектории струи по результатам натурного эксперимента (рисунок 2.1, блок А4) на основе полученных цифровых изображений при различных углах возвышения выходного патрубка в рамках разработанной технологии заключается в определении геометрического положения верхней и нижней границы движущегося огнетушащего вещества относительно пожарного лафетного ствола.

Оценка точности распознавания (рисунок 2.1, блок А5) производится путем сравнения таких параметров, как дальность и высота струи, полученных по результатам прямых измерений во время проведения эксперимента, а также рассчитанных с использованием восстановленной по цифровым изображениям траектории.

Общая схема экспериментального полигона представлена на рисунке 2.2.

Обозначения на рисунке 2.2:

X , Y , Z – координатные оси полигона: ось OX – совпадает с горизонтальной проекцией выходного патрубка пожарного ствола, ось OY – вертикальная ось, ось OZ – горизонтальная ось перпендикулярная OX и OY .

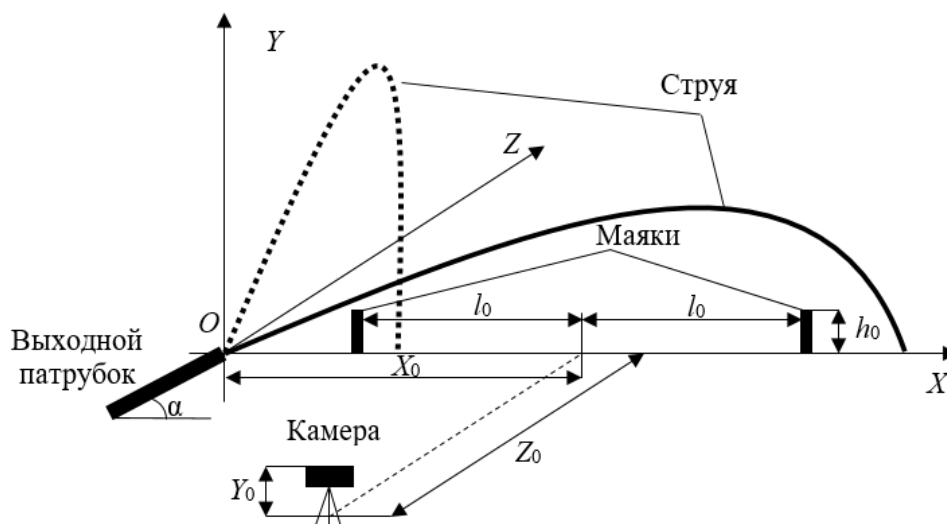


Рисунок 2.2 – Схема экспериментального полигона

O – начало координат в системе полигона, совпадает с центром выходного отверстия ствола (истока струи). Следует отметить, что в зависимости от угла возвышения выходного патрубка начало координат будет смещаться относительно полигона, однако из-за незначительных размеров лафетного ствола эти изменения являются несущественными. Такое положение начала координат выбрано исходя из удобства последующей обработки результатов натурных испытаний.

Выходной патрубок – выходной патрубок исследуемого пожарного лафетного ствола.

α – угол возвышения выходного патрубка (угол между его осью и OX).

Маяки – вертикальные объекты, предназначенные для регулировки поворота камеры относительно оси OY . Маяки располагаются на оси OX так, чтобы их вершины находились на одной горизонтальной линии.

Камера – цифровая камера, на которую записываются фото или видеоизображения струй из исследуемого пожарного лафетного ствола. Устанавливается на штатив, позволяющий отрегулировать и зафиксировать ее положение и ориентацию на время проведения эксперимента.

X_0 , Y_0 , Z_0 – координаты камеры, соответствующие центру ее матрицы (положению начала координат плоскости получаемых изображений в координатной системе экспериментального полигона). X_0 и Y_0 определяются по

оптической оси объектива камеры, Z_0 – по соответствующей отметке на камере (при ее наличии) или центру ее корпуса. Погрешности в пределах 0.1 м при оценке координат центра матрицы, учитывая линейные размеры исследуемых струй и полигона, не являются критичными для точности измеряемых по результатам эксперимента параметров.

l_0, h_0 – соответственно расстояние от проекции положения камеры на ось OX (координата X_0) до маяков и их высота относительно начала координат.

Наиболее предпочтительной с точки зрения последующей обработки результатов эксперимента является такая ориентации камеры, при которой нормаль к плоскости ее матрицы имеет координаты $[0, 0, 1]$, углы поворота матрицы относительно координатных осей OX, OY, OZ равны нулю, а ее плоскость параллельна плоскости XOY . При соблюдении данных условий перспективные искажения на получаемых цифровых снимках минимальны, а потому преобразование координат точек, образующих траекторию струи, из системы плоскости изображения в систему полигона тривиально и заключается в их масштабировании и линейном смещении.

Однако такая ориентация камеры на практике не всегда реализуема. В частности, если регулировку наклона камеры по горизонтали (относительно осей OX и OZ) можно выполнить с контролем соответствующих углов при помощи встроенных функций камеры или внешнего оборудования (угломер, лазерный уровень, пузырьковый уровень штатива и т.д.), то установить нулевой угол поворота относительно оси OY существенно сложнее.

Для решения этой задачи можно задействовать маяки (рисунок 2.2), которые расположены в плоскости XOY на одинаковом расстоянии относительно оптической оси объектива. Камера ориентируется так, чтобы верхние концы маяков на изображении находились на одной горизонтальной линии. Однако во время проведения натурных испытаний пожарных лафетных стволов в большом диапазоне изменения углов возвышения выходного патрубка для того, чтобы обеспечить попадание всей траектории основного потока огнетушащего вещества в область изображения камеры, может потребоваться изменение ее наклона

относительно оси OX (высокие струи) или OY (струи с высокой дальностью). Предлагаемая технология учитывает возможные отклонения ориентации камеры от вектора $[0, 0, 1]$ в системе координат экспериментального полигона.

Функциональная диаграмма метода распознавания траектории струи (рисунок 2.1, блок А4) на основе цифровых изображений представлена на рисунке 2.3.

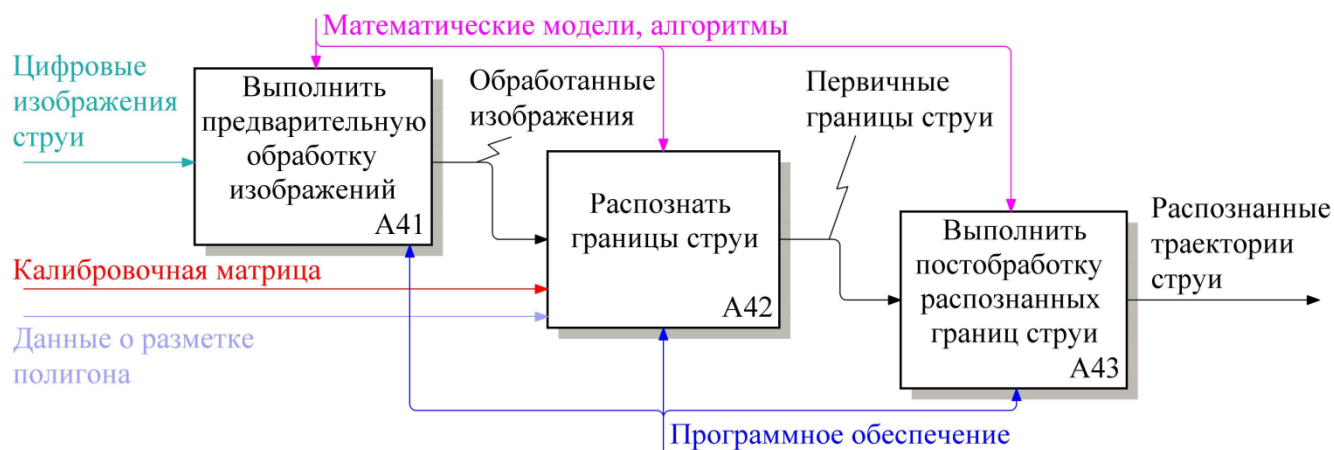


Рисунок 2.3 – Функциональная диаграмма IDEF0 метода распознавания траектории струи на основе цифровых изображений

Предварительная обработка изображений (рисунок 2.3, блок А41), которая предназначена для устранения дисторсии и выделения контуров струи за счет формирования существенного перепада яркостей на ее границах, производится на основе следующих преобразований:

1) Устранение дисторсии (искривления прямых линий оптической системой объектива фотокамеры). Осуществляется по тестовому снимку равномерной прямоугольной сетки, в соответствии с которым выполняется коррекция изображения [126]. Если объектив камеры не имеет выраженной дисторсии, данная операция пропускается.

2) Первичная коррекция яркостей [134], которая заключается в затемнении областей изображения максимально близких к абсолютно белым – (255, 255, 255) в цветовой модели RGB, для предотвращения потери деталей в них при последующих преобразованиях.

3) Коррекция локального контраста [175], которая заключается в его повышении в отдельных диапазонах яркостей: высоких, средних и, при необходимости, низких.

4) Коррекция глобального контраста [175], которая заключается в значительном снижении яркости (до абсолютно черного цвета – (0, 0, 0) в цветовой модели RGB) темных областей изображения и повышении (до абсолютно белого цвета) – светлых областей.

Основная цель данных преобразований – выделение контуров струи за счет формирования существенного скачка яркостей на ее границах. При проведении натурных испытаний в темное время суток можно использовать прожекторы [224] для обеспечения соответствующего перепада между неосвещенным окружающим пространством и рассеиваемой огнетушащим веществом подсветкой (рисунки 1.4–1.7). В сложных с точки зрения выделения струи случаях возможно итеративное повторение перечисленных выше операций. Настройка параметров каждого из этапов коррекции изображений огнетушащего вещества, полученных в рамках экспериментов, условия которых (освещение, расположение пожарного ствола, камеры и т.д.) существенно не изменялись, может производиться однократно и служить для обработки соответствующих результатов в пакетном режиме. Для автоматической подстройки параметров каждого из этапов коррекции под особенности обрабатываемых изображений используется машинное обучение.

Распознавание границ струи огнетушащего вещества (рисунок 2.3, блок А42) на основе предлагаемой технологии реализуется последовательным решением следующих задач:

1) Выделение изображения огнетушащего вещества в виде множества точек на основе соответствующего диапазона цветов, а также перепада яркостей на границе потока жидкости.

2) Выделение первичных контуров границы струи. Производится по крайним точкам в различных сечениях потока огнетушащего вещества [247].

При этом, выбор метода формирования сечений, полностью перекрывающих траекторию движения жидкости, во многом определяет качество полученного результата. Так наиболее простым способом выделения первичных контуров верхней и нижней границ на основе множества точек струи потока огнетушащего вещества, двигающегося в одной плоскости, является перебор по прямоугольной координатной сетке: ось OX – горизонтальная, ось OY – вертикальная. Для каждого значения абсциссы в диапазоне дальности струи определяется ее точка с максимальной и минимальной ординатами. Множества точек, полученных перебором таких сечений вдоль горизонтальной оси, представляют собой контуры соответственно верхней и нижней границ.

Однако, данный способ имеет существенный недостаток. На излете поток огнетушащего вещества имеет низкую горизонтальную скорость, за счет чего траектория его движения в этой области, особенно при больших углах возвышения выходного патрубка лафетного ствола, близка к вертикальной. Пространственное разрешение метода выделения контуров границ с помощью прямоугольной сетки в данном случае будет невысоким. Кроме того, этот подход, как будет продемонстрировано ниже, чувствителен к существенным отклонениям фрагментов огнетушащего вещества, распыленного в результате движения, от основного потока, формирующего траекторию струи.

Поэтому в рамках предлагаемой технологии используется метод формирования сечений в полярной системе координат, алгоритм которого представлен в параграфе 2.2.1.

3) Обратное перспективное преобразование выделенных контуров границы струи согласно методу, описанному в параграфе 2.2.2.

Постобработка распознанной траектории струи (рисунок 2.3, блок А43) выполняется путем последовательного решения следующих задач:

1) Коррекция первичных контуров верхней и нижней границ: удаление точек, находящихся на значительном расстоянии от соседних, заполнение существенных разрывов на основе интерполяции [62] и т.д.

2) Сглаживание скорректированных контуров границ. Из-за особенностей формирования и движения потока огнетушащего вещества, а также возможного зашумления изображения струи внешними объектами или фрагментами ее распыленной части соответствующая траектория имеет изломанный вид, затрудняющий восприятие, хранение и анализ полученных результатов. Для решения данных проблем в предлагаемом методе применяется сглаживание посредством фильтров Савицкого – Голея [153]:

$$p_i^s = \sum_{j=-n/2}^{n/2} b_j(n, m) \cdot p_{i+j}, \quad i = 1..N, \quad (2.3)$$

где p^s, p – координаты соответственно сглаженных и несглаженных границ;

n, m – соответственно ширина окна и степень аппроксимирующего полинома фильтра [153];

b_j – коэффициенты фильтра [153], которые определяются на основе метода наименьших квадратов;

N – количество точек сглаживаемой кривой.

В рамках данного исследования для решения проблемы значений сглаживаемой последовательности, выходящих за пределы симметричного окна ($N - n / 2 < i \leq n / 2$), применяется модификация фильтра на основе интерполяции с подстройкой аппроксимирующего полинома к доступным точкам кривой. При этом, для того, чтобы обеспечить совпадение сглаженных границ с исходными в начальной точке струи (выходное отверстия ствола) в методе наименьших квадратов используются повышающие веса для соответствующих крайних значений [153].

2.2.1 Алгоритм первичного выделения контуров границ потока огнетушащего вещества

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке А.1 (приложение А). Поясняющая схема к алгоритму приведена на рисунке 2.4.

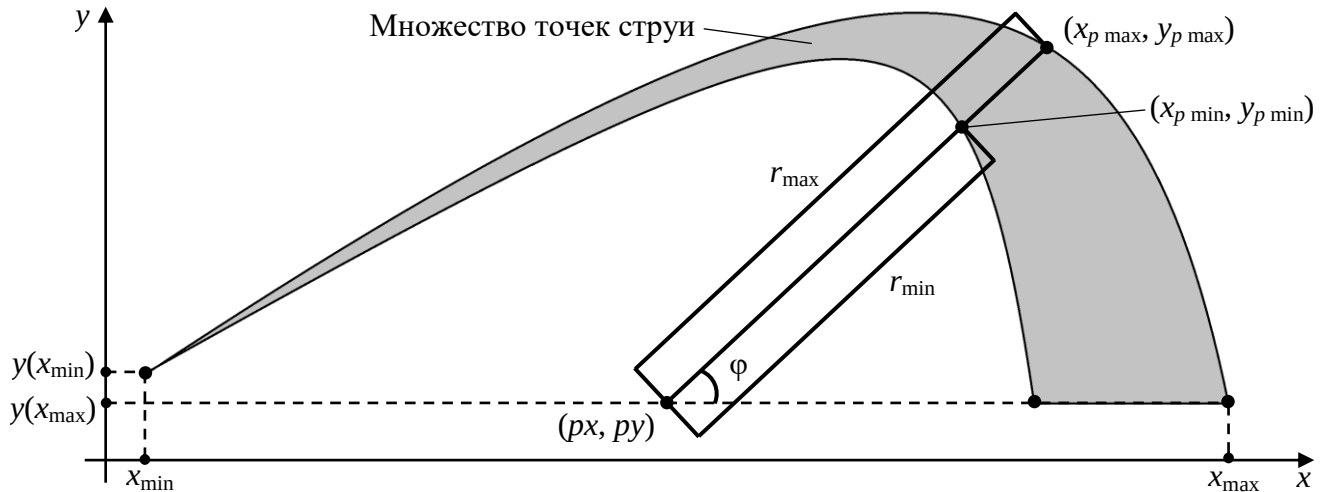


Рисунок 2.4 – Поясняющая схема к алгоритму первичного выделения контуров границ газожидкостного потока

Входные данные:

- Массивы координат множества точек изображения газожидкостного потока: x, y .
- Разрешающая способность алгоритма по полярному углу: $\Delta\varphi$.
- Разрешающая способность алгоритма по полярному радиусу: Δr .
- Предельно допустимое увеличение полярного радиуса между соседними точками изображения границы газожидкостного потока: ΔR .

Выходные данные:

- Массивы координат точек верхней и нижней границ изображения газожидкостного потока: x_u, y_u, x_d, y_d .

Шаг 1. Сброс массивов координат точек верхней и нижней границ изображения газожидкостного потока: x_u, y_u, x_d, y_d .

Шаг 2. Определение положения центра полярной системы координат (рисунок 2.4):

$$p_x = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}, \quad p_y = \min(y). \quad (2.4)$$

Шаг 3. Расчет пределов изменения полярного угла и радиуса, охватывающих изображение газожидкостного потока:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \arccos \left(\frac{x_{\min} - px}{\sqrt{(x_{\min} - px)^2 + (y(x_{\min}) - py)^2}} \right), \\ \varphi_2 &= \arccos \left(\frac{x_{\max} - px}{\sqrt{(x_{\max} - px)^2 + (y(x_{\max}) - py)^2}} \right).\end{aligned}\quad (2.5)$$

$$r_1 = \min \left(\sqrt{(x - px)^2 + (y - py)^2} \right), \quad r_2 = \max \left(\sqrt{(x - px)^2 + (y - py)^2} \right). \quad (2.6)$$

Шаг 4. Начало цикла по полярным углам: $\varphi = \varphi_1$.

Шаг 5. Вычисление параметров уравнения линии сечения $A \cdot x + B \cdot y + C = 0$:

$$A = -\sin(\varphi), \quad B = \cos(\varphi), \quad C = -(A \cdot px + B \cdot py). \quad (2.7)$$

Шаг 6. Вычисление расстояний от точек изображения потока огнетушащего вещества до линии сечения:

$$d(x, y) = |A \cdot x + B \cdot y + C|. \quad (2.8)$$

Шаг 7. Заполнение массивов точек, лежащих в окрестностях линии сечения:

$$(xs, ys) = (x, y) : dx(x, y) \leq \Delta r.$$

Шаг 8. Если массивы xs , ys непустые, то определяются радиус-векторы и координаты точек верхней и нижней границ изображения потока огнетушащего вещества в текущем сечении (рисунок 2.4):

$$\begin{aligned}r_{\max} &= \min(r_2, \max(\sqrt{(xs - px)^2 + (ys - py)^2})), \\ r_{\min} &= \max(r_1, \min(\sqrt{(xs - px)^2 + (ys - py)^2})), \\ x_{p\max} &= px + r_{\max} \cdot \cos(\varphi), \\ y_{p\max} &= py + r_{\max} \cdot \sin(\varphi), \\ x_{p\min} &= px + r_{\min} \cdot \cos(\varphi), \\ y_{p\min} &= py + r_{\min} \cdot \sin(\varphi).\end{aligned}\quad (2.9)$$

Координаты точек границ заносятся в массивы xu, yu, xd, yd .

Шаг 9. Вычисление пределов изменения полярного радиуса:

$$r_1 = r_{\min} - \Delta R, \quad r_2 = r_{\max} + \Delta R. \quad (2.10)$$

Шаг 10. Если $\varphi > \varphi_2$, то $\varphi = \varphi - \Delta\varphi$ и переход к шагу 5.

Шаг 11. Алгоритм возвращает массивы с координатами точек изображения первичных верхней и нижней границ газожидкостного потока: x_u, y_u, x_d, y_d .

На рисунке 2.5 представлено сравнение использования для определения верхней границы струи по результатам натурных испытаний, проведенных на экспериментальном полигоне Сибирской пожарной-спасательной академии ГПС МЧС России [29], алгоритмов выделения контуров объекта, реализованных на базе библиотеки OpenCV [191] (предварительная обработка, сложение изображений, вычитание фона и пр.) и разработанного метода. Как следует из рисунка 2.5, алгоритмы, реализованные на базе библиотеки OpenCV, показывают низкую эффективность на распыленной части струи даже при контрольном освещении – распавшиеся фрагменты потока воды плохо выделяются на фоне неба. При этом применение разработанного метода позволило определить верхнюю границу траектории с достаточно высоким качеством.

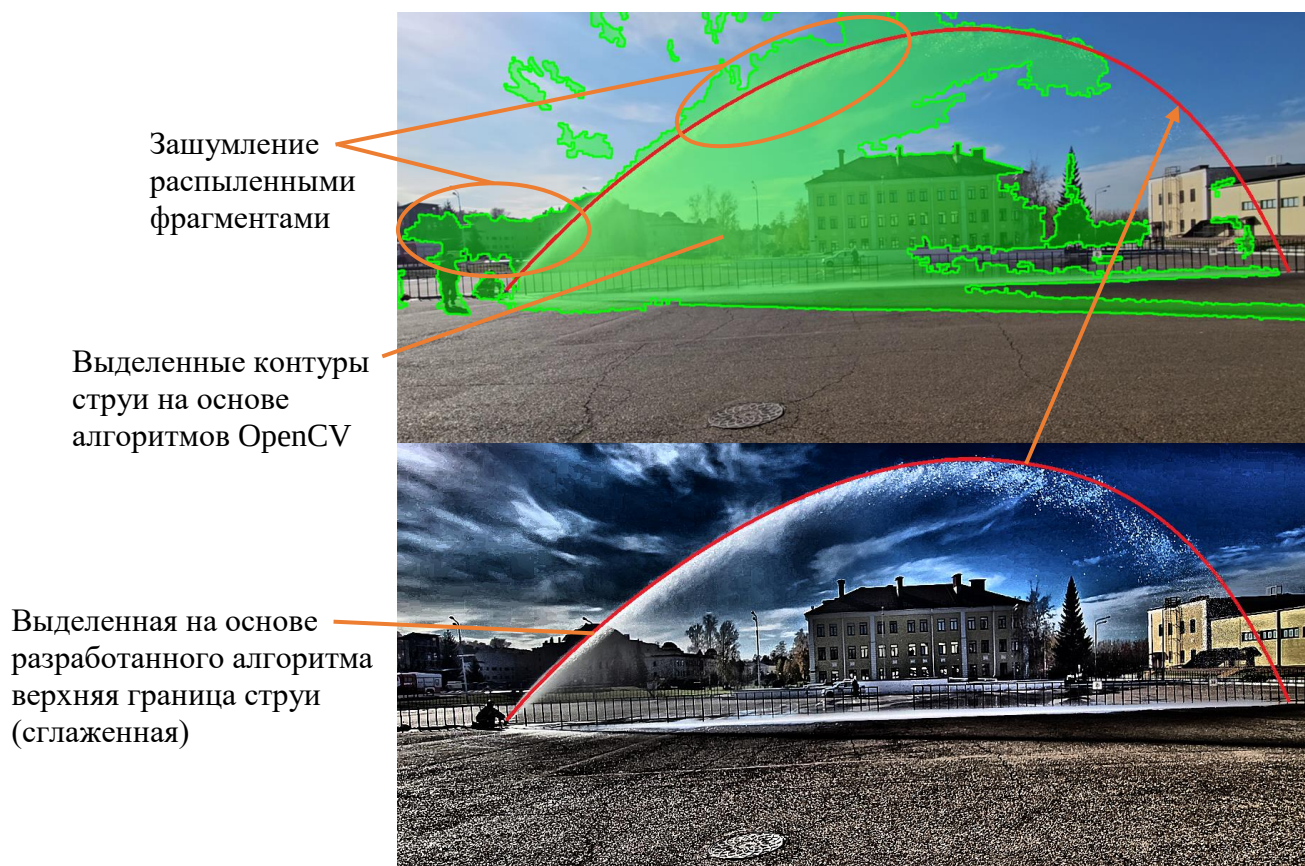


Рисунок 2.5 – Выделение контуров струи на основе алгоритмов OpenCV (сверху) и верхней границы на основе разработанного метода (снизу)

2.2.2 Метод обратного перспективного преобразования

Основу метода перехода от системы координат плоскости изображения к системе координат экспериментального полигона составляет обратное перспективное преобразование, которое имеет вид [197]:

$$P_i = \lambda \cdot Q^{-1} \cdot p_i + t, \quad i = 1..n, \quad (2.11)$$

где $p_i = [x_i \quad y_i \quad 1]^T$ – однородные координаты точек изображения выделенных границ струи;

n – мощность множества точек изображения выделенных границ струи;

$P_i = [X_i \quad Y_i \quad Z_i]^T$ – координаты соответствующих точек границ струи в системе экспериментального полигона;

λ – масштабный коэффициент;

$t = [X_0 \quad Y_0 \quad Z_0]^T$ – матрица перемещения камеры (рисунок 2.2);

$$Q = K \cdot R, \quad (2.12)$$

где K – калибровочная матрица внутренних параметров камеры;

R – матрица вращения камеры:

$$R = R_{OX} \cdot R_{OY} \cdot R_{OZ}, \quad (2.13)$$

где $R_{OX} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_{OX}) & -\sin(\varphi_{OX}) \\ 0 & \sin(\varphi_{OX}) & \cos(\varphi_{OX}) \end{bmatrix}$ – матрица поворота камеры относительно

оси OX на угол φ_{OX} ;

$R_{OY} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{OY}) & 0 & \sin(\varphi_{OY}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi_{OY}) & 0 & \cos(\varphi_{OY}) \end{bmatrix}$ – матрица поворота камеры относительно

оси OY на угол φ_{OY} ;

$R_{OZ} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{OZ}) & -\sin(\varphi_{OZ}) & 0 \\ \sin(\varphi_{OZ}) & \cos(\varphi_{OZ}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица поворота камеры относительно

оси OZ на угол φ_{OZ} .

Углы φ_{OX} и φ_{OZ} измеряются во время проведения эксперимента при помощи встроенных средств камеры или дополнительных инструментов, а угол φ_{OY} определяется путем решения системы уравнений, которую можно построить на основе прямого перспективного преобразования [76] для известных точек полигона: исток струи, вершины маяков (рисунок 2.2). Ниже представлена система уравнений для истока струи:

$$\lambda \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = Q \cdot \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) = -Q \cdot \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

где x_0, y_0 – координаты истока струи в системе плоскости изображения.

Масштабный коэффициент λ рассчитывается при известных φ_{OX} и φ_{OZ} путем решения второго уравнения системы (2.14), т.к. в нем отсутствуют члены, зависящие от φ_{OY} . Далее искомый угол определяется из первого или третьего уравнения (2.14).

Масштабный коэффициент λ при расчете координат точек траектории струи на основе (2.11) вычисляется, исходя из условия: $Z_i = 0$.

Ниже представлены результаты использования разработанного метода (рисунок 2.3) для распознавания траектории на основе цифрового изображения струи воды из лафетного ствола. Соответствующие натурные испытания производились на экспериментальном полигоне Инженерного центра пожарной робототехники «ЭФЭР» [8; 10] в безветренный день, а потому основной поток огнетушащего вещества двигался в одной плоскости без существенных отклонений от нее. Цифровая камера с объективом, имеющим незначительную дисторсию, была установлена строго по горизонтальному уровню на большом удалении от пожарного ствола так, что ее матрица была параллельна плоскости струи. Обеспечение таких условий проведения эксперимента позволило минимизировать геометрические искажения, а потому их коррекция не осуществлялась.

Рисунок 2.6 отражает результаты последовательного выполнения основных операций этапа предварительной обработки изображения (рисунок 2.3, блок А41).

Как видно, условия эксперимента с точки зрения выделения границ струи были сложными: существенное изменение цвета неба вдоль горизонтальной оси, наличие «шумовых» внешних объектов, а также фрагментов распыленной воды, в том числе сливающихся с фоном. Путем предварительной обработки обеспечен требуемый перепад яркостей почти на всей траектории движения потока огнетушащего вещества, за исключением небольшого участка в ее конце.



Исходное изображение
[10]

Изображение после
коррекции яркостей

Изображение после
коррекции локального
контраста

Изображение после
коррекции глобального
контраста

Рисунок 2.6 – Основные этапы предварительной обработки изображения струи

Рисунок 2.7 содержит результаты выделения множества точек струи воды (рисунок 2.3, блок А42) на основе предварительно обработанного изображения (синие точки) и распознавания ее верхней и нижней границы с использованием прямоугольной (прямоугольные маркеры) и полярной (круглые маркеры) систем координат. На участках компактной и раздробленной струи оба метода дают схожие результаты. Однако в распыленной области точность и пространственное

разрешение контуров верхней и нижней границ струи, выделенных с помощью полярной системы координат, выше. В частности, у кривой на рисунке 2.7, б отсутствуют существенные разрывы и выбросы.

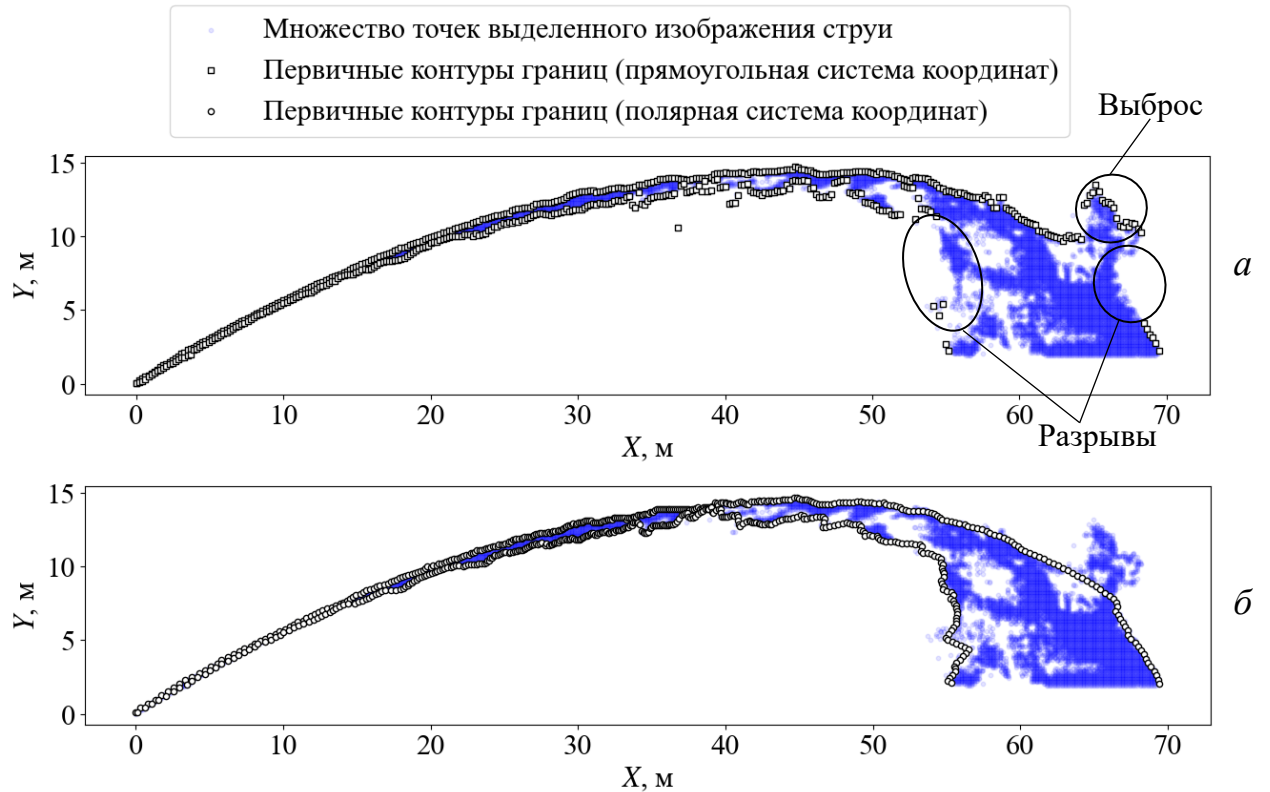


Рисунок 2.7 – Результаты выделения первичных контуров границ струи с использованием прямоугольной (а) и полярной (б) систем координат

В таблице 2.4 выполнен сравнительный анализ использованных методов выделения границ струи (рисунок 2.7). Как следует из приведенных данных, алгоритм на основе полярной системы координат имеет более высокое быстродействие и разрешающую способность (максимальное, среднее значение, а также среднеквадратическое отклонение расстояний между соседними точками меньше сравнению с прямоугольной системой координат).

На рисунке 2.8 представлены результаты постобработки (рисунок 2.3, блок А43) распознанной траектории струи, а на рисунке 2.9 – их совмещение с анализируемым изображением после предварительной обработки.

Таблица 2.4 – Сравнительный анализ методов выделения границ

Метод	На основе прямоугольной системы координат	На основе полярной системы координат
Время построения границ, с	0.017	0.012
Максимальное расстояние между соседними точками (верхняя/нижняя границы), м	5.91 / 6.72	0.12 / 0.12
Среднее расстояние между соседними точками (верхняя/нижняя границы), м	0.07 / 0.11	0.05 / 0.05
Среднеквадратическое отклонение расстояний между соседними точками (верхняя/нижняя границы), м	0.25 / 0.43	0.03 / 0.03

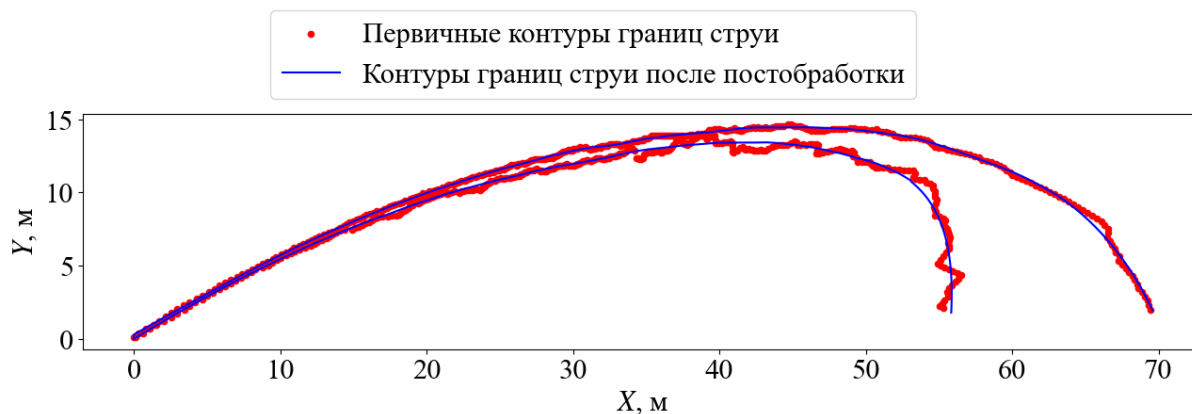


Рисунок 2.8 – Результаты постобработки распознанной струи



Рисунок 2.9 – Совмещенное изображение струи и ее границ, построенных на основе распознавания

Распознанная траектория с достаточно высокой точностью совпадает с границами цифрового изображения огнетушащего вещества. Также по полученным кривым были вычислены дальность и высота струи воды из

пожарного ствола: 69.4 м и 14.6 м соответственно. Аналогичные величины, измеренные вручную с наложением на фотографию координатной сетки, имеют значения: 70 м и 14.7 м – относительные погрешности не превышают 1 %.

Ниже описаны результаты использования разработанной технологии (рисунок 2.1) для распознавания траектории огнетушащего вещества с учетом перспективных искажений. Для этого применялись цифровые изображения, полученные в ходе натурных испытаний пожарного лафетного ствола ЛС-П20У на экспериментальном полигоне Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России [29].

Фотосъемка производилась на предварительно откалиброванную согласно методу Жанга [196] камеру Nikon D800 (фокусное расстояние использованного объектива 24 мм). Ее исходное положение в системе координат экспериментального полигона: (28, 1.5, -25) было выбрано для обеспечения попадания всей траектории основного потока огнетушащего вещества в область изображения при максимальной дальности струи: $\alpha = 30^\circ$ (рисунок 2.2). Наибольшая высота струи в исследуемом диапазоне углов возвышения выходного патрубка наблюдалась при $\alpha = 60^\circ$. Для того, чтобы при исходном положении камеры полностью уместить поток огнетушащего вещества в кадр были выставлены следующие углы поворота относительно координатных осей: $\varphi_{OX} = 20.1^\circ$, $\varphi_{OZ} = 0^\circ$ (значения получены на основе измерений), $\varphi_{OY} = 16^\circ$ (значение получено на основе расчета согласно описанному в параграфе 2.2.2 методу).

Далее показаны результаты применения технологии для распознавания струи воды из пожарного лафетного ствола при угле возвышения 60° , соответствующего максимальным в рамках проведенных натурных испытаний перспективным искажениям (рисунки 2.10–2.12).

На рисунке 2.10 построено множество выделенных точек основного потока огнетушащего вещества на основе предварительно обработанного изображения, а также его верхняя и нижняя границы в системе координат матрицы использованной цифровой камеры.

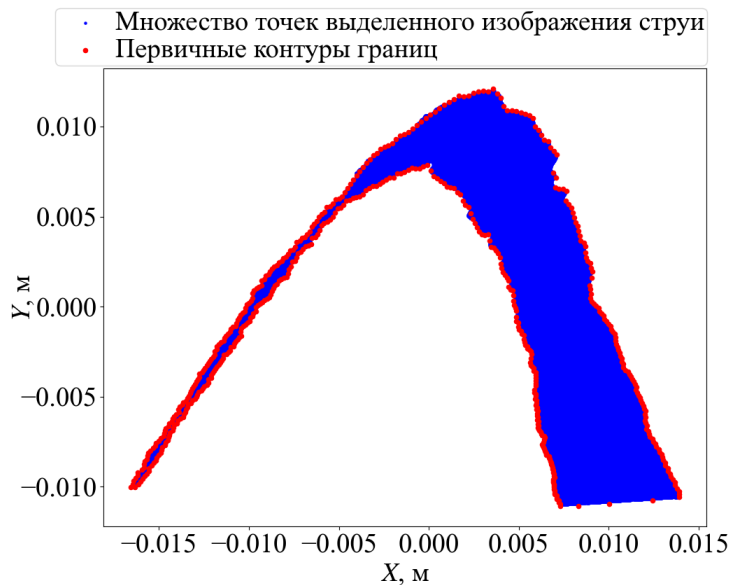


Рисунок 2.10 – Результаты выделения первичных контуров границ струи

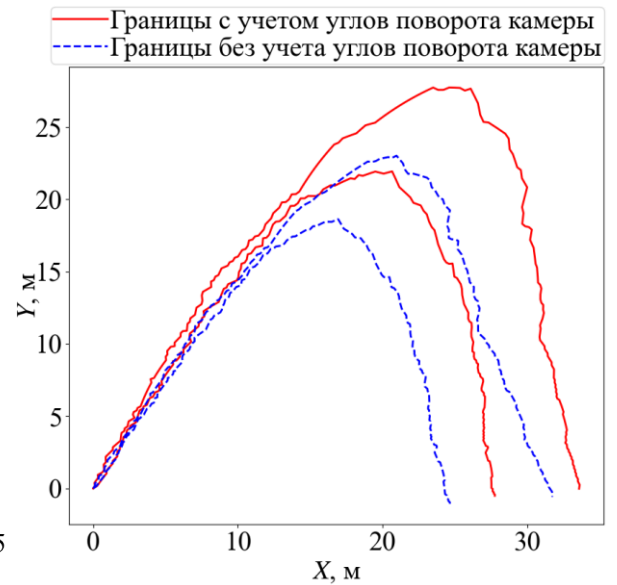


Рисунок 2.11 – Результаты распознавания границ струи

Рисунки 2.11–2.12 отражают результаты последовательного выполнения операций обратного перспективного преобразования и постобработки к выделенным границам изображения струи.

Для демонстрации влияния ориентации камеры кривые на рисунке 2.11 построены, как с учетом углов ее поворота относительно координатных осей, так и без него (с соответствующим смещением полученной траектории в начало координат).

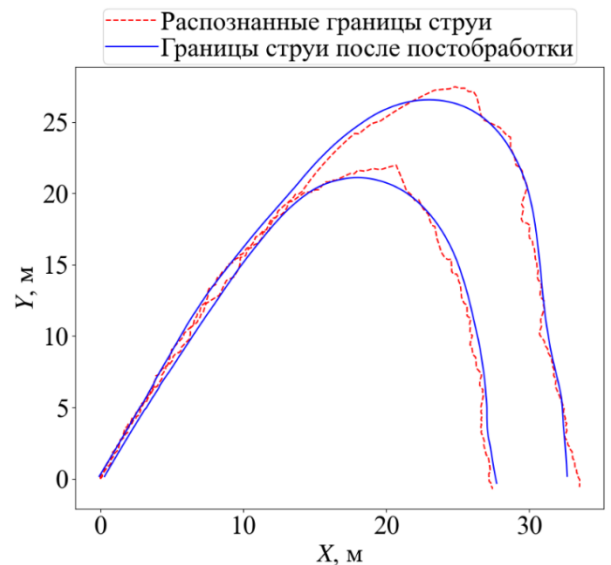


Рисунок 2.12 – Результаты постобработки распознанных границ струи

Можно сделать вывод, что разница между полученными кривыми значительная. В частности, отклонения максимальных абсцисс и ординат для траекторий, построенных без учета ориентации камеры от аналогичных значений, рассчитанных с использованием углов поворота, составляют соответственно: 1.9 м (5.6 %) и 4.7 м (17 %).

По результатам постобработки распознанных границ струи (рисунок 2.12) были определены ее дальность и высота, которые составили 32.6 м и 26.6 м соответственно. Аналогичные величины, измеренные инструментально во время проведения натурных испытаний, составили: 32 м и 26.5 м. Относительные погрешности по дальности и высоте равны соответственно: 1.9 % и 0.4 %, что, учитывая зашумление изображения основного потока огнетушащего вещества распыленными фрагментами, говорит о достаточно высокой точности.

Представленная выше технология (рисунок 2.1) предназначена для получения на основе натурных испытаний ствольной пожарной техники траекторий огнетушащего вещества с высокой точностью и пространственным разрешением, что дает возможность использовать их для определения соответствующих тактико-технических характеристик, валидации и машинного обучения различных моделей, описывающих динамику протекающих при этом процессов в условиях, когда возмущающие воздействия отсутствуют или не оказывают существенного влияния на движение струй в поперечном направлении.

Для оценки параметров газожидкостных потоков при боковом ветре, необходима трехмерная реконструкция траектории на основе синхронизированной съемки с нескольких ракурсов, что требует более сложной методики проведения натурных испытаний, а также алгоритмов последующей обработки полученных результатов. Их разработке с учетом выявленных ранее проблем многокамерной фотограмметрии (таблица 2.3) посвящены параграфы 2.3–2.4.

2.3 Методика проведения натурных испытаний противопожарных роботизированных систем для формирования валидационных выборок

На рисунке 2.13 представлена функциональная диаграмма разработанной технологии построения валидационных выборок (рисунок 1.15, блок A112) на основе натурных испытаний с учетом ветра. Реализация ее этапов (рисунок 2.13) подробно изложена в патенте на изобретение № 2843123 [226], ниже приведено краткое описание каждого из них.

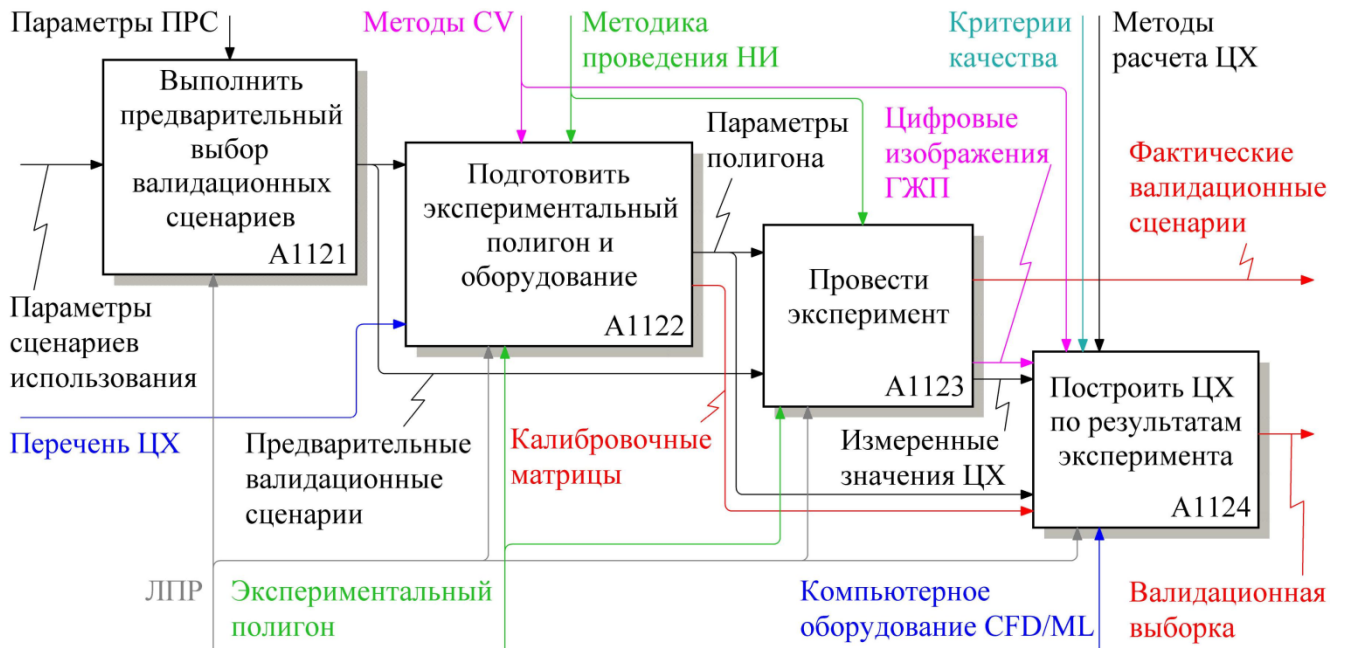


Рисунок 2.13 – Функциональная диаграмма IDEF0 технологии построения трехмерных моделей и целевых характеристик газожидкостных потоков по результатам натурных испытаний

Схема экспериментального полигона изображена на рисунке 2.14. Координатные оси системы координат экспериментального полигона: ось OX – горизонтальная ось (выбирается вдоль направления проекции выходного патрубка ПЛС на горизонтальную плоскость); ось OY – вертикальная ось; ось OZ – горизонтальная ось перпендикулярная OX и OY .

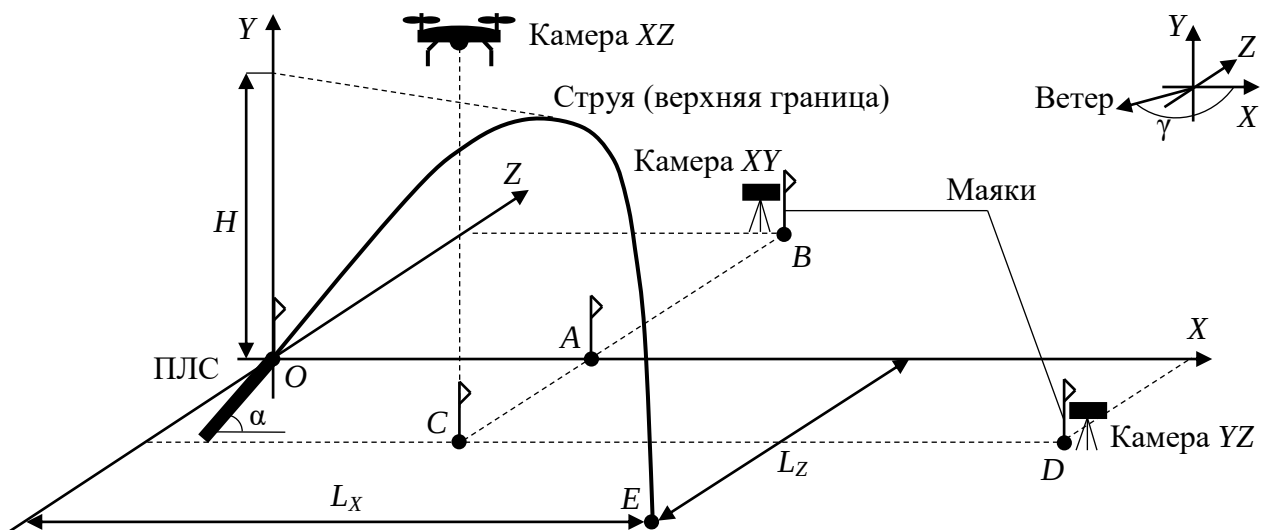


Рисунок 2.14 – Схема экспериментального полигона

Основные точки на схеме (рисунок 2.14):

$O = (0, 0, 0)$ – начало координат, точка, совпадающая с центром выходного отверстия ствола (исток струи). При разметке полигона в качестве точки O принимается предварительное место установки испытываемого оборудования. После размещения и настройки параметров ПЛС производится измерение отклонения по координатным осям центра его выходного отверстия от точки O (рисунок 2.15).

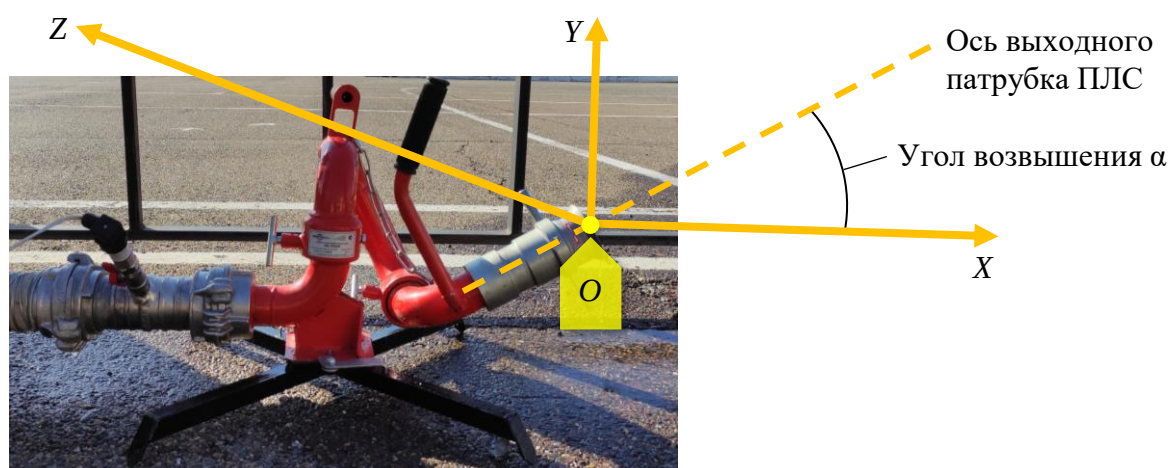


Рисунок 2.15 – Схема установки пожарного лафетного ствола

$A = (X_A, Y_A, 0)$ – точка, вертикальная проекция которой лежит на оси OX , а абсцисса соответствует месту установки камеры XU , предназначенной для съемки движения свободной струи вдоль координатной плоскости XU (рисунок 2.14).

$B = (X_B, Y_B, Z_B)$ – точка установки камеры XU .

$C = (X_C, Y_C, Z_C)$ – точка, абсцисса которой равна X_A , а аппликата соответствует месту установки камеры YZ , предназначенной для съемки движения свободной струи вдоль координатной плоскости YZ (рисунок 2.14). Данная точка необходима для предварительного выбора положения и ориентации камеры БПЛА (камера XZ), предназначенной для съемки движения свободной струи вдоль координатной плоскости XZ . При слабом ветре или при соответствующих геометрических ограничениях экспериментального полигона допустимо принять $Z_C = 0$. При этом точка C будет совпадать с A , а точка D будет лежать на оси OX (рисунок 2.16).

$D = (X_D, Y_D, Z_D)$ – точка установки камеры YZ .

$E = (X_E, Y_E, Z_E)$ – максимально удаленная от начала координат точка (определяется путем измерений по результатам испытаний) траектории исследуемой свободной струи (по крайним каплям).

При натурных испытаниях ручных стволов для их фиксации в заданном положении применялась разработанная в Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России установка [22] (рисунок 2.17). Для определения фактического расхода огнетушащего вещества при проведении эксперимента использовалась установка, описанная в работе [23].

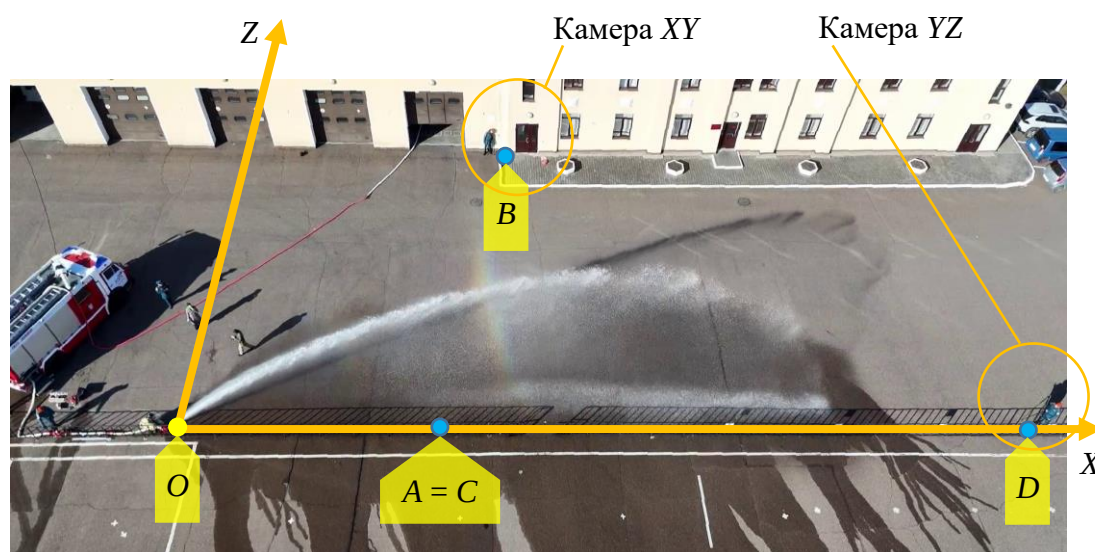


Рисунок 2.16 – Схема экспериментального полигона (вид с камеры БПЛА)

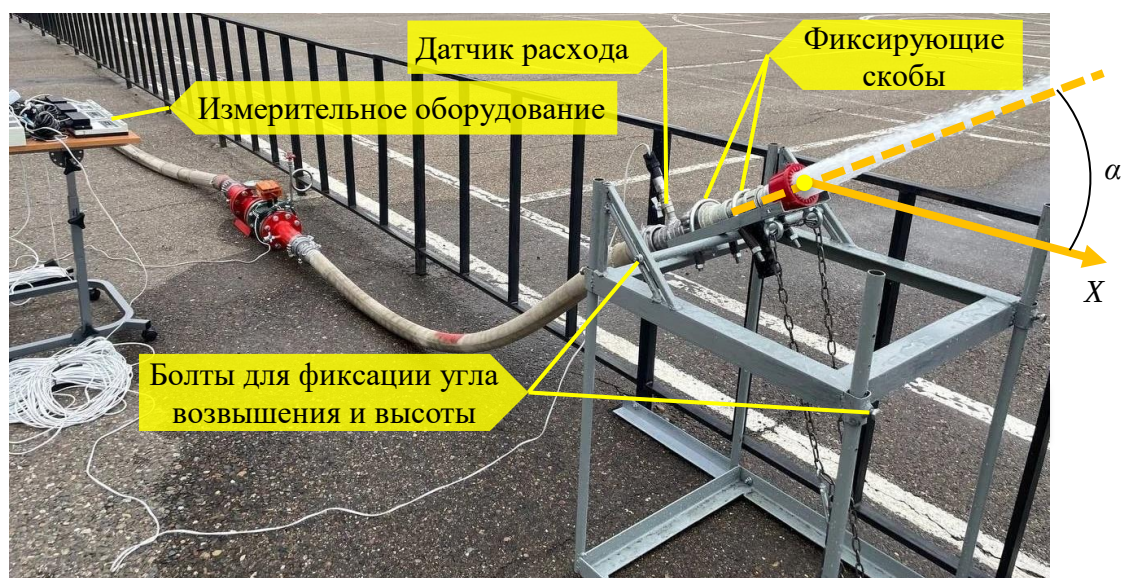


Рисунок 2.17 – Установка для фиксации ручного пожарного ствола в заданном положении

Подготовка полигона и оборудования (рисунок 2.13, блок A1122) для проведения натурных испытаний с целью сбора эмпирических данных, описывающих динамику струи из ПЛС при возмущающих воздействиях, согласно предлагаемой технологии, заключается в решении следующих задач:

1) Предварительный выбор расположения оси OX , начала координат и других точек, который осуществляется с учетом геометрических (размеры, перепад высот) и технических (места возможной установки ПЛС) особенностей экспериментального полигона, параметров управляющих (исследуемые углы возвышения выходного патрубка, рабочие давления и расходы огнетушащего вещества) и возмущающих воздействий (скорость и направление ветра, температура воздуха), характеристик используемых цифровых камер и т.д.

2) Разметка полигона (определение положения точек A, B, C, D), которая осуществляется при помощи геодезического оборудования (теодолит и т.д.). При этом в каждой точке (O, A, B, C, D) устанавливаются маяки – хорошо заметные вертикальные объекты известной высоты, например, флажок, который используется для быстрого размещения и настройки (ориентации) оборудования (ПЛС, камер, в т.ч. бортовой камеры БПЛА), а также уточнения на основе полученных цифровых изображений геометрических параметров эксперимента (характерные размеры, углы поворота камер и т.д.).

3) Измерение по результатам разметки полигона координат (по осям OX, OY, OZ) точек: A, B, C, D .

4) Калибровка камер.

Проведение эксперимента (рисунок 2.13, блок A1123) включает три основных этапа:

1) Подготовительные работы, состоящие из: расстановки (на штативах) предварительно откалиброванных камер XU и YZ в точках B и D соответственно; замера отклонений (по каждой из координатных осей) расположения камер относительно указанных точек, а также углов их поворота относительно горизонтальных осей; установки ПЛС в окрестности точки O с углом возвышения, соответствующим максимальной дальности струи (в исследуемом

диапазоне значений управляющих параметров); замеров отклонений (по каждой из координатных осей) фактического расположения центра выходного отверстия ПЛС относительно точки O ; установки оборудования для измерения параметров окружающей среды (скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления, а также запуск записи соответствующих показаний приборов).

2) Тестовый запуск струи при управляющих параметрах, обеспечивающих ее максимальную дальность, который включает: видеосъемку сформированного потока всеми камерами; оценку полного попадания траектории свободной струи в область изображения на всех камерах; коррекцию (при необходимости) расположения и углов поворота камер с фиксацией соответствующих изменений; определение (при необходимости) положения максимально удаленной от ПЛС точки траектории (точка E , рисунок 2.14) и установку соответствующего маяка.

3) Основной ход эксперимента, включающий: запуск БПЛА с размещением так, чтобы его проекция на горизонтальную плоскость полигона была как можно ближе к точке C ; ориентация бортовой предварительно откалиброванной камеры (камера XZ) так, чтобы плоскость ее матрицы была горизонтальна; выбор высоты положения БПЛА так, чтобы обеспечить попадание с небольшим запасом в область изображения точек O , E и (по возможности) B , D ; выставление и измерение заданного угла возвышения ПЛС; осуществление циклов пуска и видеосъемки струи с синхронизацией действий по звуковым сигналам, во время которых производится измерение параметров управляющих и возмущающих воздействий, а также (при необходимости) измерение геометрических параметров струи – для оценки точности полученных на основе анализа цифровых изображений результатов.

Основные параметры, заносимые в протокол испытаний и используемые в дальнейшем для оценки характеристик исследуемых струй огнетушащего вещества, представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные параметры, заносимые в протокол испытаний

Наименование параметров	Точность измерения	Этап, на котором проводятся измерения / использованное оборудование
1	2	3
Координаты основных точек полигона A, B, C, D и E (при проведении соответствующих измерений)	0.1 м – по горизонтальным осям, 0.01 м – по вертикальной оси	Разметка полигона (точки A, B, C, D), тестовый запуск струи (точка E) / геодезическая измерительная лента; теодолит; нивелирная рейка; дальномер
Отклонения по каждой из координатных осей расположения камер XY и YZ (центральной точки матрицы) соответственно относительно точек B и D	0.1 м – по горизонтальным осям, 0.01 м – по вертикальной оси	Подготовительные работы (после установки камер), тестовый запуск струи (при коррекции размещения и ориентации камер) / геодезическая измерительная лента; нивелирная рейка
Углы поворота камер XY и YZ относительно горизонтальных осей	0.1°	Подготовительные работы (после установки камер), тестовый запуск струи (при коррекции размещения и ориентации камер) / дальномер с угломером
Отклонения по каждой из координатных осей центра выходного отверстия ПЛС относительно точки O	0.01 м	Основной ход эксперимента (при каждом изменении угла возвышения ПЛС) / геодезическая измерительная лента; нивелирная рейка
Угол возвышения выходного патрубка ПЛС α	0.1°	Основной ход эксперимента (при каждом изменении угла возвышения ПЛС) / дальномер с угломером
Направление, скорость ветра, температура и влажность воздуха, атмосферное давление	Определяется используемым для измерения прибором	Основной ход эксперимента (в течение всего периода натурных испытаний) / метеостанция
Рабочее давление на входе ПЛС, температура и расход воды	Определяется используемым для измерения прибором	Основной ход эксперимента (для каждой настройки управляющих параметров) / измерительная установка [23]

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3
Высота БПЛА относительно точки взлета	Определяется используемым для измерения прибором	Основной ход эксперимента (после окончательного выбора позиции БПЛА) / бортовой датчик БПЛА
Геометрические параметры струи	0.1 м	Основной ход эксперимента (для каждой настройки управляющих параметров) / теодолит; геодезическая измерительная лента; нивелирная рейка

Внутренние параметры камер (калибровочные матрицы) определяются до проведения натурных испытаний на основе метода Жанга [196] (параграф 2.2). Углы поворота камер XU и YZ относительно оси OY , координаты БПЛА по координатным осям, а также углы поворота его бортовой камеры (XZ) оцениваются по результатам анализа (путем соответствующих перспективных преобразований) полученных изображений (с учетом положения маяков и других объектов). По данным таблицы 2.5 производится расчет положений всех камер в координатной системе экспериментального полигона.

Построение целевых характеристик по результатам эксперимента (рисунок 2.13, блок A1124; рисунок 2.18), которое в данном случае заключается в вычислении массивов положения точек, лежащих на границах исследуемого вещества, в координатной системе матриц камер, производится на основе цифровых изображений, сформированных из полученных в ходе натурных испытаний видеозаписей. При этом синхронизация видеопотоков с различных камер осуществляется по соответствующим звуковым сигналам.

Распознавание границ струи (верхней и нижней) на изображениях (рисунок 2.18, блок A11242) выполняется согласно методу, описанному в параграфе 2.2 [206], который включает, в том числе, предварительную обработку (рисунок 2.18, блок A11241), позволяющую повысить яркостный перепад между огнетушащим веществом и фоном.

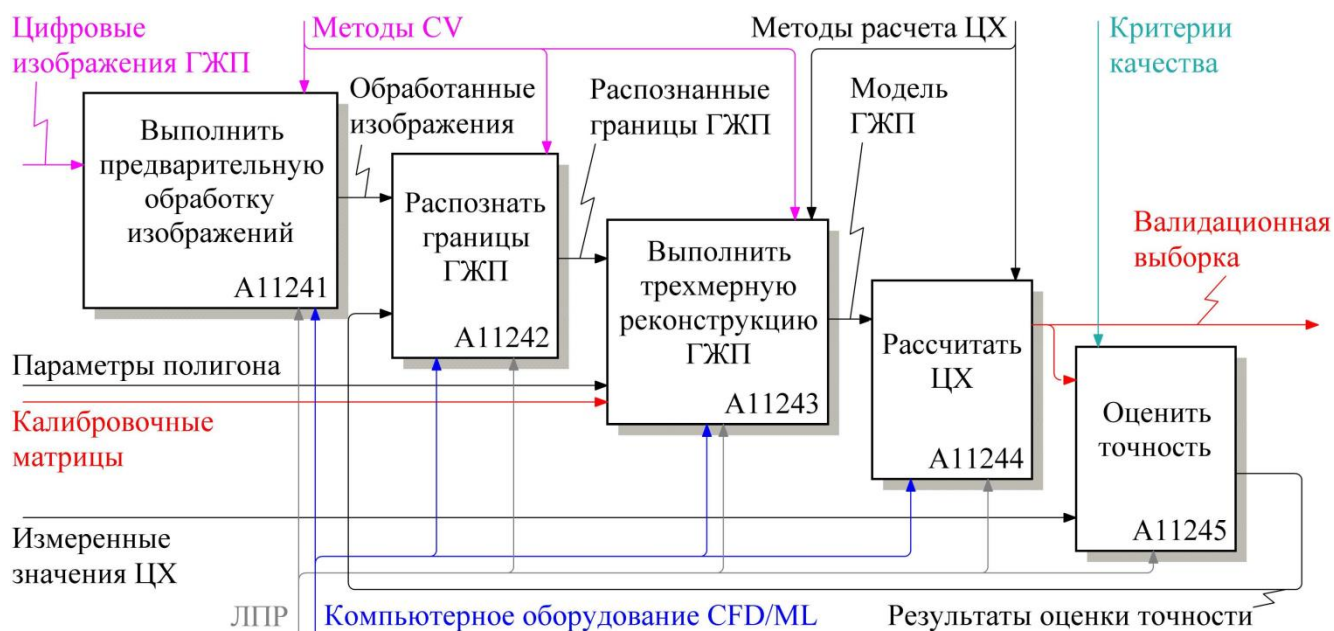


Рисунок 2.18 – Функциональная диаграмма IDEF0 декомпозиции задачи построения целевых характеристик газожидкостного потока по результатам эксперимента

Оценка точности построенных трехмерных моделей производится путем сравнения полученных на их основе целевых характеристик с измеренными при проведении натурных испытаний, в частности: положение начала газожидкостного потока, наиболее удаленной от него точки струи (по крайним каплям), положение наивысшей точки струи.

В следующем параграфе представлен алгоритм построения трехмерной модели траектории на основе распознанных изображений ее границ в различных плоскостях (рисунок 2.18, блок A11243) [221].

2.4 Алгоритм трехмерной реконструкции траектории газожидкостного потока по результатам натурных испытаний

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке А.2 (приложение А). Поясняющая схема к алгоритму построения трехмерной модели газожидкостного потока, демонстрирующая переход между ее точками, приведена на рисунке 2.19.

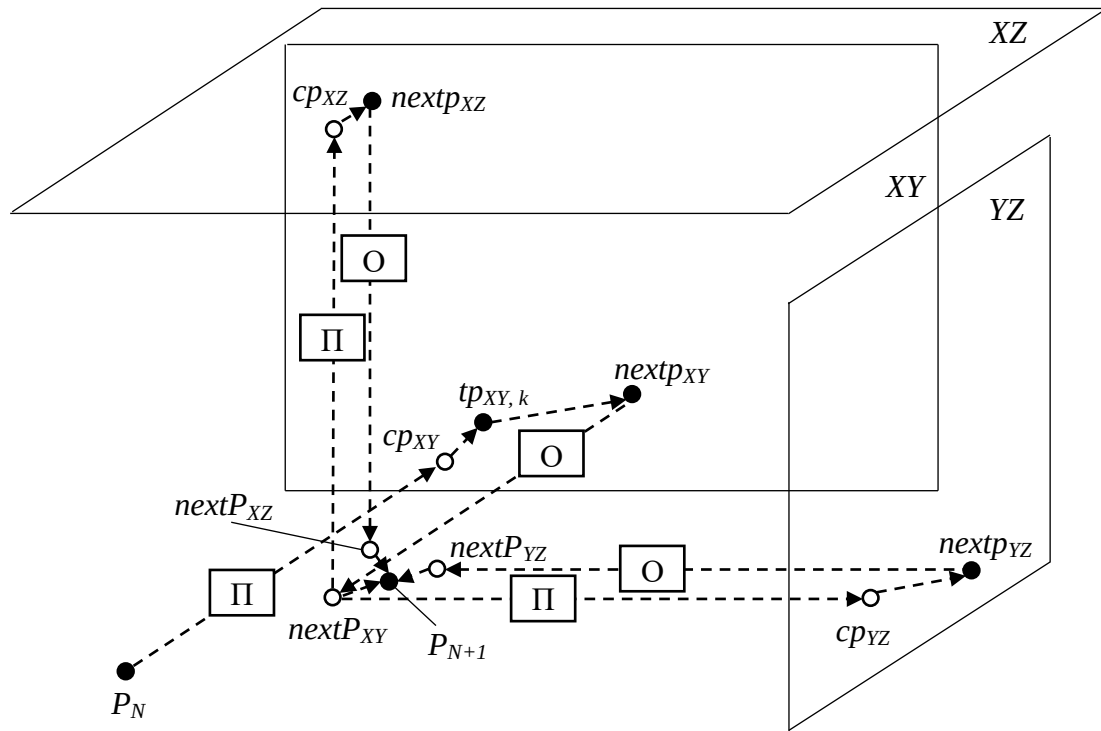


Рисунок 2.19 – Поясняющая схема к алгоритму построения
трехмерной модели газожидкостного потока

(П – операция прямого перспективного преобразования,

О – операция обратного перспективного преобразования)

Входные данные:

– Массив индексов цифровых камер: C_m , где m соответствует координатным плоскостям, которым параллельны матрицы камер (рисунок 2.19), используемые для съемки свободной струи (XY, YZ, XZ).

– Массивы точек изображений границ свободной струи: tp_m . Каждая точка массива описывается однородными координатами: $[x \ y \ 1]^T$, где x, y – положение точки в координатной системе матрицы соответствующей цифровой камеры.

– Калибровочные матрицы цифровых камер: K_m .

– Матрицы вращения цифровых камер, определяемые на основе протокола испытаний, а также по результатам анализа изображений: R_m .

– Матрицы перемещения цифровых камер: $T_m = [X_{0,m} \ Y_{0,m} \ Z_{0,m}]^T$,

где $X_{0,m}$, $Y_{0,m}$, $Z_{0,m}$ – положения камеры в системе координат полигона, определяемые на основе протокола испытаний, а также по результатам анализа изображений.

– Координаты центра выходного отверстия ПЛС (истока струи), определяемые на основе протокола испытаний: $S = [X_s \ Y_s \ Z_s]^T$.

– Индекс начальной главной камеры: mC .

– Минимальный шаг по массивам точек изображения траектории: $MinStep$.

– Минимально допустимое расстояние между соседними точками траектории в системе координат экспериментального полигона: ε .

Выходные данные:

– Массив точек траектории свободной струи в системе координат экспериментального полигона: P .

Шаг 1. Выполняется инициализация алгоритма:

1.1. В массив траектории P добавляется точка с координатами в системе экспериментального полигона: $N = 0$, $P_N = S$.

1.2. В качестве текущей точки выбирается последняя точка траектории $cP = P_N$.

1.3. В качестве главной камеры выбирается камера mC : $main = mC$.

1.4. Вычисление матриц, используемых для расчетов: $Q_m = K_m \cdot R_m$ и $q_m = -Q_m \cdot T_m$, $m \in C$.

Текущий шаг по массивам точек изображений траектории принимается равным минимальному: $step = MinStep$.

Шаг 2. Выполняется прямое перспективное преобразование для текущей точки с параметрами главной камеры ($m = main$):

$$cp_m = Q_m \cdot cP + q_m, \quad cp_m = cp_m / cp_{m,2}. \quad (2.15)$$

Шаг 3. Определяется индекс ближайшей к cp_m точки изображения траектории с главной камеры ($m = main$):

$$k = k : |p_k - cp_m| = \min_{p_i \in tp_m} (|p_i - cp_m|), \quad (2.16)$$

здесь $||$ – модуль вектора.

Если $k + step \geq |tp_m|$ (здесь $||$ – мощность множества), то конец алгоритма.

Шаг 4. Выбирается следующая за ближайшей точка массива $m = main$:

$$nexttp_m = tp_{m,k+step}. \quad (2.17)$$

Производится обратное перспективное преобразование точки $nexttp_m$:

$$nextP_m = Q_m^{-1} \cdot (\lambda \cdot nexttp_m - q_m), \quad (2.18)$$

$$\text{где } \lambda = \frac{cP_{TC(m)} + [Q_m^{-1} \cdot q_m]_{TC(m)}}{[Q_m^{-1} \cdot nexttp_m]_{TC(m)}} - \text{масштабный коэффициент; } TC(m) = \begin{cases} Z, m = XY \\ X, m = YZ \\ Y, m = XZ \end{cases}$$

функция, устанавливающая соответствие между камерами и координатными осями системы полигона ортогональными плоскостям их матриц.

Шаг 5. Для камер, не являющимися главными ($m \neq main, m \in C$), определяются ближайшие к соответствующим прямым перспективным преобразованиям $cP = nextP_{main}$ точки изображения траектории по формулам (2.15)–(2.17) (для $step = 0$), а также их обратные перспективные преобразования (2.18).

Шаг 6. На основе полученных по результатам выполнения шагов 2–5 точек $nextP_m$ для всех камер усреднением определяется новая текущая точка cP :

$$cP = \sum_{m \in C} nextP_m / |C|, \quad (2.19)$$

где $|C|$ – мощность множества C .

Шаг 7. Если расстояние между cP и последней точкой траектории P_N меньше ε :

$$|cP - P_N| < \varepsilon, \quad (2.20)$$

то $step = step + 1$, $cP = P_N$ и переход к шагу 2. В противном случае, если $step > MinStep$, $step = step - 1$.

Шаг 8. Текущая точка cP заносится в массив траектории: $N = N + 1$, $P_N = cP$. Удаление из массивов tp_m точек, лежащих между истоком струи и $nexttp_m$ включительно: $tp_{m,i} : i \leq k$, $nexttp_m = tp_{m,k}$, $m \in C$.

Шаг 9. Определяется новая главная камера по минимальному отклонению координат в системе экспериментального полигона между двумя последними точками траектории:

$$main = \text{invTC}(ax), \quad (2.21)$$

$$ax = ax : |P_{N,ax} - P_{N-1,ax}| = \min_{i \in \langle X, Y, Z \rangle} (|P_{N,i} - P_{N-1,i}|), \quad (2.22)$$

$$\text{где } \text{invTC}(ax) = \begin{cases} YZ, ax = X \\ XZ, ax = Y \\ XY, ax = Z \end{cases} - \text{функция, устанавливающая соответствие между}$$

координатными осями полигона и камерами, матрицы которых лежат в ортогональных им плоскостях.

Переход к шагу 2.

Удаление из массивов tp_m точек, лежащих между истоком струи и $nextrp_m$ включительно, на шаге 8 используется для предотвращения некорректной работы алгоритма в окрестностях максимума струи по высоте при малых расстояниях между изображениями восходящего и нисходящего потоков огнетушащего вещества, например, в проекции YZ , когда боковой ветер имеет незначительную скорость, или в проекции XY при больших значениях угла возвышения выходного патрубка. Так на шагах 3 и 5 алгоритма в качестве ближайших к cr_m могут быть выбраны точки, лежащие на соседнем участке траектории (восходящем, вместо нисходящего), что при последующих итерациях приведет к накоплению ошибки построенной модели. Поэтому для предотвращения данного эффекта на шаге 8 производится соответствующая коррекция.

2.5 Оценка эффективности разработанной технологии

На рисунке 2.20 приведены 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.

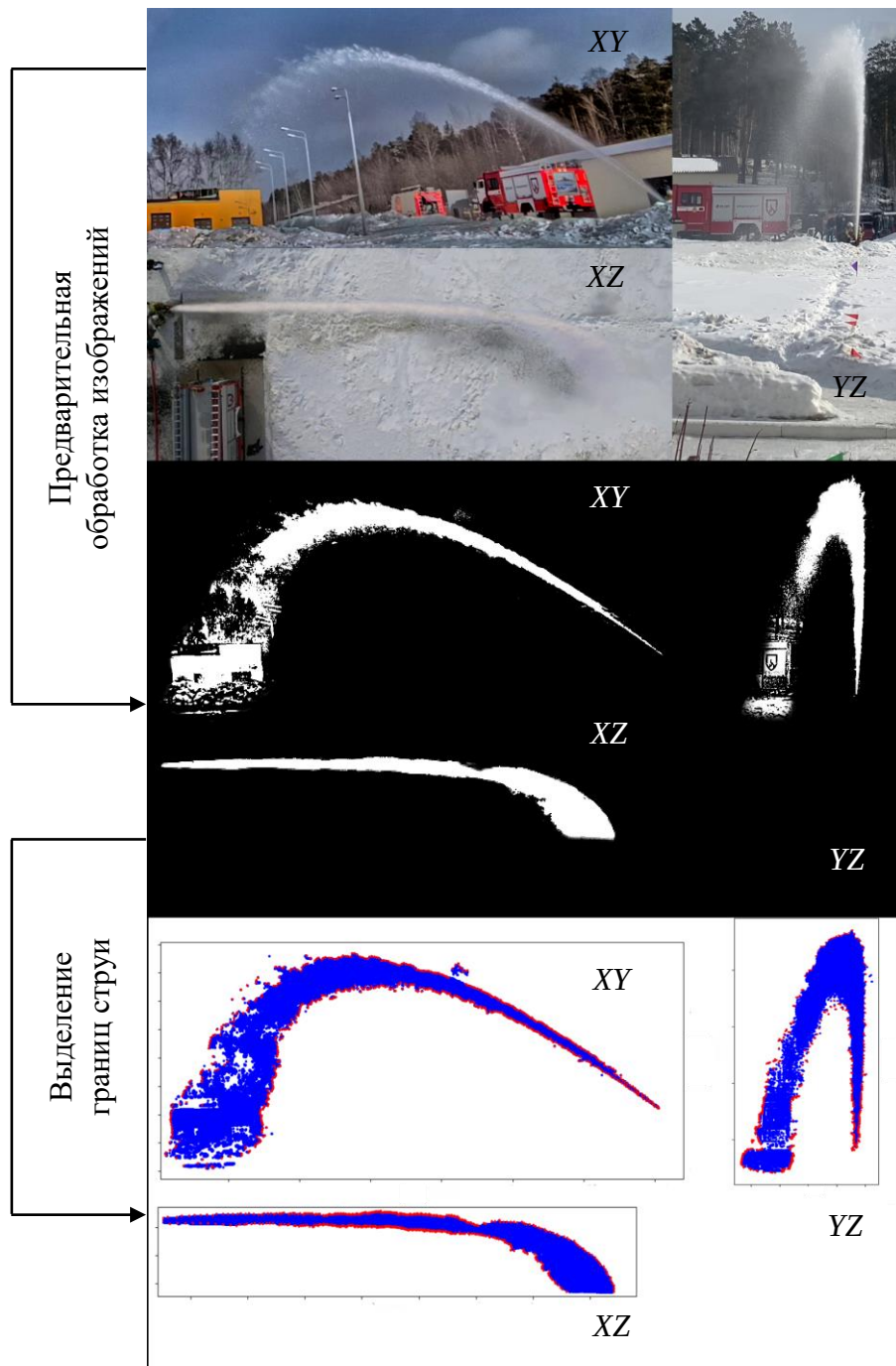


Рисунок 2.20 – Фрагменты исходных изображений, результаты их предварительной обработки и выделения верхних и нижних границ струи

Рисунок 2.21 содержит результаты построения трехмерной модели потока огнетушащего вещества с использованием представленного выше алгоритма, а также контрольные точки, полученные на ее основе и по результатам измерений: начальная точка струи (центр выходного отверстия патрубка), положение наивысшей точки струи, наиболее удаленная от выходного патрубка точка струи.

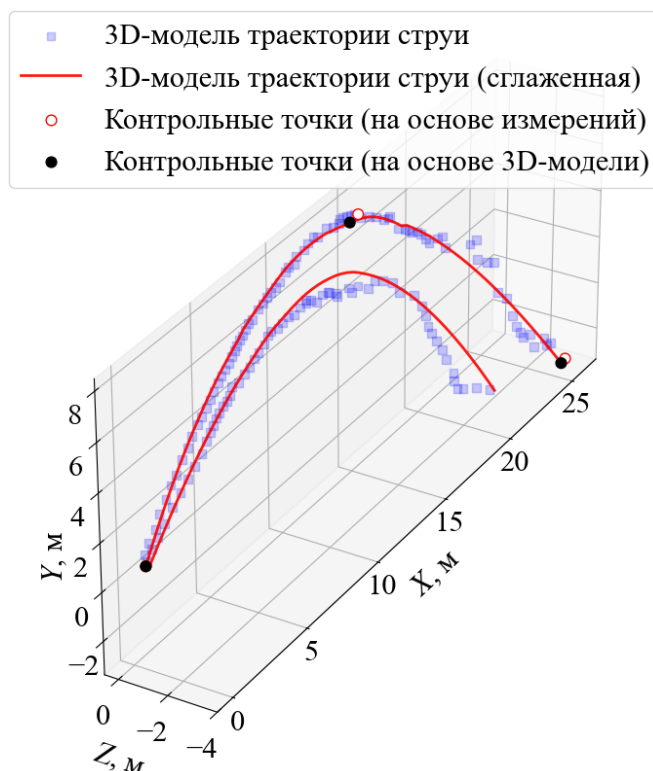


Рисунок 2.21 – Результаты построения трехмерной модели струи

В таблице 2.6 представлен сравнительный анализ основных геометрических характеристик потока огнетушащего вещества, полученных на основе построенной модели и по результатам измерений. Максимальное среди указанных в таблице 2.6 характеристик относительное отклонение составило 3.7 %, что говорит о достаточно высокой точности предлагаемой технологии.

Таблица 2.6 – Сравнительный анализ геометрических характеристик струи

Наименование характеристики	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

Для оценки чувствительности разработанных подходов к погрешностям определения положения и углов поворота камер были сгенерированы на основе сглаженной траектории (верхней границы) струи ее изображения путем прямых

перспективных преобразований [193]. Далее были построены соответствующие модели с применением предлагаемой технологии при различных значениях отклонений геометрических параметров камер (координаты в системе экспериментального полигона и углы поворота по координатным осям) от величин, использованных при формировании изображений. Точность оценивалась на основе среднеквадратического отклонения (RMSD – Root Mean Square Deviation) относительно исходной траектории. Результаты представлены на рисунке 2.22.

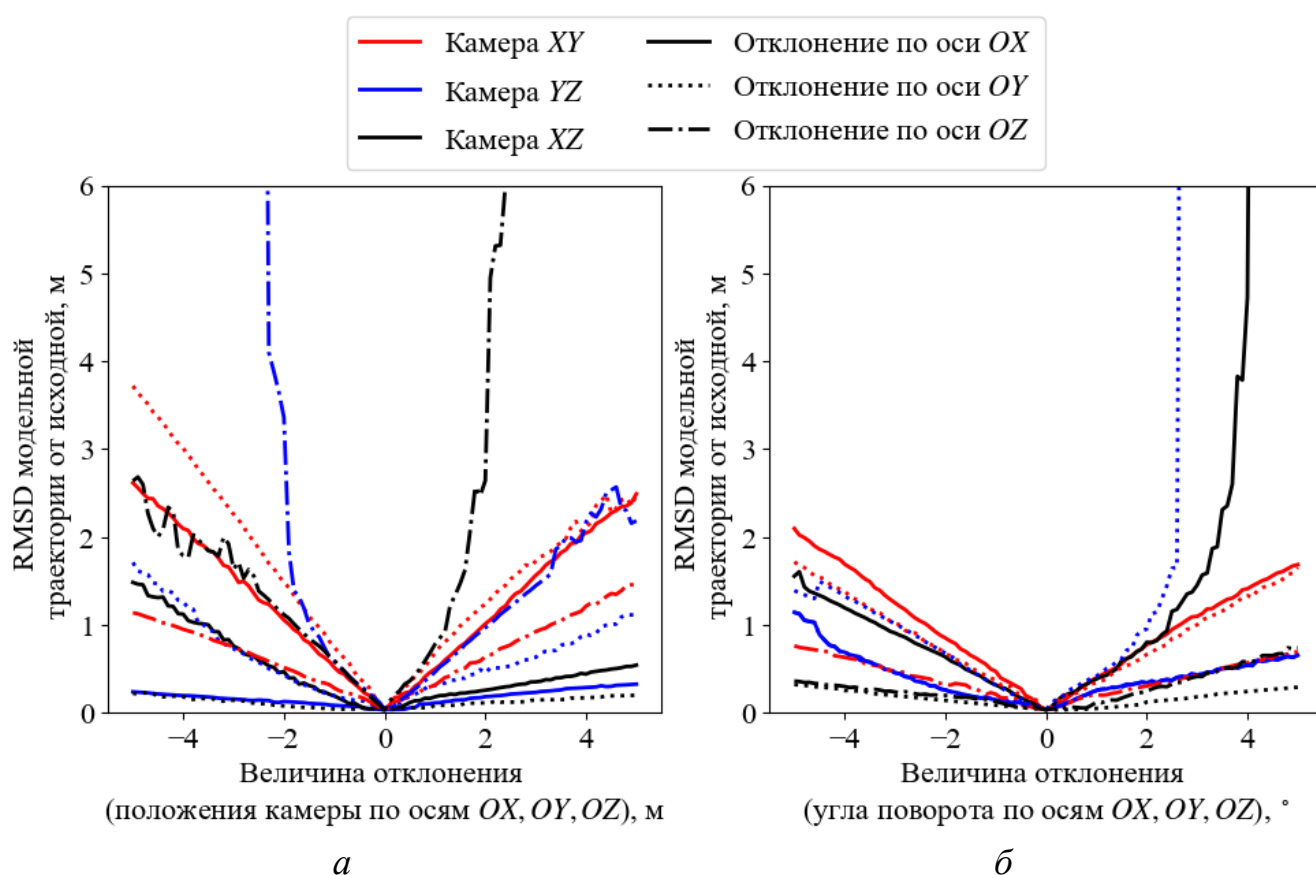


Рисунок 2.22 – Зависимость точности построения модели от погрешностей определения положения (а) и углов поворота камер (б)

Как видно из рисунка 2.22, наименее существенное влияние на точность построения траектории оказывают погрешности определения положений и углов поворота камер относительно осей перпендикулярных плоскостям их матриц (в исходном положении). Стоит отметить, что погрешности определения координат

и ориентации камер в пределах 10–20 см и 0.5° соответственно можно считать несущественными в рассмотренном примере.

Для оценки чувствительности разработанной технологии к разрешениям камер исходные изображения были соответствующим образом сжаты. Затем по ним были построены модели с применением предлагаемой технологии. Точность оценивалась на основе среднеквадратического отклонения относительно исходной траектории, полученной при разрешении 3840 x 2160 пикселей. Результаты отражены на рисунке 2.23. Можно заключить, что наибольшее влияние на RMSD в рамках рассмотренного примера оказывает разрешение камеры XY (исходная главная камера), а наибольшее ухудшение качества реконструкции траектории наблюдается при одновременном снижении разрешения всех камер.

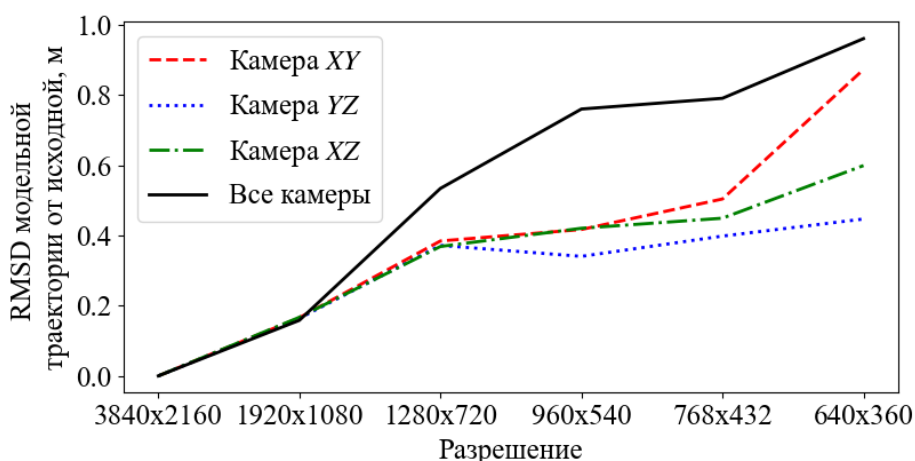


Рисунок 2.23 – Результаты оценки чувствительности технологии к разрешению камер

Согласно разработанной технологии по результатам четырех серий натурных испытаний, проведенных в различное время года для пожарного лафетного ствола ЛС-П20У, была построена валидационная выборка (рисунок 1.15, блок А112) для 48 сценариев, которые описываются следующими значениями параметров управляющих и возмущающих воздействий, определенными на основе измерений:

Углы возвышения выходного патрубка ствола α , °: [30.8, 44.5, 46.8, 57, 60.3].

Расходы огнетушащего вещества q_0 , л/с: [10.2, 12.1, 14.3, 16.1, 17.1, 20, 26].

Углы направления ветра γ , °: [62, 75, 104, 118].

Скорость ветра v_B , м/с: [0, 1.4, 2, 2.7, 3.8, 5].

Температура воздуха, °C: [-3, -2, 0, 5, 7].

По каждому из представленных сценариев были получены множества координат точек (в трехмерном пространстве), описывающих траекторию (верхнюю границу) струи огнетушащего вещества при соответствующих значениях управляющих и возмущающих воздействий. Указанные массивы были равномерно прорежены так, чтобы на каждую кривую приходилось 100 точек. Полученные таким образом для 48 сценариев данные были объединены в валидационную выборку (всего 4800 точек), которая соответствует множеству траекторий различных струй, характеристики которых меняются в достаточно широких диапазонах. Сформированная выборка в дальнейшем применяется для валидации моделей вычислительной гидродинамики (глава 4) и расчетных моделей, построенных на базе методов машинного обучения (глава 5).

2.6 Выводы по главе 2

В ходе проведенного исследования, которому посвящена вторая глава, были получены следующие результаты и выводы:

1) Разработана новая методика проведения натурных испытаний пожарных лафетных стволов, которые являются исполнительным механизмом в противопожарных роботизированных системах. Ее основу составляют предварительная разметка экспериментального полигона, синхронизированная с использованием звукового сигнала цифровая съемка струй огнетушащего вещества с трех различных ракурсов, в том числе с камеры БПЛА. Основным отличием от существующих в данной прикладной области подходов является учет влияния ветра на движение газожидкостного потока. Разработанная методика позволяет с высоким пространственным разрешением оценивать характеристики

струй огнетушащего вещества, имеющих значительные геометрические размеры и находящихся под возмущающими воздействиями, а также формировать соответствующие валидационные выборки для оценки адекватности моделей, описывающих их динамику на основе методов вычислительной гидродинамики и машинного обучения, в отличие от существующих в рассматриваемой прикладной области подходов, которые, обычно, ограничены точечными измерениями отдельных характеристик исследуемых потоковых процессов (высота, дальность, положение пятна контакта), что не дает возможности применять их для получения исходных данных в требуемом для решения сформулированной проблемы качестве.

2) Разработан новый метод выделения границ струи огнетушащего вещества на цифровых изображениях с учетом особенностей исследуемых потоков, которые снижают эффективность существующих алгоритмов: переменная оптическая плотность струи на разных ее участках; слабая различимость струи на близком по яркости и цвету фоне, визуальное зашумление полупрозрачной струи внешними объектами, на фоне которых она движется (в т.ч. распыленными фрагментами огнетушащего вещества). Отличием предлагаемого подхода являются: предварительная обработка изображений струи, направленная на повышение перепада яркостей на ее границах; использование для распознавания метода формирования сечений в полярной системе координат, направленное на повышение разрешения и снижение влияния разрывов границ на результаты последующей оценки характеристик; постобработка, также направленная на снижение влияния разрывов границ. Показано, что разработанный на основе предложенного метода алгоритм первичного выделения контуров границ огнетушащего вещества имеет более высокое быстроедействие и разрешающую способность по сравнению с подходом с использованием прямоугольной системы координат.

3) Разработан новый алгоритм трехмерной реконструкции потока огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола по результатам натурных испытаний с использованием синхронизированных по времени цифровых

изображений с трех различных ракурсов. Отличием предлагаемого подхода от известных методов фотограмметрии на основе триангуляции является применение итеративного построения модели траектории с учетом формы струи и положения ее соседних точек относительно камер. Разработанный алгоритм позволяет проводить трехмерную реконструкцию траектории 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.

4) Разработано новое импортозамещающее программное обеспечение, реализующее предлагаемые методы и алгоритмы. Проведенная апробация показала их высокую эффективность, в частности: геометрические характеристики газожидкостного потока, вычисленные на основе трехмерных моделей струй, имеют незначительные с точки зрения задачи управления наведением отклонения относительно измеренных инструментально.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ, СОГЛАСОВАННЫХ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ

Глава посвящена разработке методов и алгоритмов построения по результатам численного моделирования целевых характеристик струй огнетушащего вещества из ствола пожарного робота, согласованных с соответствующими кривыми, полученными с использованием трехмерной реконструкции по результатам натурных испытаний пожарных лафетных стволов. Использование согласования позволяет обоснованно применять методы вычислительной гидродинамики для генерации обучающих и верификационных выборок, соответствующих динамике исследуемых газожидкостных потоков в широком диапазоне значений параметров управляющих и возмущающих воздействий, что в свою очередь позволяет решить проблему построения указанных выборок в достаточном количестве и качестве на основе экспериментов. Разработан метод построения по результатам моделирования целевых характеристик с использованием алгоритма на базе максимальных скоростей. Представлен метод аппроксимации газожидкостного потока эллиптическими сечениями, используемый для объемного представления струй, имеющих соответствующую форму пересечений с секущими плоскостями. Разработанный на его основе алгоритм позволяет формировать исходные данные для решения задач, требующих оценки размеров контактного пятна, интенсивности орошения заданного участка и пр.

3.1 Обзор методов построения целевых характеристик газожидкостных потоков по результатам моделирования

Результаты численного расчета на основе методов вычислительной гидродинамики для каждого момента модельного времени представляют собой

большой массив данных, описывающих состояние исследуемого пространства в различных точках (координаты X , Y , Z , проекции векторов скорости на координатные оси V_x , V_y , V_z , объемные доли веществ и т.д.), в частности, в узлах или ячейках расчетной сетки при использовании сеточных методов решения соответствующих дифференциальных уравнений.

Оценка целевых характеристик потоковых процессов в их отдельных областях (дальность и высота струи, площадь пятна контакта, концентрация жидкости в заданных точках и их окрестностях) 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 характеристик может быть осложнено геометрическими размерами моделируемых потоковых процессов, что значительно затрудняет определение целевых параметров с приемлемым относительно решаемых задач разрешением.

Одними из наиболее распространенных характеристик, предназначенных для описания динамики потоковых процессов на всей их протяженности, являются линии тока. Однако при исследовании свободных струй подобные подходы не всегда применимы. Так, верхняя граница струи огнетушащего вещества, определяемая в системах компьютерного зрения роботизированных установок 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 3.1).

Применение пороговых значений объемной доли жидкости (Volume Fraction – VF) для исключения распыленных фрагментов из расчета характеристик малоэффективно, т.к. на излете струи ее значительная часть за счет распада имеет малые величины VF, однако их требуется учитывать при построении границы потока. Также стоит отметить, что при моделировании движения на основе VOF и задании достаточно крупных ячеек с целью

сокращения времени расчета полученные линии тока в распыленной части струи могут, как будет показано далее, существенно выходить за ее границы.

Ниже представлен обзор основных характеристик газожидкостных потоков, используемых для анализа свободных струй по результатам CFD-моделирования. Указанные характеристики можно разделить на несколько категорий:

- кинематические – параметры, описывающие движение среды (рисунок 3.2, *а, б*);
- концентрационные – параметры, определяющие пространственное распределение фаз (рисунок 3.2, *в, г*);
- интегральные – обобщенные параметры струи, вычисляемые на основе кинематических и концентрационных характеристик.

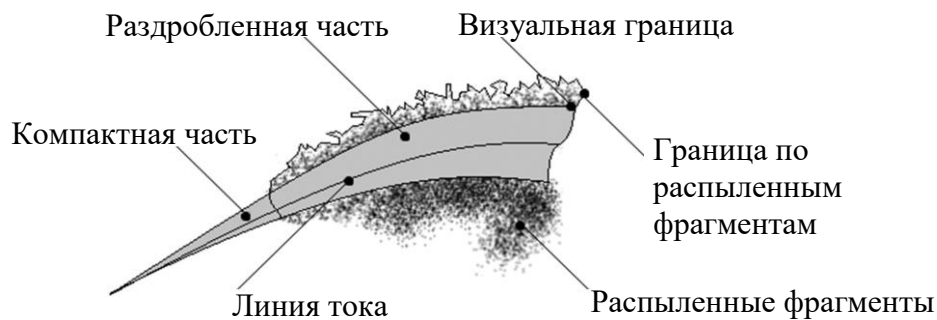


Рисунок 3.1 – Схема свободной струи огнетушащего вещества

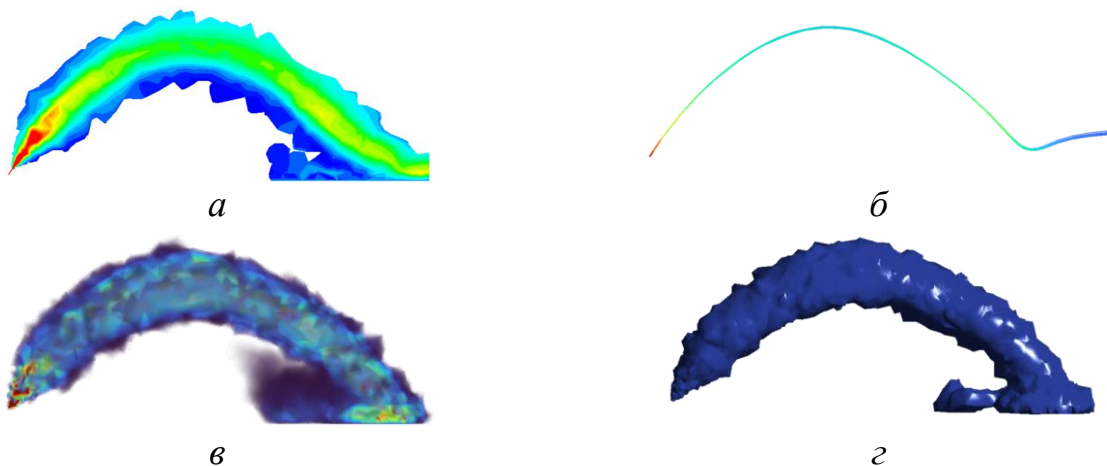


Рисунок 3.2 – Примеры построения характеристик газожидкостного потока по результатам численного моделирования: *а* – поля скоростей; *б* – линия тока; *в* – объемная визуализация по VF; *г* – изоповерхность по VF

Среди кинематических характеристик, представляющих интерес с точки зрения прикладной области данного исследования, можно выделить следующие:

1) Вектор скорости, который является фундаментальной характеристикой, определяющей движение каждой фазы [148]. В Эйлеровом подходе [80] описываются отдельные поля для компонентов потока. При использовании модели VOF [181] скорость в каждой ячейке расчетной сетки (рисунок 3.2, *а*) одинакова для обеих фаз, но скачкообразно изменяется на межфазной границе. Для оценки траектории и параметров струи на основе вектора скорости можно применять следующие характеристики:

- Профили осевой скорости – распределение продольной компоненты скорости вдоль оси струи [148]. Позволяют определить границы потенциального ядра и компактного участка струи. Данная характеристика является ключевой для определения точечных геометрических параметров струи (дальности и высоты), однако требует определения осевой линии.

- Радиальные профили скорости на различных расстояниях от истока струи [148]. Используются для определения границ газожидкостного потока и изучения его расширения.

- Поперечные компоненты скорости, которые оказывают существенное влияние на движение газожидкостного потока под воздействием бокового ветра и определяют отклонение струи от прямолинейной траектории.

2) Линии тока [90] – кривые, касательные к вектору скорости в фиксированный момент времени (рисунок 3.2, *б*). Позволяют визуализировать структуру потока.

3) Траектории частиц [90] – пути, проходимые отдельными частицами фазы за конечное время. Для модели Лагранжа [116] дисперсной фазы траектории капель являются прямым результатом численного расчета.

4) Стриклайны [90] – геометрические места частиц, прошедших через заданную точку в разные моменты времени.

Для газожидкостной струи распределение фаз является определяющим фактором при идентификации ее границ. С целью соответствующей оценки могут использоваться следующие концентрационные характеристики:

1) Объемная доля фазы [181]. В модели VOF основной характеристикой является объемная доля одной из фаз, изменяющаяся от 0 до 1 (рисунок 3.2, в). Граница струи часто определяется по изоповерхности [114] с заданным пороговым значением данного параметра (рисунок 3.2, г). Координаты ее точек дают непосредственное геометрическое описание траектории и формы струи. В двухфазных потоках (газожидкостных) объемная доля определена в каждой ячейке как непрерывная величина, что позволяет строить изоповерхности для различных значений содержания жидкости, в частности огнетушащего вещества, в том числе и для дисперсных участков струй, на которых четкая граница раздела отсутствует.

2) Межфазная площадь поверхности [90]. Плотность межфазной поверхности (площадь поверхности раздела на единицу объема) применяется для оценки интенсивности межфазного взаимодействия. В балансовой модели (PBM [56]) данная характеристика может быть рассчитана на основе распределения капель по размерам. Зоны высоких значений соответствуют областям активного дробления, коалесценции (слияния) или интенсивного массообмена.

3) Размер капель [116]. Для распыленных струй в зависимости от решаемой задачи критически важным может быть распределение капель по размерам. Данная характеристика влияет на инерционность и, следовательно, на отклонение под действием бокового ветра: крупные капли более инерционны и сохраняют траекторию, близкую к баллистической, мелкие быстро увлекаются ветром.

В зависимости от решаемой на основе моделирования задачи по его результатам вычисляются интегральные характеристики, непосредственно описывающие движение струи, в частности:

1) Осевая линия струи [58] определяется, как правило, для осесимметричных однофазных струй или сплошных участков струй, т.к. при

распылении, раздроблении потока происходит потеря его целостности и построение данной кривой существенно усложняется [164].

2) Ширина (радиус) потока [58]. Характеризует расширение струи вдоль траектории. Определяется как расстояние от оси, на котором параметр (скорость или концентрация) падает до заданного уровня. Для двухфазных потоков ширина может различаться у разных фаз из-за проскальзывания.

3) Дальнобойность струи [58]. Максимальное расстояние, на котором струя сохраняет свою структуру (определяется по порогу скорости или концентрации). Для струй в сносимом потоке можно оценивать дальнобойность вдоль первоначального (дальность струи) и поперечного (смещение пятна контакта) направления.

4) Координаты точки (множества точек) встречи потока с заданной областью [162]. Для задач управления пожарными роботами критически важной характеристикой является точка пересечения траектории струи (или ее границ) с целевой поверхностью (например, с очагом пожара или охлаждаемым объектом). По результатам моделирования эта характеристика может быть определена как пересечение изоповерхности с заданной плоскостью или кривой.

5) Траектория по изоповерхности фазы [114]. Наиболее прямой метод для струй с четкой границей раздела – построение изоповерхности и определение ее осевой линии. В постпроцессорах различных программных пакетов, реализующих методы CFD (ParaView, Tecplot, CFD-Post) [120] эта операция выполняется стандартными средствами. Однако, как было указано выше, задание фиксированных пороговых значений объемной доли жидкости малоэффективно из-за существенной разницы данного параметра на начальном и конечном участках траектории движения газожидкостного потока, поэтому для решения задач, поставленных в данной диссертации, указанный метод не подходит.

6) Траектория по максимуму концентрации [114]. Для дисперсных струй производится построение профиля потока в поперечных сечениях, определяется точка максимума, и эти точки соединяются в линию. При этом требуется

сглаживание из-за флуктуаций и дискретности сетки. Такой подход может быть эффективным, в том числе и для объемного описания геометрии исследуемых газожидкостных потоков в виде поперечных сечений. Однако для формирования соответствующих срезов требуется исходная опорная кривая, определяющая положение ортогональных секущих плоскостей в пространстве вдоль траектории движения струи.

В таблице 3.1 представлен анализ характеристик газожидкостных потоков, вычисляемых по результатам численного моделирования, которые могут быть использованы при решении задач управления противопожарными роботизированными системами.

Таблица 3.1 – Анализ характеристик газожидкостных потоков, вычисляемых по результатам численного моделирования

Наименование характеристики	Использование в противопожарных роботизированных системах	Достоинства	Недостатки
1	2	3	4
Профили осевой скорости	Оценка точечных характеристик (высота, дальность)	Наличие готовых алгоритмов вычисления	Характеристики рассчитываются по оси струи, что сложно согласовать с параметрами, определяемыми на основе натурных испытаний
Линии тока	Оценка траектории струи	Наличие готовых алгоритмов вычисления; оценка траектории по всей длине потока	Выход за границы газожидкостного потока в распыленной части при использовании модели VOF
Траектории частиц			Сложности согласования с результатами натурных испытаний, в частности с выделением траектории частиц, соответствующих верхней визуальной границе
Стриклайны			
Осевая линия струи			

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4
Дальнобойность струи	Оценка дальности и смещения пятна контакта	Наличие готовых алгоритмов	Зависимость от метода оценки
Координаты точек пересечения потока с заданной областью	Оценка положения, размеров и формы пятна контакта	Наличие готовых алгоритмов; точная оценка параметров пятна контакта	Большой объем данных, требуемых для хранения и обработки; зависимость от метода определения изоповерхности
Траектория по изоповерхности фазы	Оценка объемного представления и траектории струи	Наличие готовых алгоритмов вычисления; оценка траектории	
Траектория по максимуму концентрации	Оценка траектории струи	по всей длине потока	Зависимость от опорной кривой, на основе которой определяются сечения для вычисления объемной доли жидкости

Учитывая выделенные в таблице 3.1 недостатки, в диссертационной работе для решения задач машинного обучения, верификации и валидации моделей, применяемых для оценки характеристик газожидкостных потоков были разработаны следующие методы [203]:

1) Метод построения линии максимальных скоростей потока [244], соответствующей визуально наиболее «плотной» части струи, на основе которой формируется ее верхняя граница в системах компьютерного зрения, и определяемая фрагментами вещества, движущимися с максимальными скоростями. На основе данной кривой можно, в том числе, оценивать дальность, высоту струи и смещение пятна контакта.

2) Метод аппроксимации потока эллиптическими сечениями, используемый для объемного представления струй, имеющих соответствующую форму

пересечений с секущими плоскостями, построение которых производится, исходя из следующих принципов:

- одна вершина каждого эллипса лежит на опорной кривой, в данном случае на линии максимальных скоростей потока;
- плоскости, которым принадлежат эллипсы, ортогональны векторам скоростей в соответствующих точках опорной кривой;
- радиусы эллипсов определяются размерами струи в сечениях соответствующими плоскостями.

На основе аппроксимации потока эллиптическими сечениями можно, в том числе, определять положение, размер и форму пятна контакта, а также соответствующее направление и интенсивность орошения, что позволяет производить оценку эффективности пожаротушения и охлаждения защищаемых объектов, в частности с использованием численного моделирования пожара.

Ниже представлены алгоритмы, разработанные на базе предлагаемых методов построения потоковых характеристик свободных струй по результатам численного моделирования. В рамках диссертационного исследования также было разработано импортозамещающее программное обеспечение, реализующее данные алгоритмы [229].

При описании алгоритмов приняты следующие оси трехмерного пространства: ось OX горизонтальная ось, совпадающая с соответствующей проекцией начального направления движения потока; ось OY вертикальная ось; ось OZ горизонтальная ось, ортогональная осям OX и OY . Начало координат находится в геометрическом центре входной области исследуемого потока (начальная точка струи).

3.2 Алгоритм построения линии максимальных скоростей потока

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке А.3 (приложение А). Поясняющая схема к алгоритму приведена на рисунке 3.3.

Входные данные:

– Массив координат узлов сетки: $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$, $i = 1..n$, где n – количество узлов расчетной сетки.

– Массив векторов скоростей в узлах сетки: $V_i = [V_{x_i} \ V_{y_i} \ V_{z_i}]^T$.

– Множество узлов, формирующих входную область исследуемого потока (исток струи): *Inlet*.

– Длина шага: *step*.

– Ширина сечения: *width*.

– Пороговое значение, определяющее близость скорости к нулевой: ε .

Выходные данные:

– Массив координат линии максимальных скоростей потока: *TP*.

Шаг 1. Во входной области потока выбирается начальная точка с максимальным модулем скорости и заносится в массив линии потока:

$TP_1 = P_k : |V_k| = \max_{i=1..n, P_i \in Inlet} (|V_i|)$ (рисунок 3.3), где $|V_i| = \sqrt{V_{x_i}^2 + V_{y_i}^2 + V_{z_i}^2}$ – модуль вектора.

Вектор скоростей с максимальным модулем скорости заносится в массив скоростей линии потока: $TV_1 = V_k$.

Устанавливается счетчик итераций: $N = 1$.

Шаг 2. Вычисляются координаты опорной точки: $NP = TP_N + step \cdot TV_N$ (рисунок 3.3).

Шаг 3. Выбирается ближайший к опорной точке узел расчетной сетки: $P_k : |P_k - NP| = \min_{i=1..n} (|P_i - NP|)$ (рисунок 3.3).

Шаг 4. В окрестностях сечения потока плоскостью, которая проходит через точку $P_k = (X_k, Y_k, Z_k)$ и нормаль которой совпадает по направлению со скоростью

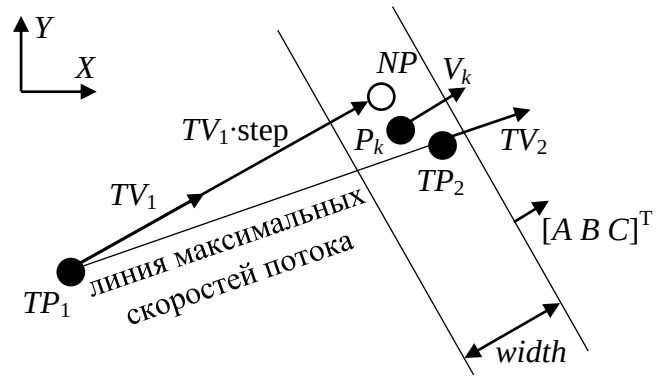


Рисунок 3.3 – Поясняющая схема к алгоритму построения линии максимальных скоростей потока

V_k в этой точке, производится поиск узла сетки с максимальной скоростью (рисунок 3.3). Для этого производится расчет параметров уравнения секущей плоскости вида (3.1):

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0, \quad (3.1)$$

где $NV = [A \ B \ C]^T = V_k / |V_k|$ – нормаль плоскости;

$D = -(A \cdot X_k + B \cdot Y_k + C \cdot Z_k)$ – свободный параметр уравнения плоскости.

Далее вычисляются расстояния от узлов сетки до секущей плоскости по формуле (3.2):

$$r(P_i) = |A \cdot X_i + B \cdot Y_i + C \cdot Z_i + D|. \quad (3.2)$$

Из множества узлов сетки, лежащих в окрестности секущей плоскости шириной $width$ выбирается точка с максимальной скоростью и заносится в массив линии потока (рисунок 3.3): $TP_{N+1} = P_m : |V_m| = \max_{i=1..n, r(P_i) \leq width/2} (|V_i|)$.

Вектор скоростей с максимальным модулем скорости заносится в массив скоростей линии потока: $TV_{N+1} = V_m$.

Если $TP_{N+1} = TP_N$, то последняя точка массива линии максимальных скоростей потока удаляется и работа алгоритма останавливается.

Если максимальный модуль скорости близок к нулю $|TV_{N+1}| \leq \varepsilon$, то достигнут конец траектории потока, и работа алгоритма останавливается. В противном случае счетчик итераций повышается $N = N+1$ и производится переход к шагу 2.

При использовании сеток с достаточно большими расстояниями между узлами для повышения точности на шаге 3 можно применять точки, координаты и вектор скорости которых вычисляются на основе вершин ячейки, содержащей NP , по формулам (3.3):

$$TP = \frac{\sum_{P_i \in F} (VF_i \cdot P_i)}{\sum_{P_i \in F} VF_i}, \quad TV = \frac{\sum_{P_i \in F} (VF_i \cdot V_i)}{\sum_{P_i \in F} VF_i}, \quad (3.3)$$

где F – ячейка расчетной сетки, в которой находится опорная точка;

VF_i – массив значений объемной доли жидкости (фазы) в узлах расчетной сетки, $i = 1..n$.

3.3 Алгоритм аппроксимации потока эллиптическими сечениями

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке А.4 (приложение А).
Поясняющая схема к алгоритму приведена на рисунке 3.4.

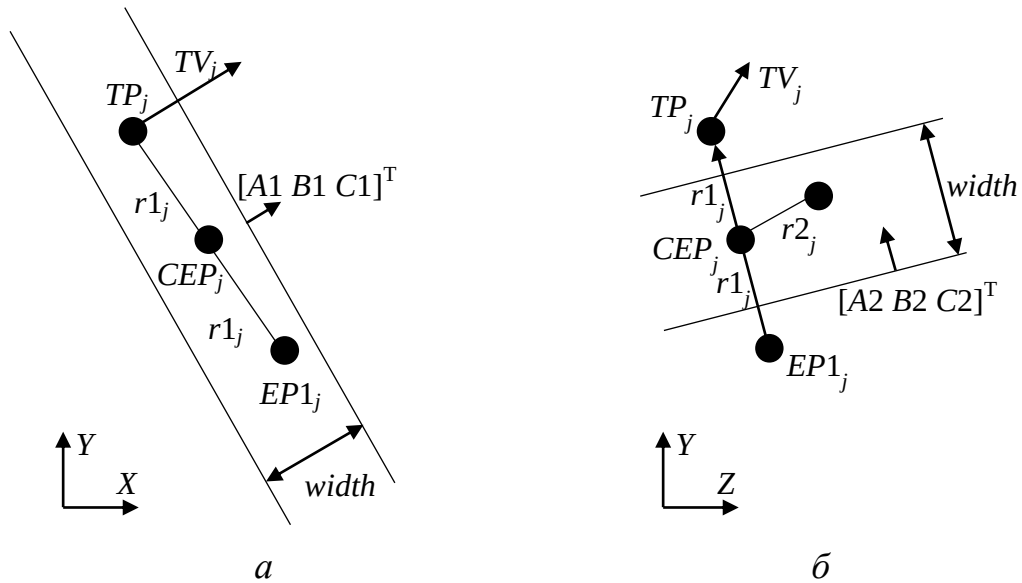


Рисунок 3.4 – Поясняющая схема к алгоритму определения параметров эллиптического сечения

Входные данные:

– Массив координат узлов сетки: $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$, $i = 1..n$, где n – количество узлов расчетной сетки.

– Массив координат точек опорной кривой, в данном случае линии максимальных скоростей потока: $TP_j = (TX_j, TY_j, TZ_j)$, $j = 1..m$, где m – количество точек опорной кривой.

– Массив векторов скоростей в точках опорной кривой:
 $TV_j = [TVx_j \quad TVy_j \quad TVz_j]^T$.

– Массив значений объемной доли жидкости в узлах расчетной сетки: VF_i .

- Ширина сечения: $width$.
- Коэффициент объемной доли жидкости, формирующей основной поток в заданном сечении: dVF .

Выходные данные:

- Массивы координат точек, лежащих на границах эллипсов, которые охватывают поток: sE .
- Массивы параметров, описывающих эллипсы: координаты центров CEP ; радиусы $r1, r2$.

Дополнительно алгоритм может возвращать: среднее значение объемной доли жидкости в узлах сетки, лежащих внутри соответствующего эллиптического сечения: eVF , что может использоваться для расчета интенсивности орошения при оценке эффективности орошения струей огнетушащего вещества защищаемых объектов.

Цикл осуществляется по всем точкам массива $TP_j, j=1..m$.

Шаг 1. Формируется множество узлов расчетной сетки, принадлежащих окрестности секущей плоскости, которая проходит через точку $TP_j = (TX_j, TY_j, TZ_j)$ и нормаль которой совпадает по направлению со скоростью TV_j в этой точке (рисунок 3.4, а).

Для этого производится расчет параметров уравнения плоскости (3.1). При этом если модуль скорости меньше ε (в последней точке опорной кривой), то в качестве нормали принимается вектор $[0 \ -1 \ 0]^T$, что соответствует вертикальному движению вниз.

Из множества узлов сетки P выбираются точки, лежащие в окрестности секущей плоскости шириной $width$, объемная доля жидкости в которых формирует основной поток:

$$SP_k = P_i : r(P_i) \leq width / 2, VF_k \geq dVF \cdot \frac{\sum_i VF_i}{\sum_i 1}.$$

Шаг 2. Определяется вершина эллиптического сечения противоположная точке TP_j , а также максимальный по множеству SP радиус (рисунок 3.4, а):

$$EP1_j = SP_k : \max_{SP_k \in SP} (|SP_k - TP_j|), \quad r1_j = |EP1_j - TP_j| / 2. \quad (3.4)$$

Шаг 3. Определяются координаты центра эллиптического сечения (рисунок 3.4, а):

$$CEP_j = (EP1_j + TP_j) / 2. \quad (3.5)$$

Шаг 4. Определяется второй радиус эллипса. Для этого производится расчет параметров уравнения (3.1) секущей плоскости, которая проходит через центр эллипса CEP_j и нормаль которой совпадает по направлению с вектором $TP_j - CEP_j$ (рисунок 3.4, б).

Далее определяется максимальное расстояние от центра эллипса до точек множества SP , лежащих в окрестности секущей плоскости шириной $width$ (рисунок 3.4, в):

$$r2_j = \max_{SP_k \in SP, r(SP_k) \leq width/2} (|SP_k - CEP_j|). \quad (3.6)$$

Шаг 5. Производится построение эллипса с радиусами $r1_j, r2_j$ в плоскости YZ с нормалью $[1 \ 0 \ 0]^T$ (рисунок 3.5).

Эллипс представляет собой множество точек E , удовлетворяющих уравнению (3.7):

$$\frac{Y^2}{r1_j^2} + \frac{Z^2}{r2_j^2} = 1. \quad (3.7)$$

Шаг 6. Производится определение матрицы перехода от плоскости с нормалью $v0 = [1 \ 0 \ 0]^T$, в которой на шаге 5 построен эллипс, к секущей плоскости с нормалью $v1 = TV_j / |TV_j|$ (рисунок 3.5).

Формирование матрицы поворота M осуществляется путем преобразований (3.8):

$$t = v0 \times v1, \quad t = \frac{t}{|t|}, \quad V0 = t \times v0, \quad V1 = t \times v1, \quad (3.8)$$

$$M1 = [v0 \ V0 \ t]^T, \quad M2 = [v1 \ V1 \ t]^T, \quad M = M2 \cdot M1^{-1},$$

где $\times$ – операция векторного умножения.

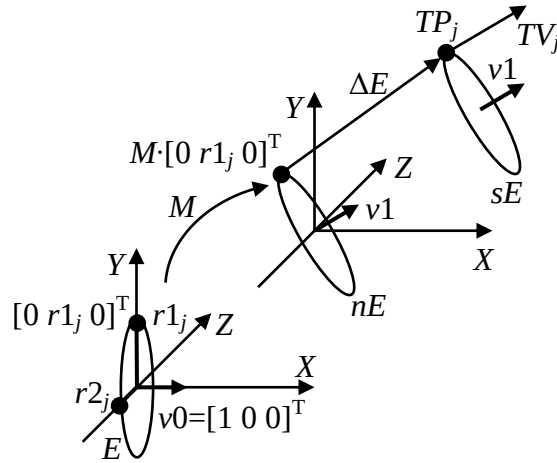


Рисунок 3.5 – Поясняющая схема к алгоритму построения эллиптического сечения

Шаг 7. Производится вычисление координат точек эллипса в секущей плоскости по формуле (3.9):

$$nE = M \cdot E. \quad (3.9)$$

Шаг 8. Производится смещение эллипса так, чтобы его вершина совпадала с точкой TP_j :

$$sE_j = nE + \Delta E, \quad (3.10)$$

где ΔE – отклонение соответствующей вершины эллипса от точки TP_j :

$$\Delta E = TP_j - M \cdot \begin{bmatrix} 0 & r1_j & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (3.11)$$

Матрица M в (3.8) определяется как переход между базисами в трехмерном пространстве, при котором единичный вектор $v0$ преобразуется в вектор $v1$. Для этого вычисляются вспомогательные векторы t , $V0$, $V1$, образующие с $v0$ и $v1$ линейно-независимые комбинации (базисы), путем их попарного произведения:

t (3.8) – ортогонален векторам $v0$ и $v1$ по определению векторного произведения.

$V0$ (3.8) – ортогонален векторам $v0$ и t по определению векторного произведения. Соответственно $v0$, $V0$, t – образуют базис в трехмерном пространстве: $M1$ (3.8).

V_1 (3.8) – ортогонален векторам v_1 и t по определению векторного произведения. Соответственно v_1 , V_1 , t – образуют базис в трехмерном пространстве: M_2 (3.8).

Тогда матрицу перехода от M_1 к M_2 можно определить на основе уравнения:

$$M_2 = M \cdot M_1 \Rightarrow M = M_2 \cdot M_1^{-1}. \quad (3.12)$$

Также для перехода между плоскостями на шаге 6 алгоритма построения эллиптических сечений можно использовать формулы Родрига [65] и Эйлера – Родрига [130].

3.4 Аprobация разработанных алгоритмов

На рисунках 3.6 и 3.7 представлены линии максимальных скоростей и линии тока, построенные по результатам моделирования (в программной среде Ansys Fluent [224]) движения огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола при боковом ветре с использованием модели переноса объемной доли жидкости (VOF) и модели турбулентности k - ϵ .

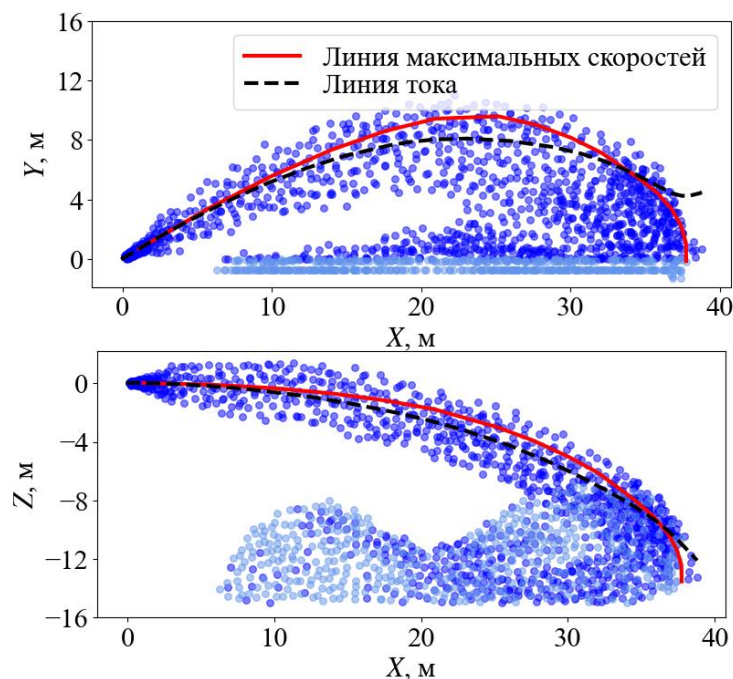


Рисунок 3.6 – Графики линии максимальных скоростей и линии тока в плоскостях XY и XZ

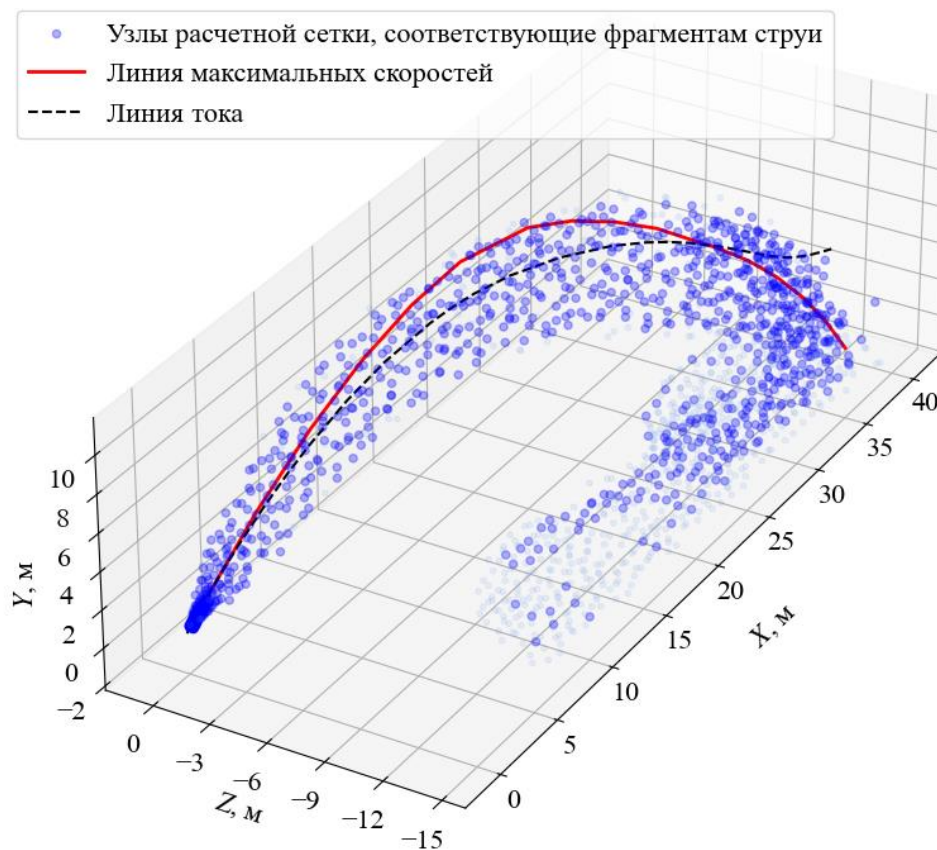


Рисунок 3.7 – Результаты построения линии максимальных скоростей
и линии тока

Точками на рисунках обозначены узлы расчетной сетки, в которых объемная доля огнетушащего вещества превышает заданное граничное значение. При этом темные точки соответствуют движущимся фрагментам струи, а более светлые – неподвижным, осевшим на поверхность земли. Линии максимальных скоростей (ЛМС) изображены кривыми красного цвета, а линии тока – черного.

Линия максимальных скоростей 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. При этом линия тока проходит ближе к центральной части потока, а в распыленной области выходит за его пределы (рисунки 3.6–3.7).

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 огнетушащего вещества 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 предлагаемый метод не имеет указанного недостатка.

На рисунке 3.8 представлена аппроксимация потока свободной струи эллиптическими сечениями, построенная по результатам моделирования (для наглядности множество сечений прорежено до 20). Полученная фигура охватывает основной поток жидкости. На участке компактной части струи (рисунок 3.8) размеры сечений минимальны и постепенно увеличиваются до существенных величин при удалении от выходного патрубка за счет раздробления и распыления огнетушащего вещества, что соответствует результатам натурных испытаний. При этом вертикальные радиусы эллипсов заметно больше горизонтальных. Это объясняется тем, что распад струи вдоль вертикальной оси происходит, в том числе, и под действием силы тяжести.

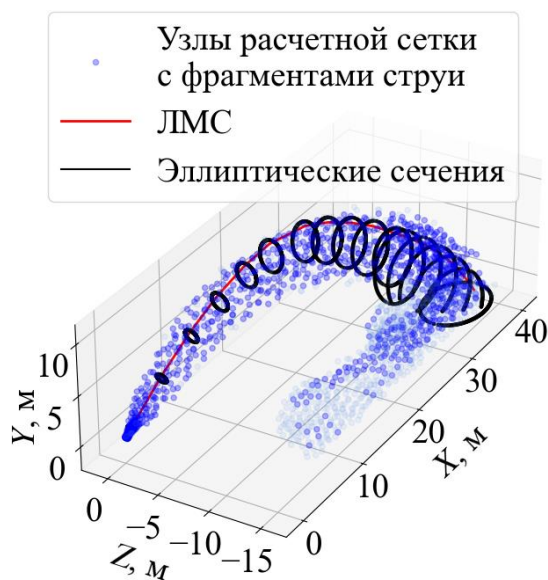


Рисунок 3.8 – Результаты аппроксимации потока эллиптическими сечениями, опирающимися на линию максимальных скоростей

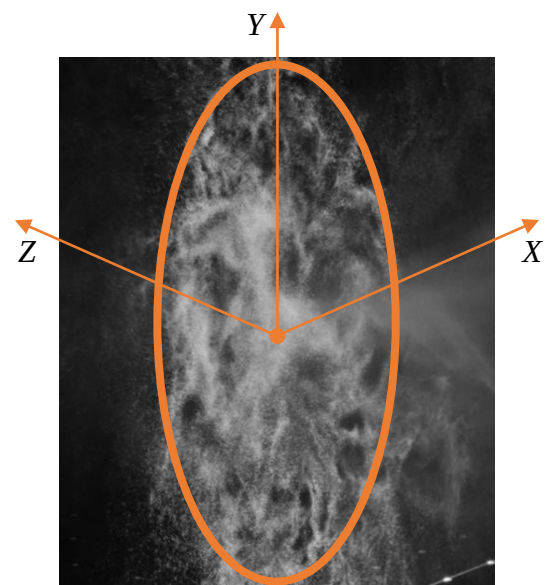


Рисунок 3.9 – Изображение сечения потока огнетушащего вещества лазерной плоскостью

Как показал анализ результатов экспериментальных исследований сечений струй огнетушащего вещества лазерными плоскостными проекциями [117], основная часть потока сосредоточена внутри фигур, ограниченных эллипсами (рисунок 3.9), что согласуется с разработанным методом объемной аппроксимации.

Также стоит отметить, что для параметрического описания такого представления требуется небольшой по сравнению с классическими подходами (в частности, на основе изоповерхностей) набор данных для каждого сечения: координаты центров и радиусы, что позволяет эффективно применять данный алгоритм для разработки и оценки законов управления пожарными роботами при орошении защищаемых поверхностей, в том числе с использованием данных о направлении и скорости движения газожидкостного потока, а также объемной доли жидкости. Так для представленной на рисунке 3.8 струи количество точек соответствующей изоповерхности (рисунок 3.2, *г*), сформированной на основе порогового значения объемной доли жидкости (VF), превышает 5000 (по 3 координаты на каждую точку, всего 15000 параметров). Соответствующее количество точек объемной визуализации по VF (рисунок 3.2, *в*) – более 10000 (по 3 координаты и 1 значение VF на каждую точку, всего 40000 параметров). При этом для описания 100 эллиптических сечений требуется 500 параметров (по 3 координаты центра и 2 радиуса на каждый эллипс).

3.5 Выводы по главе 3

В ходе проведенного исследования, которому посвящена третья глава, были получены следующие результаты и выводы:

1) 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.

2) Разработан новый алгоритм объемной аппроксимации газожидкостных потоков по результатам моделирования на основе предложенного метода представления струй в виде эллиптических сечений, отличающийся от известных меньшим количеством параметров, требующихся для описания потоков и позволяющий оценивать форму и размеры контактного пятна, а также интенсивность орошения на всей длине траектории огнетушащего вещества. Малое по сравнению с другими подходами количество параметров, требуемых для описания потока, 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.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫБОРА МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ

Четвертая глава посвящена разработке технологии выбора методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков, которая обеспечивает скорость и точность расчета, удовлетворяющие заданным критериям, что позволяет ускорить процесс формирования обучающих и верификационных выборок в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий. Проведен обзор различных методов CFD, которые могут применяться для численного расчета движения струй огнетушащего вещества, в том числе при возмущающих воздействиях. На основе разработанной технологии был произведен выбор моделей вычислительной гидродинамики и их параметров, обеспечивающих скорость и точность расчета, требуемые для формирования с их использованием обучающих и верификационных выборок для построения расчетных моделей оценки целевых характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах.

4.1 Обзор методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков

Характерными особенностями исследуемых в рамках диссертационной работы струй являются большие геометрические размеры траекторий (десятки метров), высокие начальные скорости (десятки метров в секунду), раздробление и распыл сплошного потока на отдельные фрагменты и капли различного размера (рисунок 1.16), а также обратные процессы: слияние капель (например, в области контактного пятна), что существенно повышает вычислительную сложность задачи моделирования. В частности, для математического описания указанных

явлений необходимо использование соответствующих методов и размеров ячеек расчетной сетки, на которые разбивается рассматриваемое пространство, что, учитывая высоту и дальность изучаемых потоков огнетушащего вещества, потребует значительного количества ресурсов для проведения расчета.

Исследуемые в рамках прикладной области диссертации свободные струи с точки зрения численного моделирования представляют собой многофазные потоки: воздух (первичная фаза) – огнетушащее вещество (вторичная фаза). Если обеспечить значительное превышение характерным размером межфазной границы соответствующих размеров ячеек расчетной сетки на участке сплошной струи (рисунок 1.16), то для его описания можно применять модель переноса объемной доли жидкости (VOF), которая позволяет сократить время расчета по сравнению с Эйлеровым подходом. Это может быть актуально при решении задач, требующих построения траекторий на большом множестве различных значений параметров, влияющих на анализируемую динамику, в частности, задач формирования выборок для обучения и верификации нейросетевых моделей.

Однако в случаях, когда раздробление и распыл жидкости оказывают существенное влияние на траекторию движения свободной струи, необходимо учитывать не только ее сплошную, но и дисперсную фазы, а также соответствующие переходы между ними. Для этого требуются различные подходы. В частности, гибридные методы, совместно использующие две модели, например, VOF-DPM: VOF – для сплошной фазы, DPM (модель Лагранжа) – для дискретной фазы. Такая технология позволяет учитывать применительно к рассматриваемой задаче только раздробление и распыл струи. В исследованиях, одним из предметов которых является обратный переход (слияние отдельных капель и т.д.), применяются более сложные модели на базе Эйлеровой, обзор которых представлен в этом параграфе. Отмеченные способы обладают значительной вычислительной сложностью, что может существенно увеличивать время расчета, особенно в характерных для прикладной области данного исследования геометрических масштабах.

Как было указано выше, газожидкостные струи представляют собой многофазные потоки. Выбор метода описания взаимодействия фаз определяет, как вычислительные затраты, так и точность получаемых результатов. Среди наиболее распространенных подходов, предназначенных для моделирования соответствующих явлений, можно выделить следующие:

1) Модель переноса объемной доли жидкости (Volume of Fluid – VOF) [181].

Сущность метода. В основе VOF лежит определение границы раздела фаз. При этом решается единое уравнение переноса для объемной доли одного из компонентов потока, что позволяет отслеживать положение межфазной границы. Метод эффективен для моделирования потоков с четко выраженной границей раздела.

Применение для струйных течений. VOF широко используется для моделирования свободных струй, особенно в случаях, когда важна детальная геометрия поверхности струи, ее распад на капли и взаимодействие с окружающей средой. Исследования показывают эффективность применения VOF для стратифицированных газожидкостных течений в каналах.

Достоинства: естественное сохранение массы; относительно низкие вычислительные затраты; хорошо подходит для моделирования поверхностных явлений (капиллярные эффекты, смачивание).

Недостатки: сложность точного определения кривизны поверхности для расчета сил поверхностного натяжения; возможное «размазывание» границы раздела при недостаточном разрешении сетки; трудности при моделировании дисперсных сред с большим количеством мелких включений.

2) Метод Эйлера – Эйлера (Эйлер – Эйлерова модель) [80].

Сущность метода. В рамках Эйлера – Эйлерова подхода обе фазы рассматриваются как взаимопроникающие среды. Для каждой из них решаются собственные уравнения сохранения массы, импульса и энергии, а взаимодействие между компонентами потока учитывается через члены межфазного обмена. Этот подход является доминирующим для моделирования потоков с дисперсной структурой.

Применение для струй. Метод эффективен для моделирования распыленных струй, где одна фаза распределена в другой в виде дискретных включений (капель). Современные реализации включают балансовые модели (Population Balance [56]) и модели взаимодействия капель (слияние, дробление) [186].

Достоинства: естественно описывает потоки с высокой объемной долей дисперсной фазы; позволяет учитывать полидисперсность включений через модели баланса; вычислительно эффективнее методов, отслеживающих каждую частицу.

Недостатки: требует замыкающих соотношений для межфазных сил (сопротивление, подъемная сила, виртуальная масса, турбулентная дисперсия); сложность учета распределения размеров частиц без дополнительных моделей; ограниченная точность при моделировании резких границ раздела; высокая вычислительная сложность по сравнению с VOF.

3) Метод Эйлера – Лагранжа [116].

Сущность метода. В этом подходе несущая фаза (для струй огнетушащего вещества – газ) описывается в Эйлеровой постановке, а дисперсная фаза (капли, частицы) отслеживается в Лагранжевой системе координат путем интегрирования уравнений движения для каждой частицы или их ансамбля.

Применение для струй. Метод широко применяется для моделирования распылительных процессов, топливных факелов, аэрозольных струй. Он позволяет детально изучать траектории капель, их взаимодействие с турбулентностью и стенками.

Достоинства: естественное описание полидисперсных потоков; возможность учета сложных межфазных взаимодействий (столкновения, слияние, дробление); высокая физическая наглядность.

Недостатки: высокие вычислительные затраты при большом количестве частиц; необходимость моделирования турбулентной дисперсии частиц; сложность учета обратного влияния частиц на несущую фазу при высокой объемной доле.

4) Гибридные подходы.

Современные исследования демонстрируют перспективность гибридных подходов, комбинирующих преимущества различных методов. Существуют гибридные модели, объединяющие Эйлерову двухфазную модель со свойствами захвата межфазной границы. Такие подходы способны предсказывать как пузырьковые режимы течения, так и режимы с крупными газовыми полостями, что особенно актуально для струйных течений с широким спектром масштабов неоднородностей. Среди гибридных подходов можно выделить следующие:

- Многофазная модель Эйлера, использующая VOF для описания отдельных фаз (Multi-fluid VOF) [92]. Особенностью данного подхода является представление жидкости, как дисперсного потока, который при определенном критическом значении объемной доли приобретает свойства сплошной фазы за счет изменения соответствующих уравнений (закон сопротивления и т.д.).

- Модель плотности алгебраической площади границы (интерфейса) между фазами (AIAD) [97], в которой переходы между сплошными и дисперсными фазами реализованы на основе уравнений массообмена.

- Обобщенная двухфазная методика (GenToP) [66], в которой переходы между фазами описываются на основе AIAD, Multi-fluid VOF, а также с использованием модели равновесного распределения.

Данные подходы обладают значительной вычислительной сложностью, что может существенно увеличивать время расчета, особенно в характерных для прикладной области настоящего исследования геометрических масштабах.

Турбулентность играет определяющую роль в структуре и динамике газожидкостных потоков свободных струй, поэтому выбор соответствующей модели критически влияет на точность численного расчета. Ниже представлены методы, предназначенные для моделирования турбулентных течений.

1) Прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation – DNS).

Сущность метода. DNS подразумевает решение полных нестационарных уравнений Навье – Стокса без каких-либо моделей турбулентности, с

разрешением всех пространственных и временных масштабов турбулентности [20].

Применение для струй. Используется в фундаментальных исследованиях структуры турбулентных струй, механизмов перемешивания, распада струй на капли. Позволяет получать эталонные данные для верификации других моделей.

Достоинства: наивысшая точность, отсутствие модельных допущений; возможность изучения тонких механизмов турбулентности; эталонный метод для верификации.

Недостатки: экстремально высокие вычислительные затраты; применим только для низких чисел Рейнольдса и простых геометрий; непригоден для инженерных расчетов реальных объектов.

2) Моделирование крупных вихрей (Large Eddy Simulation – LES) [107].

Сущность метода. В LES крупномасштабные турбулентные структуры разрешаются непосредственно, а влияние мелких вихрей (подсеточных масштабов) моделируется с использованием подсеточных моделей.

Применение для струй. LES эффективен для моделирования свободных струй, особенно при наличии крупных вихрей, характерных для начальных участков струй [107].

Достоинства: высокая точность в широком диапазоне условий; способность разрешать нестационарные когерентные структуры; меньшая зависимость от модели по сравнению с RANS [79].

Недостатки: высокие вычислительные затраты (на порядок выше RANS); требовательность к качеству и разрешению сетки; сложность постановки граничных условий для входящих турбулентных пульсаций.

3) Модели на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (Reynolds – Averaged Navier – Stokes, RANS) [79].

Сущность метода. RANS-подход основан на решении уравнений для осредненных характеристик потока, при этом все турбулентные пульсации моделируются через замыкающие соотношения. Этот класс моделей наиболее распространен в инженерной практике.

Основные модели RANS для струйных течений:

- стандартная k - ε модель [128] – двухпараметрическая модель, широко применяемая для свободных струй (k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации);
- k - ε модель ренормализационных групп (RNG) и k - ε Realizable [128] – модификации стандартной модели, обеспечивающие лучшую точность для вращающихся и струйных течений;
- стандартная k - ω модель [194] – эффективна в пристеночных областях (ω – удельная скорость диссипации);
- SST k - ω (Shear Stress Transport) [194] – комбинирует преимущества k - ω в пристеночной области и k - ε вдали от стенок;
- модель рейнольдсовых напряжений (Reynolds Stress Model – RSM) [150] – наиболее сложная RANS модель, основанная на решении уравнений для всех компонент тензора напряжений.

Достоинства: низкие вычислительные затраты; широко исследованы для различных классов задач; доступны в большинстве коммерческих и свободно распространяемых программных пакетов.

Недостатки: ограниченная точность для сложных отрывных течений; плохо предсказывают максимальные характеристики вблизи срыва потока; сильная зависимость результатов от выбора модели.

4) Гибридные RANS-LES методы [69].

Сущность метода. Гибридные подходы (DES – Detached Eddy Simulation, DDES – Delayed Detached Eddy Simulation) комбинируют RANS в пристеночных областях и LES в отрывных зонах.

Применение для струй. Исследования [89] показывают, что стационарные и нестационарные RANS-симуляции не способны предсказать корректную физику течения вблизи срыва даже на подробных сетках, в то время как DDES демонстрирует хорошую точность по сравнению с экспериментальными данными. Например, при моделировании течений со срывом потока DDES предсказывал максимальный коэффициент подъемной силы с ошибкой около 5 %,

тогда как вычислительные затраты были в 10 раз выше по сравнению со стационарным RANS [89].

Достоинства: высокий баланс точности и вычислительных затрат; способность разрешать крупные нестационарные структуры; приемлемые затраты по сравнению с полным LES.

Недостатки: проблемы на стыке RANS и LES зон; чувствительность к параметрам сетки; сложная настройка модели.

Классические аналитические решения для свободных струй служат важным инструментом верификации численных моделей. Исследование круглых свободных струй с использованием различных моделей турбулентности показало, что профили осевой скорости, полученные численно, могут существенно различаться в зависимости от выбранной модели. Экспериментальная оценка адекватности рассмотренных выше методов показывает удовлетворительное согласие [71] различных подходов с натурными испытаниями, однако точность сильно зависит от конкретного приложения и режима течения. Для недорасширенных струй [71] (поток, давление которых на выходе выше по сравнению с аналогичным параметром окружающей среды), где экспериментальные данные получить сложно из-за высоких скоростей и градиентов, CFD является одним из эффективных решений проблемы.

Точность CFD-моделирования существенно зависит от:

1) Типа и качества сетки – структурированные сетки часто точнее, но сложнее в построении для сложных геометрий; неструктурированные сетки обеспечивают гибкость, но могут вносить дополнительную численную диффузию.

2) Схем аппроксимации – схемы высокого порядка точности предпочтительны, но менее устойчивы.

3) Граничных условий – особенно критичен выбор условий на входе для турбулентных пульсаций.

4) Итерационной сходимости [71] – исследования показывают, что для некоторых задач итерационная сходимость менее критична, чем выбор модели турбулентности.

Поэтому при выборе методов вычислительной гидродинамики, а также их настроечных параметров требуется проведение валидации для обеспечения приемлемой точности относительно результатов экспериментов. Как показал проведенный обзор, наименьшей вычислительной сложностью (при одних и тех же размерах расчетной сетки) обладают модели VOF (для описания фаз газожидкостных потоков) и RANS (для описания турбулентности). Однако для достижения высокой степени согласованности получаемых на их основе результатов моделирования с экспериментами требуется тонкая настройка их параметров. Ниже представлен обзор основных характеристик, которые учитывались в рамках данного исследования при построении расчетных моделей.

В методах вычислительной гидродинамики корректный учет объемных сил может иметь критическое значение для точного моделирования многофазных потоков. К объемным силам в рамках решаемой задачи относятся гравитация, силы поверхностного натяжения. В уравнении Навье – Стокса они представлены в виде слагаемых в правой части:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u^T) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g + F_\sigma, \quad (4.1)$$

где ρ – плотность жидкости (огнетушащего вещества);

u – вектор скорости;

t – время;

p – давление;

τ – тензор напряжений;

g – ускорение свободного падения (ρg – гравитационная сила);

F_σ – сила поверхностного натяжения.

В модели VOF физические свойства среды (плотность ρ , вязкость μ) вычисляются как средневзвешенные по объемной доле фаз α :

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2, \quad \mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2, \quad (4.2)$$

где ρ, μ – средневзвешенные плотность и вязкость;

α – объемная доля первой фазы (жидкости);

ρ_1, ρ_2 – плотность соответственно первой и второй фазы (воздуха);

μ_1, μ_2 – вязкость соответственно первой и второй фазы.

Для учета поверхностного натяжения при использовании модели VOF, применяется CSF (Continuum Surface Force) [181]:

$$F_{\sigma} = \sigma k \nabla \alpha, \quad (4.3)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения (жидкой фазы струи);

k – кривизна свободной поверхности (между фазами: жидкость-воздух).

При достаточно больших объемных силах могут возникать проблемы со сходимостью численных алгоритмов, поэтому для решения данной проблемы применяется схема их неявного учета [181] в уравнениях, на основе которых определяются скорости через смежные грани соседних ячеек расчетной сетки. Однако указанный подход увеличивает вычислительную сложность. Ниже представлен сравнительный анализ реализаций модели VOF: без использования и с использованием неявного учета объемных сил.

Достоинства схемы без использования неявного учета объемных сил: простота реализации; меньшая вычислительная сложность [179].

Недостатки схемы без использования неявного учета объемных сил: применение данной схемы может приводить к численной неустойчивости при больших значениях объемных сил или при наличии сильных градиентов плотности (характерно для VOF с большим отношением плотностей фаз, например, вода-воздух); необходимость замельчения шага по времени – для сохранения устойчивости зачастую необходимо обеспечить выполнение условия Куранта – Фридрихса – Леви (CFL) [115]; может возникать дисбаланс между градиентом давления и объемными силами, что приводит к появлению нефизичных паразитных потоков, особенно вблизи межфазной границы.

Достоинства схемы с использованием неявного учета объемных сил: повышенная устойчивость – позволяет увеличивать размер шага по времени, особенно при наличии больших объемных сил; снижение паразитных потоков – более сбалансированный учет сил вблизи межфазной границы уменьшает нефизичные осцилляции скорости; лучшая сходимость – неявный учет способствует более быстрой сходимости к установившемуся решению.

Недостатки схемы с использованием неявного учета объемных сил: более сложная реализация; увеличение вычислительных затрат на итерацию.

Исследования [179] показывают, что неявный учет объемных сил через модифицированное давление может уменьшать величину паразитных потоков на несколько порядков. Хотя указанный подход требует больше вычислительных ресурсов на одну итерацию, возможность использования крупных шагов по времени за счет повышения устойчивости часто приводит к меньшему общему времени расчета для достижения заданного момента модельного времени. Соответствующий сравнительный анализ схем учета объемных сил при использовании модели VOF представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнительный анализ схем учета объемных сил

Характеристика	Без неявного учета	С неявным учетом
Устойчивость при больших отношениях плотностей	Низкая	Высокая
Паразитные потоки	Значительные	Минимальные
Сложность реализации	Низкая	Средняя
Затраты на итерацию	Низкие	Средние

При использовании модели VOF для повышения устойчивости расчета используется пороговое значение объемной доли жидкости:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \alpha < \alpha_{\min} \\ 1, & \alpha > 1 - \alpha_{\min} \\ \alpha, & \alpha_{\min} \leq \alpha \leq 1 - \alpha_{\min} \end{cases} \quad (4.4)$$

где α – объемная доля жидкости в текущей ячейке расчетной сетки;

$\alpha_{\min}$ – пороговое значение объемной доли жидкости.

Применительно к задаче моделирования струй огнетушащего вещества выбор значения $\alpha_{\min}$ оказывает влияние на точность учета распыленных фрагментов, время и устойчивость расчета, поэтому данный фактор также следует учитывать при настройке параметров используемой модели.

Для ограничения роста турбулентных величин (кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε), обеспечения физической

корректности поведения моделей k - ε и повышения их численной устойчивости применяется демпфирование [128], соответствующее естественным механизмам, к которым относятся: вязкая диссипация – преобразование кинетической энергии турбулентности в тепло; перенос энергии по спектру – каскадный перенос энергии от крупных вихрей к мелким; взаимодействие с градиентами среднего течения – подавление турбулентности в зонах с сильным сдвигом или вращением; близость стенок – пристеночное демпфирование турбулентных пульсаций.

Модель k - ε RNG (ренормализационных групп) [128] включает математические аналоги этих физических механизмов. Метод ренормализационных групп позволяет получить аналитические выражения для констант модели, исходя из фундаментальных принципов статистической физики. В процессе ренормализации естественным образом возникает демпфирующий член в уравнении для скорости диссипации ε , отсутствующий в стандартной k - ε модели, который математически реализует концепцию «быстро деформируемой турбулентности» (RDT – Rapid Distortion Theory [151]): когда поток подвергается сильной деформации за время, меньшее характерного времени турбулентности, ее структура изменяется качественно иначе, чем при медленной деформации. RNG модель автоматически учитывает этот эффект через зависимость от ε .

Достоинства модели k - ε RNG с демпфированием турбулентности: автоматическая коррекция диссипации; уменьшение турбулентной вязкости в зонах сильного сдвига; улучшенное предсказание для струйных течений по сравнению со стандартной моделью k - ε ; демпфирующий член улучшает численную устойчивость, предотвращая нефизичный рост ε в зонах с низкой турбулентностью.

Недостатки модели k - ε RNG с демпфированием турбулентности: не решает проблему изотропной турбулентности полностью; может давать нефизичные результаты при очень сильной закрутке потока; требует замеления ячеек расчетной сетки в зонах с высокими градиентами.

В рамках разработанной в диссертационном исследовании методологии (глава 1) численное моделирование применяется для построения выборок,

задействованных при машинном обучении и верификации расчетных моделей оценки характеристик газожидкостных потоков, что требует проведения большого количества компьютерных экспериментов для охвата соответствующих диапазонов значений параметров управляющих и возмущающих воздействий. Поэтому скорость проведения вычислений, которая определяется сложностью решаемых CFD-уравнений, является таким же важным критерием, как и точность.

Исходя из этого, для численного моделирования целесообразно использовать методы, которые позволяют сократить время расчета и обеспечить при этом требуемое для дальнейшего машинного обучения качество выборок. В частности, как показано выше, наименьшей вычислительной сложностью (для моделирования струи огнетушащего вещества) обладают VOF и RANS модели. Однако в случаях, когда процесс распада и слияния потока оказывает существенное влияние на его движение, результаты расчета с использованием модели переноса объемной доли жидкости могут иметь низкую точность.

Поэтому в рамках диссертационного исследования была разработана технология выбора методов CFD, а также их параметров с поэтапным повышением их вычислительной сложности (времени расчета) так, чтобы обеспечить требуемую точность (относительно валидационной экспериментальной выборки) результатов численного расчета. При этом, исходя из проведенного выше анализа, в качестве предварительных моделей для исследования динамики газожидкостных потоков были выбраны VOF с неявным учетом объемных сил и k - ϵ в RNG модификации с демпфированием турбулентности.

Стоит отметить, что в рассмотренных выше публикациях не представлен опыт совместного использования указанных подходов и, соответственно, обоснование их применимости для численного расчета струй огнетушащего вещества. С этой точки зрения результаты, полученные в четвертой главе на основе разработанной технологии выбора CFD-моделей, имеют теоретическую значимость в прикладной области настоящей диссертации.

4.2 Разработка технологии выбора методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков

В рамках диссертационной работы для моделирования струй огнетушащего вещества в условиях, соответствующих проведенным натурным испытаниям, используется математическая модель на основе уравнений Навье – Стокса. При этом принимаются допущения о том, что рассматриваемые потоки изотермические, низкоскоростные (скорости движения существенно ниже скорости звука) и обе их фазы (вода, воздух) несжимаемы, согласно [44; 55].

Прямое численное решение уравнений Навье – Стокса (DNS [20]) является задачей с очень высокой вычислительной сложностью, поэтому в настоящем исследовании используется математическая модель на основе осреднённой по Рейнольдсу системы уравнений Навье – Стокса (RANS). Так как потоки двухфазные, то при построении математической модели задействуются соответствующие методы для учета фаз [80; 116]. В частности, если применяется модель VOF [55], то исходная замкнутая система включает (с обозначенными выше допущениями) уравнения неразрывности, движения и переноса объемной доли [61]. При этом в систему для замыкания добавляются соответствующие уравнения моделей турбулентности (например, k - ε , k - ω).

Ниже приведена замкнутая система, описывающая движение исследуемых в данной работе газожидкостных потоков с использованием модели VOF для учета фаз и k - ε модели турбулентности. Указанная математическая модель включает следующие уравнения.

Уравнение неразрывности (здесь и далее в тензорной форме):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (4.5)$$

где u_i – осредненная скорость по i -й координатной оси;

x_i – i -я пространственная координата (в трехмерном пространстве, в котором двигается струя).

Уравнение движения (с учетом осреднения и гипотезы Буссинеска) [136]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_{\sigma,i}, \quad (4.6)$$

где ρ – средневзвешенная плотность (4.2), которая вычисляется через объемную долю жидкости α (для учета двух фаз) (4.7);

t – время;

k – кинетическая энергия турбулентности (4.8);

μ – средневзвешенная динамическая вязкость (4.2);

μ_t – турбулентная вязкость, на основе которой производится замыкание системы (4.10);

p – осредненное давление (единое для потока со средневзвешенной плотностью и вязкостью [55]);

g_i – проекция ускорения свободного падения на i -ю ось;

$F_{\sigma,i}$ – сила поверхностного натяжения (4.3).

Уравнение переноса объемной доли (для учета межфазной границы на основе VOF) [181]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (4.7)$$

Уравнение для кинетической энергии турбулентности (при использовании модели k - ϵ с учетом несжимаемых фаз) [55]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon, \quad (4.8)$$

где ϵ – скорость диссипации (4.9);

σ_k – число Прандтля для k ;

G_k – генерация кинетической энергии турбулентности [55].

Уравнение для скорости диссипации (при использовании модели k - ϵ с учетом несжимаемых фаз) [55]:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (4.9)$$

где σ_ϵ – число Прандтля для ϵ ;

$C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ – эмпирические константы модели.

Система замыкается на основе выражения для турбулентной вязкости, как функции от k и ε [55]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4.10)$$

где C_μ – константа.

При использовании k - ε модели турбулентности в модификации RNG уравнения (4.8)–(4.9) записываются следующим образом [55]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon, \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где $\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ – обратные числа Прандтля соответственно для k и ε ;

μ_{eff} – эффективная вязкость;

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4.12)$$

где $\eta = S k / \varepsilon$ – отношение масштаба времени турбулентности к масштабу времени среднего сдвига;

S – модуль тензора скорости деформации;

η_0, β – эмпирические константы модели.

При использовании других RANS моделей турбулентности (за исключением модели рейнольдсовых напряжений), в частности k - ω SST [55], система уравнений RANS также замыкается на основе соответствующего выражения для турбулентной вязкости.

При использовании Эйлера подхода для учета фаз исследуемого потока [80] замкнутая система, аналогичная рассмотренной выше математической модели (4.5)–(4.10), включает в соответствующем виде следующие уравнения [55]:

- неразрывности – записываются для каждой фазы;
- движения – записываются отдельно для воды и воздуха с учетом их объемных долей; в правую часть добавляются межфазные силы;

– кинетической энергии турбулентности, скорости диссипации (или удельной скорости диссипации в случае $k-\omega$ SST) – записываются в зависимости от применяемого подхода: отдельно для каждой фазы; для смеси с учетом средневзвешенных параметров (плотности, скорости и т.д.); для несущей фазы (параметры дисперсной фазы вычисляются с использованием алгебраических выражений).

Согласно [55] в Эйлеровой модели давление принимается единым для обеих компонент потока, замыкание системы выполняется с использованием выражения для турбулентной вязкости смеси или отдельных фаз. Общее количество уравнений при этом больше по сравнению с математической моделью на основе VOF, что влияет на время моделирования и, как было указано выше, может быть критичным с точки зрения построения обучающих и верификационных выборок в требуемом объеме.

Поэтому в рамках данного исследования для выбора методов вычислительной гидродинамики, а также их параметров для численного расчета движения потоков огнетушащего вещества (рисунок 1.15, блок A114) была разработана соответствующая технология [201]. Ее общая схема представлена на рисунке 4.1.

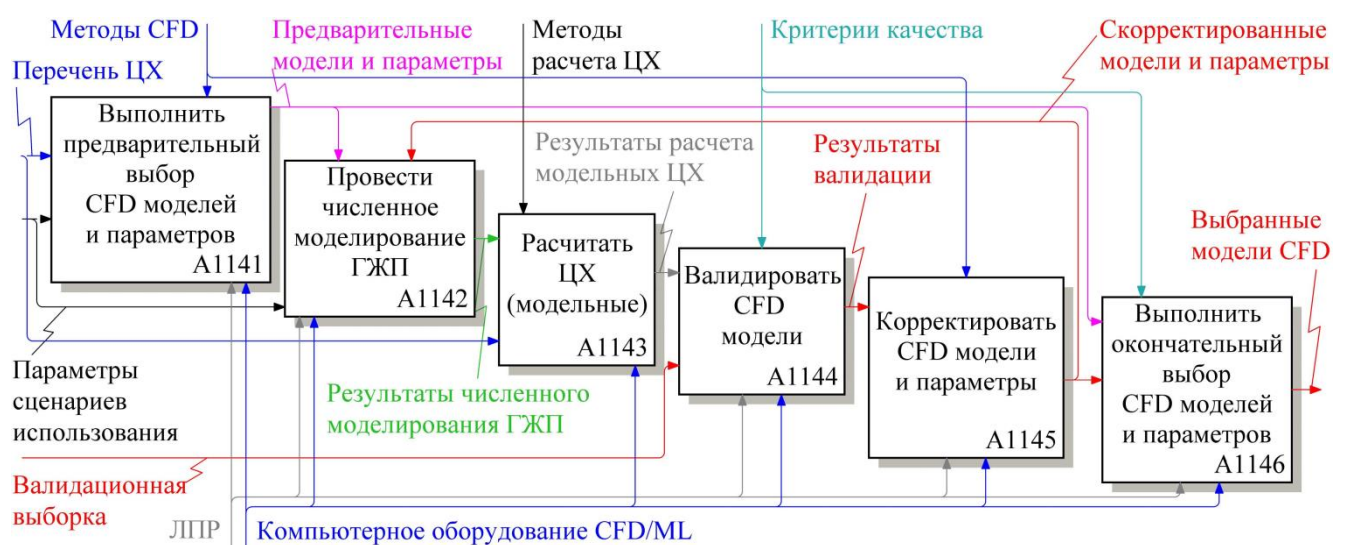


Рисунок 4.1 – Функциональная диаграмма IDEF0 технологии выбора методов вычислительной гидродинамики для моделирования свободных струй

Выбор моделей (для учета фаз, турбулентности), а также их параметров для описания свободных струй огнетушащего вещества 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.

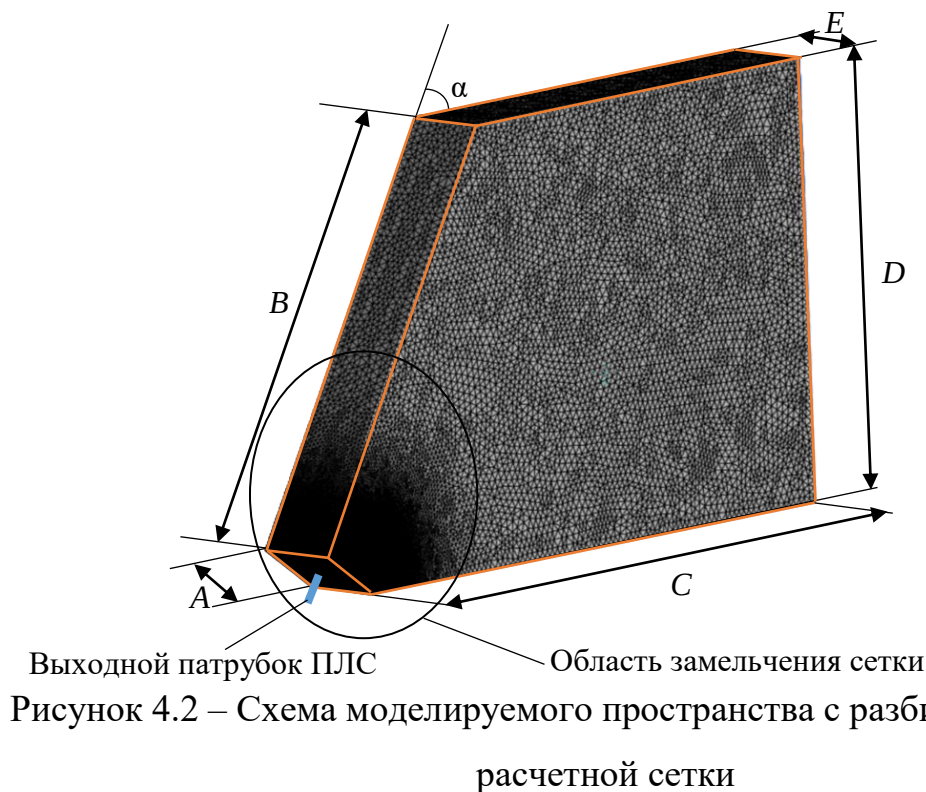
При этом важной особенностью целевых потоковых характеристик, выделенных ранее, является отсутствие необходимости учитывать процессы перехода из дисперсной фазы в сплошную, что позволяет в качестве предварительных моделей CFD (рисунок 4.1, блок A1141) задавать уравнения математической модели с использованием наиболее простых подходов для описания фаз – VOF (4.5)–(4.7) и турбулентности – k - ε (4.8)–(4.10) (таблица 4.2). Усложнение моделей в соответствии с таблицей 4.2 производится на этапе коррекции (рисунок 4.1, блок A1145) на основе валидации (рисунок 4.1, блок A1144) целевых характеристик, рассчитанных (рисунок 4.1, блок A1143) по результатам моделирования (рисунок 4.1, блок A1142).

Таблица 4.2 – Ранжирование вычислительной сложности использованных в работе моделей от меньшей к большей (сверху вниз)

Модель	Обоснование
Учет фаз	
VOF	Наиболее простая из представленных моделей
Эйлерова	Сложнее за счет необходимости решения большего количества уравнений
Моделирование турбулентности	
k - ε	Наиболее простая из рассмотренных выше моделей, которая применяется для моделирования турбулентных многофазных потоков
k - ω SST	Включена в перечень моделей, т.к. комбинирует преимущества k - ω в пристеночной области (внутри ствола) и k - ε (на участке свободной струи). Однако модель более чувствительна к качеству сетки и начальным условиям. Более сложная по сравнению со стандартной k - ω за счет необходимости вычисления дополнительных членов уравнений
k - ε RNG	Самая сложная из представленных, в том числе, за счет дополнительного члена R_ε . Имеет ряд рассмотренных ранее преимуществ для задачи моделирования свободной струи

Кроме того, на повышение вычислительной сложности влияет добавление в исходные модели новых членов или уравнений (в частности, неявный учет объемных сил, демпфирование или ограничение турбулентности), уменьшение порогового значения объемной доли жидкости (4.4). Время расчета также зависит от таких факторов, как граничные условия, настройки солвера, геометрические размеры исследуемого пространства, количество ячеек расчетной сетки [217; 232] и т.д.

В данной работе для увеличения скорости моделирования применялась схема построения расчетной сетки, представленная на рисунке 4.2.



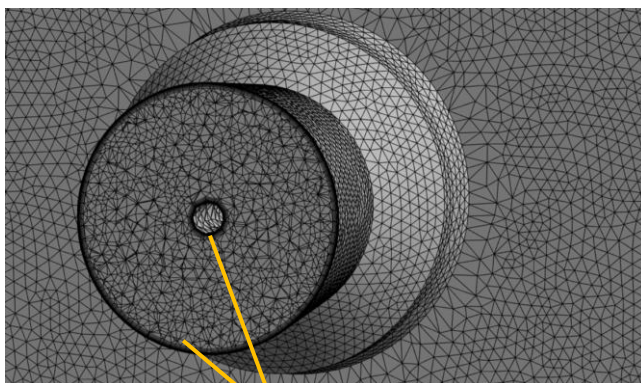
Обозначения на рисунке 4.2: A – длина задней стенки моделируемого пространства, смежной с выходным патрубком пожарного лафетного ствола (ПЛС); B – длина верхней стенки моделируемого пространства на начальном участке струи; C – длина моделируемого пространства; D – высота передней стенки моделируемого пространства; E – ширина моделируемого пространства; α – угол возвышения выходного патрубка ПЛС.

Параметры A , B , C , D , E выбираются по результатам предварительных натурных испытаний так, чтобы обеспечить полный охват исследуемой струи и

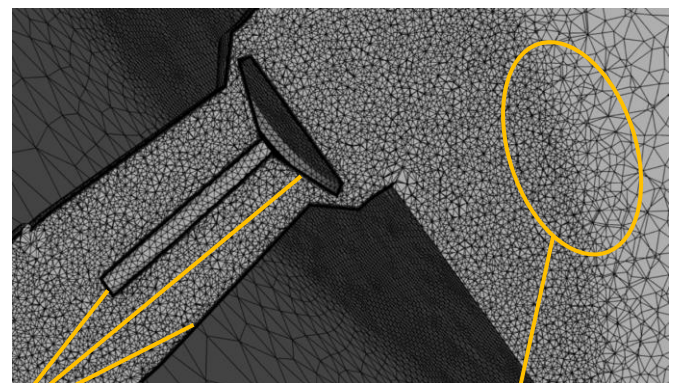
исключить влияние на ее движение явлений, возникающих на границах расчетной сетки (граничных условий). Размеры ячеек расчетной сетки выбираются так, чтобы получить приемлемую точность моделирования с учетом факторов оказывающих влияние на траекторию свободной струи.

Как показали предварительные исследования, малые отклонения параметров, описывающих динамику огнетушащего потока на выходе из ПЛС (профиль скорости, диаметр и форма выходного отверстия, процессы в пристеночной области жидкой фазы и т.д.) могут приводить к существенным изменениям выбранных целевых характеристик. Поэтому критически важно обеспечить в соответствующей области моделируемого пространства высокую точность расчетов, в частности (рисунок 4.3):

- использование внутри исследуемого ПЛС малых размеров ячеек расчетной сетки, достаточных для разрешения его характерных геометрических особенностей;
- использование уменьшения размеров ячеек расчетной сетки в областях исследуемого пространства, находящихся в непосредственной близости от стенок ПЛС (пристеночные области);
- использование на начальном участке траектории огнетушащего вещества (на выходе из ПЛС) малых размеров ячеек расчетной сетки, достаточных для разрешения его характерных геометрических особенностей.



Замельчение сетки в пристеночных областях



Постепенное увеличение размеров ячеек после выхода из ствола

Рисунок 4.3 – Сечения расчетной сетки внутри и на выходе из ПЛС

Валидация (рисунок 4.1, блок A1144) рассматриваемых в рамках данного исследования моделей вычислительной гидродинамики производилась путем оценки отклонений (точности) результатов расчетов относительно полученных на основе натурных испытаний с соответствующими значениями исходных параметров. Для этого было произведено согласование выбранных целевых характеристик (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Согласование целевых характеристик, определяемых по результатам моделирования и эксперимента

Наименование целевой характеристики	Способ оценки по результатам моделирования	Способ оценки по результатам эксперимента
Высота струи	Расстояние по вертикальной оси от выходного отверстия пожарного ствола до наивысшей точки линии максимальных скоростей	Вычисленное на основе верхней границы струи, построенной по результатам эксперимента, расстояние H на рисунке 2.14
Дальность струи	Расстояние по горизонтальной оси (параллельной проекции оси выходного патрубка на горизонтальную плоскость) от выходного отверстия пожарного ствола до наиболее удаленной от него точки линии максимальных скоростей на высоте, соответствующей поверхности моделируемого экспериментального полигона	Измеренное в ходе эксперимента расстояние L_x на рисунке 2.14
Смещение пятна контакта	Расстояние по горизонтальной оси (перпендикулярной проекции оси выходного патрубка на горизонтальную плоскость) от выходного отверстия пожарного ствола до наиболее удаленной от него точки линии максимальных скоростей на высоте, соответствующей поверхности моделируемого экспериментального полигона	Измеренное в ходе эксперимента расстояние L_z на рисунке 2.14
Верхняя граница струи	Линия (множество точек) максимальных скоростей потока огнетушащего вещества, определяемая на основе алгоритма, разработанного в третьей главе	Верхняя граница визуально наиболее плотной части струи, определяемая на основе технологии, разработанной во второй главе

На рисунке 4.4 представлен пример валидации моделей вычислительной гидродинамики, используемых для численного расчета движения потока огнетушащего вещества под воздействием бокового ветра. Изображения струи и графики приведены в плоскости YZ .

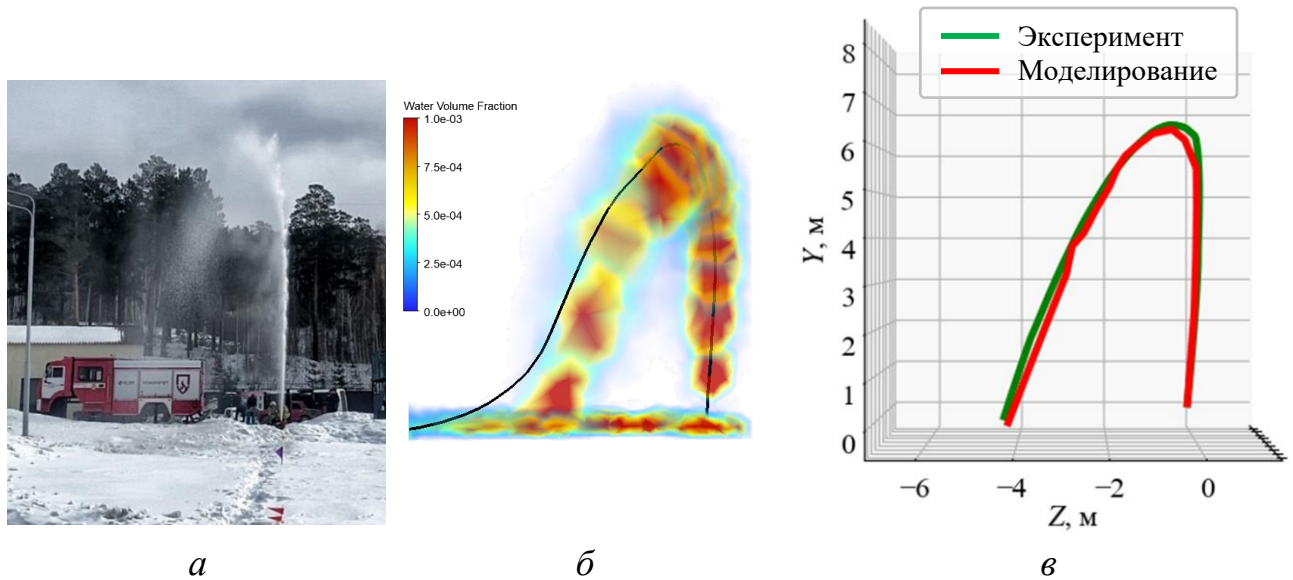


Рисунок 4.4 – Валидация моделей вычислительной гидродинамики:
a – изображение струи, полученной по результатам натурных испытаний;
б – визуализация результатов численного расчета в программной среде Ansys Fluent; *в* – совмещенные графики кривых, построенных по результатам эксперимента (сглаженная верхняя граница струи) и моделирования (линия максимальных скоростей потока)

Точность моделирования по сравнению с результатами, полученными экспериментально, оценивается в рамках представленной технологии на основе относительного отклонения (4.13) для простых характеристик (высоты и дальности струй, смещения пятна контакта) и среднеквадратического отклонения (4.14) – для сложных (верхние границы струй).

$$RD = |X_e - X_m| / X_e \cdot 100 \%, \quad (4.13)$$

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

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |P_{e,i} - P_{m,i}|^2}, \quad (4.14)$$

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

$P_{e,i}$ – координаты i -й точки верхней границы струи, построенной по результатам эксперимента;

$P_{m,i}$ – координаты точки верхней границы струи, построенной по результатам моделирования, ближайшей к точке $P_{e,i}$.

Решение об изменении (усложнении) моделей вычислительной гидродинамики или их параметров (рисунок 4.1, блок A1145) принимается в зависимости от значений указанных отклонений. В настоящем исследовании в качестве критериев достижения приемлемой точности использовалось выполнение условий (4.15)–(4.16):

$$\text{RD} \leq 10 \%, \quad (4.15)$$

$$\text{RMSD} \leq 1 \text{ м}. \quad (4.16)$$

При невыполнении данных условий, согласно предлагаемой технологии (рисунок 4.1, блок A1145), производится коррекция применяемых моделей или их параметров и повторное выполнение операций численного моделирования, расчета целевых характеристик и валидации.

4.3 Сравнительный анализ методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков

Современные пожарные стволы, позволяющие регулировать угол распыления струи огнетушащего вещества, в том числе и роботизированные, имеют достаточно сложную геометрию насадков, что может значительно повышать количество ячеек расчетной сетки в соответствующей области моделируемого пространства (рисунок 4.3), и, как следствие, время, требуемое

для вычислений. Поэтому в рамках диссертационного исследования задача выбора методов вычислительной гидродинамики производилась в три этапа:

1) Первичный выбор моделей вычислительной гидродинамики и их параметров для решения задачи расчета движения воды из пожарного ствола с простой геометрией и малым расходом огнетушащего вещества: РС-70. Валидация производилась на основе дальности и высоты траектории струи.

2) Оценка точности выбранных методов при построении решения задачи моделирования траектории струи воды из пожарного лафетного ствола 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 огнетушащего вещества при низких температурах. Валидация производилась на основе дальности, высоты и верхней границы траектории струи.

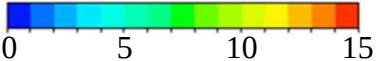
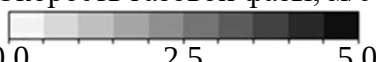
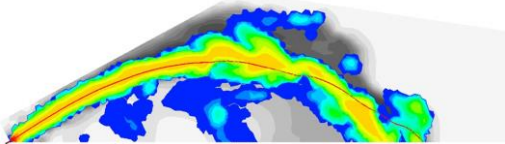
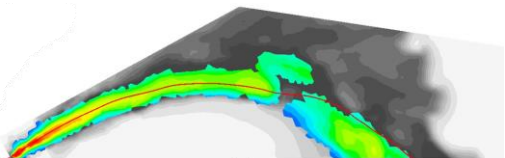
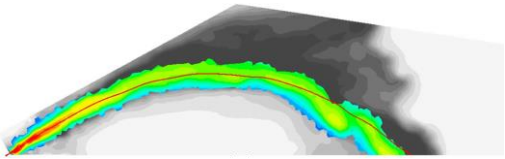
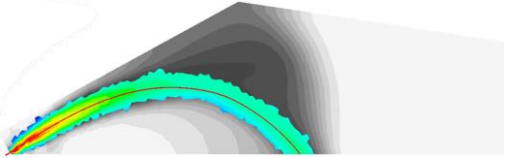
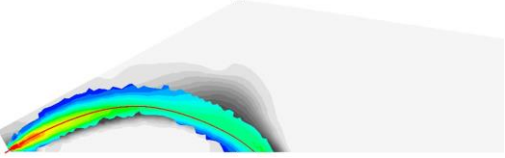
3) Оценка точности выбранных методов при построении решения задачи моделирования траектории струи воды из пожарного лафетного ствола со сложной геометрией ЛС-П20У и высоким расходом огнетушащего вещества при низких температурах и боковом ветре. Валидация производилась на основе дальности, высоты, верхней границы траектории струи, а также смещения пятна контакта.

Далее представлены результаты выполнения всех этапов.

В рамках первичного выбора моделей вычислительной гидродинамики (этап 1) был проведен расчет траекторий свободных струй воды из пожарного ствола РС-70 для следующих значений управляющих параметров: угол возвышения 30° , расход огнетушащего вещества 7.4 л/с, рабочее давление 0.4 МПа. Соответствующие значения дальности и высоты по экспериментальным замерам составляют 32 м и 6.7 м.

В таблице 4.4 приведены полученные результаты для различных наборов моделей вычислительной гидродинамики и их параметров в программной среде Ansys Fluent [224].

Таблица 4.4 – Результаты моделирования траектории струи воды из пожарного ствола РС-70

Обозначение наборов моделей и параметров	Поля скоростей жидкой и газовой фаз в сечении вертикальной плоскости симметрии пожарного ствола Скорость жидкой фазы, м/с  Скорость газовой фазы, м/с 	Время расчета, ч	Дальность, м / RD, %	Высота, м / RD, %
<i>a</i>		11.5	30.5 / 4.7	6.9 / 3
<i>б</i>		10.5	29.5 / 7.8	6.8 / 1.5
<i>в</i>		11.5	29.5 / 7.8	6.8 / 1.5
<i>г</i>		11.5	22.3 / 30.3	5.9 / 11.9
<i>д</i>		13	19.2 / 40	4.9 / 26.9

Обозначения наборов моделей и параметров в таблице 4.4:

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

б – модель фазового взаимодействия VOF с неявным учетом объемных сил и пороговым ограничением объемной доли жидкости $\alpha_{\min} = 10^{-6}$, модель турбулентности *k-ε* с демпфированием турбулентности;

ϵ – модель фазового взаимодействия VOF без использования неявного учета объемных сил и пороговым ограничением объемной доли жидкости $\alpha_{\min} = 10^{-6}$, модель турбулентности k - ϵ с демпфированием турбулентности;

ζ – модель фазового взаимодействия VOF с пороговым ограничением объемной доли жидкости $\alpha_{\min} = 10^{-6}$, модель турбулентности k - ω (SST модификация);

∂ – модель фазового взаимодействия Эйлера, модель турбулентности k - ϵ .

Время расчета в таблице 4.4 указано при использовании (в рамках предварительных исследований) 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 целевых характеристик.

Как следует из полученных результатов, условию (4.15) удовлетворяют только траектории, построенные на основе совместного использования моделей VOF и k - ϵ и с различными настроечными параметрами.

Минимальное время расчета обеспечивается для схемы с ограничением объемной доли жидкости $\alpha_{\min} = 10^{-6}$ с неявным учетом объемных сил (таблица 4.4, ϵ), поэтому она была выбрана в качестве базовой для дальнейших вычислений. При этом, как показало проведенное исследование, уменьшение порогового значения до 10^{-8} (таблица 4.4, a) приводит к увеличению времени вычислений, дальности и высоты за счет учета большего количества расчетных ячеек при формировании свободной струи.

Стоит отметить, что существенные отклонения целевых характеристик, полученные на базе моделей Эйлера и k - ω (таблица 4.4, ζ и ∂), можно объяснить подбором их параметров, не соответствующих особенностям исследуемых процессов. Однако, даже для таких настроек при достаточно большом времени расчета наблюдаются слабо (по сравнению со схемами VOF совместно с k - ϵ) 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 (VOF с неявным учетом объемных сил и пороговым ограничением объемной доли жидкости 10^{-6} и $k-\varepsilon$ в модификации RNG с демпфированием турбулентности и т.д.) при решении задачи построения траектории струи из пожарного лафетного ствола со сложной геометрией (без ветра) (этап 2) выполнялась по результатам натурных испытаний, проведенных на экспериментальном полигоне Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России [29].

Рисунок 4.5 содержит соответствующие фрагменты изображений струи воды из ствола ЛС-П20У, полученные для следующих значений управляющих параметров: угол возвышения выходного патрубка 57° , расход огнетушащего вещества 10.2 л/с. В левой части рисунка 4.5 приведен фрагмент исходной цифровой фотографии потока огнетушащего вещества, а в правой – после выделения верхней и нижней границ на основе алгоритма, описанного в главе 2.



Рисунок 4.5 – Фрагменты изображения струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола исходного (*a*) и после выделения границ (*б*)

На рисунке 4.6 изображены совмещенные кривые, соответствующие верхним границам струи, которые построены по данным эксперимента и моделирования, а в таблице 4.5 приведены результаты валидации.

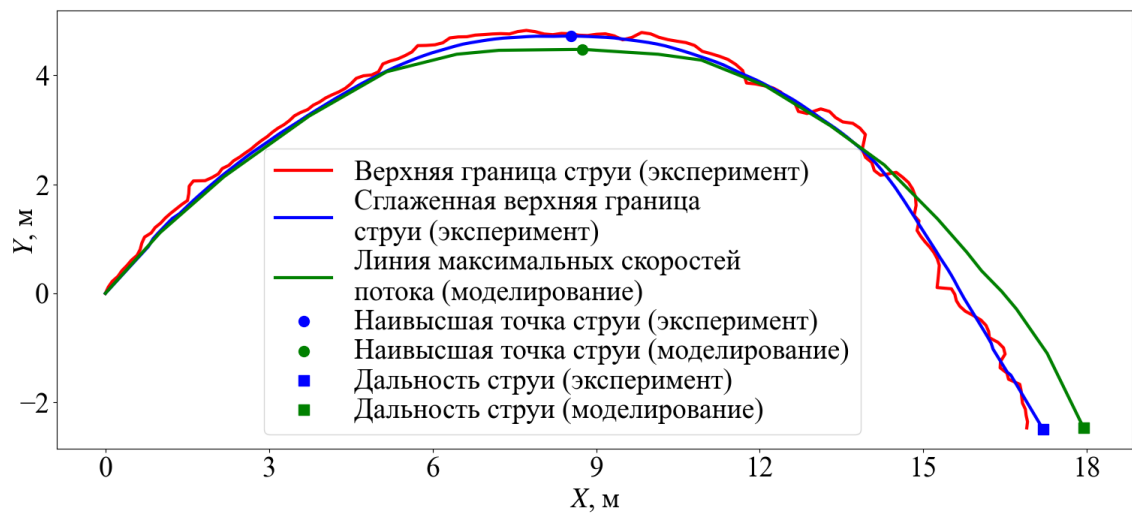


Рисунок 4.6 – Верхние границы струи, полученные по результатам эксперимента и моделирования

Таблица 4.5 – Оценка точности моделирования относительно результатов эксперимента

Наименование целевой характеристики	Значение по результатам эксперимента, м	Значение по результатам моделирования, м	RD/RMSD	Выполнение условий (4.15)–(4.16)
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	$0.27 \text{ м} \leq 1 \text{ м}$

Как следует из таблицы 4.5, условия (4.15)–(4.16) выполняются для всех рассмотренных характеристик, что соответствует приемлемой точности модели. При этом время расчета составило 10 часов, что также удовлетворяет заданным критериям качества.

В таблице 4.6 и на рисунках 4.7–4.8 представлены результаты оценки точности выбранных методов и их параметров для моделирования движения потока огнетушащего вещества из ствола ЛС-П20У при низких температурах и боковом ветре (этап 3): угол возвышения выходного патрубка 44.5° , расход огнетушащего вещества 12.1 л/с, температура воздуха минус 2°C , скорость ветра 1.4 м/с.

Таблица 4.6 – Оценка точности моделирования относительно результатов эксперимента с учетом ветра

Наименование целевой характеристики	Значение по результатам эксперимента, м	Значение по результатам моделирования, м	RD/RMSD	Выполнение условий (4.15)–(4.16)
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	$0.29 \text{ м} \leq 1 \text{ м}$

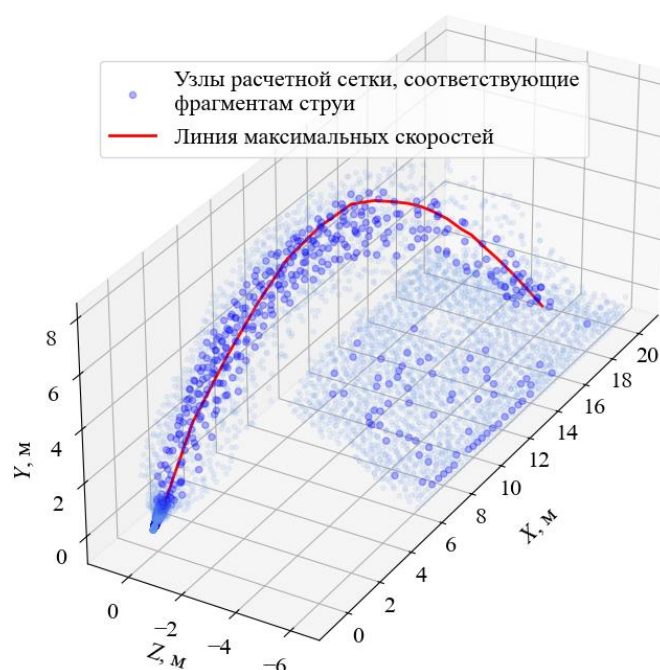


Рисунок 4.7 – Результаты моделирования и потоковые характеристики, построенные на их основе

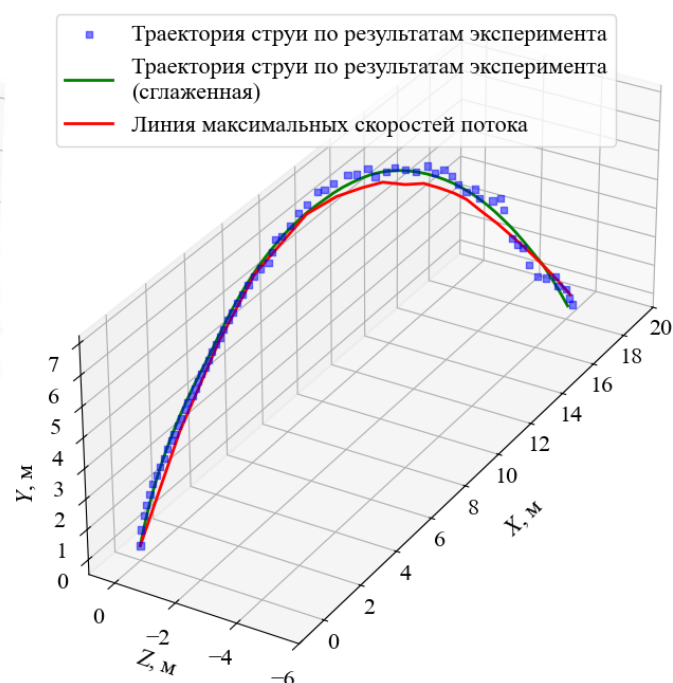


Рисунок 4.8 – Верхние границы струи, полученные по результатам эксперимента и моделирования с учетом ветра

На основании данных таблицы 4.6 можно сделать вывод, что условия (4.15)–(4.16) выполняются для всех целевых характеристик, что соответствует приемлемой точности модели. Время расчета 10 секунд движения газожидкостного потока под воздействием ветра составило 10 часов, что также удовлетворяет заданным критериям качества.

Как показали результаты натурных испытаний, выполненных при низких температурах воздуха, данный фактор в исследованном диапазоне значений (от минус 3 °С до плюс 7 °С) не оказывает существенного влияния на траекторию движения огнетушащего вещества. Поэтому для построения обучающих и верификационных выборок (рисунок 1.15, блок A115), соответствующих валидационным сценариям, использовалась фиксированная температура. При этом было проведено численное моделирование газожидкостных потоков, формируемых пожарным лафетным стволом ЛС-П20У на основе выбранных в рамках данной главы моделей для следующих наборов параметров управляющих и возмущающих воздействий:

Углы возвышения α , °: [30, 35, ..., 60].

Расходы огнетушащего вещества q_0 , л/с: [12, 14, ..., 20, 25, 26].

Углы направления ветра γ , °: [60, 65, ..., 120].

Скорость ветра v_B , м/с: [0, 0.5, ..., 5].

Температура воздуха (фиксированная): $T = 0$ °С.

Выбор значений представленных диапазонов производился, исходя из следующих принципов:

- охват параметров сценариев, использованных при построении валидационной выборки (параграф 2.5), что позволяет оценить точность построенной модели в рамках проведенных ранее экспериментов;

- шаг изменения значений параметров, обеспечивающий достаточный размер обучающей и верификационной выборок и приемлемое суммарное время моделирования.

Общее количество сценариев, сформированных в рамках данного исследования на основе сочетаний диапазонов значений параметров управляющих (α , q_0) и возмущающих (γ , v_B) воздействий, представленных выше: 735 (по 100 точек траектории на каждый сценарий по аналогии с валидационной выборкой). Для обеспечения равномерного охвата многомерного пространства всех возможных сочетаний значений признаков генерация сценариев производилась с использованием метода латинского гиперкуба [64] (рисунок 4.9).

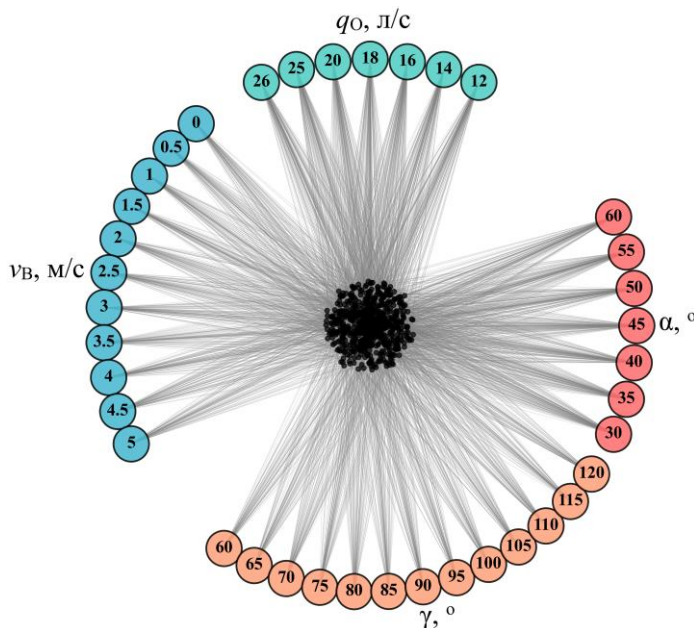


Рисунок 4.9 – Визуализация сформированных сценариев (черные точки) в виде графа сочетаний значений параметров (цветные круги)

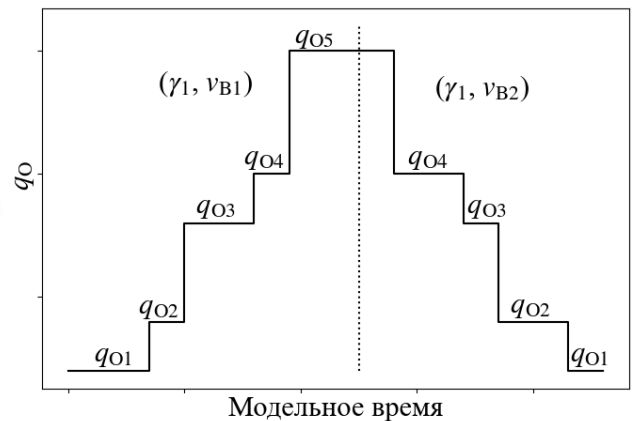


Рисунок 4.10 – Фрагмент диаграммы изменения значений параметров при фиксированном угле возвышения α

С целью сокращения суммарного времени подготовки модели и расчета сценарии были сгруппированы по значениям углов возвышения α . Моделирование (на основе кластера с использованием параллельных вычислений, поддержка которых является базовыми функциональными возможностями применяемой в диссертационном исследовании программной среды Ansys Fluent) в рамках каждой группы выполнялось при различных значениях других параметров, последовательное изменение которых производилось после достижения устойчивой траектории движения огнетушащего вещества (рисунок 4.10).

Сформированная выборка в дальнейшем применяется для обучения и верификации расчетных ML моделей (параграф 5.3.2) [200].

4.4 Выводы по главе 4

В ходе проведенного исследования, которому посвящена четвертая глава, были получены следующие результаты и выводы:

1) Разработана технология выбора методов вычислительной гидродинамики для моделирования газожидкостных потоков, отличающаяся использованием согласованных целевых характеристик, которые описывают верхнюю границу свободной струи по результатам численного расчета и натурных испытаний, для оценки адекватности моделей, а также поэтапным повышением вычислительной сложности для обеспечения скорости и точности, удовлетворяющих целевым критериям. 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.

2) Проведенная апробация разработанной технологии показала, что совместное использование модели фазового взаимодействия VOF (с неявным учетом объемных сил; пороговым ограничением объемной доли жидкости 10^{-6} , применяемом для отсекаания ячеек с малым содержанием фрагментов жидкости на участках распыленной свободной струи) и модели $k-\varepsilon$ в модификации RNG (с демпфированием турбулентности) дает возможность решить задачу расчета динамики движения потока огнетушащего вещества из ствола пожарного робота с учетом возмущающих воздействий. При этом отклонение точечных потоковых характеристик относительно полученных экспериментально не превышает 10 %, соответствующее среднеквадратическое отклонение верхней границы свободной струи не превышает 0.5 м, а время расчета составляет на использованном оборудовании 10 часов. С использованием указанных моделей CFD и вычислительного кластера для ускорения расчетов была сформирована выборка для машинного обучения и верификации модели оценки характеристик газожидкостных потоков в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий.

ГЛАВА 5. МЕТОДЫ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ ПРИ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Пятая глава посвящена исследованию возможностей методов машинного обучения для решения задачи оценки характеристик газожидкостных потоков в режиме реального времени. Разработка соответствующих методов и алгоритмов искусственного интеллекта в исследуемой прикладной области направлена на обеспечение проведения вычислений со скоростью и точностью, требуемыми для эффективного использования в противопожарных роботизированных системах. Выполнен анализ актуальных архитектур с точки зрения реализации на их основе соответствующей расчетной модели. Приведены результаты предварительного исследования возможностей различных методов машинного обучения для оценки простых характеристик струй огнетушащего вещества из пожарных лафетных стволов. Представлены результаты сравнительного анализа новой архитектуры (сети Колмогорова – Арнольда) и многослойного персептрона при расчете траектории газожидкостного потока в достаточно широких диапазонах значений управляющих и возмущающих воздействий. Показано, что обученная расчетная модель оценки целевых характеристик струй огнетушащего вещества позволяет решать поставленную задачу с точностью и скоростью, которые соответствуют требованиям противопожарных роботизированных систем.

5.1 Анализ архитектур машинного обучения

В данном параграфе представлен обзор ключевых архитектур машинного обучения с позиции их применимости для решения задачи оценки целевых

характеристик газожидкостных потоков при возмущающих воздействиях в режиме реального времени.

1) Многослойный персептрон (MLP – Multilayer Perceptron) [109]. Классическая (впервые данная архитектура была предложена в 1986 г.) полносвязная нейронная сеть прямого распространения. Состоит из входного слоя (параметры: угол ствола, расход, скорость ветра, направление ветра), нескольких скрытых слоев с нелинейными активациями и выходного слоя, предсказывающего параметры траектории (например, координаты точек струи, дальность, отклонение).

Особенности реализации (здесь и далее, применительно к решаемой задаче):

- вход: вектор фиксированной размерности (параметры управляющих и возмущающих воздействий);
- выход: целевые характеристики, может быть представлен как набор координат ключевых точек траектории (дискретизация) или параметры аппроксимирующей кривой;
- обучение: на парах (входные параметры – целевые характеристики);
- аугментация данных [59]: генерация целевых характеристик или синтетических траекторий варьированием параметров.

Достоинства: простота реализации и интерпретации; высокая скорость расчета (микросекунды на современном оборудовании); высокая эффективность при умеренной размерности входа; возможность реализации на встраиваемых системах (противопожарные роботизированные системы); возможность комбинации с другими методами (как часть ансамбля) [43].

Недостатки: отсутствие учета пространственно-временной структуры газожидкостного потока (некритично относительно решаемой задачи); фиксированная размерность выхода (некритично относительно решаемой задачи); чувствительность к шумам во входных данных; ограниченная способность к обобщению на режимы, выходящие за границы обучающей выборки; сложности с интерпретацией влияния входных параметров на целевые характеристики.

2) Сети Колмогорова – Арнольда (KAN – Kolmogorov – Arnold Networks) [204]. Новый класс нейронных сетей (в научных публикациях данная архитектура упоминается с 2024 г.), основанный на теореме Колмогорова – Арнольда о представлении функций многих переменных. В отличие от MLP с фиксированными активациями на узлах, KAN используют обучаемые активации на ребрах (сплайны или другие параметризуемые функции). Это позволяет сети аппроксимировать сложные функции с меньшим числом параметров.

Особенности реализации: аналогичные MLP.

Достоинства: аппроксимация сложных зависимостей, в частности, траектория газожидкостного потока – сложная нелинейная функция от входных параметров, на базе KAN потенциально можно строить модели, которые описывают данные зависимости эффективнее MLP; интерпретируемость – активации на ребрах могут визуализироваться, демонстрируя зависимость выхода от каждого входного параметра; потенциально более высокая точность на сложных функциях; меньшее число параметров для достижения той же точности по сравнению с MLP (экономия памяти, что может быть актуально для реализации на элементной базе противопожарных роботизированных систем); адаптивность к локальным особенностям функции благодаря сплайнам.

Недостатки: новая архитектура, малоисследованная на практических задачах; сложность обучения; вычислительная сложность может быть выше MLP при одинаковом числе параметров; ограниченная поддержка в существующих фреймворках.

3) Физически-информированные нейронные сети (PINN – Physics-Informed Neural Networks) [135]. Это нейронные сети, обучаемые с учетом физических законов, описываемых дифференциальными уравнениями. Функция потерь включает как ошибку на данных (CFD и натурные испытания), так и невязку уравнений (например, упрощенных уравнений движения газожидкостного потока, сохранения импульса, уравнения неразрывности). Сеть аппроксимирует траекторию как функцию координат и времени.

Особенности реализации:

- аналогичные MLP, но могут использоваться упрощенные физические модели, например, уравнения CFD для регуляризации;
- обратная задача: возможность обучения на разреженных данных (натурные эксперименты) с последующим дообучением с использованием выборок, сгенерированных на основе CFD.

Достоинства: гарантия физической непротиворечивости оценок даже вне обучающей выборки при достаточно высоком качестве обучения; потенциально высокая эффективность при малом объеме данных; возможность комбинации CFD и экспериментальных данных разных типов; экстраполяция на новые режимы в пределах применимости физической модели; естественная интерпретация через физические величины.

Недостатки: необходимость реализации физических уравнений; для сложных турбулентных газожидкостных потоков точная физическая модель имеет высокую вычислительную сложность; сложность балансировки потерь между обучающей выборкой и физическими уравнениями; высокие вычислительные затраты при обучении; возможность появления нефизичных результатов при неправильной постановке задачи.

4) Градиентный бустинг (GB – Gradient Boosting) [94]. Ансамблевый метод, в основе которого лежит построение композиции деревьев решений, где каждое следующее дерево корректирует ошибки предыдущего. Популярные реализации: XGBoost, LightGBM, CatBoost [168].

Особенности реализации:

- аналогичные MLP;
- ансамблирование: возможность построения отдельных моделей для разных наборов сценариев.

Достоинства: высокая точность на табличных данных; робастность к выбросам и пропускам; встроенная регуляризация; отсутствие требований к масштабированию признаков; высокая скорость расчета.

Недостатки: необходимость ручного конструирования признаков; отсутствие учета гладкости траектории; для сложных целевых характеристик требуется большое количество моделей; менее эффективны для задач с высокоразмерным выходом (например, множество точек траектории газожидкостного потока); ограниченная способность к экстраполяции за пределы сценариев, использованных при обучении.

5) Рекуррентные нейронные сети (RNN/LSTM) [40]. Сети, предназначенные для обработки последовательностей и сохраняющие внутреннее состояние, что позволяет учитывать предыдущие элементы.

Особенности реализации:

- генерация траектории: обученная сеть последовательно вычисляет точки траектории, получая на каждом шаге предыдущую точку и параметры управляющих и возмущающих воздействий;

- динамика: может моделировать эволюцию газожидкостного потока во времени;

- вход: начальные условия (значения параметров управляющих и возмущающих воздействий), характеристики, описывающие состояние газожидкостного потока на предыдущем шаге (например, координаты предыдущей точки траектории);

- выход: характеристики, описывающие состояние газожидкостного потока на следующем шаге (например, координаты следующей точки траектории).

Достоинства: естественное моделирование последовательного характера движения газожидкостного потока; учет локальной динамики газожидкостного потока; LSTM позволяет учитывать долговременные зависимости.

Недостатки: потребность в высоком объеме данных (особенно LSTM); проблема накопления ошибки при авторегрессии; сложность параллелизации при обучении; низкая интерпретируемость; чувствительность к шагу дискретизации исходных данных.

6) Трансформеры (Transformers) [173]. Архитектура, основанная на механизме самовнимания, позволяющая моделировать зависимости между всеми

элементами последовательности одновременно. Изначально разработаны для обработки естественного языка [131], но применяются, в том числе, для временных рядов и траекторий [174].

Особенности реализации:

- траектория движения газожидкостного потока представляется в виде последовательности: точки/участки траектории формируются как токены [174] с позиционными кодировками;

- условные параметры: сценарии могут добавляться, как специальные токены или через механизм самовнимания;

- мультимодальность: потенциальная возможность комбинации различных представлений газожидкостного потока;

- предобучение: возможность предварительного обучения на больших наборах CFD-данных.

Достоинства: моделирование глобальных зависимостей (например, влияния начальных параметров газожидкостного потока на его движение по всей длине траектории); параллельная обработка всей последовательности (быстрое обучение); механизм внимания позволяет оценивать наиболее значимые с точки зрения решаемой задачи участки траектории; масштабируемость – повышение качества модели с ростом объема данных.

Недостатки: потребность в обучающих выборках очень большого объема; высокая сложность по длине последовательности (проблема для длинных траекторий); высокая вычислительная сложность инференса (может быть критично с точки зрения реализации на элементной базе противопожарных роботизированных систем); сложность интерпретации; высокая чувствительность к архитектурным гиперпараметрам.

В таблице 5.1 представлены результаты сравнительного анализа рассмотренных архитектур относительно значимых с точки зрения решаемой задачи критериев.

Таблица 5.1 – Сравнительный анализ архитектур машинного обучения

Критерий	MLP	RNN/LSTM	PINN	Трансформер	KAN	GB
Точность на CFD данных	+	+/-	+	+	+	+/-
Физическая корректность	–	–	+	–	+	–
Экстраполяция за пределы данных	–	–	+	–	+	–
Скорость обучения	+	+/-	–	+/-	–	+
Требования к данным	10^3-10^4	10^4-10^5	10^2-10^3 +физика	10^4-10^5	10^3-10^4	10^3-10^4
Сложность реализации	–	+/-	+	+	+/-	–
Пригодность для реального времени	+	+/-	+	+/-	+	+

Исходя из представленного анализа, целесообразно выбрать MLP в качестве предварительной базовой модели, имеющей более простую архитектуру по сравнению с другими нейросетями, для оценки эффективности решения поставленной задачи в рамках предлагаемой методологии при ограниченном множестве обучающих сценариев (выборок). Основные преимущества MLP в данном контексте заключаются в: простоте реализации; скорости обучения, расчета, выявления потенциальных проблем; возможности задания в качестве стартовой модели для стратегии поэтапного усложнения, с применением более сложных архитектур, в частности физически информированных нейросетей (PINN) или нейросетевых ансамблей для различных сценариев. Главным недостатком MLP относительно решаемой задачи является возможное критическое снижение точности расчета на сценариях, существенно отличающихся от учитываемых при обучении. Поэтому на стадии подготовки обучающих данных необходимо обеспечить охват потенциальных сценариев использования противопожарных роботизированных систем, что может потребовать большого объема выборки.

Также с позиции простоты реализации целесообразно рассмотреть при предварительном анализе модели на основе градиентного бустинга (GB).

К известным (по результатам проведенного в главе 1 обзора) способам использования методов машинного обучения для определения характеристик струй огнетушащего вещества из ствола пожарного робота относятся: прогнозирование точки падения струи на основе системы компьютерного зрения ближнего радиуса действия и регрессионной модели [146] (без учета ветра) и прогнозирование положения точки падения струи на основе нейросетевой модели с учетом ветра [139].

Однако данные подходы имеют ряд ограничений, которые существенно снижают эффективность их использования для решения задач оценки характеристик газожидкостных потоков в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий. В частности, при сильном боковом ветре и большой дальности наведения прогноз на основе компактной части струи [146] может иметь низкую точность. Обучающие выборки в способе [139] формируются только для точки падения, определенной по экспериментальным данным, что не позволяет обеспечить широкий диапазон сценариев использования. Эффективность методов в работах [139; 146] показана только для решения задач расчета положения пятна контакта и на струях небольшой дальности (менее 10 м) при слабом ветре или штиле – условиях, при которых в меньшей степени проявляются явления, усложняющие оценку целевых характеристик. Кроме того, применяемые при этом программные реализации рассмотренных способов прогнозирования, являются зарубежными разработками, доступ к которым может быть ограничен.

Поэтому в рамках диссертационного исследования были разработаны расчетные модели оценки характеристик газожидкостных потоков (параграф 5.3), в том числе по всей их длине, учитывающие влияние ветра различной скорости и направления. Существенным отличием предлагаемого подхода от рассмотренных выше является: использование для обучения и верификации выборок, построенных на основе численного моделирования (глава 4), что позволяет расширить диапазон значений параметров управляющих и возмущающих воздействий; использование для валидации CFD и расчетных моделей выборок,

построенных по результатам натурных испытаний, что позволяет обеспечить требуемую точность. Также разработано импортозамещающее программное обеспечение, которое реализует данную расчетную модель, ее обучение, верификацию и валидацию [228].

С точки зрения задачи оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах важным свойством разрабатываемых решений относительно элементной базы, применяемой в указанной прикладной области, может являться размер программных модулей. При этом, как было установлено в рамках предварительного исследования, обученные нейросетевые модели расчета траектории свободных струй в широких диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий могут занимать относительно большой объем памяти [208]. Поэтому поиск решений, позволяющих снизить соответствующие аппаратные требования является актуальной в данной проблемной области задачей. Ниже представлен анализ распространенных методик уменьшения размеров нейронных сетей: прунинг (усечение), квантование, тензорная декомпозиция, дистилляция знаний [111].

1) Прунинг (усечение) для регрессионных моделей.

Суть метода: классические методы прунинга, такие как OBD и OBS [160], разработанные для регрессионных моделей с учетом их особенностей, основаны на разложении функции ошибки в ряд Тейлора и анализе второй производной (гессиана). Подход заключается в удалении тех параметров, которые вносят наименьший вклад в ошибку аппроксимации, с одновременной корректировкой остальных весов для компенсации.

Степень сжатия: методы второго порядка позволяют удалить значительную долю параметров (зачастую до 40–70 % [111]) без существенной потери точности, особенно если сеть была избыточно параметризована.

Преимущества: метод позволяет получить более компактную модель с сохранением гладкости, которая характерна для целевых параметров

газожидкостных потоков, рассматриваемых в настоящем исследовании, т.к. учитывает функцию ошибки.

Недостатки: высокая вычислительная сложность расчета гессиана и его обратной матрицы для всех параметров модели. На практике для решения такой проблемы используются приближения [160].

2) Квантование.

Суть метода: снижение точности представления весов и активаций, что сокращает объем памяти, требуемый для хранения обученной сети, и увеличивает скорость вычислений. Для задачи оценки характеристик газожидкостных потоков критически важна точность. Поэтому для минимизации ее потерь в данной прикладной области целесообразно применять следующие методы: квантование после обучения PTQ, квантование с адаптивным обучением QAT [41].

Степень сжатия: теоретическое сжатие пропорционально уменьшению битности. Переход от 32-битных чисел с плавающей точкой (FP32) к 8-битным целым (INT8) даёт сжатие в 4 раза.

Преимущества: обычно простая реализация метода.

Недостатки: применительно к задаче оценки характеристик газожидкостных потоков квантование может привести к ступенчатости и нарушению гладкости выходных функций, например, траекторий. Поэтому в данной прикладной области предпочтительнее использовать смешанно-точное квантование (MPQ) [119], где точность наиболее чувствительных слоев не изменяется. Однако такой подход уменьшает степень сжатия.

3) Тензорная декомпозиция.

Суть метода: тензор весов обученной нейросети высокой размерности раскладывается на комбинацию более простых, низкоразмерных компонент в соответствии с одним из форматов: CP (каноническое), TT [192].

Степень сжатия: в отдельных случаях сжатие может быть экспоненциальным по отношению к исходной размерности задачи. В частности, в методе F-INR многомерная функция аппроксимируется как тензорное произведение специализированных нейросетей меньшей размерности [192], что

позволяет не только получить высокую степень компрессии, но и ускорить обучение (в отдельных случаях на 2 порядка [111]) за счёт распараллеливания.

Преимущества: гибкая настройка соотношения точности и степени сжатия за счет выбора ранга разложения.

Недостатки: выбор оптимального ранга для каждого слоя является нетривиальной задачей и требует дообучения после разложения для восстановления точности.

4) Дистилляция знаний.

Суть метода: использование обученной нейросети в качестве «учителя» для сети меньшего объема (размерности).

Степень сжатия: напрямую зависит от выбора архитектуры обучаемой сети меньшего объема. В отдельных случаях достигается высокая степень сжатия: в 5–10 раз [111], однако в среднем допустимое снижение точности (в пределах 10 %) достигается при двукратном уменьшении количества параметров сети.

Преимущества: требует меньше данных и вычислений по сравнению с обучением на исходных выборках.

Недостатки: высокая чувствительность к качеству обучения исходной сети.

В таблице 5.2 представлены результаты проведенного анализа методов компрессии нейросетей.

Таблица 5.2 – Сравнение методов сжатия нейронных сетей

Метод	Типичная степень сжатия	Влияние на точность	Ключевая особенность для оценки целевых характеристик газожидкостных потоков
Прунинг (OBD/OBS)	2–3	Возможно снижение	Напрямую использует разложение Тейлора функции потерь
Квантование	2–4	Возможно существенное снижение	Требует осторожного применения (PTQ/QAT) для сохранения точности
Тензорная декомпозиция	2–5	Зависит от ранга	Наиболее подходящие методы: F-INR и ТТ-разложение напрямую работают с размерностью функции
Дистилляция знаний	2	Возможно снижение	Эффективна для передачи неявных знаний о целевых характеристиках

Рассмотренные методики уменьшения размеров нейронных сетей, как, в том числе, показано в [111], имеют ряд недостатков относительно решаемой в данном диссертационном исследовании задачи, в частности, снижение точности модели, сложности настройки, изменение архитектуры и т.д. при не всегда высокой степени сжатия. Одним из способов решения указанной проблемы является использование сетей Колмогорова – Арнольда, главное отличие которых от нейросетей на основе многослойных персептронов заключается в том, что функции активации, аппроксимируемые сплайнами, находятся не в нейронах, а в связях между ними.

Это позволяет при точности, сопоставимой с MLP, существенно уменьшить количество узлов, что, несмотря на необходимость хранения дополнительных параметров для каждого ребра, дает 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 (замедление в несколько раз). Поэтому в рамках настоящей работы был также проведен анализ эффективности использования сетей Колмогорова – Арнольда и многослойного персептрона для решения задачи оценки целевых характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах.

5.2 Предварительный анализ эффективности методов машинного обучения для решения задачи оценки характеристик газожидкостных потоков

Машинное обучение расчетных моделей оценки характеристик газожидкостных потоков согласно разработанной в данном исследовании методологии (рисунок 1.14, блок A12) осуществляется поэтапно согласно приведенной на рисунке 5.1 схеме [208].

1) Выбор и настройка модели машинного обучения (рисунок 5.1, блок A121). Этап включает выбор архитектуры и ее начальных гиперпараметров. Для этого, в том числе, применяется предварительная оценка эффективности

выделенных моделей на ограниченных наборах сценариев и простых целевых характеристиках (высота, дальность).

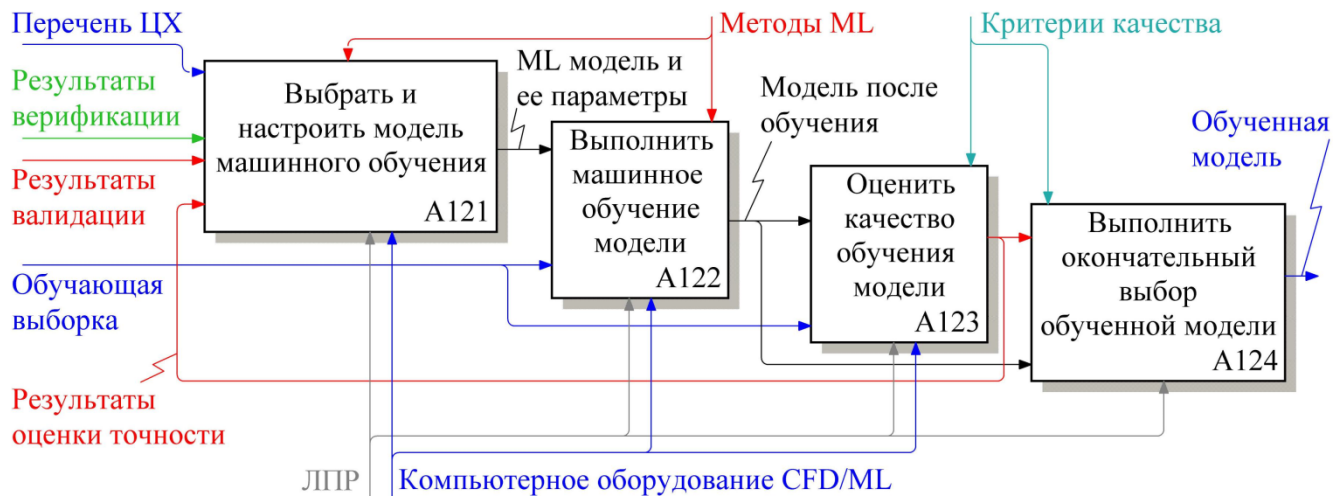


Рисунок 5.1 – Функциональная диаграмма IDEF0 технологии машинного обучения модели оценки целевых характеристик

2) Машинное обучение выбранной модели на исходных гиперпараметрах (рисунок 5.1, блок A122) производится на выборках, построенных на стадии формирования исходных данных (рисунок 1.14, блок A11) с использованием методов вычислительной гидродинамики.

3) По результатам оценки точности обученной модели (рисунок 5.1, блок A123) при необходимости принимается решение о коррекции модели – усложнении архитектуры или изменении гиперпараметров (рисунок 5.1, блок A121).

4) При соответствии точности обученной модели заданным критериям качества принимается решение об окончательном (на данной стадии) выборе (рисунок 5.1, блок A124).

5) После верификации и валидации обученной модели (рисунок 1.14, блоки A13, A14) возможна повторная коррекция ее архитектуры и гиперпараметров (рисунок 5.1, блок A121).

В рамках диссертационного исследования была проведена предварительная оценка эффективности использования методов машинного обучения для решения следующих задач оценки характеристик потоков огнетушащего вещества [250]:

1) Оценка параметров характерных точек струи воды из пожарного лафетного ствола ЛС-С40У при номинальном расходе 40 л/с и рабочем давлении 600 кПа без учета возмущающих воздействий: максимальная $L_{\max}$ (по крайним каплям) и минимальная $L_{\min}$ дальность пятна контакта, горизонтальная $X_{\max}$ и вертикальная $Y_{\max}$ координаты наивысшей точки траектории струи [15].

2) Оценка верхней и нижней границ струи воды [15] из пожарного лафетного ствола ЛС-С20У при номинальном расходе 20 л/с и рабочих давлениях в диапазоне от 400 до 800 кПа без учета возмущающих воздействий.

3) Оценка верхней границы струи воды из пожарного лафетного ствола ЛС-С40У при фактическом расходе 40 л/с с учетом возмущающих воздействий.

Основной целью решения задач расчета характерных точек и границ без учета возмущающих воздействий (задачи 1 и 2) была предварительная оценка эффективности методов машинного обучения применительно к исследуемой области с заданием в качестве исходных данных для обучающих и тестовых выборок имеющихся результатов испытаний лафетных стволов на экспериментальном полигоне их производителя – Инженерного центра пожарной робототехники «ЭФЭР» [15].

Оценка параметров характерных точек струи воды из пожарного лафетного ствола (задача 1) осуществлялась на базе трех методов машинного обучения [251]: регрессионного дерева решений (DT) [168], многослойного персептрона (MLP) [109] (с использованием метода обратного распространения ошибки) и метода градиентного бустинга (GB) [168].

Основные гиперпараметры рассмотренных моделей (для деревьев решений: максимальная глубина дерева, максимальное количество узлов, способ разделения узлов и т.д.; для многослойного персептрона: количество скрытых слоев, функция активации нейронов, скорость обучения и т.д.; для градиентного бустинга: количество деревьев, максимальная глубина дерева, скорость обучения и т.д.) подбирались так, чтобы минимизировать ошибку обучения.

Оценка точности обученных моделей производилась на основе среднеквадратических отклонений. Результаты сравнительного анализа

применения различных методов машинного обучения для оценки параметров характерных точек струи из пожарного лафетного ствола в диапазоне углов возвышения от 10° до 80° с шагом 1° представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Среднеквадратические отклонения (RMSD, м) оценки параметров характерных точек струи для различных методов машинного обучения

Наименование параметра	Метод	Отношение размеров обучающей и тестовой выборки				
		1:1	2:1	3:1	4:1	5:1
Горизонтальная координата наивысшей точки траектории струи $X_{\max}$, м	DT	1.31	1.17	0.98	1.35	0.97
	MLP	0.34	0.33	0.35	0.37	0.39
	GB	1.29	0.99	1.07	1.07	0.97
Вертикальная координата наивысшей точки траектории струи $Y_{\max}$, м	DT	0.94	0.83	0.65	0.51	0.53
	MLP	0.19	0.14	0.13	0.12	0.12
	GB	0.80	0.66	0.55	0.52	0.47
Максимальная дальность пятна контакта $L_{\max}$, м	DT	1.87	1.83	1.77	1.76	1.46
	MLP	0.25	0.31	0.58	0.30	0.44
	GB	1.83	1.45	1.53	1.56	1.47
Минимальная дальность пятна контакта $L_{\min}$, м	DT	1.93	1.38	1.67	1.56	1.35
	MLP	0.34	0.36	0.29	0.47	0.48
	GB	1.55	1.19	1.25	1.28	1.17

Можно заключить, что даже при относительно небольшом размере обучающей выборки результаты расчета параметров характерных точек, полученные на основе двухслойного персептрона, имеют незначительное среднеквадратическое отклонение: от 0.12 м до 0.58 м в зависимости от типа характерной точки.

Графики зависимостей параметров характерных точек, определенных экспериментально для различных траекторий, а также на основе двухслойного персептрона с соотношением размеров выборок 4:1 представлены на рисунке 5.2 (результаты, рассчитанные на основе тестовой выборки, выделены более крупными символами).

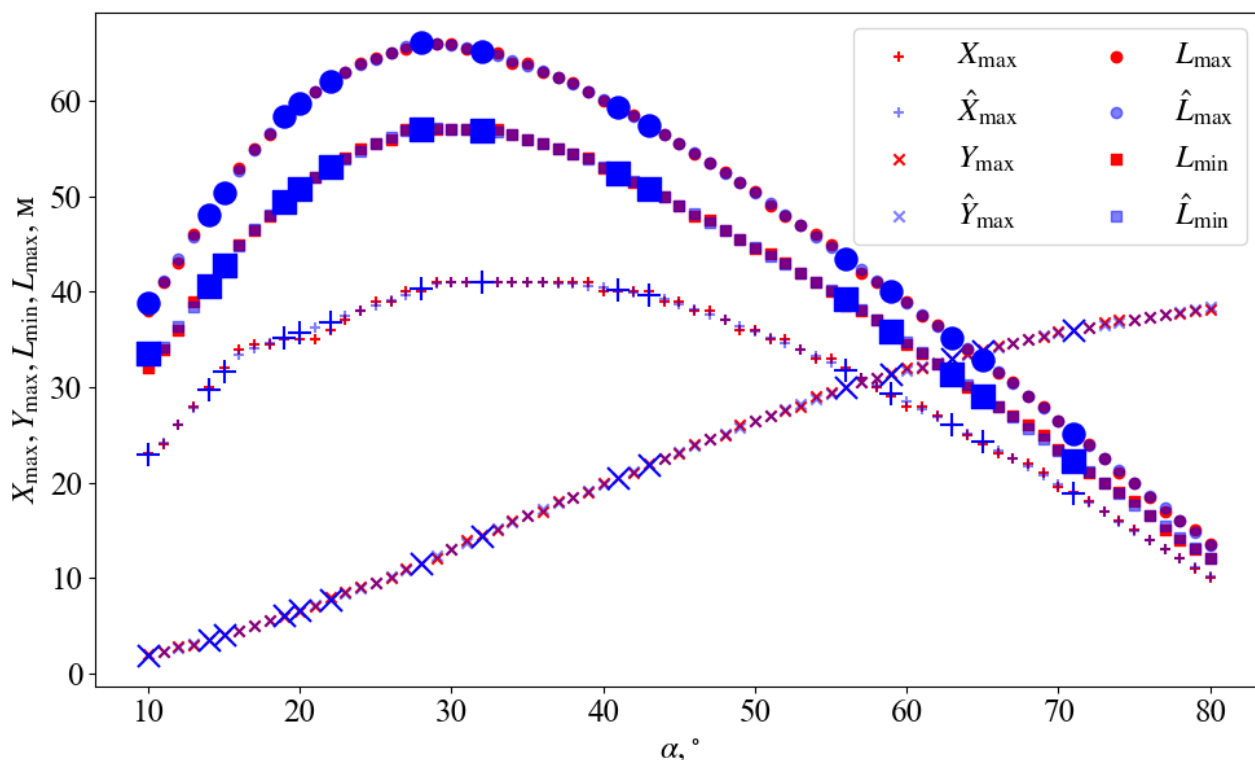


Рисунок 5.2 – Графики зависимостей параметров характерных точек, полученных экспериментально для различных траекторий (красные символы) и на основе двухслойного персептрона (синие символы)

Так как при решении задачи оценки параметров характерных точек струи в условиях ограниченного объема обучающих выборок наилучшую среди рассмотренных моделей точность продемонстрировал многослойный персептрон, то именно эта архитектура применялась для дальнейшего исследования эффективности методов машинного обучения.

Настройка MLP моделей для построения верхней и нижней границ струи воды из пожарного лафетного ствола (задача 2) осуществлялось с использованием выборок при углах возвышения в диапазоне от 20° до 80° (обучающих – 249 сценариев, тестовых – 63 сценария). Результаты расчета соответствующих кривых при рабочем давлении 600 кПа на основе обученного трехслойного персептрона приведены в таблице 5.4 и на рисунке 5.3. Выборки для углов возвышения 25° , 35° , ... 75° не использовались при обучении, поэтому отклонения расчетных границ от экспериментальных при указанных значениях параметров выше.

Таблица 5.4 – Среднеквадратические отклонения расчета верхней и нижней границ струи

Угол возвышения	RMSD, м	
	Верхняя граница струи	Нижняя граница струи
20°	0.03	0.03
25°	0.14	0.07
30°	0.04	0.02
35°	0.07	0.03
40°	0.09	0.04
45°	0.29	0.10
50°	0.14	0.04
55°	0.21	0.04
60°	0.17	0.03
65°	0.76	0.10
70°	0.28	0.08
75°	1.50	0.95
80°	0.86	0.62
По всей выборке	0.4	0.26

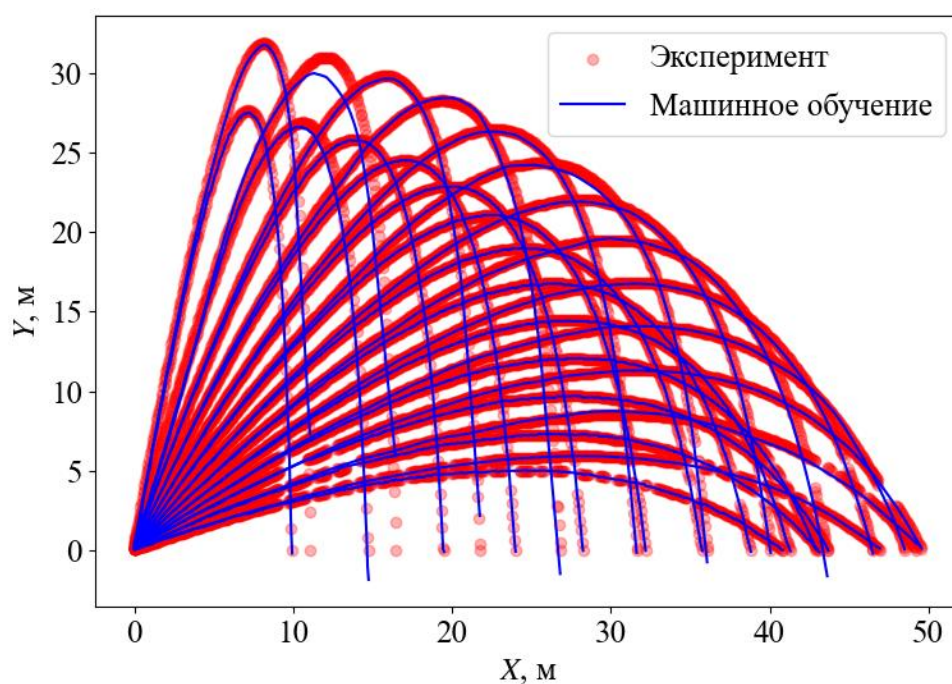


Рисунок 5.3 – Верхние и нижние границы струи, полученные по эмпирическим данным (красные линии) и построенные обученной нейросетью (синие линии)

Согласно полученным данным усредненное по всему диапазону углов возвышения RMSD не превышает 0.4 м, что говорит о достаточно высоком качестве построения траекторий. Однако при $\alpha = 75^\circ$ отклонения для каждой из границ достигают больших значений, т.к. соответствующие данные не использовались при обучении, а потому для практического применения MLP модели требуется более тонкая настройка ее гиперпараметров.

При обучении многослойного персептрона для оценки верхней границы струи воды из пожарного лафетного ствола с учетом возмущающих воздействий (задача 3) использовались данные, полученные в результате моделирования с применением методов вычислительной гидродинамики движения огнетушащего вещества на ограниченном наборе сценариев (23 траектории по 100 точек каждая), которые определялись следующими параметрами: направление (90°) и скорость ветра ($[0, 1, \dots, 5]$ м/с), температура воздуха (-3°C), фактический расход воды (40 л/с), угол возвышения выходного патрубка лафетного ствола ($[20^\circ, 25^\circ, \dots, 35^\circ]$). Оценка качества моделей производилась на основе среднеквадратического отклонения относительно верхней границы струи, полученной экспериментально для сценария, который не учитывался при обучении многослойного персептрона.

Графики на рисунке 5.4 демонстрируют результаты применения нейросети, обученной на основе моделирования движения огнетушащего вещества с использованием методов вычислительной гидродинамики [224], для расчета траектории струи воды из пожарного лафетного ствола с учетом возмущающих воздействий при следующих исходных параметрах: боковой (перпендикулярно направлению ствола) ветер со скоростью 5 м/с, угол возвышения 30° .

Как видно, отклонение верхней границы, полученной на основе обученного многослойного персептрона, относительно экспериментальной незначительно: среднеквадратическое отклонение составило 0.2 м, а время расчета – доли секунды, что говорит об эффективности представленной методики для оценки траектории струи огнетушащего вещества из ствола пожарного робота в режиме реального времени.

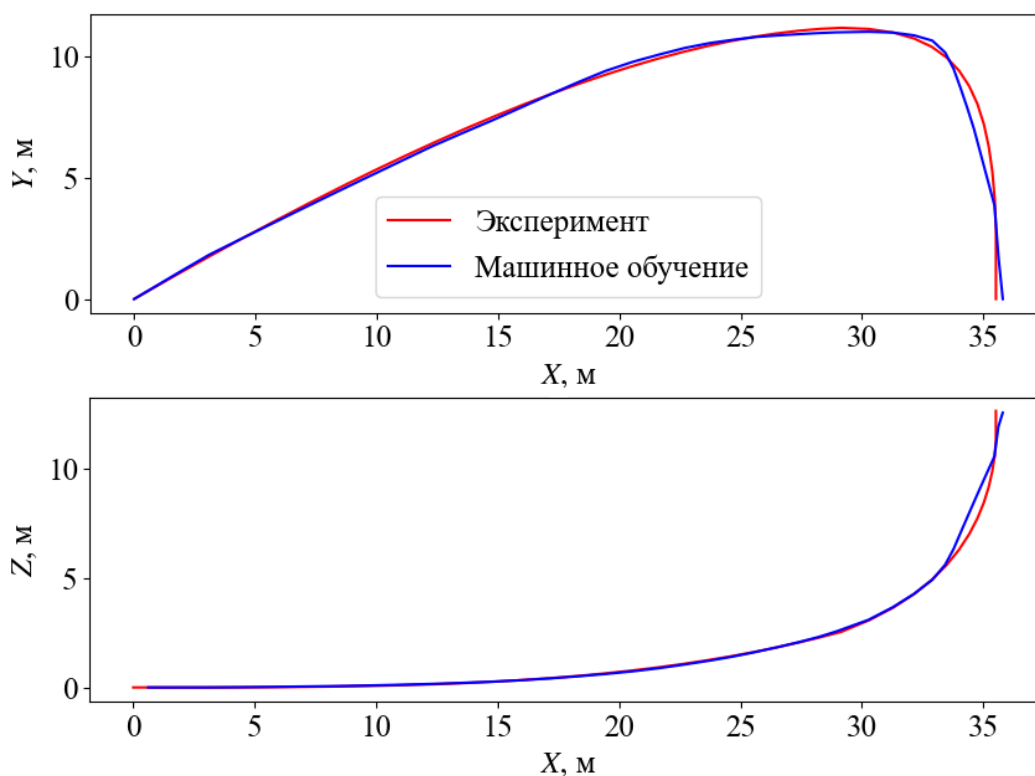


Рисунок 5.4 – Верхние границы струи воды, полученные по результатам натурального эксперимента (красные линии) и построенные обученной нейросетью (синие линии) в проекциях XY (вид сбоку) и XZ (вид сверху)

Таким образом, нейросетевые алгоритмы оценки параметров характерных точек (рисунок 5.2), а также верхней и нижней границ струи огнетушащего вещества без учета (рисунок 5.3) и с учетом (рисунок 5.4) возмущающих воздействий можно применять для решения задач проектирования систем обеспечения пожарной безопасности с использованием пожарных роботизированных стволов в соответствующих условиях. Продемонстрированные точность и скорость расчета верхней границы траектории струи воды при боковом ветре и отрицательной температуре воздуха (рисунок 5.4) говорят о высоком потенциале представленного метода для решения задач управления пожарными роботами в режиме реального времени при наличии возмущающих воздействий, как в закрытых помещениях, так и на открытых пространствах. Однако требуются дополнительные исследования эффективности данного подхода в более широких диапазонах значений управляющих и возмущающих воздействий.

5.3 Сравнительный анализ многослойного персептрона и сетей Колмогорова – Арнольда

В данном параграфе представлены результаты проведенного в рамках диссертационной работы исследования возможности использования сетей Колмогорова – Арнольда (с учетом их скорости, размера и точности) для оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах [204]. Для этого был выполнен сравнительный анализ эффективности решения указанной задачи на основе MLP и KAN моделей. Ниже представлен обзор основных гиперпараметров, на основе которых формируется стратегия обучения указанных нейросетевых архитектур.

Основные группы гиперпараметров MLP можно разделить на три категории:

1) Архитектурные гиперпараметры [98], которые определяют структуру и сложность модели:

- количество скрытых слоев. Значение этого гиперпараметра варьируется от единиц до десятков (в глубоких сетях). Увеличение количества слоев позволяет оценивать на их основе более абстрактные признаки. Для большинства задач на табличных данных достаточно 1–3 слоев. Большее количество слоев при малых объемах обучающей выборки, как правило, приводит к переобучению [98];

- количество нейронов в слое (ширина слоя), которое определяет размерность пространства признаков на выходе слоя [109];

- функция активации, обеспечивающая нелинейность в нейросети [109].

2) Гиперпараметры оптимизации, которые обуславливают стратегию поиска минимума функции потерь:

- скорость обучения (Learning Rate), которая определяет величину шага в сторону антиградиента [98]. Большое значение данного гиперпараметра может привести к низкой сходимости оптимизации, а малое – к медленному обучению или его остановке, например, в локальном минимуме;

– размер мини-батча (Batch Size) – количество образцов выборки, обрабатываемых до обновления весов. Малый размер обеспечивает регуляризующий эффект, однако замедляет сходимость. Большой размер батча ускоряет обучение, но может ухудшать регуляризацию;

– алгоритм оптимизации – метод, на основе которого минимизируется функция потерь [98].

3) Гиперпараметры регуляризации, которые используются для предотвращения переобучения модели:

– параметр L2-регуляризации [98] – коэффициент, на который умножается сумма квадратов весов, при добавлении к функции потерь;

– Dropout [98] – обнуление случайным образом части нейронов сети при обучении с заданной вероятностью для защиты от переобучения.

Основные гиперпараметры KAN можно разделить на архитектурные (структура графа) и параметры представления функций, определяющие кривые на ребрах сети:

1) Архитектурные гиперпараметры: количество слоев и нейронов на каждом слое – аналогично MLP, однако, как правило, KAN обеспечивают высокую точность обучения при меньших значениях этих параметров.

2) Гиперпараметры оптимизации – аналогичные MLP.

3) Регуляризационные гиперпараметры:

– L1-регуляризация на активациях – штраф абсолютных значений выходов функций для сокращения количества ребер обученной сети;

– L1-регуляризация на сплайнах – штраф значений коэффициентов сплайнов для сглаживания и уменьшения амплитуды реберных функций;

– Node Dropout – случайное обнуление выходов нейронов;

– Edge Dropout – случайное обнуление реберных функций.

4) Гиперпараметры сплайнов, определяющие характеристики функций на ребрах сети, которые, обычно, представляются как линейная комбинация B-сплайнов [104], иногда дополняющаяся остаточной сигмоидальной связью для обеспечения стабильности:

- размер сетки – количество интервалов разбиения области определения функции, на которой производится построение сплайнов;
- порядок сплайнов – степень полиномов, на основе которых производится построение реберных функций;
- масштабирование сетки, которое задает границы области определения сплайнов, вне которых данные экстраполируются.

5.3.1 Сравнение многослойного персептрона и сети Колмогорова – Арнольда при решении задач оценки характеристик струи огнетушащего вещества без учета возмущающих воздействий

В качестве исходных выборок для формирования непересекающихся тестового и обучающего массивов, соотношение между размерами которых составляло 1:4, использовались экспериментальные данные, полученные при испытании соответствующей ствольной пожарной техники, а также результаты моделирования на основе методов вычислительной гидродинамики.

При этом обучение производилось для решения следующих задач:

1) Расчет геометрических характеристик свободной струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола ЛС-С40У при различных углах возвышения выходного патрубка α : $X_{\max}$, $Y_{\max}$ – горизонтальная и вертикальная координаты (относительно выходного патрубка ствола) точки струи, имеющей максимальную высоту, $L_{\max}$, $L_{\min}$ – дальняя (дальность струи по крайним каплям) и ближняя границы пятна контакта струи.

2) Расчет верхней границы свободной струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола ЛС-С20У при различных углах возвышения выходного патрубка без учета возмущающих воздействий. При этом применялись непересекающиеся обучающие и тестовые выборки (соответственно, 249 и 63 сценария), построенные на основе эмпирических данных Инженерного центра пожарной робототехники «ЭФЭР» [15] – те же, которые использовались при решении аналогичной задачи в параграфе 5.2.

В качестве критериев сравнения MLP и KAN моделей были выбраны следующие характеристики:

- среднее (по результатам нескольких запусков) время обучения финальной версии сети;
- среднее время расчета на основе обученной сети;
- размер финальной версии обученной сети (объем памяти, который она занимает);
- среднеквадратическое отклонение (RMSD) обученной сети по тестовой выборке.

Для оптимизации использовались алгоритмы адаптивной оценки моментов (Adam) и Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно с ограниченным использованием памяти (LBFGS) [98]. Предпочтение давалось тому методу, который обеспечивал наилучшую сходимость обучения, критерием остановки которого являлось несущественное в течение нескольких итераций уменьшение ошибки.

Для реализации MLP и KAN моделей, а также алгоритмов обучения, критериев точности применялись библиотеки Python: scikit-learn [156; 157], pyTorch [140; 170] и pyKAN [57; 106].

Кроме того, было проведено исследование возможности дообучения нейросети на базе многослойного персептрона и сети Колмогорова – Арнольда при появлении новых ранее не учитывавшихся 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, не использовавшийся для обучения и имеющий максимальное среднеквадратическое отклонение. Массив координат точек экспериментальной траектории для соответствующего значения α добавлен к обучающей выборке, после чего произведена настройка MLP и KAN моделей без изменения их структуры.

Результаты сравнительного анализа MLP и KAN моделей, обученных для расчета геометрических характеристик и границ потоков огнетушащего вещества

при различных значениях управляющих параметров представлены в таблицах 5.5–5.6 и на рисунках 5.5–5.6.

Указанные в таблице 5.5 значения усреднены по всем исследуемым геометрическим характеристикам. Как видно, точность построенных MLP и KAN моделей одинакова. При этом на обучение сети Колмогорова – Арнольда, а также расчет характеристик на ее основе, требуется в 3 раза больше времени. Однако многослойный персептрон требует в 4 раза большего объема памяти.

В таблице 5.6 время расчета характеристик на основе каждой из моделей отличается в 2 раза. Однако среднеквадратическое отклонение сети Колмогорова – Арнольда вдвое ниже по сравнению с многослойным персептроном, а требуемый объем памяти меньше в 10 раз. При этом для обучения KAN модели необходимо в 4 раза больше времени.

Таблица 5.5 – Основные параметры MLP и KAN моделей, обученных для расчета геометрических характеристик свободных струй (задача 1)

Наименование параметра	MLP	KAN
Среднее время обучения, с	35	103
Среднее время расчета характеристик, мс	0.7	2
Размер обученной сети, КБ	17	4
RMSD, м	0.27	0.27

Таблица 5.6 – Основные параметры MLP и KAN моделей, обученных для расчета траекторий свободных струй без учета возмущающих воздействий (задача 2)

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

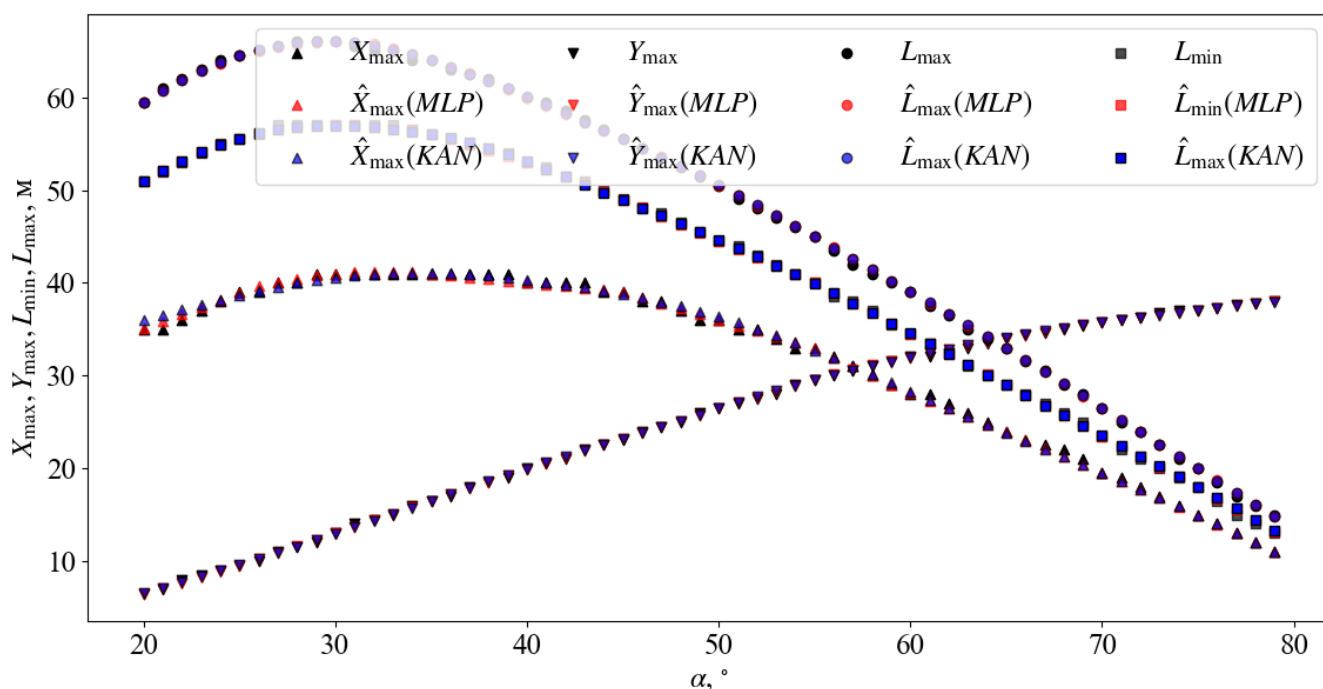


Рисунок 5.5 – Графики зависимостей геометрических характеристик свободных струй, полученных экспериментально, а также на основе MLP и KAN моделей

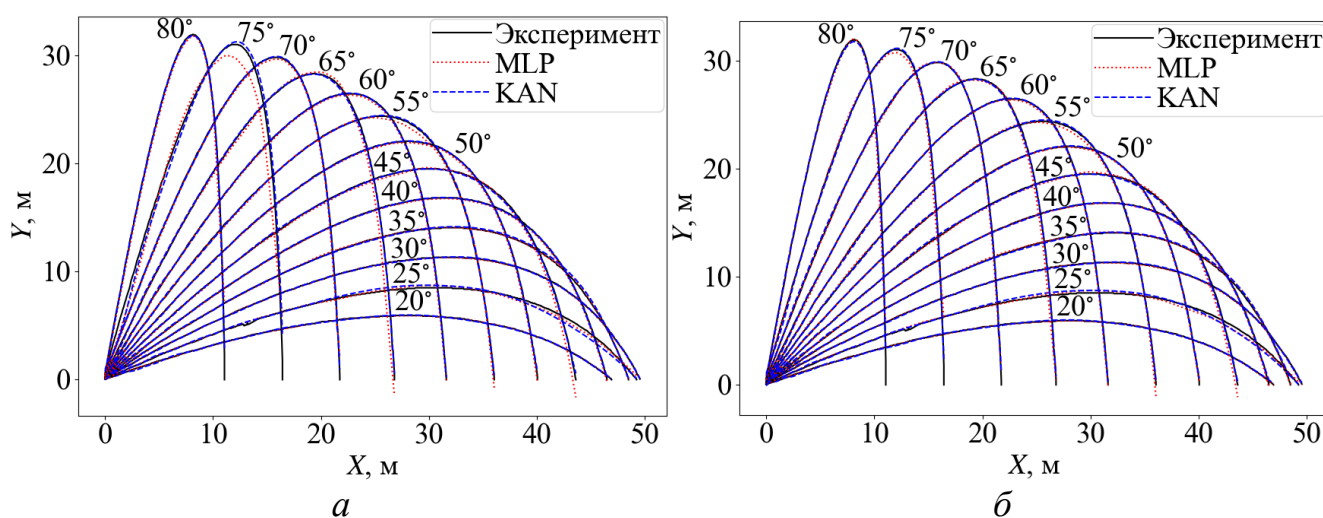


Рисунок 5.6 – Верхние границы свободных струй огнетушащего вещества, полученные на основе эксперимента, MLP и KAN моделей:

a – без дообучения, b – с дообучением

Максимальное значение RMSD по обеим моделям наблюдается при угле возвышения 75° : 1.5 м для MLP и 0.76 м для сети KAN. Поэтому к обучающей выборке были добавлены экспериментальные точки траектории, полученные для $\alpha = 75^\circ$, и произведено дообучение моделей. Соответствующие результаты представлены в таблице 5.6 и на рисунке 5.7.

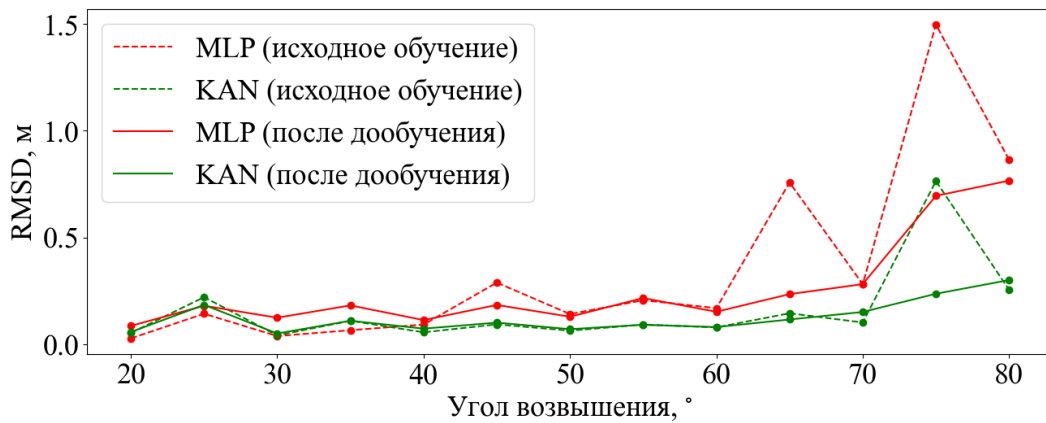


Рисунок 5.7 – Среднеквадратические отклонения моделей для различных углов возвышения после первичного обучения и дообучения

Дообучение моделей MLP и KAN с использованием экспериментальных данных для угла возвышения 75° позволило снизить среднеквадратическое отклонение соответственно до 0.69 м и 0.24 м. При этом, как следует из таблицы 5.6, значения RMSD по всей тестовой выборке также уменьшились (до 0.24 м и 0.12 м). Для дообучения многослойного персептрона потребовалось 148 секунд, что составляет 25 % от времени исходного обучения модели. Аналогичные показатели для сети Колмогорова – Арнольда составляют 342 секунды и 16 % соответственно. Из рисунка 5.7 следует, что RMSD KAN модели на углах возвышения отличных от 75° после дообучения существенно не изменились, а отклонения многослойного персептрона в диапазоне $\alpha = [20^\circ, 35^\circ]$ увеличились, т.е. включение дополнительных данных может привести к частичному ухудшению качества расчета MLP.

Кроме того, как показало проведенное исследование, при построении модели на базе MLP возможно критическое снижение точности расчета на сценариях, существенно отличающихся от применяемых для обучения. Сети Колмогорова – Арнольда продемонстрировали несущественное увеличение ошибки при выходе за границы диапазонов значений параметров обучающей выборки. Соответствующие результаты представлены на рисунке 5.8. Из рисунка 5.8 следует, что кривая, построенная на основе MLP, существенно отклоняется от реальной траектории газожидкостного потока после выхода за

границы обучающих сценариев. Значение RMSD на соответствующем участке для многослойного персептрона 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.

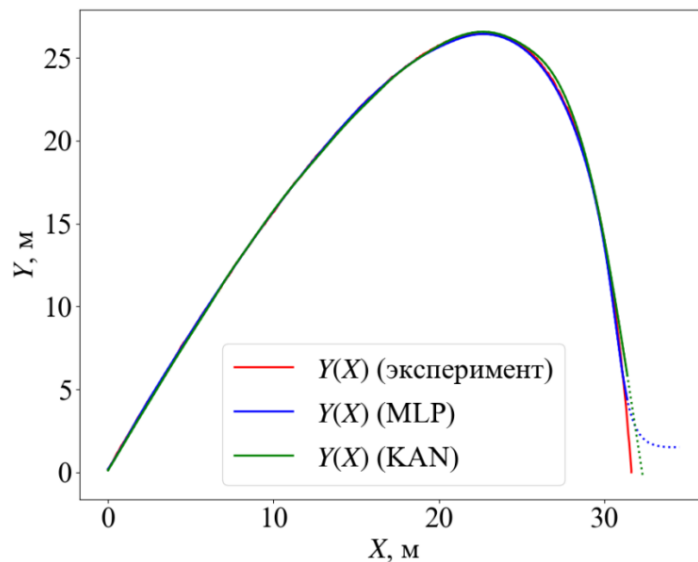


Рисунок 5.8 – Верхние границы газожидкостного потока, полученные на основе эмпирических данных, многослойного персептрона и сети Колмогорова – Арнольда в пределах (сплошные линии) и за пределами (пунктирные линии) обучающих сценариев

5.3.2 Сравнение многослойного персептрона и сети Колмогорова – Арнольда при решении задачи оценки характеристик потока огнетушащего вещества с учетом возмущающих воздействий

Оценка верхней границы потока огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола ЛС-П20У под воздействием бокового ветра и низкой температуре воздуха производилась на базе MLP и KAN моделей оценки характеристик газожидкостных потоков [204; 243], машинное обучение и верификация которых осуществлялась с использованием выборок, сгенерированных по результатам моделирования на основе выбранных методов

вычислительной гидродинамики (параграф 4.3), а валидация – с использованием выборок, построенных по результатам натурных испытаний (параграф 2.5). Соответствующие параметры представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – 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	Численное моделирование со случайным разбиением (4:1)		Натурные испытания (4 серии экспериментов)
Диапазон углов возвышения α	[30°, 35°, ..., 60°]		[30.8°, 44.5°, 46.8°, 57°, 60.3°]
Диапазон расходов огнетушащего вещества q_0 , л/с	[12, 14, ..., 20, 25, 26]		[10.2, 12.1, 14.3, 16.1, 17.1, 20, 26]
Диапазон углов направления ветра γ	[60°, 65°, ... , 120°]		[62°, 75°, 104°, 118°]
Диапазон скоростей ветра v_B , м/с	[0, 0.5, ..., 5]		[0, 1.4, 2, 2.7, 3.8, 5]

Обучающая (P_{LEARN}) и верификационная (P_{VER}) выборки генерировались по результатам моделирования в соотношении объема 4:1. Соответствующие размерности выборок: 588 и 147 сценариев. В качестве функции потерь при машинном обучении модели использовалось среднеквадратическое отклонение:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |P_i - P_{M,i}|^2}, \quad (5.1)$$

где N – количество точек траектории струи, построенной на основе обученной модели;

$P_{M,i}$ – координаты i -й точки верхней границы струи, построенной на основе обученной модели $P_M = f(\alpha, q_0, \gamma, v_B)$;

P_i – координаты ближайшей к $P_{M,i}$ точки траектории струи, построенной по результатам моделирования ($P = P_{LEARN}$ – для обучающей выборки, $P = P_{VER}$ – для верификационной выборки) или натурных испытаний ($P = P_e$ – для валидационной выборки).

Подбор гиперпараметров [98; 163] производился так, чтобы обеспечить требуемое качество расчета целевых характеристик, сходимость, защиту от переобучения. Критерием для прекращения усложнения расчетной модели являлось выполнение условия (4.16) для среднеквадратического отклонения относительно верификационной выборки. В таблицах 5.8–5.9 представлены финальные параметры обученных моделей.

Таблица 5.10 и рисунок 5.9 включают результаты расчета в трехмерном пространстве верхней границы потока огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола при боковом ветре для следующего сценария: $\alpha = 44.5^\circ$, $q_0 = 16.1$ л/с, $v_B = 2$ м/с, $\gamma = 104^\circ$.

Таблица 5.8 – Финальные параметры обученной модели на базе MLP

Наименование параметра	Значение	Обоснование
Количество скрытых слоев	3	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров (здесь и далее, по результатам подбора)
Функция активации нейронов	tanh	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров, гладкость траекторий
Коэффициент L2-регуляризации	0.001	Защита от переобучения
Метод оптимизации	Adam	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров, стабильность обучения
Начальное значение скорости обучения	0.001	Обеспечение сходимости обучения
Способ управления скоростью обучения	Адаптивный	Обеспечение стабильности обучения
Ранняя остановка	Используется	Защита от переобучения
Размер минибатча	250	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров

Таблица 5.9 – Финальные параметры обученной модели на базе KAN

Наименование параметра	Значение	Обоснование
Количество скрытых слоев	2	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров (здесь и далее, по результатам подбора)
Количество интервалов разбиения области определения функций	3	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров, гладкость траекторий
Порядок полиномов В-сплайнов	3	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров, гладкость траекторий
Добавочная функция для реберных весов	SiLU	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров
Коэффициент регуляризации	0.001	Защита от переобучения
Метод оптимизации	Adam	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров, стабильность обучения
Скорость обучения	0.01	Обеспечение сходимости обучения
Размер минибатча	200	Обеспечение требуемого качества расчета целевых параметров

Таблица 5.10 – Оценка точности расчета траектории относительно результатов эксперимента

Наименование параметра	Валидационное значение, м	Расчетное значение, м	Отклонение RD/RMSD	Выполнение условий (4.15)–(4.16)
MLP модель				
Дальность струи	24.9	25.8	3.6 %	$3.6 \% \leq 10 \%$
Высота струи	7.37	7.21	2.2 %	$2.2 \% \leq 10 \%$
Смещение пятна контакта	3.57	3.48	2.5 %	$2.5 \% \leq 10 \%$
Верхняя граница струи	–	–	0.48 м	$0.48 \text{ м} \leq 1 \text{ м}$
KAN модель				
Дальность струи	24.9	25.5	2.4 %	$2.4 \% \leq 10 \%$
Высота струи	7.37	7.27	1.4 %	$1.4 \% \leq 10 \%$
Смещение пятна контакта	3.57	3.49	2.2 %	$2.2 \% \leq 10 \%$
Верхняя граница струи	–	–	0.36 м	$0.36 \text{ м} \leq 1 \text{ м}$

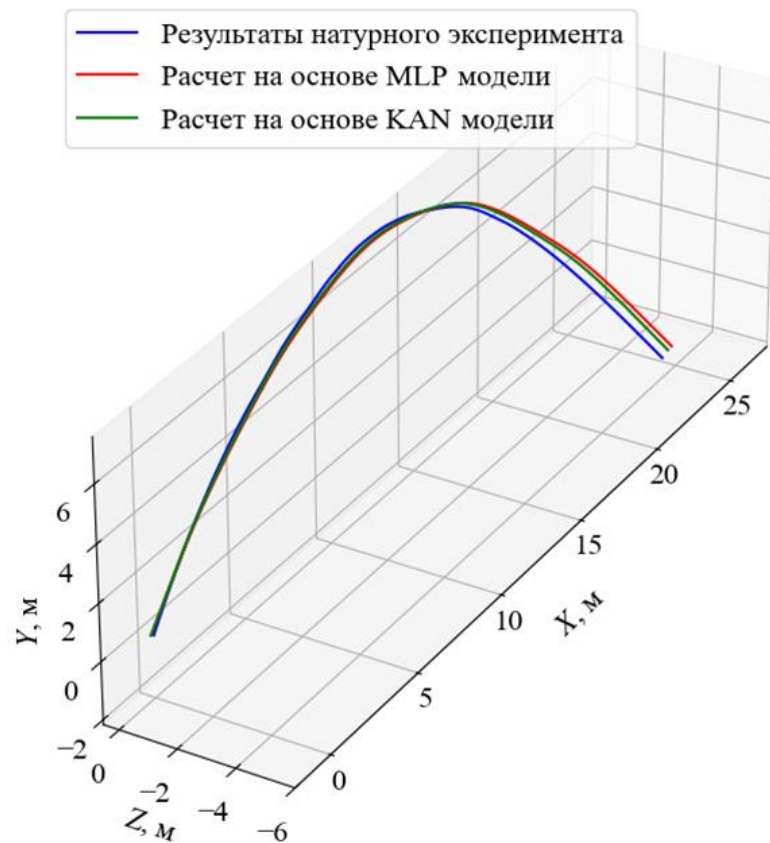


Рисунок 5.9 – Верхние границы газожидкостного потока при боковом ветре, полученные на основе эксперимента, многослойного персептрона и сети Колмогорова – Арнольда

Отклонение прогнозной траектории для обеих моделей от экспериментальной незначительно, в частности среднеквадратическое отклонение по всей ее длине составляет 0.48 м для MLP и 0.36 м для KAN, что говорит о достаточно высокой точности, согласно критерию (4.16).

В таблице 5.11 приведены основные параметры MLP и KAN моделей, обученных для расчета верхней границы потока огнетушащего вещества с учетом возмущающих воздействий.

Как следует из представленных на рисунке 5.9 и в таблицах 5.10–5.11 данных, KAN модель имеет более высокую точность. При этом время, требуемое для обучения и расчета, в случае применения многослойного персептрона примерно в 4 раза меньше по сравнению с сетью Колмогорова – Арнольда. Однако объем памяти, необходимый для хранения MLP модели, в 6 раз больше аналогичного параметра KAN модели.

Таблица 5.11 – Основные параметры MLP и KAN моделей, обученных для расчета верхней границы потока огнетушащего вещества

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

В таблице 5.12 содержится информация об отклонениях построенных нейросетевых моделей относительно обучающей, верификационной (тестовой) и валидационной выборок. Согласно значениям, указанным в таблице 5.12, максимальное отклонение результатов расчета на основе обученных моделей не превышает 0.71 м для MLP и 0.63 м для KAN, что соответствует сформулированному выше критерию точности (4.16).

Таблица 5.12 – Оценка точности обучения

Наименование выборки	Минимальное значение RMSD, м	Максимальное значение RMSD, м	Среднее значение RMSD, м
MLP модель			
Обучающая	0.06	0.48	0.12
Верификационная	0.06	0.51	0.14
Валидационная	0.22	0.71	0.52
KAN модель			
Обучающая	0.04	0.37	0.09
Верификационная	0.05	0.45	0.11
Валидационная	0.16	0.63	0.43

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, сети Колмогорова – Арнольда имеют ряд преимуществ,

существенных с точки зрения решения рассмотренных задач оценки характеристик газожидкостных потоков.

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 выборе одинаковых стратегий обучения. Отсутствие заметного преимущества по среднеквадратическому отклонению при решении задачи расчета геометрических характеристик объясняется появившейся из-за существенной погрешности измерений (около 0.5 м) частичной «ступенчатости» экспериментальных данных, что влияет на качество аппроксимации сплайнами функций активации нейронов. Такую особенность следует учитывать при формировании обучающих выборок для сетей Колмогорова – Арнольда.

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 (например, диапазонам значений параметров возмущающих воздействий), задействуя соответствующие результаты эксперимента или моделирования.

В-четвертых, меньшее снижение точности оценки целевых характеристик на сценариях, значительно отличающихся от применяемых для обучения. При этом скорость построения расчета на основе сетей Колмогорова – Арнольда 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 газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах с учетом возможных ограничений со стороны используемой элементной базы на размеры соответствующих программных модулей.

В таблице 5.13 приведены коэффициенты корреляции между параметрами управляющих, возмущающих воздействий и среднеквадратическим отклонением, вычисленные по верификационной выборке. Максимальное по модулю значение коэффициента корреляции (для расхода огнетушащего вещества) составляет 0.1, что говорит о достаточно высоком качестве обучения KAN модели.

Таблица 5.13 – Коэффициенты корреляции между параметрами управляющих, возмущающих воздействий и среднеквадратическим отклонением

Параметр	α	q_0	γ	v_B	RMSD
α	1	0	0	0	0.07
q_0	0	1	0	0	0.1
γ	0	0	1	0	-0.09
v_B	0	0	0	1	0.05
RMSD	0.07	0.1	-0.09	0.05	1

На рисунке 5.10 представлен график плотности распределения RMSD по верификационной выборке KAN модели. С доверительной вероятностью $P = 0.95$ среднеквадратическое отклонение не превышает 0.16 м.

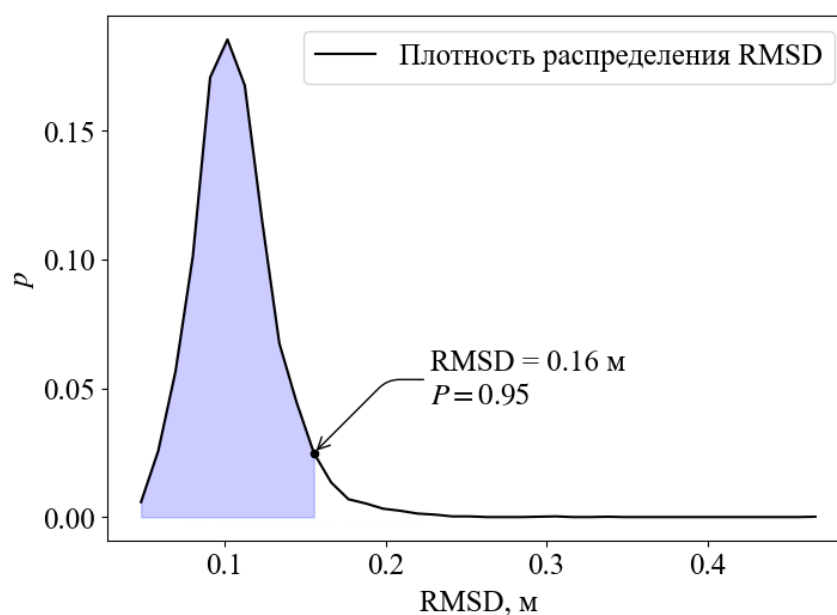


Рисунок 5.10 – Плотность распределения RMSD по верификационной выборке

Схема на рисунке 5.11 отражает последовательность формирования исходных данных (по результатам натурных испытаний и моделирования), обучения, верификации и валидации расчетной модели, предназначенной для оценки целевых характеристик газожидкостных потоков, на примере рассмотренной выше сети Колмогорова – Арнольда. Визуализация струй на рисунке 5.11 представлена в сечении YZ , для которого в наибольшей степени проявляется воздействие бокового ветра.

В таблице 5.14 приведено сравнение разработанной методологии (KAN модель) с другими подходами к оценке целевых характеристик потоков огнетушащего вещества: методом прогнозирования точки падения на основе CV-систем ближнего радиуса действия [146], методом прогнозирования положения точки падения на основе нейросетевой модели с экспериментальной обучающей выборкой [139].

Как следует из таблицы 5.14, среднее значение относительного отклонения дальности, рассчитанной на основе обученной KAN модели, меньше по сравнению с другими методами. Оценка точности по всей длине траектории в работах [139; 146] не производилась, поэтому в таблице 5.14 соответствующие величины не указаны.

Кроме того, следует отметить, что эффективность этих методов показана только на струях небольшой дальности (менее 10 м) при слабом ветре или штиле – условиях, при которых в меньшей степени проявляются явления, усложняющие задачу расчета целевых характеристик. При этом разработанная методология позволяет оценивать целевые характеристики газожидкостных потоков значительных размеров с существенным смещением контактного пятна под возмущающими воздействиями. В частности, результаты, содержащиеся в таблицах 5.12–5.14, были получены, в том числе для струй дальностью свыше 50 метров и скорости ветра до 5 м/с.

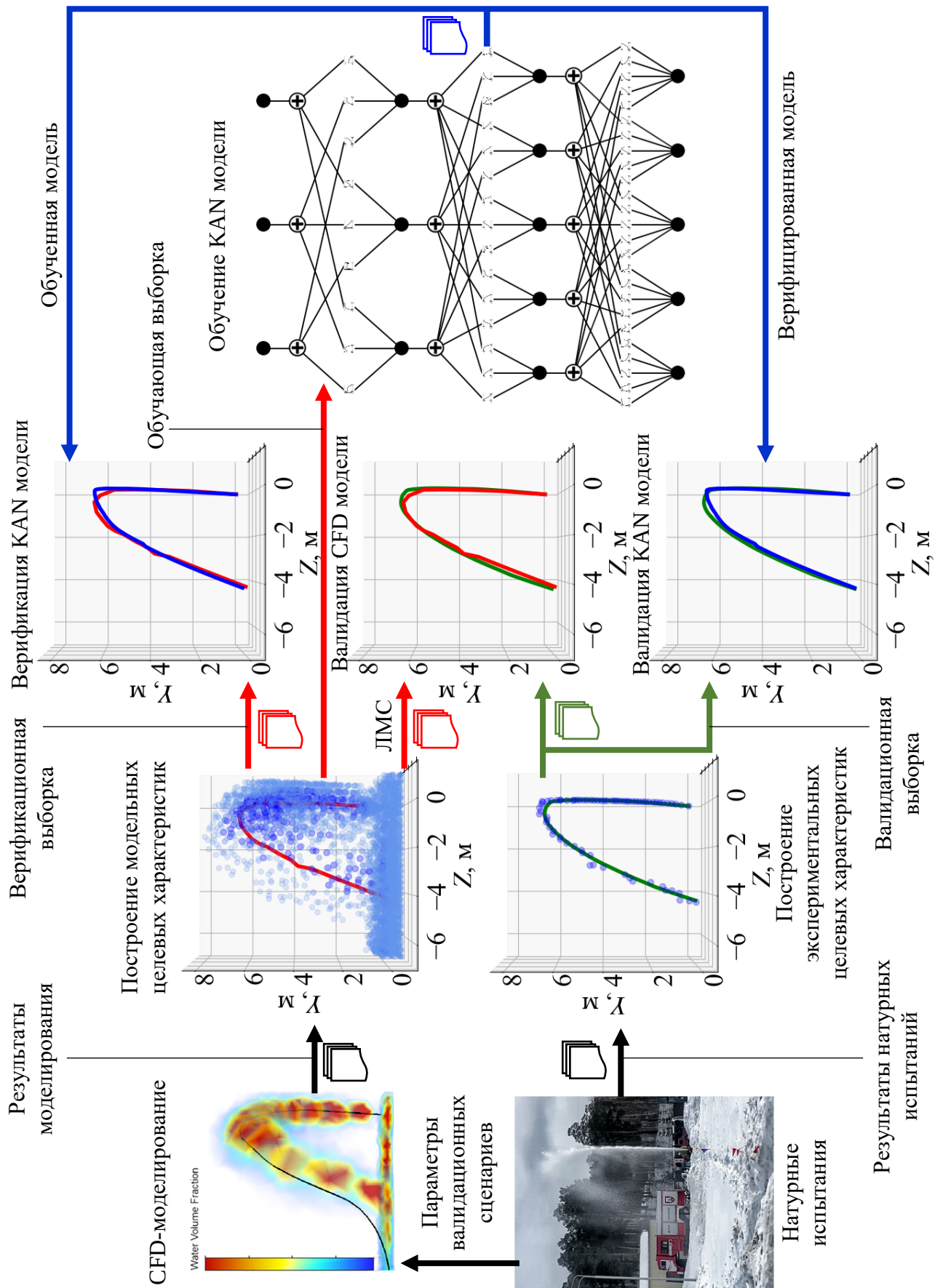


Рисунок 5.11 – Схема формирования исходных данных обучения, верификации и валидации расчетной KAN модели

Таблица 5.14 – Сравнение методов оценки целевых характеристик газожидкостных потоков

Метод	Среднее значение RD по дальности, %	Среднее значение RMSD по всей длине траектории, м	Достоинства	Ограничения
Метод прогнозирования точки падения траектории на основе систем компьютерного зрения ближнего радиуса действия [146]	4.5	–	Метод может использоваться в условиях низкой дальности видимости. Высокая точность и скорость, соответствующая режиму реального времени	При сильном боковом ветре и большой дальности наведения прогноз на основе компактной части струи может иметь низкую точность
Метод прогнозирования положения точки падения на основе нейросетевой модели с экспериментальной обучающей выборкой [139]	4.7	–	Высокая точность и скорость, соответствующая режиму реального времени на струях с небольшой дальностью	Эффективность метода показана только на струях с небольшой дальностью, обучающие выборки формируются только для точки падения на основе экспериментальных данных, что не позволяет обеспечить широкий диапазон сценариев использования
Разработанная методика	3.8	0.43	Высокая точность и скорость, соответствующая режиму реального времени, в т.ч. на струях с большой дальностью	Требует численного моделирования в большом объеме для построения обучающих и верификационных выборок

5.4 Выводы по главе 5

В ходе проведенного исследования, которому посвящена пятая глава, были получены следующие результаты и выводы:

1) Разработаны расчетные модели оценки характеристик газожидкостных потоков при возмущающих воздействиях в режиме реального времени на основе методов машинного обучения. Отличием построенных моделей 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.

2) Проведенный сравнительный анализ использования различных архитектур машинного обучения для решения задачи оценки характеристик потоков огнетушащего вещества в противопожарных роботизированных системах показал, что сети Колмогорова – Арнольда имеют ряд преимуществ перед многослойным персептроном, в частности:

- меньший объем памяти, требуемый для хранения обученной модели, достигаемый за счет значительного упрощения ее структуры, что может иметь значение с точки зрения реализации соответствующих алгоритмов на элементной базе противопожарных роботизированных систем;

- более высокая по сравнению MLP моделями точность при использовании одинаковых стратегий обучения;

- более 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;

- более высокая устойчивость при выходе за пределы обучающей выборки.

3) Разработана расчетная модель на основе 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. Показано, что разработанная модель на исследованных диапазонах значений параметров управляющих и возмущающих воздействий обеспечивает точность и скорость вычисления характеристик, требуемые для функционирования противопожарных роботизированных систем.

ГЛАВА 6. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОЖАРНЫМИ РОБОТАМИ

Шестая глава посвящена аспектам практического применения расчетных моделей оценки характеристик газожидкостных потоков, построенных на основе разработанной методологии. Предложены способы управления пожарными роботами с использованием обученной модели. Разработан метод и его алгоритмическая реализация для расчета углов наведения потока огнетушащего вещества в заданную точку трехмерного пространства, в том числе при наличии возмущающих воздействий, с учетом геометрических особенностей струи. Предложен метод синтеза закона управления пожарными роботами, позволяющий формировать временные диаграммы изменения углов наведения ствола для орошения защищаемой поверхности по заданному циклу, в том числе с учетом возмущающих воздействий, а также параметров контактного пятна. Разработана технология оценки эффективности применения пожарных роботов для охлаждения защищаемых поверхностей (строительных конструкций, оборудования) на основе синтезированного закона управления с использованием численного моделирования динамики развития пожара. Разработана импортозамещающая программная реализация предложенных методов и алгоритмов. Приведены результаты их апробации.

6.1 Способы управления пожарными роботами с использованием расчетной модели оценки целевых характеристик газожидкостных потоков

Управление наведением струи огнетушащего вещества в отечественных противопожарных роботизированных системах в настоящее время выполняется в дистанционном или ручном режиме по визуальному контролю, а также по заложенной на стадии проектирования программе (таблица 1.1) [2; 10]. На основе

разработанной методологии оценки целевых характеристик газожидкостных потоков существующие способы управления могут быть модифицированы с применением обученной расчетной модели для решения следующих задач:

1) Генерация управляющих воздействий U (в системе управления пожарным роботом), обеспечивающих прохождение расчетной траектории огнетушащего вещества через цель X_Z (рисунок 6.1).

2) Оценка (в системе обратной связи) траектории огнетушащего вещества Y' и положения пятна контакта X' в зависимости от параметров управляющих U и возмущающих воздействий F в условиях, когда визуальные методы, в том числе на базе CV [146], не обеспечивают требуемую точность (рисунок 6.2).

3) Оценка (в системе обратной связи) значений параметров возмущающих воздействий F' на основе доступных визуально фрагментов струи огнетушащего вещества Y (рисунок 6.3).

Обозначения на рисунках 6.1–6.3: X_Z – положение цели; X_0 – выходные параметры газожидкостного потока; X – фактическое положение пятна контакта; X' – оцененное фактическое положение пятна контакта; U – управляющие воздействия; F – возмущающие воздействия; F' – оцененные параметры возмущающих воздействий; Y – траектория газожидкостного потока.

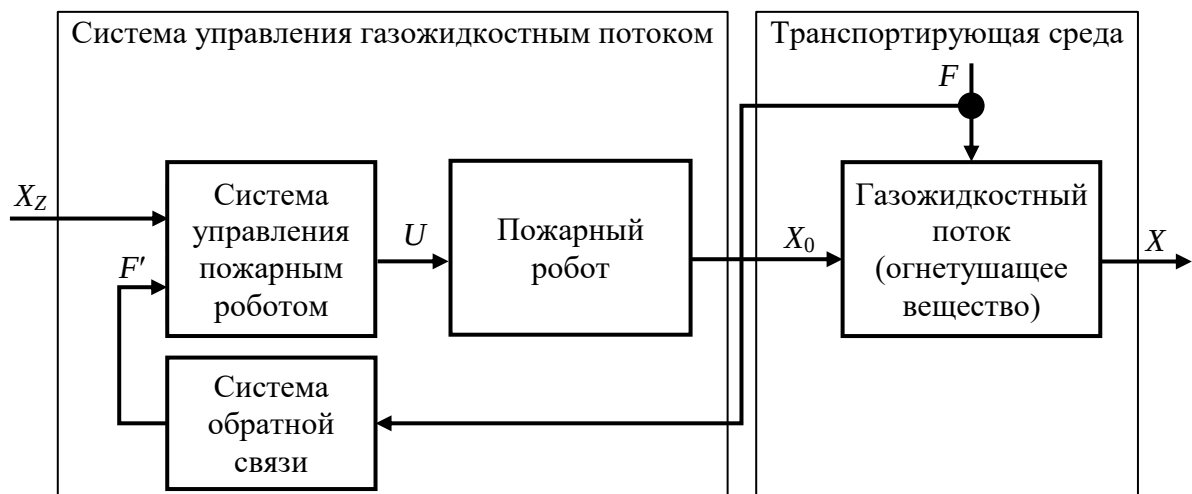


Рисунок 6.1 – Схема способа управления наведением струи из ствола пожарного робота с генерацией управляющих воздействий на основе обученной расчетной модели

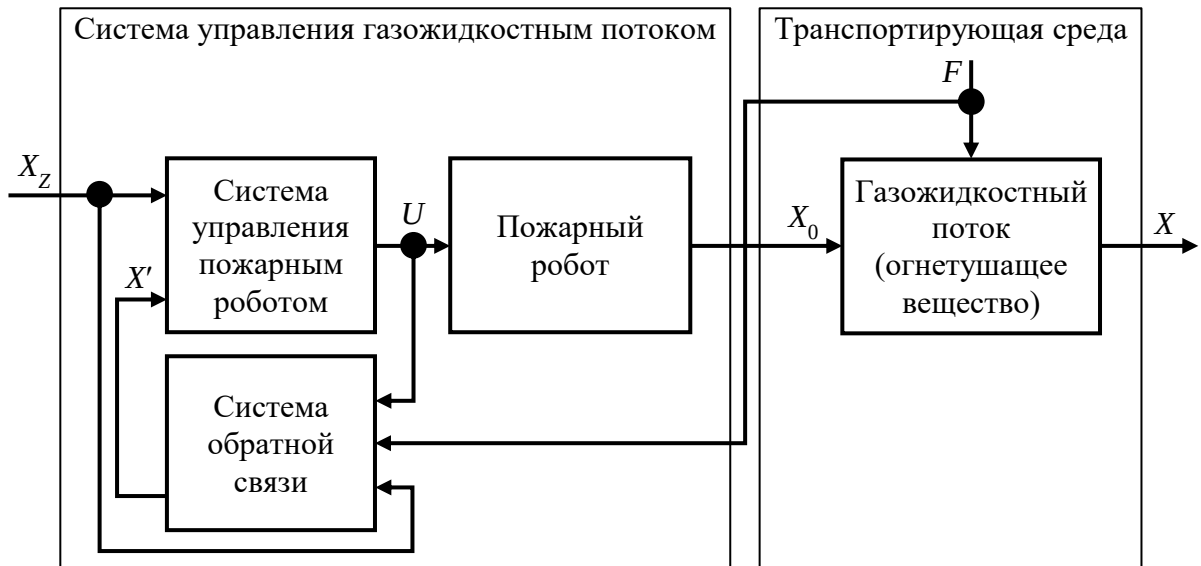


Рисунок 6.2 – Схема способа управления наведением струи из ствола пожарного робота с оценкой траектории и положения пятна контакта на основе обученной расчетной модели

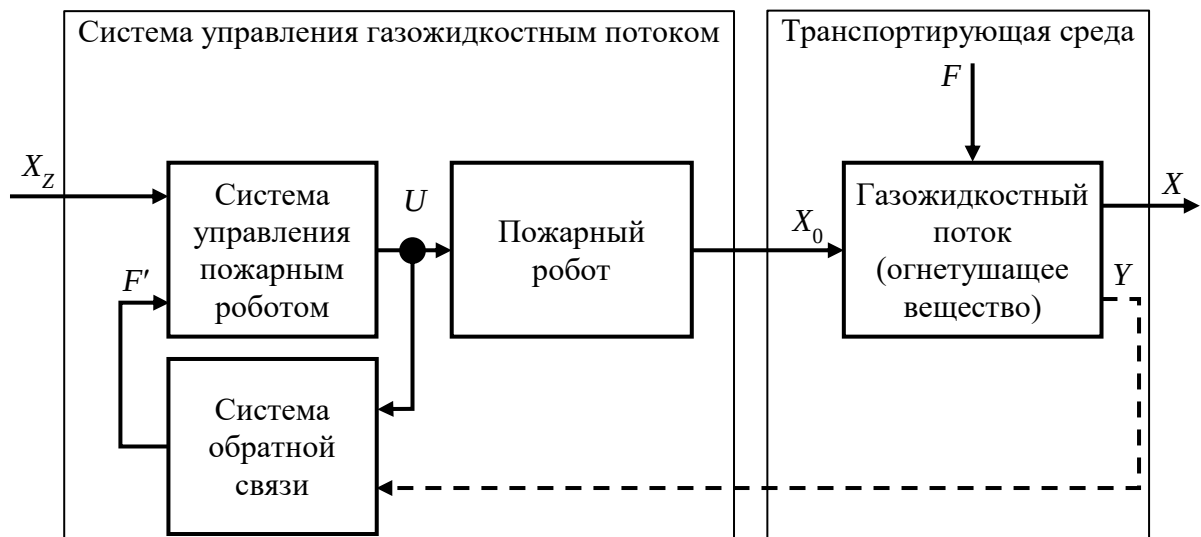


Рисунок 6.3 – Схема способа управления наведением струи из ствола пожарного робота с оценкой значений параметров возмущающих воздействий на основе расчетной модели

Способ управления наведением с генерацией управляющих воздействий, обеспечивающих прохождение расчетной траектории огнетушащего вещества через цель (рисунок 6.1), реализуется следующим образом. На основе заданного положения цели X_Z (координаты точки в трехмерном пространстве защищаемого объекта), оцененных параметров возмущающих воздействий F' (скорость и угол

направления ветра, потока воздуха под влиянием систем вентиляции, дымоудаления и т.д.) генерируются управляющие воздействия U (1.1), минимизирующие расчетное отклонение положения пятна контакта X' от X_Z (1.6) или обеспечивающие выполнение критерия (1.7) или (1.8).

Для подбора соответствующих значений параметров U могут использоваться различные методы оптимизации (прямого поиска [141], градиентные с численной оценкой производных [49] и др.). В следующем параграфе представлен алгоритм, разработанный для решения данной задачи с учетом геометрических особенностей траектории струи. Схема генерации управляющих воздействий согласно описанному выше способу представлена на рисунке 6.4. Индекс C на рисунке 6.4 обозначает координатную ось в соответствии с формулой (1.7).

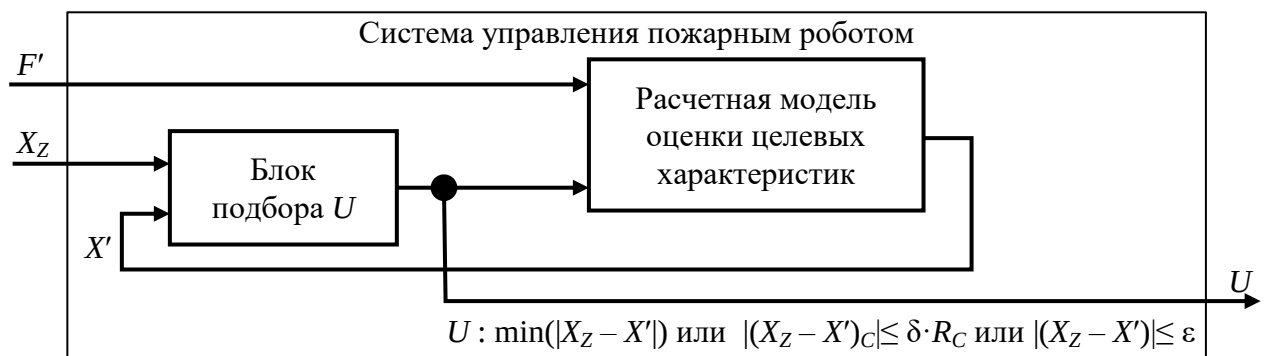


Рисунок 6.4 – Схема генерации управляющих воздействий
на основе обученной расчетной модели

Достоинства данного способа управления наведением заключаются в:

- быстром формировании струи, траектория которой проходит через заданную цель, что сокращает время начала ее орошения, т.к. скорость наведения ствола пожарного робота (без подачи огнетушащего вещества), обычно, значительно выше скорости сканирования (с подачей огнетушащего вещества) [3];

- возможности наведения струи на цель с учетом возмущающих воздействий (ветра, движения потока воздуха, создаваемого системами вентиляции, дымоудаления и т.д.).

Стоит отметить, что описанный выше способ управления чувствителен к качеству обученной расчетной модели, погрешностям оценки параметров возмущающих воздействий и т.д. Кроме того, при орошении заданной области сканирующими струями (движение ствола осуществляется по определенному циклу) скорость расчета управляющих параметров должна соответствовать режиму реального времени (в данном случае – времени перемещения ствола между соседними точками цикла), что формирует дополнительные требования к быстродействию используемого метода оптимизации.

Способ управления наведением с оценкой траектории огнетушащего вещества Y' и положения пятна контакта X' (рисунок 6.2) можно описать следующей последовательностью операций:

1) На основе обученной расчетной модели производится оценка траектории струи огнетушащего вещества Y' (рисунок 6.5) с учетом текущих значений параметров управляющих U и возмущающих (измеренных) F' воздействий.

2) Оценивается фактическое положение контактного пятна X' , как ближайшая к цели X_Z точка траектории струи огнетушащего вещества:

$$X' = x : \min_{x \in Y'} (|X_Z - x|). \quad (6.1)$$

3) В системе управления пожарным роботом на основе полученного отклонения $\Delta X = X_Z - X'$ при необходимости (например, если не выполняется критерий (1.7)–(1.8)) производится коррекция управляющих воздействий с учетом геометрических особенностей струи. После чего цикл повторяется, начиная с п. 1.

Схема оценки фактического положения пятна контакта на основе обученной расчетной модели, реализующая пункты 1–2 описанной выше последовательности операций, представлена на рисунке 6.5. Основным достоинством представленного способа является то, что управление наведением осуществляется по отклонению, т.к. оценка положения пятна контакта на основе обученной расчетной модели формирует обратную связь, что позволяет реализовать регулирование на базе соответствующих методов [1]. Кроме того, данную схему (рисунок 6.5) можно использовать совместно с другими способами определения координат контактного пятна для повышения точности наведения.

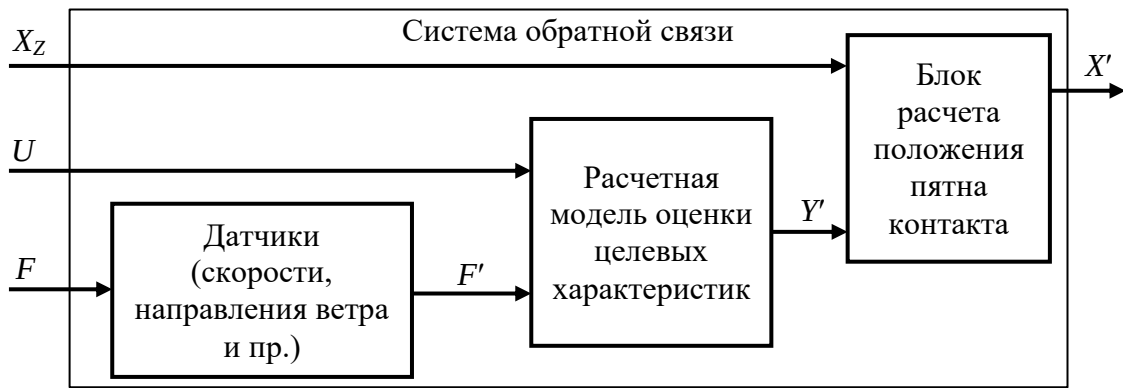


Рисунок 6.5 – Схема оценки фактического положения пятна контакта на основе обученной расчетной модели

Точность управления наведением с оценкой траектории огнетушащего вещества и положения пятна контакта зависит от качества обученной расчетной модели и погрешностей определения параметров возмущающих воздействий. Кроме того, т.к. в данном случае наведение осуществляется в сканирующем режиме, то за счет меньшей скорости перемещения ствола, время регулирования будет выше по сравнению с подходом, представленном на рисунке 6.1.

Способ управления с оценкой значений параметров возмущающих воздействий F' на основе доступных визуально фрагментов огнетушащего вещества Y (рисунок 6.3) основан на совместном использовании обученной модели и системы компьютерного зрения. Последовательность операций при данном подходе следующая:

1) На основе методов компьютерного зрения (CV), в частности разработанных в главе 2, по доступным визуально (в условиях задымления) фрагментам огнетушащего вещества Y (рисунок 6.3) на расстоянии, ограниченном дальностью видимости и эффективной дальностью используемой системы компьютерного зрения (обычно, область сплошной/компактной струи [198]), определяется фактическое положение соответствующих участков траектории на основе распознанных фрагментов Y_{CV} (рисунок 6.6).

2) На основе обученной расчетной модели производится оценка траектории струи огнетушащего вещества Y' с учетом текущих значений параметров управляющих U и возмущающих (оцененных) F' воздействий.

3) Вычисляются параметры возмущающих воздействий F' , минимизирующие отклонение расчетной траектории струи Y' от фактической Y_{CV} на доступных участках:

$$F' = f : \min_f \left(\sum_{Y_{CV}} |Y_{CV} - Y'| \right). \quad (6.2)$$

4) В системе управления пожарным роботом на основе уточненных значений параметров возмущающих воздействий производится генерация управляющих воздействий (например, с использованием способа, представленного на рисунке 6.4).

Схема оценки параметров возмущающих воздействий на основе обученной расчетной модели и системы компьютерного зрения представлена на рисунке 6.6.

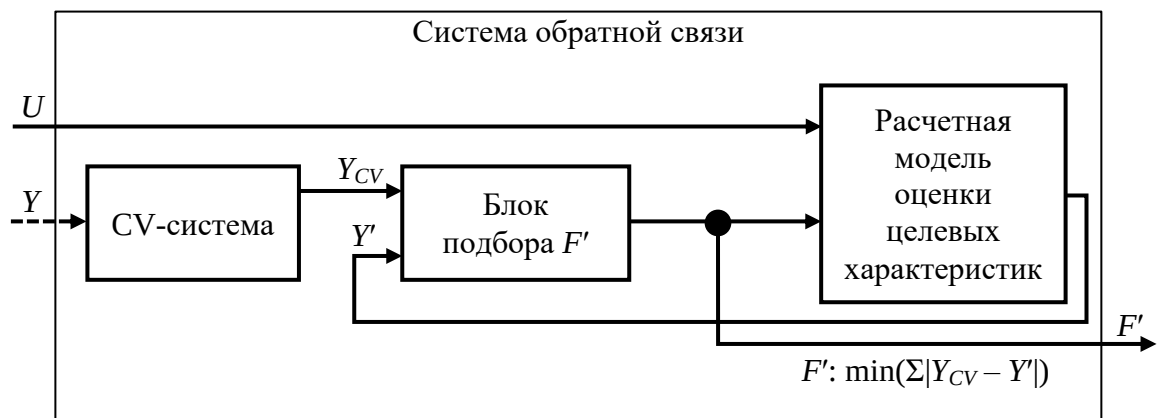


Рисунок 6.6 – Схема оценки фактических значений параметров возмущающих воздействий на основе обученной расчетной модели

Основным достоинством данного способа является независимость от наличия или погрешности датчиков, измеряющих параметры возмущающих воздействий. Однако этот подход чувствителен к качеству обучения расчетной модели, точности системы компьютерного зрения. К ограничениям способа можно отнести низкую эффективность при малых скоростях ветра, которые несущественно смещают траекторию струи на ее компактных участках.

6.2 Решение задачи наведения газожидкостного потока на цель

Для реализации способа управления, представленного на рисунках 6.1 и 6.4 требуется решение задачи определения значений параметров управляющих воздействий, обеспечивающих прохождение расчетной траектории огнетушащего вещества через цель. На рисунке 6.7 представлена соответствующая схема.

Основные обозначения на рисунке 6.7:

(X, Y, Z) – положение целевой точки в системе координат защищаемого объекта.

(X^R, Y^R, Z^R) – координаты роботизированного пожарного лафетного ствола (его геометрического центра – точки, относительно которой осуществляется расчет траектории струи с учетом углов наведения).

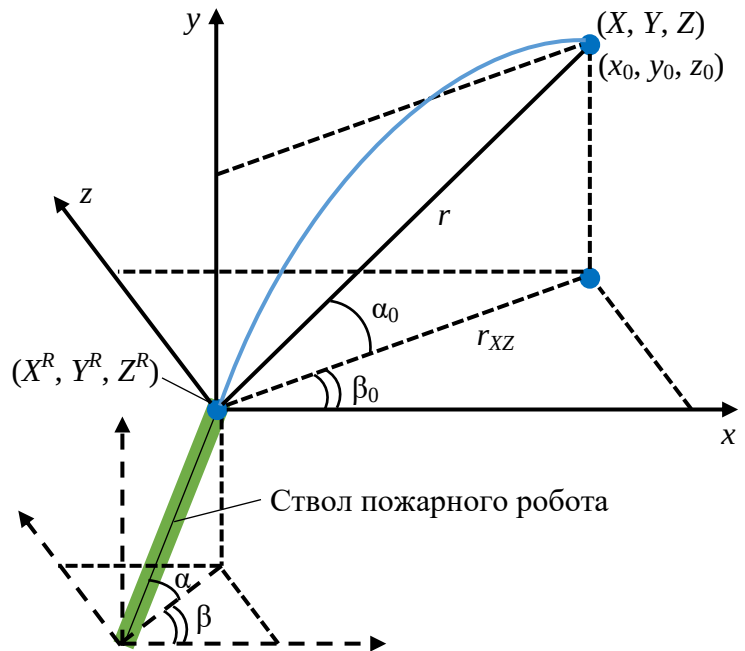


Рисунок 6.7 – Схема наведения струи из ствола пожарного робота в заданную точку

Выбор данной точки осуществляется так, чтобы ее положение не смещалось при повороте ствола относительно горизонтальной и вертикальной осей. Такое решение определяется тем, что в зависимости от особенностей конструкции пожарного робота и длины выходного патрубка исток струи (начальная точка ее траектории) может существенно отклоняться от исходного положения при изменении углов наведения. Если оси поворота ствола имеют точку пересечения, то она является геометрическим центром.

r – радиус положения цели в сферической системе координат пожарного робота [73]:

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}, \quad (6.3)$$

где $x_0 = X - X^R$; $y_0 = Y - Y^R$; $z_0 = Z - Z^R$ – координаты цели в системе координат пожарного робота с началом в точке (X^R, Y^R, Z^R) .

r_{XZ} – проекция радиуса положения цели на горизонтальную плоскость (xz) в системе координат пожарного робота:

$$r_{XZ} = \sqrt{x_0^2 + z_0^2}. \quad (6.4)$$

α_0, β_0 – углы положения цели в сферической системе координат пожарного робота:

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{y_0}{r}\right), \beta_0 = \arcsin\left(\frac{z_0}{r_{XZ}}\right). \quad (6.5)$$

α, β – углы наведения ствола соответственно по возвышению и азимуту в системе координат пожарного робота.

Задача наведения струи из ствола пожарного робота, геометрический центр которого находится в точке (X^R, Y^R, Z^R) , на заданную цель с координатами (X, Y, Z) заключается в определении углов α и β , обеспечивающих прохождение траектории движения огнетушащего вещества через точку (X, Y, Z) . Здесь и далее считается, что расход огнетушащего вещества (и соответственно рабочее давление) имеет фиксированное значение, обеспечивающее в текущих условиях требуемую интенсивность орошения цели.

При отсутствии возмущающих воздействий, оказывающих существенное влияние на положение пятна контакта в поперечном направлении, $\beta = \beta_0$ (6.5). Поиск угла возвышения α при этом производится с использованием расчетной модели струи на основе критерия (1.8) по формулам:

$$\alpha : g(\alpha) \leq \varepsilon, \quad (6.6)$$

где $g(\alpha)$ – расстояние от цели до ближайшей точки траектории:

$$k = \arg \left[\min_j \left(\left| [x_j^t, y_j^t, z_j^t] - [x_0, y_0, z_0] \right| \right) \right], \quad g(\alpha) = \left| [x_k^t, y_k^t, z_k^t] - [x_0, y_0, z_0] \right|, \quad (6.7)$$

где $\left| [x_k^t, y_k^t, z_k^t] - [x_0, y_0, z_0] \right| = \sqrt{(x_k^t - x_0)^2 + (y_k^t - y_0)^2 + (z_k^t - z_0)^2}$ – здесь и далее расстояние между точками с координатами $[x_k^t, y_k^t, z_k^t]$, $[x_0, y_0, z_0]$;

$[x^t, y^t, z^t]$ – координаты точек траектории струи с учетом поворота ее относительно вертикальной оси на угол β :

$$[x^t, y^t, z^t] = [x^r \cdot \cos(\beta) - z^r \cdot \sin(\beta), y^r, x^r \cdot \sin(\beta) + z^r \cdot \cos(\beta)], \quad (6.8)$$

где $[x^r, y^r, z^r]$ – координаты точек траектории, определяемые на основе обученной расчетной модели с учетом ее смещения относительно геометрического центра пожарного робота в зависимости от управляющих воздействий (угла возвышения α и фактического расхода огнетушащего вещества q_0):

$$[x^r, y^r, z^r] = f(\alpha, q_0), \quad (6.9)$$

где $f(\alpha, q_0)$ – обученная расчетная модель при нулевой скорости ветра ($v_B = 0$, $\gamma = 0$);

$z^r = 0$ при отсутствии ветра.

Для поиска угла возвышения α , обеспечивающего выполнение критерия (6.6) можно использовать различные методы оптимизации [53], выбирая в качестве начального значения α_0 . Соответствующие результаты, полученные на основе библиотеки `scipy` [158] для пожарного робота ПР-ЛСД-С20У, представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты поиска угла возвышения без учета ветра с использованием различных методов оптимизации

Наименование метода	Количество итераций	Количество вычислений целевой функции $g(\alpha)$	Конечное значение целевой функции, м	Время расчета, с
Метод Нелдера – Мида [91]	34	82	0.1	0.98
Метод Бroyдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно [72]	3	143	0.1	1.3
Метод градиентного спуска [185]	3	162	0.1	1.4

При достаточно сильном ветре поток огнетушащего вещества отклоняется в поперечном направлении от вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии выходного патрубка ствола пожарного робота, что также требует соответствующего управления наведением по азимуту (углу β). При этом выражения (6.6), (6.7) приводятся к следующему виду:

$$\alpha, \beta: g(\alpha, \beta) \leq \varepsilon, \quad (6.10)$$

$$k = \arg \left[\min_j \left(\left\| \begin{bmatrix} x_j^t \\ y_j^t \\ z_j^t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \right\| \right) \right], \quad g(\alpha, \beta) = \left\| \begin{bmatrix} x_k^t \\ y_k^t \\ z_k^t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \right\|. \quad (6.11)$$

Координаты точек траектории $[x^r, y^r, z^r]$ в (6.8) определяются в данном случае на основе обученной расчетной модели в зависимости не только от управляющих (угла возвышения α и фактического расхода ОТВ q_0), но и возмущающих воздействий (скорости v_B и направления ветра γ):

$$\begin{bmatrix} x^r \\ y^r \\ z^r \end{bmatrix} = f(\alpha, q_0, v_B, \gamma - \beta). \quad (6.12)$$

Аргумент $(\gamma - \beta)$ функции f в (6.12) учитывает изменение направления ветра относительно ориентации пожарного ствола при его повороте по вертикальной оси.

Результаты рассмотренных выше методов оптимизации для определения углов α и β , обеспечивающих прохождение траектории струи огнетушащего вещества из ствола ПР-ЛСД-С20У через заданную цель, представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты поиска углов наведения с учетом ветра с использованием различных методов оптимизации

Наименование метода	Количество итераций	Количество вычислений целевой функции $g(\alpha, \beta)$	Конечное значение целевой функции, м	Время расчета, с
Метод Нелдера – Мида	59	121	0.2	1.5
Метод Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно	9	248	0.3	2.2
Метод градиентного спуска	4	301	0.3	2.6

Отклонение пятна контакта 0.2–0.3 м на компактном участке струи может превышать его размеры, что не удовлетворяет критерию качества (1.7). Кроме того, продолжительность расчета, превышающая 1 с, не соответствует режиму реального времени. Основная проблема рассмотренных методов оптимизации заключается в том, что в них не учитываются геометрические особенности траектории потока огнетушащего вещества: наличие восходящей и нисходящей части, влияние α на дальность и высоту струи. В настоящей диссертационной работе был разработан алгоритм определения углов наведения газожидкостного потока из ствола пожарного робота на цель на основе обученной расчетной модели с учетом перечисленных особенностей.

Алгоритм расчета углов наведения газожидкостного потока на цель

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке А.5 (приложение А).

Входные данные:

– Координаты цели в системе трехмерного пространства защищаемого объекта: X, Y, Z .

– Координаты пожарного лафетного ствола: X^R, Y^R, Z^R .

– Расход ОТВ: q_O .

– Параметры возмущающих воздействий: v_B, γ .

– Расчетная модель струи: $\begin{bmatrix} x^r, y^r, z^r \end{bmatrix} = f(\alpha_i, q_O, v_B, \gamma)$ ($\begin{bmatrix} x^r, y^r, z^r \end{bmatrix}$ – координаты точек траектории относительно геометрического центра ПЛС).

Начальные величины множителей приращений по углам наведения: $d\alpha_0, d\beta_0$. Выбираются так, чтобы обеспечить сходимость и устойчивость алгоритма, соответствующие зависимости будут рассмотрены ниже.

– Коэффициенты уменьшения множителей приращений по углам наведения: $s\alpha, s\beta$.

– 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 (если средняя за последние n итераций точность не улучшается, то уменьшаются приращения по углам наведения).

Выходные данные:

– Угол возвышения α и угол ориентации (азимута) β .

Шаг 1. Вычисление координат цели в системе пожарного робота (α_0, β_0) по формулам (6.3)–(6.5). Обнуление счетчика итераций: $i = 0$. Задание начальных значений углов наведения: $\alpha_i = \alpha_0, \beta_i = \beta_0$.

Начальные значения приращений по углам наведения: $d\alpha = d\alpha_0; d\beta = d\beta_0$.

Шаг 2. Вычисление траектории струи по формуле (6.12), поворот струи на угол β_i по формуле (6.8).

Шаг 3. Вычисление отклонения траектории струи от цели по формуле (6.11). Если $g(\alpha_i, \beta_i) \leq \varepsilon$, то конец алгоритма.

Расчет разности между средними за последние n итераций значениями отклонений на текущем и предыдущем шаге по формуле:

$$d\varepsilon = \left[\sum_{m=i-n}^i g(\alpha_m, \beta_m) - \sum_{m=i-n}^i g(\alpha_{m-1}, \beta_{m-1}) \right] / n. \quad (6.13)$$

Если среднее отклонение уменьшилось $d\varepsilon < 0$, то переход к шагу 5.

Шаг 4. Обновление приращений по углам наведения (для обеспечения устойчивости и сходимости алгоритма):

$$d\alpha = d\alpha / s\alpha, \quad d\beta = d\beta / s\beta. \quad (6.14)$$

Шаг 5. Расчет приращений по углам наведения с учетом геометрических особенностей струи:

$$k\alpha = \left[\alpha_0 - \arcsin \left(\frac{y_k^t}{\sqrt{(x_k^t)^2 + (y_k^t)^2 + (z_k^t)^2}} \right) \right] \cdot ct, \quad (6.15)$$

$$k\beta = \beta_0 - \arcsin \left(\frac{z_k^t}{\sqrt{(x_k^t)^2 + (z_k^t)^2}} \right),$$

$$ct = \begin{cases} 1, & \text{при } y_k^t - y_{k-1}^t \geq 0 \\ -\text{sign}[(y_{k-1}^t - y_k^t) - (x_k^t - x_{k-1}^t)], & \text{при } y_k^t - y_{k-1}^t < 0 \end{cases} \quad (6.16)$$

где sign – знак разности координат по вертикальной оси ближайшей к цели точки траектории и предыдущей.

Множитель ct определяется для учета геометрии струи огнетушащего вещества (восходящего или нисходящего участка, и его наклона): при положительном знаке ct следует увеличить угол возвышения, если огнетушащее вещество проходит ниже y_0 ; если знак отрицательный, то значение α наоборот снижается в случае, когда цель расположена выше траектории.

Обновление углов наведения с округлением до $\varepsilon\alpha$, $\varepsilon\beta$:

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + k\alpha \cdot d\alpha, \beta_{i+1} = \beta_i + k\beta \cdot d\beta. \quad (6.17)$$

Следующая итерация: $i = i + 1$, переход к шагу 2.

Результаты применения разработанного алгоритма для наведения струи воды из ствола пожарного робота ПР-ЛСД-С20У на заданную цель при боковом ветре приведены в таблице 6.3 и на рисунках 6.8–6.10.

Таблица 6.3 – Сравнительный анализ разработанного алгоритма расчета углов наведения с другими методами оптимизации

Наименование метода	Количество итераций	Количество вычислений целевой функции $g(\alpha, \beta)$	Конечное значение целевой функции, м	Время расчета, с
Метод Нелдера – Мида	59	121	0.2	1.5
Метод Бroyдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно	9	248	0.3	2.2
Метод градиентного спуска	4	301	0.3	2.6
Разработанный алгоритм	3	4	0.1	0.04

Основу предлагаемого метода составляет итеративное изменение углов наведения с учетом геометрических особенностей струй огнетушащего вещества. При этом направления и величины соответствующих приращений $d\alpha$, $d\beta$ на каждом шаге определяются адаптивно – на основе текущего отклонения струи от цели, что обеспечивает высокую сходимость решения.

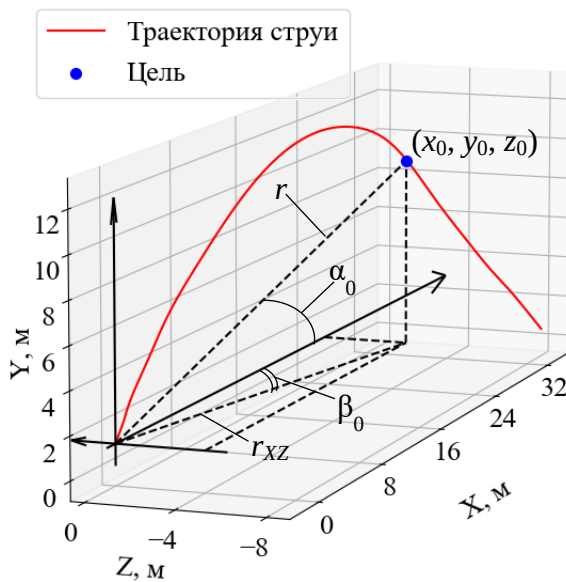


Рисунок 6.8 – Визуализация наведения струи на цель

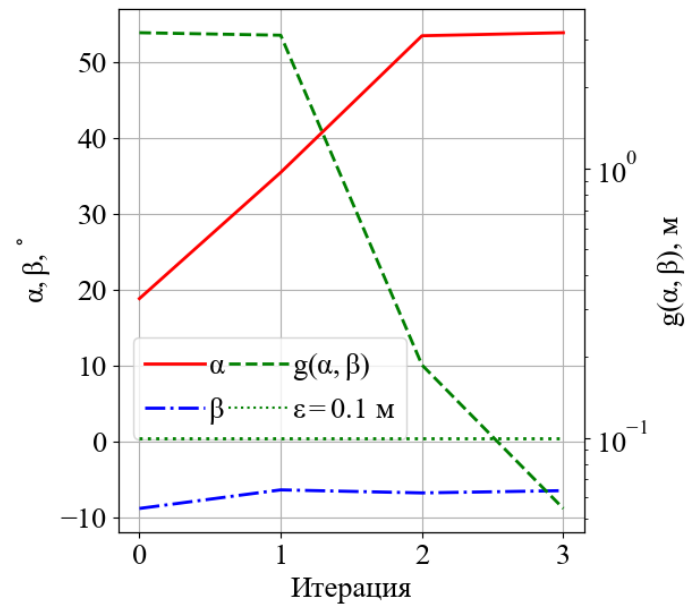


Рисунок 6.9 – Результаты расчета углов наведения струи на цель

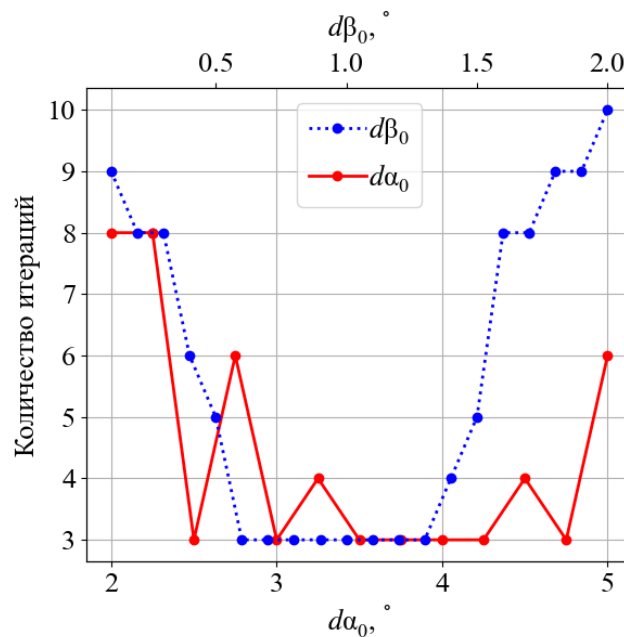


Рисунок 6.10 – Графики зависимости сходимости алгоритма от начальных значений множителей приращений по углам наведения

В частности, для сценария, представленного на рисунке 6.8, расчет углов наведения огнетушащего вещества на цель с отклонением $\varepsilon = 0.1$ м потребовал 3 итерации и менее 0.1 с (таблица 6.3, рисунок 6.9), что соответствует требуемому для использования в противопожарных роботизированных системах быстрдействию.

На рисунке 6.10 показаны зависимости сходимости алгоритма (количества итераций) от начальных значений множителей приращений по углам наведения ($d\alpha_0$, $d\beta_0$) для обозначенного сценария. Как следует из рисунка 6.10, в рассмотренных диапазонах $d\alpha_0$, $d\beta_0$ количество итераций алгоритма вычисления углов наведения для формирования траектории струи, проходящей через целевую точку с отклонением менее 0.1 м, не превышает 10, что на используемом аппаратном обеспечении соответствует времени расчета порядка 0.1 с.

6.3 Метод синтеза закона управления пожарными роботами

На основе предложенного алгоритма расчета углов наведения был также разработан метод синтеза закона управления пожарными роботами для орошения поверхностей защищаемых объектов, например при охлаждении струями огнетушащего вещества строительных конструкций и технологического оборудования [237] во время пожара для предотвращения их прогрева до критических температур и потери механической прочности [167; 235].

При этом движение ствола осуществляется по алгоритму, сложность которого зависит от геометрии защищаемой поверхности, ее положения относительно выходного патрубка и др. В частности, размеры пятна контакта и интенсивность орошения определяются скоростью, направлением движения и сечением потока огнетушащего вещества на соответствующем участке его траектории.

Указанные характеристики находятся в достаточно сложной с вычислительной точки зрения зависимости [202] от управляющих параметров: угол возвышения выходного патрубка ствола пожарного робота, угол распыления, расход огнетушащего вещества и т.д., что затрудняет аналитическое решение задачи наведения струи на заданную позицию. При этом для охлаждения поверхности, имеющей значительные размеры, требуется циклическое перемещение пятна контакта по траектории, обеспечивающей полное покрытие ее площади [4].

Разработанный метод и его алгоритмические реализации позволяют учитывать указанные особенности за счет использования описанной в главе 5 расчетной модели.

С учетом представленной на рисунке 6.7 модели наведения струи на цель задача орошения сканирующими струями огнетушащего вещества защищаемой поверхности [4; 74; 202] решается путем синтеза законов изменения углов α и β в зависимости от времени ($\alpha(t)$ и $\beta(t)$), обеспечивающих циклическое перемещение пятна контакта.

При этом необходимо принимать во внимание влияние различных факторов: ограничения на скорость и диапазон перемещения выходного патрубка по вертикальной и горизонтальной оси, геометрическую специфику строительных конструкций и т.д. В настоящей диссертационной работе разработан метод синтеза закона изменения углов наведения с учетом указанных особенностей, усложняющих решение соответствующей задачи.

На рисунке 6.11 представлена функциональная диаграмма разработанного метода синтеза алгоритма движения ствола пожарного робота при охлаждении поверхностей строительных конструкций.

Исходными данными для предлагаемого метода являются:

1) Трехмерная модель защищаемого объекта: множество точек и соединяющих их линий, описывающих положение в пространстве [63; 207] и геометрические особенности конструктивных элементов, оборудования и т.д.

2) Множество точек защищаемой области, которое определяет ее геометрию и положение в трехмерном пространстве объекта [142]. Границы охлаждаемых поверхностей могут формироваться, в частности, на основе результатов моделирования динамики пожара по заданным сценариям: прогрев до критических температур [236] и т.д.

3) Параметры пожарного робота: координаты в трехмерном пространстве защищаемого объекта, скорость и зона перемещения ствола по осям, диапазоны расхода огнетушащего вещества и т.д.



Рисунок 6.11 – Функциональная диаграмма IDEF0 метода синтеза закона изменения углов наведения пожарного робота

4) Расчетная модель струи, построенная на основе разработанной в данном исследовании методологии. В зависимости от использованного для ее построения метода модель может кроме траектории движения (6.12), минимально необходимой с точки зрения предлагаемого алгоритма, также включать различные характеристики: сечения потока огнетушащего вещества (на основе разработанного в главе 3 метода эллиптических сечений), профили его скорости и интенсивности и т.д.

На основе исходных данных производится построение упрощенной модели объекта (рисунок 6.11, блок A1), которая включает только существенные с точки зрения наведения струи на охлаждаемую поверхность элементы и соответствующий фрагмент трехмерного пространства. На рисунке 6.12 представлен пример решения данной задачи для сооружения тоннельного типа (подземной исследовательской лаборатории, предназначенной для изучения возможности окончательной изоляции радиоактивных отходов в глубоких

геологических формациях [18; 205; 207; 212]), свод которого имеет криволинейную форму, что осложняет синтез закона изменения углов наведения пожарного робота.

Полученная таким образом модель используется для построения множества точек защищаемой поверхности с учетом ее геометрических особенностей, а также расположения относительно ствола пожарного робота. Кроме того, на основе сгенерированного фрагмента трехмерного пространства можно визуализировать результаты синтеза, оценить область покрытия струи огнетушащего вещества [242; 256; 258] и т.д.

Построение последовательности точек защищаемой области (рисунок 6.11, блок А2) заключается в формировании циклической траектории движения пятна контакта по орошаемой поверхности, которая обеспечивает полное покрытие ее площади [4; 123].

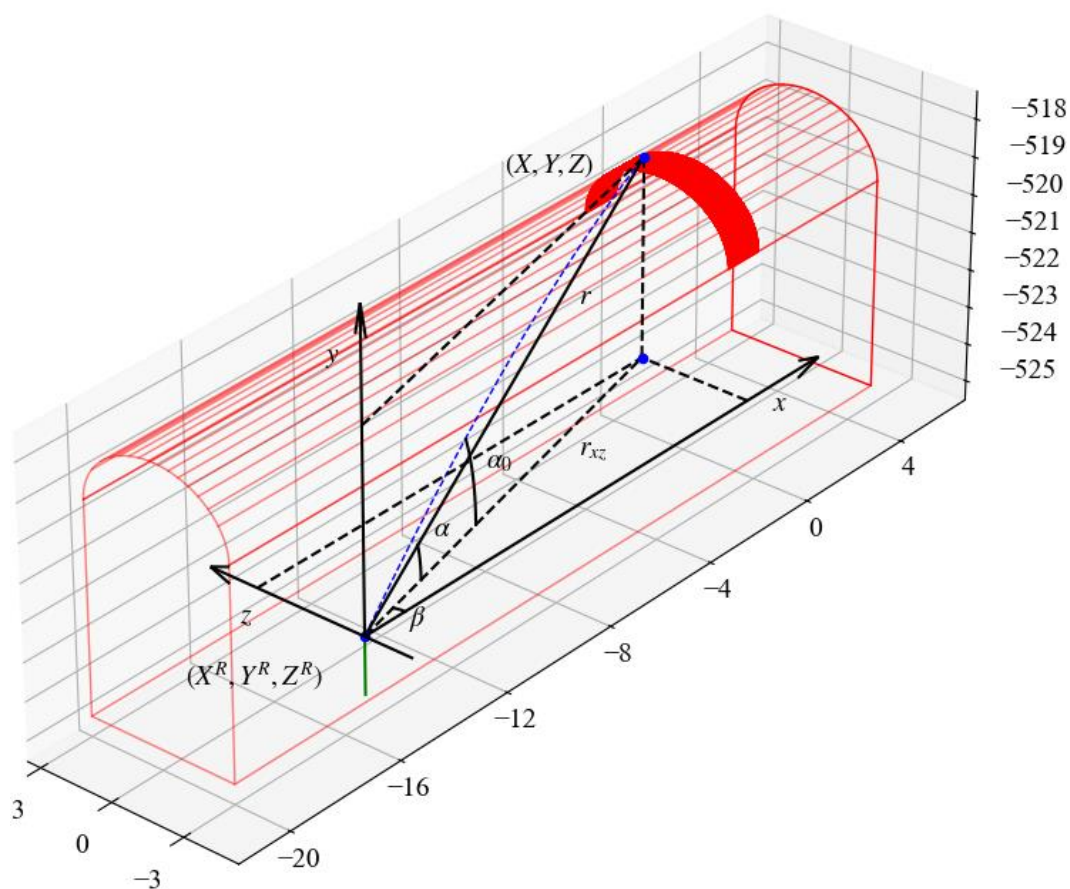


Рисунок 6.12 – Схема наведения струи из ствола пожарного робота на защищаемую поверхность свода подземной исследовательской лаборатории

Способ решения данной задачи выбирается в зависимости от размеров и формы защищаемых конструкций, ограничений на длительность соответствующей программы [31], эффективности охлаждения, которую можно оценить, в том числе, на основе моделирования [213], и т.д. На рисунке 6.13 представлены различные варианты построения циклов орошения поверхности свода подземной исследовательской лаборатории (рисунок 6.12) для зон, границы которых обозначены красной линией. Стоит отметить, что в данном случае охлаждение производится восходящей частью траектории струи из-за геометрических особенностей пространства.

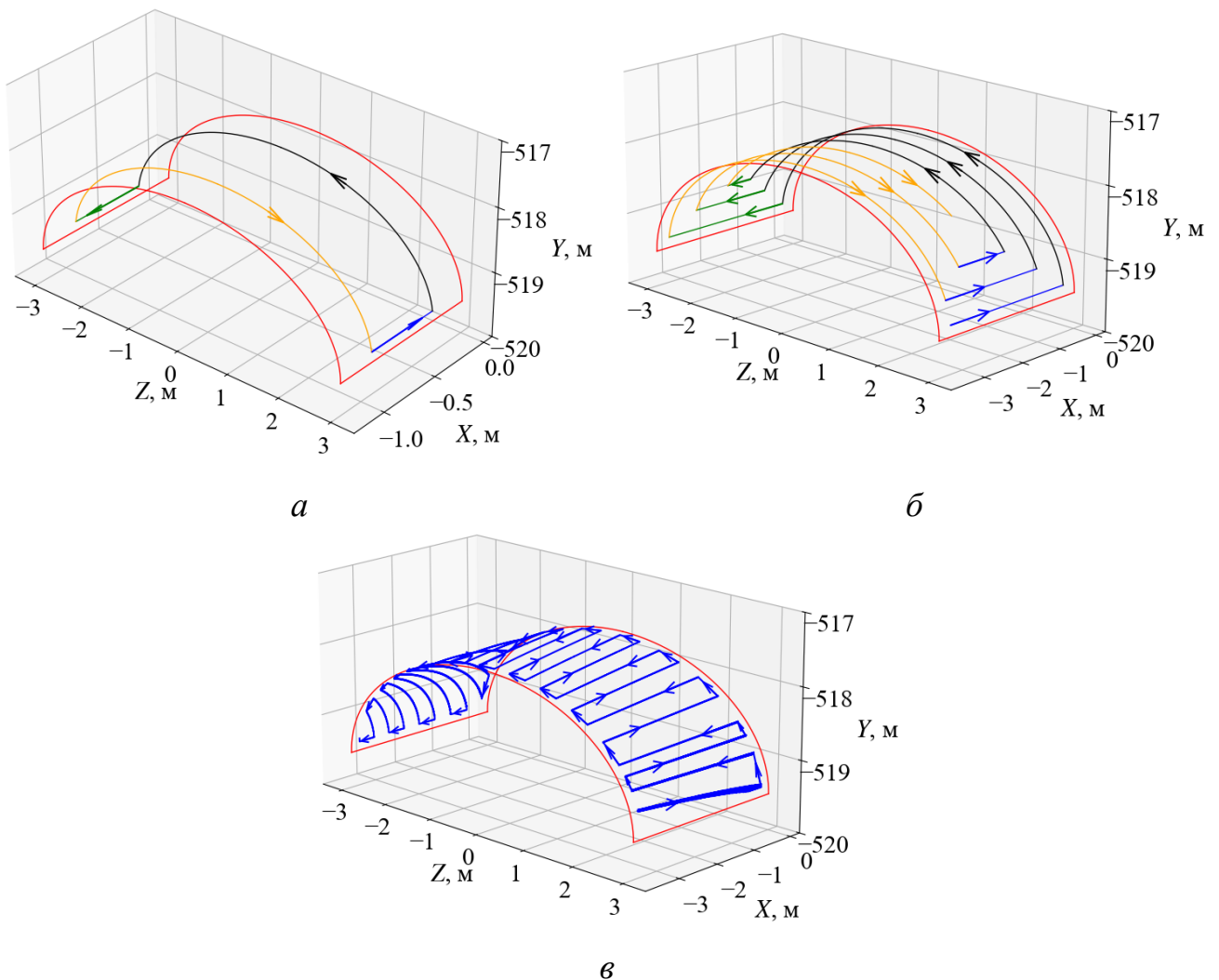


Рисунок 6.13 – Примеры последовательностей точек защищаемой области

(циклов орошения): *a* – контурная (ширина охлаждаемой зоны 1.2 м);

б – спиральная (ширина охлаждаемой зоны 3.5 м);

в – радиальная (ширина охлаждаемой зоны 3.5 м)

Контурный цикл охлаждения (рисунок 6.13, *а*) можно использовать для орошения областей, ширина которых не превышает удвоенный минимальный диаметр контактного пятна. Струя при этом двигается вдоль границ защищаемой зоны с отступом, учитывающим размеры сечения потока огнетушащего вещества в соответствующей области. Для определения контуров орошаемой поверхности могут применяться различные методы, в том числе на основе сверточных нейронных сетей [144].

На рисунке 6.13, *б* изображен прямой ход спирального цикла охлаждения, при котором струя, начиная с наименее удаленной от пожарного ствола точки, двигается с отступом вдоль границы защищаемой зоны, смещаясь на каждом витке на расстояние, не превышающее минимальный диаметр пятна контакта.

Радиальное орошение (рисунок 6.13, *в*) состоит из двух основных циклов: внешнего, при котором угол наведения по азимуту β меняется в диапазоне, обеспечивающем полное покрытие огнетушащим веществом защищаемой зоны (от минимального к максимальному) и внутреннего, при котором струя двигается от одного края защищаемой области к другой (при фиксированном β) в соответствующем сечении только за счет изменения угла возвышения α . Расстояние между траекториями перемещения контактного пятна на соседних итерациях не превышает его минимальный диаметр.

Контурная схема орошения является замкнутой, т.е. ее конечная точка совпадает с начальной, а спиральная и радиальная – разомкнутые. Поэтому при их использовании по достижению конца последовательности (прямой ход) струя перемещается в обратном порядке (обратный ход). После чего весь цикл повторяется.

Последовательность точек защищаемой поверхности, сформированная на данном этапе разработанной технологии, позволяет визуально оценить степени покрытия огнетушащим веществом охлаждаемой области, а также является основой для построения закона изменения углов наведения ствола пожарного робота (рисунок 6.11, блок А3), алгоритм синтеза которого представлен ниже.

Алгоритм синтеза закона управления пожарными роботами при орошении защищаемых поверхностей

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке А.6 (приложение А).

Входные данные:

– Массивы координат точек поверхности, на которые последовательно осуществляется наведение струи (цикл орошения), в системе трехмерного пространства защищаемого объекта: $X_i, Y_i, Z_i; i=1..N$.

– Скорости перемещения ствола пожарного робота по углу возвышения и азимуту: v_α, v_β .

– Координаты пожарного робота: X^R, Y^R, Z^R .

– Расход ОТВ: q_0 .

– Параметры возмущающих воздействий: v_B, γ .

– Расчетная модель струи: $[x^r, y^r, z^r] = f(\alpha_i, q_0, v_B, \gamma)$.

– Начальные величины множителей приращений по углам наведения: $d\alpha_0, d\beta_0$.

– Коэффициенты уменьшения множителей приращений по углам наведения: $s\alpha, s\beta$.

– Точность наведения: ε .

– Точность по углам наведения: $\varepsilon\alpha, \varepsilon\beta$.

– Количество итераций для вычисления изменения точности: n .

Выходные данные:

– Временные диаграммы изменения управляющих параметров в виде массивов углов наведения и соответствующих моментов времени, обеспечивающих орошение поверхности по заданному циклу: α, β, t .

Шаг 1. Расчет углов наведения для первой точки цикла орошения X_1, Y_1, Z_1 по алгоритму, представленному в параграфе 6.2: $\alpha_1, \beta_1; i = 2$.

Шаг 2. Расчет углов наведения для следующей точки цикла орошения X_i, Y_i, Z_i по алгоритму, представленному в параграфе 6.2: α_i, β_i .

В качестве начальных значений углов наведения при работе алгоритма используются: α_{i-1} , β_{i-1} , что ускоряет сходимость.

Если $i < N$, то $i = i + 1$, переход к шагу 2.

Шаг 3. Формирование массива моментов времени цикла с учетом ограничений на скорости перемещения ствола пожарного робота:

Для начальной точки: $t_1 = 0$;

Для остальных точек: $t_i = t_{i-1} + \max[(\alpha_i - \alpha_{i-1}) / v\alpha, (\beta_i - \beta_{i-1}) / v\beta]$; $i = 2..N$.

Стоит отметить, что движение ствола пожарного робота может оказывать влияние на траекторию огнетушащего вещества, поэтому при использовании представленного выше алгоритма целесообразно применять расчетную модель, учитывающую данный фактор. Либо в каждой точке цикла (на шаге 3) добавлять остановку, необходимую для достижения установившегося режима струи.

Алгоритм синтеза закона управления пожарными роботами при орошении защищаемых поверхностей с использованием аппроксимации потока эллиптическими сечениями

Выше и на рисунке А.6 представлена базовая версия алгоритма, разработанная в рамках настоящей диссертационной работы, для которой также была проведена модификация на основе аппроксимации газожидкостного потока эллиптическими сечениями, позволяющая не только определять положение пятна контакта, но и его размеры и форму в зависимости от геометрических особенностей орошаемых поверхностей.

При этом к входным данным базового алгоритма, представленного выше, $(X_i, Y_i, Z_i; i=1..N; v\alpha, v\beta; X^R, Y^R, Z^R; q_0; v_B, \gamma; d\alpha_0, d\beta_0; s\alpha, s\beta; \varepsilon\alpha, \varepsilon\beta; n)$ добавляется множество точек, описывающих геометрию защищаемой поверхности в окрестностях X_i, Y_i, Z_i : $S_i, i=1..N$. Вместо заданной точности ε применяется доля характерного размера пятна контакта, определяющая эффективность орошения: δ . А в качестве расчетной используется модель оценки характеристик струи огнетушащего вещества, для обучения которой применяются

выборки, сгенерированные по результатам численного моделирования на базе алгоритма, представленного в параграфе 3.3:

$$\left[x^r, y^r, z^r, r1^r, r2^r \right] = f(\alpha_i, q_O, v_B, \gamma), \quad (6.18)$$

где $\left[x^r, y^r, z^r \right]$ – координаты точек центров эллиптических сечений (данные для обучения формируются на основе (3.5));

$r1^r, r2^r$ – радиусы эллиптических сечений (данные для обучения формируются на основе (3.4), (3.6)).

Для предлагаемого подхода используется модифицированный алгоритм поиска углов наведения с адаптивной точностью ε , которая учитывает размеры пятна контакта. Для этого на шаге 4 (рисунок А.5) выполняются также следующие операции:

4.1. Вычисление множества точек пересечения cE_c защищаемой поверхности S_c в окрестности точки $[x_0, y_0, z_0] = [X_c, Y_c, Z_c] - [X^R, Y^R, Z^R]$ (c – текущая точка цикла орошения) с эллиптическими сечениями $sE_{k+\Delta k}^t$ с центрами в точках $[x_{k+\Delta k}^t, y_{k+\Delta k}^t, z_{k+\Delta k}^t]$, радиусами $r1_{k+\Delta k}^t, r2_{k+\Delta k}^t$ и нормальными векторами $\left[\frac{x_{k+\Delta k}^t, y_{k+\Delta k}^t, z_{k+\Delta k}^t}{\sqrt{(x_{k+\Delta k}^t)^2 + (y_{k+\Delta k}^t)^2 + (z_{k+\Delta k}^t)^2}} \right] - \left[\frac{x_{k+\Delta k-1}^t, y_{k+\Delta k-1}^t, z_{k+\Delta k-1}^t}{\sqrt{(x_{k+\Delta k-1}^t)^2 + (y_{k+\Delta k-1}^t)^2 + (z_{k+\Delta k-1}^t)^2}} \right]$ на основе преобразований (3.7)–(3.12) с учетом текущего значения угла β_i (рисунок 6.14):

$$cE_c \in S_c \cap sE_{k+\Delta k}^t; \Delta k : |S_c \cap sE_{k+\Delta k}^t| > 0. \quad (6.19)$$

4.2. Вычисление минимального размера контактного пятна:

$$rc_{\min} = \min_{pc \in cE_c} \left[\left[x^z, y^z, z^z \right] - pc \right], \quad (6.20)$$

где $\left[x^z, y^z, z^z \right] = \sum_{pc \in cE_c} pc / |cE_c|$ – координаты центра пятна контакта.

4.3. Определение допустимого отклонения с учетом критерия (1.7):

$$\varepsilon = \delta \cdot rc_{\min}, \quad (6.21)$$

где δ – доля характерного размера пятна контакта, определяющая эффективность орошения.

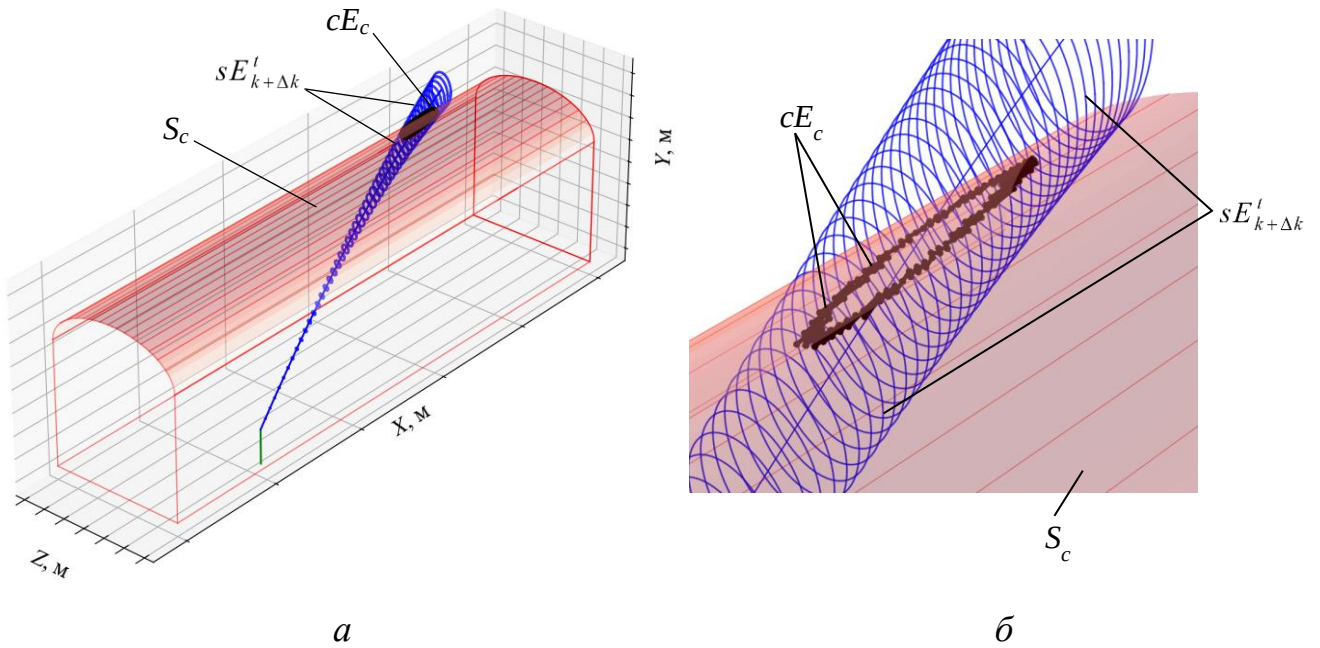


Рисунок 6.14 – Визуализация определения пересечения потока огнетушащего вещества с защищаемой поверхностью:

a – общий вид; *б* – приближение области пятна контакта

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке А.7 (приложение А). Модифицированный алгоритм кроме углов наведения может также возвращать:

- координаты пятна контакта: $zE_c = [x^z, y^z, z^z]$;
- точки, находящиеся на пересечении защищаемой поверхности и эллиптических сечений струи в окрестности zE_c : cE_c ;
- координаты вектора скорости движения потока огнетушащего вещества в области пятна контакта: $vE_c = \frac{\begin{bmatrix} x_k^t, y_k^t, z_k^t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{k-1}^t, y_{k-1}^t, z_{k-1}^t \end{bmatrix}}{\left\| \begin{bmatrix} x_k^t, y_k^t, z_k^t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{k-1}^t, y_{k-1}^t, z_{k-1}^t \end{bmatrix} \right\|} \cdot |TV_k|$, где TV_k – вектор скорости опорной кривой эллиптического сечения k (один из входных параметров алгоритма эллиптических сечений);
- среднюю объемную долю жидкости внутри контактного пятна: $eVF_c = eVF_k$, где eVF_k – дополнительный выходной параметр алгоритма эллиптических сечений.

Перечисленные параметры могут применяться в дальнейшем для оценки эффективности соответствующего закона изменения углов наведения пожарного робота на основе численного моделирования динамики пожара [46; 205].

На рисунке 6.15 представлены результаты применения разработанного метода синтеза законов изменения углов наведения пожарного робота ПР-ЛСД-С20У [17; 28] при охлаждении струей огнетушащего вещества поверхности свода подземной исследовательской лаборатории с учетом работы системы вентиляции, создающей мощный поток воздуха, на основе различных способов орошения (в соответствии со схемами на рисунке 6.13): *а* – контурное (4 замкнутых цикла), *б* – спиральное (прямой и обратный ход цикла), *в* – радиальное (прямой и обратный ход цикла).

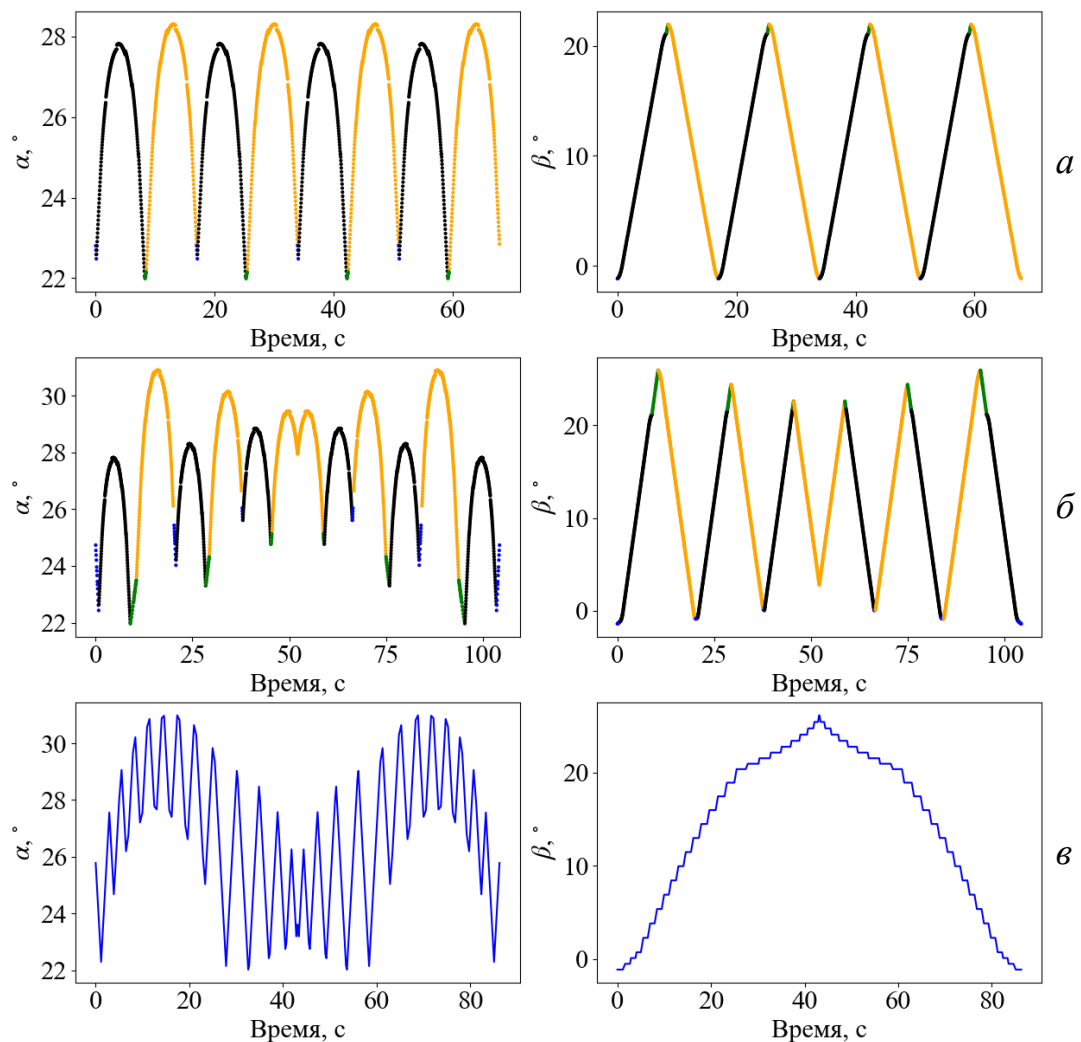


Рисунок 6.15 – Временные диаграммы изменения углов наведения ствола пожарного робота:

а – контурное орошение; *б* – орошение по спирали; *в* – радиальное орошение

Для синтеза законов изменения углов наведения были приняты следующие значения исходных параметров: скорости перемещения ствола пожарного робота по соответствующим углам наведения $v\alpha = v\beta = 3^\circ/\text{с}$, разрешающая способность по соответствующим углам наведения $\varepsilon\alpha = \varepsilon\beta = 0.1^\circ$, точность наведения $\varepsilon = 0.1$ м.

Различные участки графиков на рисунках 6.15, *а*, *б* выделены цветами в соответствии со схемами, представленными на рисунках 6.13, *а*, *б*. Длительность одного замкнутого цикла контурного охлаждения зоны шириной 1.2 м составляет 18 с, диапазоны изменения углов наведения по возвышению и азимуту равны соответственно: $[22^\circ; 28.3^\circ]$, $[-1.2^\circ; 22^\circ]$. Аналогичные показатели для спирального и радиального орошения области шириной 3.5 м: 105 с, $[21.7^\circ; 30.9^\circ]$, $[-1.3^\circ; 25.9^\circ]$ и 91 с, $[21.8^\circ; 31^\circ]$, $[-1.1^\circ; 26^\circ]$.

Как видно, диапазоны изменения углов наведения спирального (рисунок 6.15, *б*) и радиального (рисунок 6.15, *в*) орошения одной и той же зоны совпадают в пределах разрешающей способности. При этом длительность цикла спирального варианта охлаждения больше, т.к. на каждом витке ствол пожарного робота совершает повороты относительно вертикальной оси – в сумме более чем на 250° . При радиальном орошении выходной патрубок по азимуту перемещается за полный цикл суммарно приблизительно на 54° , что дает соответствующее преимущество по скорости при охлаждении областей, угловые размеры которых по β значительно превышают аналогичные величины по α (рисунок 6.12).

Стоит отметить, что при спиральном и радиальном охлаждении (рисунок 6.15, *б*, *в*) контактное пятно за полный цикл проходит последовательность защищаемых точек два раза (прямой и обратный ход), а при контурном (рисунок 6.15, *а*) – один раз, поэтому его соответствующая длительность равна 36 с, что сопоставимо с аналогичными показателями замкнутых способов с учетом почти втрое большей ширины зоны орошения.

На рисунке 6.16 представлены графики движения струи по защищаемой поверхности на основе построенных законов изменения углов наведения (цветные точки) и соответствующие последовательности точек циклов орошения (черные линии).

Как следует из представленных графиков, перемещение пятна контакта по защищаемым поверхностям соответствует заданным последовательностям точек. При этом абсолютные ошибки не превышают 0.1 м (точность наведения по оси аппликат), что говорит о корректности разработанного метода синтеза закона изменения углов наведения ствола пожарного робота.

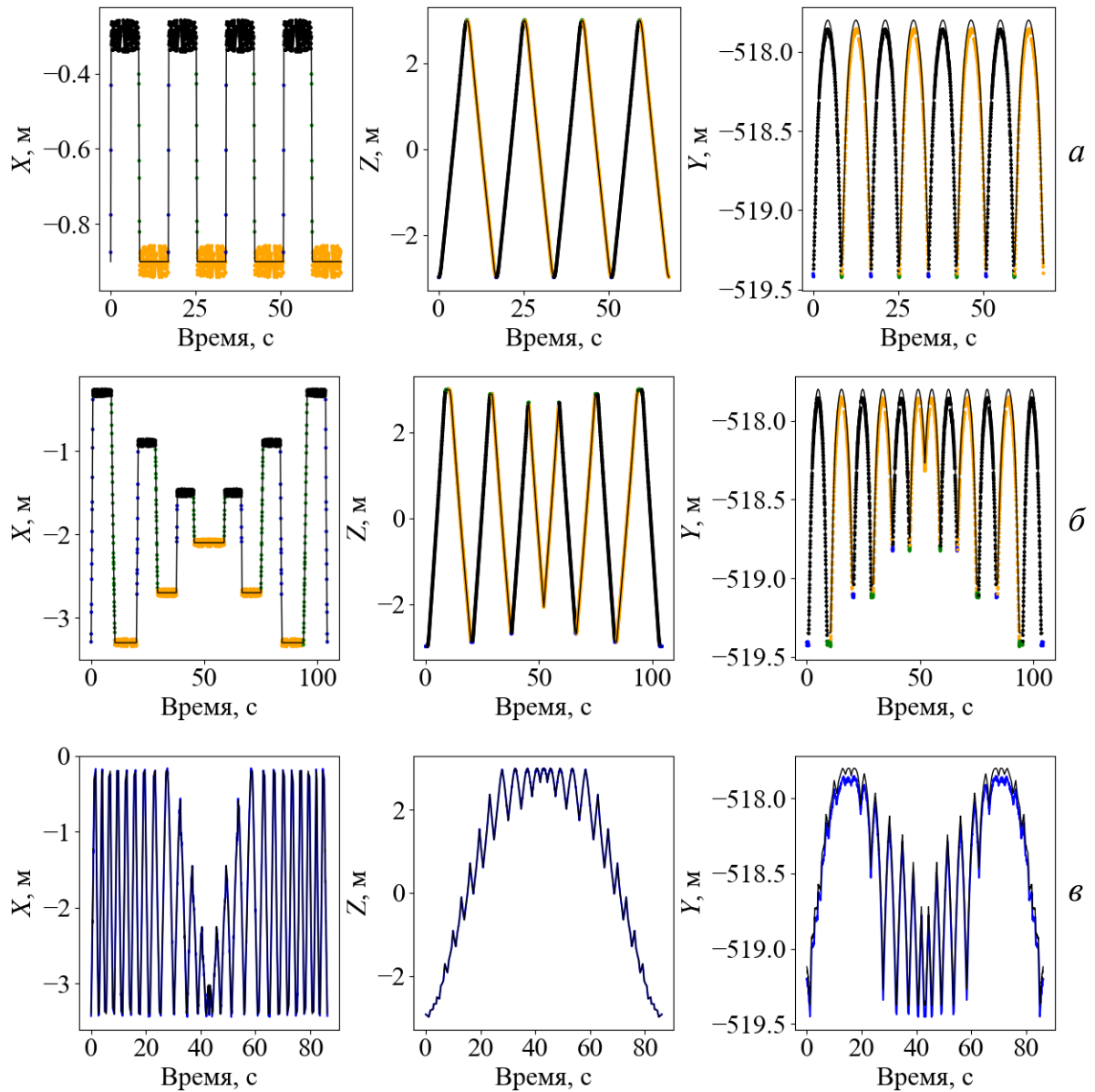


Рисунок 6.16 – Графики движения пятна контакта

по защищаемой поверхности:

а – контурное орошение; *б* – орошение по спирали; *в* – радиальное орошение

Рисунок 6.17 визуализирует орошение свода подземной исследовательской лаборатории по контурному циклу (рисунок 6.13, а): защищаемая поверхность изображена красной штриховкой, струи огнетушащего вещества – синими пунктирными линиями, зона покрытия обозначена синей полупрозрачной поверхностью.

Согласно рисунку 6.17 площадь защищаемой поверхности полностью перекрывается огнетушащим веществом, что показывает эффективность построенного закона изменения углов наведения ствола пожарного робота и метода его синтеза.

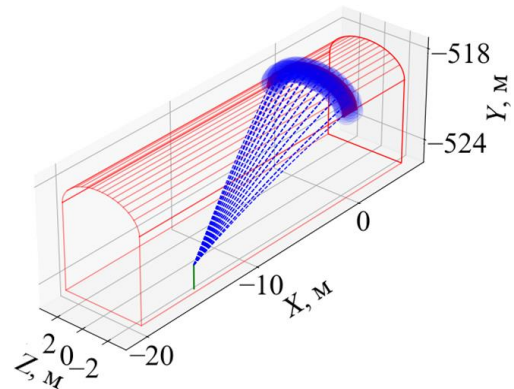


Рисунок 6.17 – Визуализация цикла орошения защищаемой поверхности по синтезированному закону

Результаты, полученные на различных этапах реализации разработанного метода, могут также использоваться для решения сопутствующих задач, в частности:

- упрощенная трехмерная модель защищаемого объекта позволяет оценить область покрытия пожарного робота, а также визуализировать движение струи по охлаждаемой поверхности и т.д.;

- циклы орошения защищаемой поверхности дают возможность провести предварительное сравнение различных способов охлаждения, например, по длине траектории движения контактного пятна, по охвату наиболее проблемных с точки зрения перегрева участков и т.д., а также визуально оценить степень покрытия огнетушащим веществом орошаемой зоны;

- графики движения струи по защищаемой поверхности можно использовать для оценки эффективности охлаждения с применением синтезированного закона на основе численного моделирования.

6.4 Технология оценки эффективности охлаждения защищаемых поверхностей на основе синтезированного закона управления

В данном параграфе представлена разработанная в рамках диссертационного исследования технология оценки эффективности охлаждения пожарными роботами защищаемых поверхностей (строительных конструкций, оборудования) с использованием обученных моделей, предназначенных для расчета характеристик струй огнетушащего вещества.

Основу разработанной технологии оценки эффективности составляет имитационное моделирование [236; 239], которое позволяет с достаточно высокой точностью прогнозировать динамику развития опасных факторов пожара как с использованием систем противопожарной защиты, так и без них [238; 252–255]. В настоящее время существует ряд программных средств, в частности Fire Dynamics Simulator (FDS) [85], позволяющих моделировать на базе CFD развитие пожара для различных сценариев, объектов и используемых мер обеспечения пожарной безопасности [240]. Адекватность результатов, получаемых на основе указанной программы, доказана обширным перечнем верификационных и валидационных исследований [93].

Однако встроенные возможности FDS по оценке эффективности систем противопожарной защиты ограничены в основном стационарными решениями, которые включаются/отключаются на основании управляющего сигнала (заданный момент времени, достижение показаниями датчика порогового значения).

При этом, существуют системы противопожарной защиты, параметры элементов которых (положение в пространстве или геометрические размеры) могут меняться, оказывая существенное влияние на развитие пожара, например, пожарные роботы, работающие по заданному алгоритму, разворачивающиеся противопожарные экраны [209; 234] и т.д. Для моделирования систем, реализующих подобные решения, на относительно небольших в геометрическом смысле объектах можно выполнять их имитацию на основе соответствующих

стационарных устройств, т.к. характеристики, влияющие на распространение опасных факторов пожара, меняются при этом в незначительных пределах. Однако, если размеры защищаемых помещений велики (например, здания ангарного типа [235; 238], тоннельные сооружения [212]), использование такого подхода может существенно исказить результаты оценки эффективности.

Тоннельные сооружения отличаются не только значительными объемами внутренних пространств, но и криволинейной формой свода, а также возможностью возникновения мощных потоков воздуха, влияющих, как на динамику пожара, так и на траектории струй огнетушащего вещества, что осложняет решение задачи моделирования [218]. Поэтому оценка эффективности разрабатываемой в данном параграфе технологии производится на примере подобного объекта.

Пожар в тоннельных сооружениях может приводить к перегреву и обрушению строительных конструкций [6; 100]. Для предотвращения таких сценариев используются комплексные решения по обеспечению пожарной безопасности, направленные как на тушение пожара, так и на охлаждение конструкций [7; 212; 236; 254; 257]. При этом, если для тушения пожара можно применять широко распространенные стационарные установки (спринклерные, дренческие системы и т.д.), то для эффективного охлаждения строительных конструкций производительности таких систем, как правило, недостаточно. Поэтому защита тоннельных сооружений при пожаре может быть реализована на базе пожарных роботов, которые способны, управляя струей по заданному алгоритму, орошать определенные участки, например, ограждений, предотвращая таким образом их нагревание до критических температурных значений [202; 212].

Как было отмечено выше, оценка эффективности подобных решений осложняется отсутствием в программах, позволяющих прогнозировать развитие пожара, встроенных возможностей для моделирования систем противопожарной защиты с изменяющимися основными параметрами, в частности, пожарных роботов. Учитывая значительные геометрические размеры тоннельных сооружений, использование стационарных устройств для имитации струи из

роботизированного ствола может значительно искажать полученные результаты. Как было показано в работе [235], усреднение расхода стационарного источника огнетушащего средства по всей зоне покрытия пожарного робота при оценке эффективности охлаждения строительных конструкций приведет к равномерному снижению температуры в соответствующей области. Однако при защите конструкций от перегрева струей, движущейся по их поверхности, вероятны значительные локальные перегревы на участках, существенно удаленных от текущего положения места подачи воды, что может привести к потере ими механической прочности и последующему разрушению.

Для решения обозначенной проблемы в настоящем исследовании предлагается использовать метод разбиения траектории движения струи воды по защищаемой области на отдельные участки, подача воды к которым осуществляется по заданному алгоритму [202]. Имитация работы пожарного робота в программной среде моделирования динамики пожара осуществляется путем включения/отключения стационарных источников огнетушащего вещества с соответствующим расходом и направлением подачи. Предлагаемая технология имитационного моделирования охлаждения пожарными роботами защищаемых поверхностей может быть описана функциональной диаграммой, представленной на рисунке 6.18.

Технология основана на численном моделировании пожара на объекте защиты в программе FDS с использованием пользовательского интерфейса Pyrosim [86]. Встроенные средства FDS позволяют на базе трехмерной модели сооружения выполнить расчет процессов тепломассообмена в газовой среде и теплообмена в защищаемых поверхностях при пожаре [85]. Соответствующие методы описаны в работах автора диссертации [205; 207; 211–213; 218; 236]. С учетом необходимости расчета воздействий на строительные конструкции или технологическое оборудование как высоких температур, так и огнетушащего вещества, данные подходы модифицированы и представлены диаграммой, приведенной на рисунке 6.19.

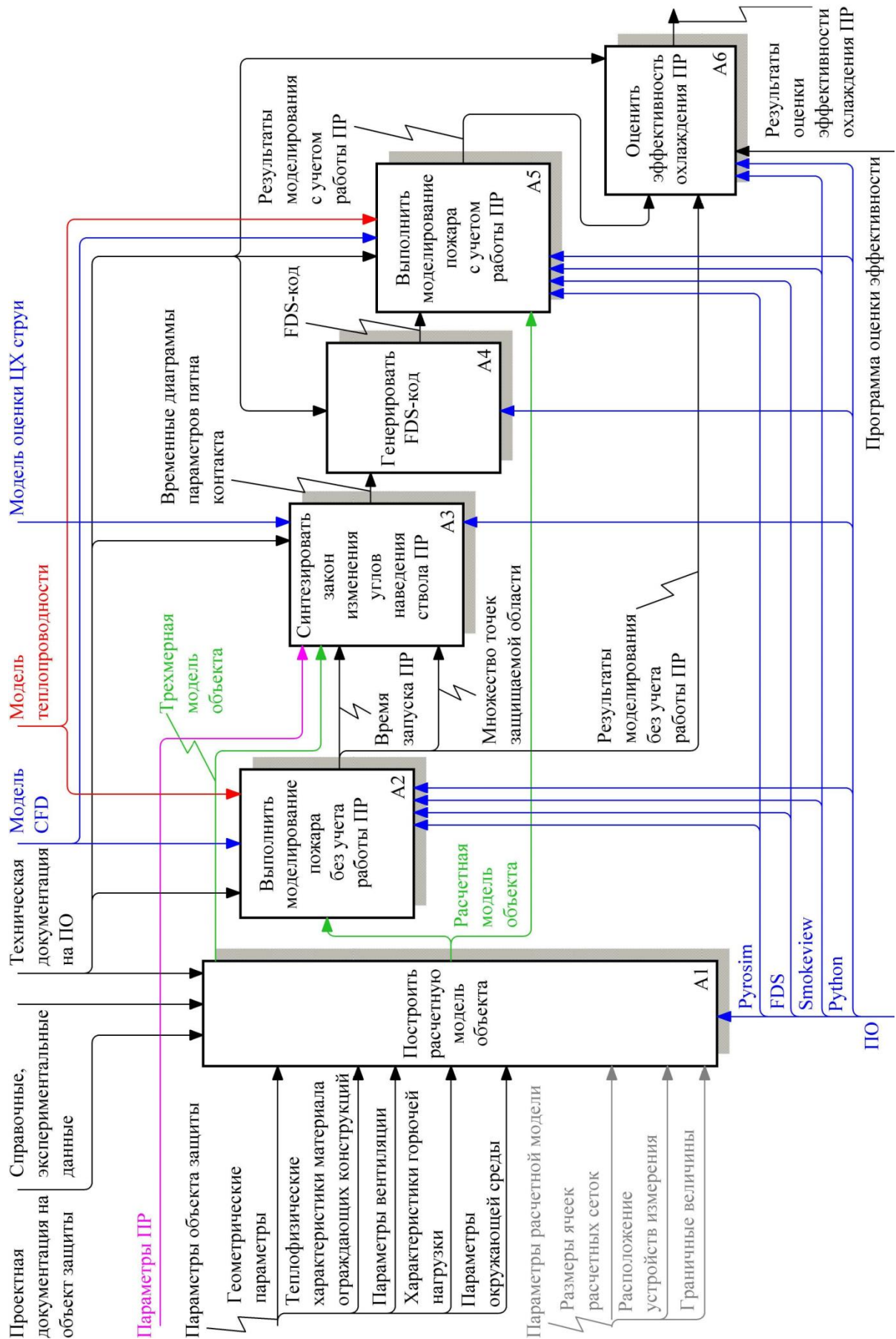


Рисунок 6.18 – Функциональная диаграмма IDEF0 имитационного моделирования охлаждения пожарными роботами защищаемых поверхностей

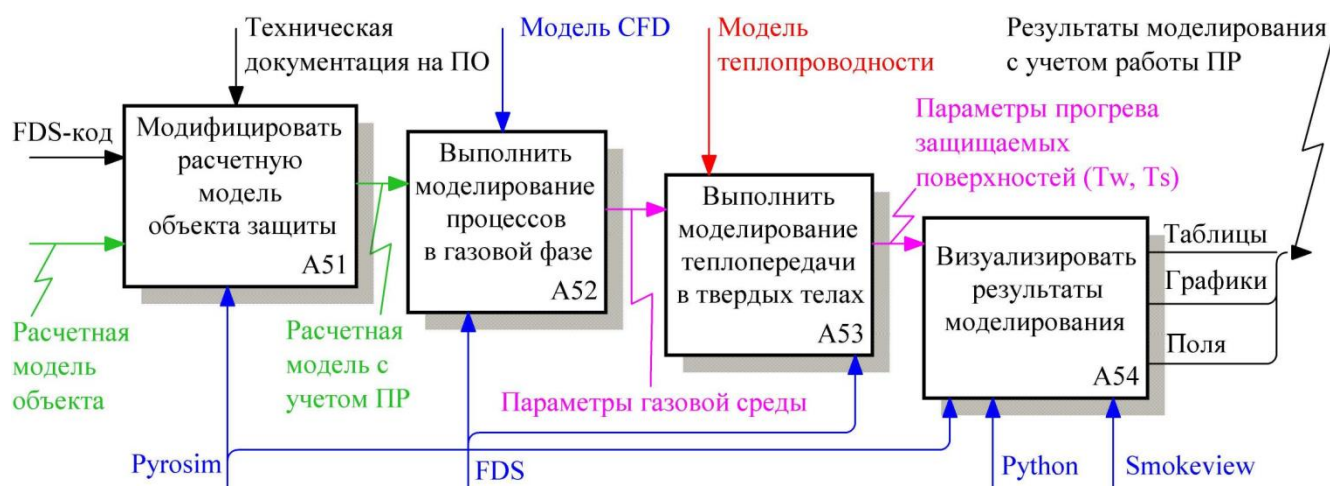


Рисунок 6.19 – Функциональная диаграмма IDEF0 декомпозиции задачи моделирования пожара с учетом работы ПРС

Воздействие на поверхность огнетушащего вещества в FDS может быть симитировано путем последовательного включения и отключения в расчетной модели стационарных источников воды (форсунок) вблизи защищаемого участка S_i в моменты времени t_i , соответствующие алгоритму движения ствола пожарного робота [202], входными данными для выполнения которого (рисунок 6.18, блок A3) являются его параметры, трехмерная модель объекта, а также множество точек защищаемой поверхности ограждающих конструкций, определенное на основе моделирования пожара [259].

Временные диаграммы изменения соответствующих параметров формируются в предлагаемой технологии на основе метода, разработанного в параграфе 6.3.

Для генерации FDS-кода на основе графика движения струи и требуемого времени запуска пожарного робота (рисунок 6.18, блок A4) в настоящем исследовании был разработан специализированный Python-скрипт (рисунок 6.20), принципы построения и применения которого описаны в [212]. Решение данной задачи базируется на представлении модели движения струи воды из роботизированного ствола в программной среде Pyrosim в виде совокупности элементов NOZZLE (рисунок 6.20), имитирующих последовательную подачу огнетушащего вещества в различные точки охлаждаемых строительных

конструкций путем включения и отключения в моменты времени, соответствующие алгоритму работы пожарного робота.

&PART ID='Water', SPEC_ID='WATER VAPOR', DIAMETER=500.0, MONODISPERSE=.TRUE., AGE=10, SAMPLING_FACTOR=1/	Блок описания огнетушащего вещества
&PROP ID='Flow10', PART_ID='Water', FLOW_RATE=740.4, PARTICLE_VELOCITY=2.8, SPRAY_ANGLE=0.0,86.1/	Блок описания параметров потока огнетушащего вещества
&DEVC ID='Time', QUANTITY='TIME', XYZ=0.0,0.0,-520.5/	Блок описания таймера, по которому формируются управляющие сигналы
&RAMP ID='Water Timer10_RAMP', T=119.9, F=-1.0/ &RAMP ID='Water Timer10_RAMP', T=120.0, F=1.0/ &RAMP ID='Water Timer10_RAMP', T=120.79, F=-1.0/	Блок описания сигналов включения и отключения форсунок
&CTRL ID='Water Timer10', FUNCTION_TYPE='CUSTOM', RAMP_ID='Water Timer10_RAMP', LATCH=.FALSE., INPUT_ID='Time'/	Блок описания элемента управления форсункой
&DEVC ID='NOZZLE10', PROP_ID='Flow10', XYZ=-1.19,-2.83,-519.58, ORIENTATION=0.29,-0.01,0.07, LATCH=.FALSE., QUANTITY='CONTROL', CTRL_ID='Water Timer10'/	Блок описания форсунки

Рисунок 6.20 – Фрагменты блоков FDS-кода, имитирующего охлаждение строительных конструкций, в среде Pyrosim

Моделирование движения струи воды по поверхности строительных конструкций в программной среде Pyrosim (с использованием ядра FDS), согласно представленной выше схеме, можно разбить на следующие этапы:

1) Моделирование движения струи воды. На основе метода, представленного в параграфе 6.3, генерируются временные диаграммы, описывающие движение пятна контакта по защищаемой поверхности и изменение следующих его параметров:

- координаты центра пятна контакта: $zE(t)$;
- точки, находящиеся на пересечении защищаемой поверхности и эллиптических сечений струи в окрестности $zE(t)$: $cE(t)$;
- координаты вектора скорости движения потока огнетушащего вещества в области пятна контакта: $vE(t)$;
- средняя объемная доля жидкости внутри контактного пятна: $eV(t)$.

2) На основе полученных временных диаграмм при помощи Python-скрипта генерируется FDS-код [233], имитирующий последовательную подачу воды в соответствующие участки трехмерной модели помещения пожара с учетом направления движения струи огнетушащего вещества, интенсивности орошения и т.д. Алгоритм генерации FDS-кода представлен ниже.

3) Полученный FDS-код подгружается к модели помещения в программной среде Pyrosim (рисунок 6.18, блок А5), и производится расчет динамики пожара с учетом охлаждения защищаемых поверхностей (рисунок 6.21, *а*). Вода при этом представлена в виде отдельных частиц (рисунок 6.21, *б*), движение которых моделируется на основе уравнений вычислительной гидродинамики (CFD).

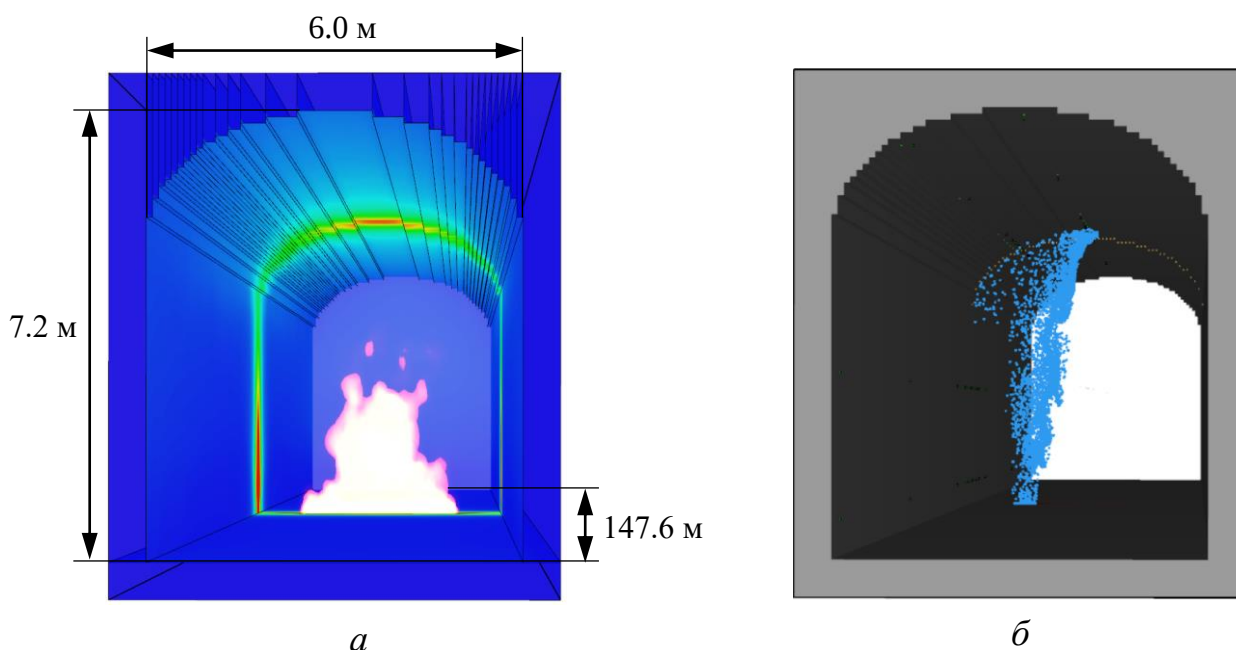


Рисунок 6.21 – Визуализация результатов имитационного моделирования:
а – визуализация нагрева ограждений; *б* – визуализация орошения ограждений

Алгоритм генерации FDS-кода для имитации орошения струей воды из ствола пожарного робота заданной поверхности

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке А.8 (приложение А).

Входные данные:

- Временные диаграммы движения центра контактного пятна по защищаемой поверхности: $zE_i = [x_i^z, y_i^z, z_i^z]; t_i; i = 1..N$.
- Временные диаграммы перемещения точек, находящихся на пересечении защищаемой поверхности и эллиптических сечений струи в окрестности zE_i : cE_i .
- Временные диаграммы изменения координат вектора скорости движения потока огнетушащего вещества в области пятна контакта: $vE_i = [vx_i, vy_i, vz_i]$.
- Временные диаграммы изменения средней объемной доли жидкости внутри контактного пятна: eVF_i .
- Количество фрагментов, на которые разбивается цикл орошения: M .
- Время начала и окончания орошения (в расчетной модели динамики пожара): t^s, t^e [214].
- Начальный индекс таймеров, управляющих включением и выключением форсунок, имитирующих движение пятна контакта: I .
- Смещение положения форсунки от центра контактного пятна: Δv .
- Плотность огнетушащего вещества: ρ .

Выходные данные:

- FDS-код, описывающий движение пятна контакта.

Шаг 1. Инициализация алгоритма: загрузка временных диаграмм.

Шаг 2. Расчет периода квантования временных диаграмм:

Для замкнутых циклов:

$$\Delta t = \frac{\max(t)}{M}. \quad (6.22)$$

Для разомкнутых циклов (с прямым и обратным ходом):

$$\Delta t = \frac{\max(t)}{2 \cdot (M - 1)}. \quad (6.23)$$

Прореживание массивов временных диаграмм в соответствии с периодом квантования:

$$\begin{aligned} zE_i, cE_i, vE_i, eVF_i, t_i; i = 1..N \rightarrow zE_j, cE_j, vE_j, eVF_j, t_j; j = 1..M, \\ t_j - t_{j-1} = \Delta t, j = 2..M. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Шаг 3. Цикл записи сигналов включения/выключения форсунок:

Заполнение массивов моментов времени включения и отключения форсунок:

$$\begin{aligned} t_{j,k}^{on} = \begin{cases} t^s + t_j, & k = 1 \\ t^s + t_j + \max(t) \cdot (k - 1) + \Delta t, & k > 1 \end{cases} \\ t_{j,k}^{off} = t_{j,k}^{on} + \Delta t; k : t_{j,k}^{on} \leq t^e - \Delta t; j = 1..M. \end{aligned} \quad (6.25)$$

Генерация FDS-кода, описывающего элементы, которые формируют сигналы включения и выключения форсунок: объекты «&RAMP» (рисунок 6.20) с порядковыми номерами $I + j - 1; j = 1..M$ и свойствами, которые соответствуют $t_{j,k}^{on}, t_{j,k}^{off}$.

Шаг 4. Цикл записи FDS-кода, описывающего элементы управления форсунками: объекты «&CTRL» (рисунок 6.20) с порядковыми номерами $I + j - 1; j = 1..M$ и сигналами, сформированными на шаге 3 (&RAMP).

Шаг 5. Цикл записи FDS-кода, описывающего форсунки: объекты «&DEVCS» (рисунок 6.20) с порядковыми номерами $I + j - 1; j = 1..M$.

Положения форсунок в системе координат расчетной модели определяются по формуле:

$$\begin{bmatrix} x_j^d, y_j^d, z_j^d \end{bmatrix} = zE_j - \Delta v \cdot \frac{vE_j}{|vE_j|}. \quad (6.26)$$

Ориентация форсунок определяется по вектору скорости движения потока огнетушащего вещества:

$$\begin{bmatrix} ox_j^d, oy_j^d, oz_j^d \end{bmatrix} = \frac{vE_j}{|vE_j|}. \quad (6.27)$$

Ниже перечислены свойства потока огнетушащего вещества, задаваемые в качестве параметров объекта «&PROP» (рисунок 6.20).

Расход огнетушащего вещества через форсунки определяется по формуле:

$$FR_j = eVF_j \cdot \rho \cdot |vE_j| \cdot s(cE_j), \quad (6.28)$$

где $s(cE_j)$ – площадь фигуры, образованной точками пятна контакта.

Угол распыла форсунок определяется по формуле:

$$ar_j = 2 \cdot \arctg \left[\frac{\min(|cE_j - zE_j|)}{\Delta v} \right]. \quad (6.29)$$

Скорость течения: $vF_i = |vE_j|$.

Шаг 6. Сохранение сгенерированного FDS-кода.

Апробация предложенных методов и алгоритмов проводилась с использованием базовой трехмерной модели подземной исследовательской лаборатории в формате FDS, внешний вид которой представлен на рисунках 6.12, 6.17 и 6.21.

При имитационном моделировании пожара в программе FDS (без и с учетом функционирования пожарного робота), рассмотрена модель указанного сооружения с ограждающими конструкциями без обделки (тоннель расположен в толще скального массива с теплофизическими и геомеханическими параметрами горной породы, описанными в [207]).

Исследуемым сценарием является пожар пролива индустриального масла, при котором наблюдается наиболее интенсивное тепловое воздействие на ограждения [205; 207]. Согласно проведенному исследованию [205], наибольшие температуры при пожаре в подобном тоннеле наблюдаются в условиях ограниченной вентиляции над очагом горения [241] на высоте 6.7–7.2 м от основания, т.е. в области свода. Таким образом, целесообразно осуществлять охлаждение струей огнетушащего вещества именно этой зоны.

Расчетная модель объекта построена с учетом ограничений, в т.ч. на размеры ячеек сеток, обусловленных большим геометрическим объемом рассматриваемого пространства. Для ее создания применялась технология,

описанная в работах автора настоящего исследования [205; 211]. В верхней части пространства модель имеет размеры ячеек сетки 0.1 м x 0.1 м x 0.1 м. Для имитации плавного движения струи огнетушащего вещества по поверхности свода тоннеля использовано 60 источников воды (форсунок) – по одному на каждую ячейку сетки вдоль траектории перемещения пятна контакта. Расход каждого источника воды и направление подачи определялись с учетом расстояния орошаемого участка от насадка ствола и фактической площади сечения струи в точке встречи с поверхностью на основе модели с использованием эллиптических сечений, представленной в главе 3.

Параметры движения контактного пятна при орошении свода тоннеля приняты согласно синтезированному закону для контурного цикла (рисунок 6.17). Момент запуска пожарного робота выбран $t^s = 120$ с и $t^s = 240$ с от начала моделирования пожара.

Оценка эффективности охлаждения защищаемых поверхностей (рисунок 6.18, блок А6) выполнялась путем сопоставления температуры конструкции на различной глубине. Расчет прогрева твердых тел производился в программе FDS синхронно с моделированием пожара на основе численного решения одномерного уравнения теплопроводности [213]. Соответствующие значения температуры фиксировались добавляемыми в расчетную модель датчиками на поверхности (T_w) и внутри твердого тела (T_s), а также путем настройки выходных данных для граничных величин [207]. В качестве критерия эффективного охлаждения использовалось выполнение условия:

$$\max(T_w, T_s) < T_{кр}, \quad (6.30)$$

где T_w, T_s – температура соответственно на поверхности и внутри защищаемых конструкций;

$T_{кр}$ – критическое значение температуры, при которой наблюдается изменение прочностных характеристик материала.

Полученные результаты после моделирования визуализированы графиками (рисунок 6.22). Для построения кривых на графиках применено сглаживание модельных данных методом Савицкого – Голея [153].

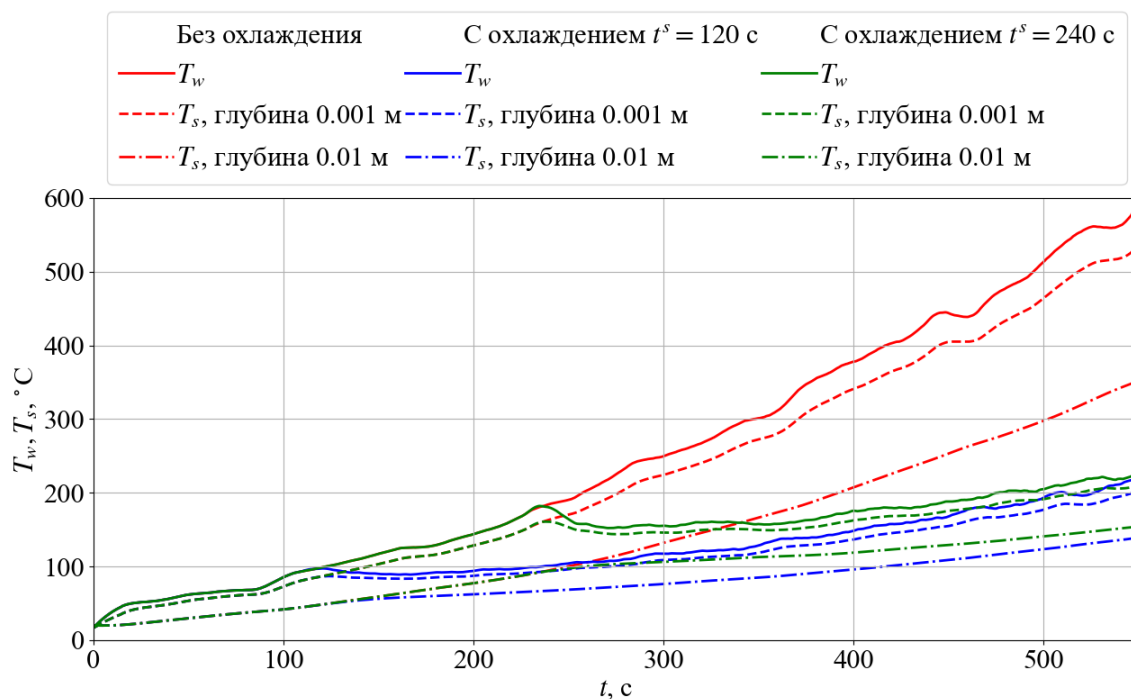


Рисунок 6.22 – Результаты имитационного моделирования прогрева ограждений (без и с учетом охлаждения пожарными роботами)

С целью построения объемного распределения температур внутри конструкции (рисунок 6.23) размещение датчиков выполнялось на основе разработанной в рамках данного исследования методики автоматизации подготовки модели и обработки результатов численного расчета развития пожара [215; 220; 225].

Согласно представленным на рисунках 6.22–6.23 результатам расчета температур на поверхности T_w и внутри T_s ограждений тоннеля использование охлаждения в расчетной модели позволяет предотвратить нагрев конструкции до температуры $T_{кр} = 300$ °С, при которой наблюдается изменение прочностных характеристик материала [14; 34], что соответствует критерию эффективности (6.30). После запуска пожарного робота значения T_w и T_s вблизи поверхности снижаются относительно пиковых в течение 6–7 циклов орошения, затем при заданном расходе огнетушащего вещества продолжается их рост. При достаточно большом интервале моделирования наблюдается постепенное сокращение разницы между температурами в соответствующих расчетных точках для $t^s = 120$ с и $t^s = 240$ с.

В модели без охлаждения T_w превышает $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунки 6.22–6.23), что при длительном воздействии критично для рассматриваемого материала ограждений подземной исследовательской лаборатории [14; 34] и может привести к наступлению предельных состояний конструкции по огнестойкости.

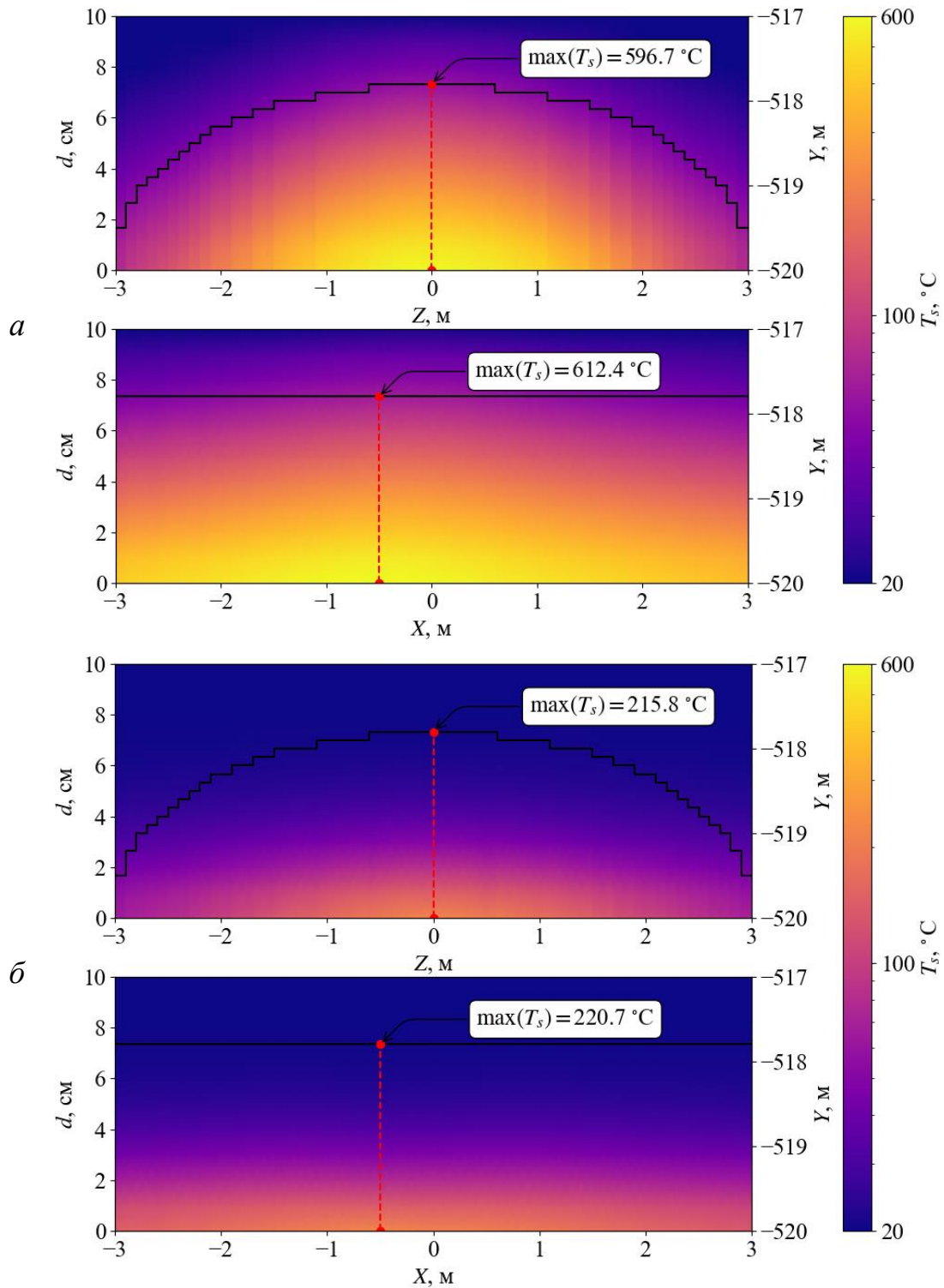


Рисунок 6.23 – Распределение температур внутри ограждений в плоскостях YZ и XY : *a* – без охлаждения; *б* – с охлаждением ($t^s = 120\text{ s}$)

Поля температуры ограждений над очагом горения (рисунок 6.23) иллюстрируют ширину области, для которой охлаждение с выбранными параметрами является эффективным. На практике размеры области могут быть скорректированы путем организации ее защиты двумя и более пожарными роботами (на базе роботизированных установок пожаротушения [32]), использования распыленных струй, увеличения расхода воды, задания иной схемы орошения и закона изменения углов наведения ствола.

Технология, предложенная в данном параграфе, может применяться для исследования эффективности охлаждения пожарными роботами различных поверхностей объектов защиты при пожарах. При этом могут учитываться с одной стороны различные комбинации характеристик противопожарных роботизированных систем, в том числе способы орошения (циклы, законы изменения управляющих параметров), с другой стороны геометрия объекта, а также участки размещения, свойства горючей нагрузки, особенности вентиляции, теплофизические свойства материалов конструкций и другие параметры.

6.5 Выводы по главе 6

В ходе проведенного исследования, которому посвящена шестая глава, были получены следующие результаты и выводы:

1) Предложены способы управления пожарными роботами на основе обученной расчетной модели оценки целевых характеристик газожидкостных потоков с использованием сети Колмогорова – Арнольда.

2) Разработан алгоритм оптимизации, который предназначен для расчета углов наведения ствола пожарного робота, обеспечивающих прохождение струи через заданную точку трехмерного пространства, в том числе при наличии возмущающих воздействий. Отличие данного подхода от других методов оптимизации заключается в учете зависимости геометрии струи от углов возвышения и азимута. Показано, что предложенный алгоритм позволяет решить

задачу расчета углов наведения с более высокой скоростью и точностью по сравнению с другими методами параметрической оптимизации.

3) 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 возмущающих воздействий, а также геометрических особенностей и параметров потока огнетушащего вещества на всей его длине, в том числе: размера, формы пятна контакта, направления движения огнетушащего вещества, интенсивности орошения. 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. Проведенная апробация разработанного метода показала, что:

- использование расчетных траекторий огнетушащего вещества при различных управляющих параметрах позволяет генерировать законы изменения углов наведения ствола пожарного робота, которые обеспечивают полное покрытие защищаемой зоны, имеющей сложную геометрию, с учетом размеров контактного пятна;

- применение разработанного метода объемного представления газожидкостного потока эллиптическими сечениями дает возможность обоснованно оценивать эффективность охлаждения защищаемой поверхности на основе численного расчета динамики пожара с учетом размеров пятна контакта и интенсивности орошения на соответствующем участке траектории струи.

4) Разработана технология оценки эффективности охлаждения защищаемых поверхностей (строительных конструкций, оборудования) на основе синтезированного закона управления с использованием численного моделирования динамики развития пожара. Отличием предлагаемого подхода является имитация движения контактного пятна по защищаемой поверхности с учетом его параметров, определяемых с применением разработанной модели оценки характеристик газожидкостных потоков.

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 заключаются 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 находящихся 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.

Таким образом в диссертационной работе решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение, обусловленное повышением безопасности и эффективности противопожарной защиты с использованием пожарных роботов, снижением рисков для жизни людей и материальных потерь, а также импортозамещением применяемого в данной прикладной области программного обеспечения.

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. 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- CFD – вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics);
- CV – компьютерное зрение (Computer Vision);
- DT – дерево решений (Decision Tree);
- GB – градиентный бустинг (Gradient Boosting);
- ML – машинное обучение (Machine Learning);
- MLP – многослойный перцептрон (Multi Layer Perceptron);
- KAN – сеть Колмогорова – Арнольда (Kolmogorov – Arnold Network);
- RANS – осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (Reynolds – Averaged Navier – Stokes);
- RMSD – среднеквадратическое отклонение (Root Mean Square Deviation);
- RD – относительное отклонение (Relative Deviation);
- VF – объемная доля (Volume Fraction);
- VOF – модель переноса объемной доли жидкости (Volume of Fluid);
- БПЛА – беспилотный летательный аппарат;
- ГЖП – газожидкостный поток;
- ЛМС – линия максимальный скоростей;
- ЛПР – лицо, принимающее решение;
- НИ – натурные испытания;
- ОТВ – огнетушащее вещество;
- ПЛС – пожарный лафетный ствол;
- ПО – программное обеспечение;
- ПР – пожарный робот;
- ПРС – противопожарная роботизированная система;
- РУП – роботизированная установка пожаротушения;
- ЦХ – целевые характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивное управление роботизированными подвижными объектами / Б. Р. Андриевский, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов [и др.] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 5. – С. 61–77.

2. Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения. Часть 1. Предпосылки создания РУП и специфические особенности тушения пожаров ПРС / Л. М. Мешман, В. А. Былинкин, Ю. И. Горбань [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28. – № 3. – С. 70–88.

3. Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения. Часть 2. Программы управления ПРС при тушении статическими струями с учетом компоновки ПРС относительно очага пожара / Л. М. Мешман, В. А. Былинкин, Ю. И. Горбань [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28. – № 4. – С. 63–81.

4. Актуальные проблемы навигации на очаг пожара пожарных роботизированных стволов в роботизированных установках пожаротушения. Часть 3. Программы управления ПРС при тушении стручными струями с учетом компоновки ПРС относительно очага пожара / Л. М. Мешман, В. А. Былинкин, Ю. И. Горбань [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28. – № 5. – С. 71–81.

5. Баллистика струй из универсальных насадков ствольной пожарной техники / В. А. Меженков, И. А. Ольховский, А. Н. Лебедев [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 3. – С. 37–43.

6. Буценко, В. О. Огнестойкость конструкций тоннеля // Метро и тоннели. – 2015. – № 5. – С. 31–35.

7. Горбань, Ю. И. Защита тоннелей и стеллажных складов пожарными роботами на болидах / Ю. И. Горбань, В. А. Варганов, Е. А. Синельникова // Пожарная безопасность. – 2010. – № 3. – С. 195–198.

8. Горбань, Ю. И. Пожарные роботы в пожарной автоматике: научно-технические исследования, алгоритмы поведения и дизайн / Ю. И. Горбань, С. Г. Немчинов // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29. – № 5. – С. 82–88.

9. Горбань, Ю. И. Пожарные роботы и ствольная пожарная техника в пожарной автоматике и пожарной охране. II. Баллистика струй / Ю. И. Горбань, Е. А. Синельникова // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 5. – С. 62–66.

10. Горбань, Ю. И. Пожарные роботы и ствольная техника в пожарной автоматике и пожарной охране : для специалистов в области пожарной автоматики и пожарной охраны. – Москва : Пожнаука, 2013. – 351 с.

11. Горбань, Ю. И. Роботизированные установки пожаротушения – современные технологии пожаротушения с российским приоритетом / Ю. И. Горбань, С. Г. Цариченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. – № 5. – С. 54–66.

12. ГОСТ Р 53326-2009. Техника пожарная. Установки пожаротушения роботизированные. Общие технические требования. Методы испытаний. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 22 с.

13. Здор, Г. Н. Определение траектории наклонной гидравлической струи с учетом действия силы трения, возникающей на ее поверхности / Г. Н. Здор, А. В. Потеха // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2016. – Т. 6. – № 2. – С. 88–97.

14. Исследование прочностных характеристик и рентгенофазовый анализ керна скважин подземной исследовательской лаборатории при термическом воздействии / Е. Ю. Трояк, И. Н. Пожаркова, Д. А. Озерский [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2025. – № 1(59). – С. 35–41.

15. Компьютерная программа «Баллистика» // Инженерный центр пожарной робототехники ЭФЭР – URL: <https://firerobots.ru/library/84/programma-ballistika> (дата обращения: 01.03.2026).

16. Коркодинов, Я. А. Обзор семейства $k-\varepsilon$ моделей для моделирования турбулентности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15. – № 2. – С. 5–16.

17. Лысенкова, Ю. В. К вопросу применения лафетных стволов в пожарной охране / Ю. В. Лысенкова, С. Г. Аксенов, Ф. К. Синагатуллин // E-Scio. – 2023. – V. 78. – № 3. – Р. 378–384.

18. Материалы обоснования лицензии на сооружение не относящегося к ядерным установкам пункта хранения РАО, создаваемого в соответствии с проектной документацией на строительство объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив) в составе подземной исследовательской лаборатории (включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду). Т. 1 // ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» – URL: https://www.norao.ru/upload/docs/%D0%9C%D0%9E%D0%9B_%D1%82%D0%BE%D0%BC%201.pdf (дата обращения: 01.03.2026).

19. Меженев, В. А. Программный комплекс для расчета баллистики струй ствольной пожарной техники при проектировании систем пожаротушения / В. А. Меженев, А. В. Хачиров, Д. Р. Струнов // Экономика строительства. – 2025. – № 6. – С. 349–353.

20. Моделирование процесса распыла с использованием адаптивных сеточных моделей / А. М. Сипатов, С. А. Карабасов, Л. Ю. Гомзилов [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 93–101.

21. Можяев, А. Г. Показатели поперечной статистической и динамической устойчивости базовых шасси робототехнических комплексов МЧС России // Достижения науки и образования. – 2020. – № 13(67). – С. 12–15.

22. О необходимости уточнения основных технических характеристик, стоящих на вооружении в подразделениях МЧС России современных пожарных стволов / С. О. Куртов, А. Ю. Трояк, В. Ю. Яровой [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2024. – Т. 32. – № 1. – С. 136–142.

23. Обоснование выбора состава экспериментально-исследовательской установки для измерения теплогидравлических параметров элементов насосно-рукавных систем / В. П. Малый, С. О. Куртов, А. С. Лунев [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 2(54). – С. 60–68.

24. Ольховский, И. А. Применение вычислительной гидрогазодинамики при конструировании пожарных стволов / И. А. Ольховский, В. А. Меженев, М. М. Данилов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 3. – С. 69–76.

25. Основные параметры струй ствольной техники, обеспечивающие огнетушащую эффективность подачи огнетушащих веществ / И. А. Ольховский, Д. А. Иощенко, В. Я. Гладченко [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2025. – № 1. – С. 48–57.

26. Оценка интенсивности орошения для пожарных лафетных стволов / В. А. Меженев, И. А. Ольховский, К. П. Щетнев [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 1. – С. 22–29.

27. Пожарный дрон «Грузовик М500» // Лаборатория будущего – URL: <https://cablewalker.ru/products/pozharnyj-dron-gruzovik-m500/> (дата обращения: 01.03.2026).

28. Противопожарная защита машинных залов атомных электростанций с использованием многофункциональных робототехнических комплексов / С. Г. Немчинов, В. А. Харевский, Ю. И. Горбань [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 2. – С. 20–26.

29. Разработка технологии оценки параметров траектории струи огнетушащего вещества из пожарного ствола при возмущающих воздействиях : отчет о НИР (заключительный) / руководитель И. Н. Пожаркова ; Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям

и ликвидации последствий стихийных бедствий, ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. – Железногорск, 2024. – 55 с. – Рег. № НИОКТР 124112200034-0.

30. Расчет распределений локальных параметров адиабатных двухфазных потоков по коду ANSYS CFX / О. Е. Степанов, Ю. Н. Корниенко, И. Ю. Галкин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – № 5. – С. 185–195.

31. Роботизированные установки пожаротушения. Параметры эффективного тушения / Ю. И. Горбань, С. Г. Немчинов, С. Г. Цариченко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32. – № 4. – С. 58–67.

32. Свод правил СП 485.1311500.2020 Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 105 с.

33. Система технического зрения для роботизированных установок пожаротушения / С. Г. Немчинов, Ю. И. Горбань, А. А. Туровский [и др.] // Экстремальная робототехника. – 2022. – № 1(33). – С. 51–56.

34. Трояк, Е. Ю. Микроскопический анализ и исследование цветовых характеристик керна скважин подземной исследовательской лаборатории при термическом воздействии / Е. Ю. Трояк, И. Н. Пожаркова, Т. А. Литвинская // Современные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 1(54). – С. 124–134.

35. Хмелевая, А. О. Инновационные технологии пожаротушения: интеграция беспилотных систем и робототехники в современной пожарной безопасности // Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности объектов различного назначения. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2025. – С. 148–152.

36. Юрченко, И. Ф. Разработка и совершенствование технологий автоматизированного управления формированием мелиоративного режима агроэкосистем // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 2 (54). – С. 354–363.

37. 3D reconstruction system for foot arch detecting based on openMVG and openMVS / Z. Li, S. Luo, W. Zeng [et al.] // 2022 5th International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (PRAI). – IEEE, 2022. – P. 1017–1022.
38. 3D reconstruction using 3D registration-based ToF-stereo fusion / S. Jung, Y. S. Lee, Y. Lee [et al.] // Sensors. – 2022. – V. 22. – № 21. – P. 8369.
39. A CFD-based wind solver for an urban fast response transport and dispersion model / A. A. Gowardhan, E. R. Pardyjak, I. Senocak [et al.] // Environmental fluid mechanics. – 2011. – V. 11. – № 5. – P. 439–464.
40. A comparative assessment of CFD based LSTM and GRU for hydrodynamic predictions of gas-solid fluidized bed / M. Nadda, K. Singh, S. Roy [et al.] // Powder Technology. – 2024. – V. 441. – P. 119836.
41. A Hardware-Aware Analysis of PTQ and QAT Quantized CNNs for Object Detection on FPGA / N. Jariri, K. Allabouche, M. Benaly [et al.] // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2026. – V. 16. – № 2. – P. 34498–34504.
42. A low-cost automatic acquisition system for photogrammetry / L. E. Sebar, S. Grassini, M. Parvis [et al.] // 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – IEEE, 2021. – P. 1–6.
43. A novel stacked generalization ensemble-based hybrid LGBM-XGB-MLP model for Short-Term Load Forecasting / M. Massaoudi, S. S. Refaat, I. Chihi [et al.] // Energy. – 2021. – V. 214. – P. 118874.
44. A numerical method for the simulation of low Mach number liquid–gas flows / V. Daru, P. Le Quéré, M. C. Duluc [et. al] // Journal of Computational Physics. – 2010. – V. 229. – № 23. – P. 8844-8867.
45. A review in particle image velocimetry techniques (developments and applications) / M. R. Abdulwahab, Y. H. Ali, F. J. Habeeb [et al.] // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2020. – V. 65. – P. 213–229.
46. A Study on Large Electric Vehicle Fires in a Tunnel: Use of a Fire Dynamics Simulator (FDS) / R. Dessì, D. Fruhwirt, D. Papurello // Processes. – 2025. – V. 13. – № 8. – P. 2435.

47. A systematic literature review of 3D deep learning techniques in computed tomography reconstruction / H. Rahman, A. R. Khan, T. Sadiq [et al.] // Tomography. – 2023. – V. 9. – № 6. – P. 2158–2189.
48. Accelerating CFD simulation with high order finite difference method on curvilinear coordinates for modern GPU clusters / C. C. Ye, P. J. Y. Zhang, Z. H. Wan [et al.] // Advances in Aerodynamics. – 2022. – V. 4. – № 1. – P. 7.
49. Accelerating federated learning via momentum gradient descent / W. Liu, L. Chen, Y. Chen [et al.] // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2020. – V. 31. – № 8. – P. 1754–1766.
50. Adaptive edge detection of rebar thread head image based on improved Canny operator / L. Liu, Z. Liu, A. Hou [et al.] // IET Image Processing. – 2024. – V. 18. – № 5. – P. 1145–1160.
51. Advances in liquid nitrogen fracturing for unconventional oil and gas development: A review / L. Qin, X. Zhang, C. Zhai [et al.] // Energy & Fuels. – 2022. – V. 36. – № 6. – P. 2971–2992.
52. Aidun, C. K. Lattice-Boltzmann method for complex flows / C. K. Aidun, J. R. Clausen // Annual review of fluid mechanics. – 2010. – V. 42. – № 1. – P. 439–472.
53. An autonomous positioning method for fire robots with multi-source sensors / Y. T. Liu, R. Z. Sun, X. N. Zhang [et al.] // Wireless Networks. – 2024. – V. 30. – № 5. – P. 3683–3695.
54. An improved Deeplab V3+ network based coconut CT image segmentation method / Q. Liu, Y. Zhang, J. Chen [et al.] // Frontiers in Plant Science. – 2023. – V. 14. – P. 1139666.
55. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide // ANSYS, Inc. – 2009. – 816 p.
56. Application of CFD-PBM coupling model for analysis of gas-liquid distribution characteristics in centrifugal pump / Z. Ge, D. He, R. Huang [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 194. – P. 107518.

57. Application of Kolmogorov–Arnold networks in high energy physics / E. E. Abasov, P. V. Volkov, G. A. Vorotnikov [et al.] // Moscow University Physics Bulletin. – 2024. – V. 79. – № Suppl 2. – P. S585–S590.
58. Atmaca, M. CFD analysis of jet flows ejected from different nozzles / M. Atmaca, B. Çetin, C. Ezgi [et al.] // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2021. – V. 16. – № 3. – P. 940–945.
59. AutoAugment: Learning augmentation strategies from data / E. D. Cubuk, B. Zoph, D. Mane [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2019. – P. 113–123.
60. Automatic feature type selection in digital photogrammetry of piping / Y. Tian, C. Ding, Y. F. Lin [et al.] // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2022. – V. 37. – № 10. – P. 1335–1348.
61. Bathe, K. J. Benchmark problems for incompressible fluid flows with structural interactions / K. J. Bathe, G. A. Ledezma // Computers & structures. – 2007. – V. 85. – № 11-14. – C. 628–644.
62. Bertolazzi, E. Point data reconstruction and smoothing using cubic splines and clusterization / E. Bertolazzi, M. Frego, F. Biral // Mathematics and Computers in Simulation. – 2020. – V. 176. – P. 36–56.
63. BIM-based co-simulation of fire and occupants' behavior for safe construction rehabilitation planning / S. T. Shams Abadi, N. Moniri Tokmehdash, A. Hosny [et al.] // Fire. – 2021. – V. 4. – № 4. – P. 67.
64. Borisut P. Adaptive latin hypercube sampling for a surrogate-based optimization with artificial neural network / P. Borisut, A. Nuchitprasittichai // Processes. – 2023. – V. 11. – № 11. – P. 3232.
65. Brezov, D. Factorization and generalized roots of dual complex matrices with Rodrigues' formula // Advances in Applied Clifford Algebras. – 2020. – V. 30. – № 2. – P. 29.
66. CFD-modelling of boiling in a heated pipe including flow pattern transition / H. Setoodeh, A. M. Shabestary, W. Ding [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2022. – V. 204. – P. 117962.

67. Cheng, H. A study on predicting the deviation of jet trajectory falling point under the influence of random wind / H. Cheng, J. Zhu, S. Wang // *Sensors*. – 2024. – V. 24. – № 11. – P. 3463.
68. ColMap: A memory-efficient occupancy grid mapping framework / A. Fisher, R. Cannizzaro, M. Cochrane [et al.] // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2021. – V. 142. – P. 103755.
69. Comparative assessment of SAS, IDDES and hybrid filtering RANS/LES models based on second-moment closure / G. Wang, S. Wang, H. Li [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2021. – V. 13. – № 6. – P. 168.
70. Computational analysis in underexpanded jets simulations / J. R. Martins, J. V. Barbosa, F. P. Santos [et al.] // *Fluid Dynamics Research*. – 2022. – V. 54. – № 6. – P. 065502.
71. Computational analysis in underexpanded jets simulations / J. R. Martins, J. V. Barbosa, F. P. Santos [et al.] // *Fluid Dynamics Research*. – 2022. – V. 54. – № 6. – P. 065502.
72. Dai, Y. H. Convergence properties of the BFGS algorithm // *SIAM Journal on Optimization*. – 2002. – V. 13. – № 3. – P. 693–701.
73. Design and research of an articulated tracked firefighting robot / J. Zhao, Z. Zhang, S. Liu [et al.] // *Sensors*. – 2022. – V. 22. – № 14. – P. 5086.
74. Design and verification of intelligent temperature monitoring and cooling system for high-temperature fire area / L. Liu, H. Fei, P. Cheng [et al.] // *Journal of Mining Science and Technology*. – 2026. – V. 11. – № 2. – P. 477–486.
75. Determination of accuracy and usability of a SLAM scanner GeoSLAM Zeb Horizon: A bridge structure case study / R. Urban, M. Štroner, J. Braun [et al.] // *Applied Sciences*. – 2024. – V. 14. – № 12. – P. 5258.
76. Devi, R. Geometric transformations and thresholding of images using Opencv-Python // *GRD Journal for Engineering*. – 2017. – V. 2. – № 11.
77. Drouin, M. A. Active triangulation 3D imaging systems for industrial inspection / M. A. Drouin, J. A. Beraldin // *3D Imaging, analysis and applications*. – Cham : Springer International Publishing, 2020. – P. 109–165.

78. Du, Y. 3D contact point cloud reconstruction from vision-based tactile flow / Y. Du, G. Zhang, M. Y. Wang // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022. – V. 7. – № 4. – P. 12177–12184.
79. Durrani, F. Evaluation of LES and RANS CFD modelling of multiple steady states in natural ventilation / F. Durrani, M. J. Cook, J. J. McGuirk // Building and Environment. – 2015. – V. 92. – P. 167–181.
80. Dynamic numerical simulation of gas-liquid two-phase flows Euler/Euler versus Euler/Lagrange / A. Sokolichin, G. Eigenberger, A. Lapin [et al.] // Chemical engineering science. – 1997. – V. 52. – № 4. – P. 611–626.
81. Enesi, I. Evaluation of the 3D reconstruction performance of objects in Meshroom: A case study / I. Enesi, A. Kuqi // Athens Journal of Technology & Engineering. – 2023. – V. 10. – № 1. – P. 49–70.
82. Enhancing transparent object matting using predicted definite foreground and background / Y. Liang, Q. Fu, K. Zou [et al.] // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2024. – V. 35. – № 1. – P. 62–74.
83. Fast 3D reconstruction via event-based structured light with spatio-temporal coding / J. Fu, Y. Zhang, Y. Li [et al.] // Optics express. – 2023. – V. 31. – № 26. – P. 44588–44602.
84. Favre, T. An assessment of detached-eddy simulations of unsteady crosswind aerodynamics of road vehicles / T. Favre, G. Efraimsson // Flow, Turbulence and Combustion. – 2011. – V. 87. – № 1. – P. 133–163.
85. Fire Dynamics Simulator. Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model // NIST Special Publication 1018-1. – 2023.
86. Fire risk assessment and simulation of multi-functional teaching buildings: A combined application of DEMATEL and PyroSim / H. He, Z. Zhou, Y. Sun [et al.] // Journal of Engineering Management and Systems Engineering. – 2025. – V. 4. – № 1. – P. 1–20.
87. Firefighting water jet trajectory detection from unmanned aerial vehicle imagery using learnable prompt vectors / H. Cheng, J. Zhu, S. Wang [et al.] // Sensors. – 2024. – V. 24. – № 11. – P. 3553.

88. Fobiri, G. Reality capture in construction project management: A review of opportunities and challenges / G. Fobiri, I. Musonda, F. Muleya // *Buildings*. – 2022. – V. 12. – № 9. – P. 1381.
89. Free-Air Simulation Sensitivities on NASA's High-Lift Common Research Model / M. Zauner, A. Sansica, T. Matsuzaki [et al.] // *AIAA Journal*. – 2025. – V. 63. – № 6. – P. 2224–2248.
90. From Streamline to Pathline: Visualizing Particle Trajectories Under Changing Velocity Fields / A. Li, H. Chen, R. Jalali [et al.] // *SPE Journal*. – 2024. – V. 29. – № 7. – P. 3801–3812.
91. Gao, F. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters / F. Gao, L. Han // *Computational Optimization and Applications*. – 2012. – V. 51. – № 1. – P. 259–277.
92. Garoosi, F. New benchmark problems for validation and verification of incompressible multi-fluid flows based on the improved Volume-Of-Fluid (VOF) method / F. Garoosi, T. F. Mahdi // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2022. – V. 648. – P. 129313.
93. Gottuk, D. Smoke transport and FDS validation / D. Gottuk, C. Mealy, J. Floyd // *Fire safety science*. – 2008. – V. 9. – P. 129–140.
94. Gradient boosted decision trees for combustion chemistry integration / S. Yao, A. Kronenburg, A. Shamooni [et al.] // *Applications in Energy and Combustion Science*. – 2022. – V. 11. – P. 100077.
95. Han, L. Research on edge detection algorithm based on improved sobel operator / L. Han, Y. Tian, Q. Qi // *MATEC web of conferences*. – EDP Sciences, 2020. – V. 309. – P. 03031.
96. Hang, Z. Learning super-resolution of environment matting of transparent objects from a single image / Z. Hang, Y. H. Yang // *IEEE Access*. – 2022. – V. 10. – P. 3548–3558.
97. Höhne, T. Validation of AIAD sub-models for advanced numerical modelling of horizontal two-phase flows / T. Höhne, P. Porombka, S. Moya Sáez // *Fluids*. – 2020. – V. 5. – № 3. – P. 102.

98. Hyperparameter tuning in machine learning: A comprehensive review / J. Ilemobayo, O. Durodola, O. Alade [et al.] // Journal of Engineering Research and Reports. – 2024. – V. 26. – № 6. – P. 388–395.
99. Image Tracking of Fire Extinguishing Jet Drop Point Based on Improved ENet and Robust Adaptive Cubature Kalman Filtering / L. Pan, W. Li, J. Zhu [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2024. – V. 73. – P. 1–12.
100. In-situ fire test to assess tunnel lining fire resistance / K. Sakkas, N. Vagiokas, K. Tsiamouras [et al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 85. – P. 368–374.
101. Integration of Hertz–Knudsen–Schrage phase change in phase-field lattice Boltzmann method: Validation and parametric studies / A. Mandegari, M. H. Rahimian, A. Jalali [et al.] // Physics of Fluids. – 2024. – V. 36. – № 7.
102. Intelligent fire monitor for fire robot based on infrared image feedback control / J. Zhu, W. Li, D. Lin [et al.] // Fire Technology. – 2020. – V. 56. – № 5. – P. 2089–2109.
103. Jarahizadeh, S. A comparative analysis of UAV photogrammetric software performance for forest 3D modeling: A case study using AgiSoft photscan, PIX4DMapper, and DJI Terra / S. Jarahizadeh, B. Salehi // Sensors. – 2024. – V. 24. – № 1. – P. 286.
104. KAN: Kolmogorov–Arnold networks / Z. Liu, Y. Wang, S. Vaidya [et al.] // International conference on learning representations. – 2025. – V. 2025. – P. 70367–70413.
105. Karami, A. Combining photogrammetry and photometric stereo to achieve precise and complete 3D reconstruction / A. Karami, F. Menna, F. Remondino // Sensors. – 2022. – V. 22. – № 21. – P. 8172.
106. Kolmogorov–Arnold Networks (KANs) – URL: <https://github.com/KindXiaoming/pykan> (accessed: 12.03.2026).
107. Kuan, T. W. I. LES and ILES Simulations of Free-jets / T. W. I. Kuan, J. Szmelter, F. Cocetta // Flow, Turbulence and Combustion. – 2023. – V. 110. – № 3. – P. 547–579.

108. Large-scale structured light 3D shape measurement with reverse photography / Y. L. Xiao, Y. Wen, S. Li [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2020. – V. 130. – P. 106086.

109. Laubscher, R. Utilization of basic multi-layer perceptron artificial neural networks to resolve turbulent fine structure chemical kinetics applied to a CFD model of a methane/air piloted jet flame // *Journal of Thermal Engineering*. – 2018. – V. 4. – № 2. – P. 1828–1846.

110. Lehoczky, M. Present Software of photogrammetric processing of digital images / M. Lehoczky, Z. Abdurakhmonov // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2021. – V. 227. – P. 04001.

111. Li, Z. Model compression for deep neural networks: A survey / Z. Li, H. Li, L. Meng // *Computers*. – 2023. – V. 12. – № 3. – P. 60.

112. Liu, Y. Validation and uncertainty quantification of multiphase-CFD solvers: A data-driven Bayesian framework supported by high-resolution experiments / Y. Liu, X. Sun, N. T. Dinh // *Nuclear Engineering and Design*. – 2019. – V. 354. – P. 110200.

113. Looking outside the window: Wide-context transformer for the semantic segmentation of high-resolution remote sensing images / L. Ding, D. Lin, S. Lin [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2022. – V. 60. – P. 1–13.

114. Machine learning model for gas–liquid interface reconstruction in CFD numerical simulations / T. Nakano, M. A. Bucci, J. M. Gratien [et al.] // *Fluids*. – 2025. – V. 10. – № 1. – P. 20.

115. Mahgerefteh, H. Courant, Friedrichs and Lewy (CFL) impact on numerical convergence of highly transient flows / H. Mahgerefteh, Y. Rykov, G. Denton // *Chemical Engineering Science*. – 2009. – V. 64. – № 23. – P. 4969–4975.

116. Marocco, L. Multiphase Euler–Lagrange CFD simulation applied to wet flue gas desulphurisation technology / L. Marocco, F. Inzoli // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2009. – V. 35. – № 2. – P. 185–194.

117. Menchini, C. P. Experimental Flow Characterization and Computational Model Development of Aqueous Film Forming Foam Firefighting Jets / C. P. Menchini, G. J. Morris, W. W. Huebsch // – 2015. – № DOT/FAA/TC-15/21.
118. Miyashita, L. High-Speed 3D Vision Based on Structured Light Methods / L. Miyashita, S. Tabata, M. Ishikawa // Metrology. – 2025. – V. 5. – № 2. – P. 24.
119. MPQ-DM: Mixed precision quantization for extremely low bit diffusion models / W. Feng, H. Qin, C. Yang [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2025. – V. 39. – № 16. – P. 16595–16603.
120. Mukherjee, C. How to Plot Heatlines? / C. Mukherjee, S. Mukhopadhyay // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. – 2023. – V. 15. – № 11. – P. 111002.
121. Multi-sensor imagery rectification and registration for herbicide testing / F. Aguera-Vega, M. Aguera-Puntas, J. Aguera-Vega [et al.] // Measurement. – 2021. – V. 175. – P. 109049.
122. Nguyen, H. Single-shot 3D shape reconstruction using structured light and deep convolutional neural networks / H. Nguyen, Y. Wang, Z. Wang // Sensors. – 2020. – V. 20. – № 13. – P. 3718.
123. Novel exterior cover design for radiant heat resistance of firefighting robots in large-scale petrochemical complex fires / J. Fujita, Y. Tamura, H. Amano [et al.] // ROBOMECH Journal. – 2022. – V. 9. – № 1. – P. 13.
124. Novel UAV-based 3D reconstruction using dense LiDAR point cloud and imagery: A geometry-aware 3D gaussian splatting approach / K. Qin, J. Li, S. Zlatanova [et al.] // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2025. – V. 140. – P. 104590.
125. Novel wall-attached multidirectional jets: Mathematical formulation, CFD modeling and experimental validation / H. L. Zhang, J. H. Chen, Y. He [et al.] // Building and Environment. – 2023. – V. 244. – P. 110778.
126. Optical distortion correction considering radial and tangential distortion rates defined by optical design / Y. Liu, D. Cheng, Q. Wang [et al.] // Results in Optics. – 2021. – V. 3. – P. 100072.

127. Optical tomography in additive manufacturing: a review, processes, open problems, and new opportunities / M. Dharnidharka, U. Chadha, L. M. Dasari [et al.] // *The European Physical Journal Plus*. – 2021. – V. 136. – № 11. – P. 1133.
128. Papageorgakis, G. C. Comparison of linear and nonlinear RNG-based k-epsilon models for incompressible turbulent flows / G. C. Papageorgakis, D. N. Assanis // *Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals*. – 1999. – V. 35. – № 1. – P. 1–22.
129. Patel, C. Validation of Computational Fluid Dynamics Model of Pressure Control in a Flight-scale Liquid Hydrogen Tank using a Spray Bar // *AIAA SCITECH 2026 Forum*. – 2026. – P. 0567.
130. Patra, B. An analytical study of Euler angle and Rodrigues parameter representations of geometrically and establishing the relations between these / B. Patra, S. Bandyopadhyay // *Robotica*. – 2025. – V. 43. – № 1. – P. 163–193.
131. Patwardhan, N. Transformers in the real world: A survey on nlp applications / N. Patwardhan, S. Marrone, C. Sansone // *Information*. – 2023. – V. 14. – № 4. – P. 242.
132. Phase-domain modulated hybrid phase-shifting structured light based efficient 3D measurement / R. Yu, H. Yu, X. Liang [et al.] // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2024. – V. 172. – P. 107875.
133. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics – A review / J. Baqersad, P. Poozesh, C. Niezrecki [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2017. – V. 86. – P. 17–34.
134. Photographic tone reproduction for digital images / E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley [et al.] // *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries, Volume 2*. – 2023. – P. 661–670.
135. Physics-informed neural networks (PINNs) for fluid mechanics: A review / S. Cai, Z. Mao, Z. Wang [et al.] // *Acta Mechanica Sinica*. – 2021. – V. 37. – № 12. – P. 1727–1738.
136. Pope, S. B. *Turbulent Flows* // Cambridge University Press, Cambridge, U.K. – 2000. – 771 pp.

137. Poullikkas, A. Effects of two-phase liquid-gas flow on the performance of nuclear reactor cooling pumps // *Progress in Nuclear Energy*. – 2003. – V. 42. – № 1. – P. 3–10.

138. Precision of 3D laser optical in assimilation of experimental bite marks in chocolate / A. Kanaparthi, M. A. Meundi, C. M. David [et al.] // *Journal of Indian Academy of Oral Medicine and Radiology*. – 2020. – V. 32. – № 3. – P. 259–265.

139. Prediction model for the water jet falling point in fire extinguishing based on a GA-BP neural network / C. Y. Zhang, R. Zhang, Z. Dai [et al.] // *PLoS one*. – 2019. – V. 14. – № 9. – P. e0221729.

140. Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library / A. Paszke, S. Gross, F. Massa [et al.] // *Advances in neural information processing systems*. – 2019. – V. 32.

141. Rahkar Farshi, T. Battle royale optimization algorithm // *Neural Computing and Applications*. – 2021. – V. 33. – № 4. – P. 1139–1157.

142. Ran, H. Surface representation for point clouds / H. Ran, J. Liu, C. Wang // *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. – 2022. – P. 18942–18952.

143. Random forest regression-based machine learning model for accurate estimation of fluid flow in curved pipes / P. Jain, A. Choudhury, P. Dutta [et al.] // *Processes*. – 2021. – V. 9. – P. 2095.

144. Rani, S. Object detection and recognition using contour based edge detection and fast R-CNN / S. Rani, D. Ghai, S. Kumar // *Multimedia Tools and Applications*. – 2022. – V. 81. – № 29. – P. 42183–42207.

145. Rapid CFD prediction based on machine learning surrogate model in built environment: A review / R. Mao, Y. Lan, L. Liang [et al.] // *Fluids*. – 2025. – V. 10. – P. 193.

146. Real-time monitoring of jet trajectory during jetting based on near-field computer vision / J. Zhu, W. Li, D. Lin [et al.] // *Sensors*. – 2019. – V. 19. – № 3. – P. 690.

147. Recent advances in 3D gaussian splatting / T. Wu, Y. J. Yuan, L. X. Zhang [et al.] // Computational Visual Media. – 2024. – V. 10. – № 4. – P. 613–642.
148. Recent trends in computational fluid dynamics / M. M. Bhatti, M. Marin, A. Zeeshan [et al.] // Frontiers in Physics. – 2020. – V. 8. – P. 593111.
149. Review of advances in fire extinguishing based on computer vision applications: Methods, challenges, and future directions / V. Loboichenko, G. Wilk-Jakubowski, L. Pawlik [et al.] // Sensors. – 2025. – V. 25. – № 20. – P. 6399.
150. Reynolds-stress model computations of NASA juncture flow experiment / B. Eisfeld, C. L. Rumsey, V. Togiti [et al.] // AIAA Journal. – 2022. – V. 60. – № 3. – P. 1643–1662.
151. Savill, A. M. Recent developments in rapid-distortion theory // Annual review of fluid mechanics. – 1987. – V. 19. – P. 531–575.
152. Scaling up gas–liquid photo-oxidations in flow using rotor-stator spinning disc reactors and a high-intensity light source / A. Chaudhuri, W. F. de Groot, J. H. Schuurmans [et al.] // Organic Process Research & Development. – 2025. – V. 29. – № 2. – P. 460–471.
153. Schafer R. W. What is a Savitzky–Golay filter? [Lecture notes] // IEEE Signal processing magazine. – 2011. – V. 28. – № 4. – P. 111–117.
154. Schonberger, J. L. Structure-from-motion revisited / J. L. Schonberger, J. M. Frahm // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – P. 4104–4113.
155. Scianna, A. Digital photogrammetry, TLS survey and 3D modelling for VR and AR applications in CH / A. Scianna, G. F. Gaglio, M. La Guardia // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2020. – V. 43. – P. 901–909.
156. Scikit-learn: machine learning in Python — URL: <https://github.com/scikit-learn/scikit-learn> (accessed: 18.11.2025).
157. Scikit-learn: Machine learning in Python / F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort [et al.] // the Journal of machine Learning research. – 2011. – V. 12. – P. 2825–2830.

158. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python / P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant [et al.] // Nature methods. – 2020. – V. 17. – № 3. – P. 261–272.
159. Segmenting transparent objects in the wild / E. Xie, W. Wang, W. Wang [et al.] // European conference on computer vision. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 696–711.
160. Shao, H. One-shot sensitivity-aware mixed sparsity pruning for large language models / H. Shao, B. Liu, Y. Qian // ICASSP 2024-2024 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2024. – P. 11296–11300.
161. Sharma, M. Development of an open-source tool for UAV photogrammetric data processing / M. Sharma, S. Raghavendra, S. Agrawal // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. – 2021. – V. 49. – № 3. – P. 659–664.
162. Simulation of movement characteristics of wind and sand two-phase flow on the gobi surface based on CFD technology / C. Liao, H. Wang, X. Liu [et al.] // Journal of Desert Research. – 2023. – V. 43. – № 6. – P. 71.
163. SMAC3: A versatile Bayesian optimization package for hyperparameter optimization / M. Lindauer, K. Eggensperger, M. Feurer [et al.] // Journal of Machine Learning Research. – 2022. – V. 23. – № 54. – P. 1–9.
164. Soleimani M. Multi-component high aspect ratio turbulent jets issuing from non-planar nozzles / M. Soleimani, P. Oshkai, N. Djilali // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44. – № 29. – P. 15262-15277.
165. Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction / S. Zhao, F. Kang, J. Li [et al.] // Automation in Construction. – 2021. – V. 130. – P. 103832.
166. Survey of image edge detection / R. Sun, T. Lei, Q. Chen [et al.] // Frontiers in Signal Processing. – 2022. – V. 2. – P. 826967.
167. Syphard, A. D. The importance of building construction materials relative to other factors affecting structure survival during wildfire / A. D. Syphard, T. J. Brennan,

J. E. Keeley // International journal of disaster risk reduction. – 2017. – V. 21. – P. 140–147.

168. Szczepanek, R. Daily streamflow forecasting in mountainous catchment using XGBoost, LightGBM and CatBoost // Hydrology. – 2022. – V. 9. – № 12. – P. 226.

169. Tanyıldızı, A. K. Design, control and stabilization of a transformable wheeled fire fighting robot with a fire-extinguishing, ball-shooting turret // Machines. – 2023. – V. 11. – № 4. – P. 492.

170. Tensors and Dynamic neural networks in Python with strong GPU acceleration — URL: <https://github.com/pytorch/pytorch> (accessed: 06.03.2026).

171. Tinkham, W. T. Influence of Agisoft Metashape parameters on UAS structure from motion individual tree detection from canopy height models / W. T. Tinkham, N. C. Swayze // Forests. – 2021. – V. 12. – № 2. – P. 250.

172. Tomiyama, A. Struggle with computational bubble dynamics // Multiphase Science and Technology. – 1998. – V. 10. – № 4. – P. 369–405.

173. TransCFD: A transformer-based decoder for flow field prediction / J. Jiang, G. Li, Y. Jiang [et al.] // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2023. – V. 123. – P. 106340.

174. Transformer networks for trajectory forecasting / F. Giuliani, I. Hasan, M. Cristani [et al.] // 2020 25th international conference on pattern recognition (ICPR). – IEEE, 2021. – P. 10335–10342.

175. Tutorial: luminance maps for daylighting studies from high dynamic range photography / C. Pierson, C. Cauwerts, M. Bodart [et al.] // Leukos. – 2021. – V. 17. – № 2. – P. 140–169.

176. Tyler, C. CFD Validation in Gas-Liquid Systems Using Flow Flowing Sensors // 2023 AIChE Annual Meeting. – AIChE, 2023. – P. 847.

177. Unifying automatic and interactive matting with pretrained vits / Z. Ye, W. Liu, H. Guo [et al.] // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2024. – P. 25585–25594.

178. Vervecken, L. Stable reduced-order models for pollutant dispersion in the built environment / L. Vervecken, J. Camps, J. Meyers // *Building and Environment*. – 2015. – V. 92. – P. 360–367.

179. Vicente Cruz, R. Physical/numerical duality of explicit/implicit subgrid-scale modelling / R. Vicente Cruz, E. Lamballais // *Journal of Turbulence*. – 2023. – V. 24. – № 6-7. – P. 235–279.

180. Vignon, C. Recent advances in applying deep reinforcement learning for flow control: Perspectives and future directions / C. Vignon, J. Rabault, R. Vinuesa // *Physics of fluids*. – 2023. – V. 35. – № 3. – P. 031301.

181. VOF simulations of the contact angle dynamics during the drop spreading: Standard models and a new wetting force model / I. Malgarinos, N. Nikolopoulos, M. Marengo [et al.] // *Advances in colloid and interface science*. – 2014. – V. 212. – P. 1–20.

182. Wang, J. Assessment of turbulence models and mesh types for the simulation of multi-body separation by coupling the CFD and rigid body dynamics / J. Wang, Y. Wang // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2023. – V. 2512. – № 1. – P. 012005.

183. Wang, M. Robotic firefighting: A review and future perspective / M. Wang, X. Chen, X. Huang // *Intelligent building fire safety and smart firefighting*. – 2024. – P. 475–499.

184. Wang, Z. Fusion of FTP and LC for Robust Single-shot 3D Reconstruction / Z. Wang, S. Liu // *2025 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. – IEEE, 2025. – P. 1–5.

185. Wasi, H. A. Proposed CG method to solve unconstrained optimization problems / H. A. Wasi, M. A. K. Shiker // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – V. 1804. – № 1. – P. 012024.

186. Watanabe, T. Numerical simulation of coalescence and breakup of rising droplets / T. Watanabe, K. Ebihara // *Computers & fluids*. – 2003. – V. 32. – № 6. – P. 823–834.

187. Weaver, D. S. A study of RANS turbulence models in fully turbulent jets: a perspective for CFD-DEM simulations / D. S. Weaver, S. Mišković // *Fluids*. – 2021. – V. 6. – № 8. – P. 271.
188. Wyngaard, J. C. Transport asymmetry in skewed turbulence / J. C. Wyngaard, J. C. Weil // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. – 1991. – V. 3. – № 1. – P. 155–162.
189. Xue, T. A novel 3-D reconstruction method of liquid film based on scanning laser-induced fluorescence / T. Xue, J. Liu, H. Li // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2023. – V. 72. – P. 1–9.
190. Yang, H. Q. Investigation of damping physics and CFD tool validation for simulation of baffled tanks at variable slosh amplitude / H. Q. Yang, J. West // *Modeling and Simulation (MSS) Meeting*. – 2016. – № M17-5650.
191. Yang, J. Real time object tracking using OpenCV // *2023 IEEE 3rd International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA)*. – IEEE, 2023. – P. 1472–1475.
192. Yılmaz, B. Compression of Convolutional Neural Networks Employing Tensor Train and High Dimensional Model Representation / B. Yılmaz, S. Tuna // *2025 9th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies (ISAS)*. – IEEE, 2025. – P. 1–6.
193. Zhang, J. A perspective transformation method based on computer vision / J. Zhang, J. Zhang, B. Chen [et al.] // *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*. – IEEE, 2020. – P. 765–768.
194. Zhang, L. Analysis on Performances and Flow Fields of a Single Waterjet Propeller Based on SST $k-\omega$ Model / L. Zhang, L. Hou, Y. Tao // *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*. – 2023. – V. 18. – № 9. – P. 1021–1036.
195. Zhang, T. Roadside lidar vehicle detection and tracking using range and intensity background subtraction / T. Zhang, P. J. Jin // *Journal of advanced transportation*. – 2022. – V. 2022. – № 1. – P. 2771085.
196. Zhang, Z. Camera calibration // *Computer vision: a reference guide*. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – P. 130–131.

197. Zhenyu, S. Three-dimensional reconstruction algorithm based on inverse perspective transformation / S. Zhenyu, W. Lihui, L. Liqiang // 2020 International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE). – IEEE, 2020. – P. 221–225.

198. Zhu, J. An improved near-field computer vision for jet trajectory falling position prediction of intelligent fire robot / J. Zhu, L. Pan, G. Zhao // Sensors. – 2020. – V. 20. – № 24. – P. 7029.

199. Zhu, J. Study on water jet trajectory model of fire monitor based on simulation and experiment / J. Zhu, W. Li, D. Lin, G. Zhao // Fire Technology. – 2019. – V. 55. – № 3. – P. 773–787.

Список публикаций автора

Основные публикации автора по теме диссертации. Статьи, опубликованные в ведущих российских рецензируемых научных журналах по специальности диссертации, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, в том числе в рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами данных и/или RSCI

200. 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. (ВАК K1, RSCI)

201. Пожаркова, И. Н. Выбор численных методов для моделирования свободных струй из пожарного ствола // Онтология проектирования. – 2025. – Т. 15. – № 2(56). – С. 270–280. (ВАК K1, RSCI)

202. 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. (ВАК K1, RSCI)

203. Пожаркова, И. Н. Алгоритмы построения потоковых характеристик свободных струй по результатам численного моделирования // Информационные технологии. – 2024. – Т. 30. – № 9. – С. 443–448. (BAK K1, RSCI)

204. 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. (BAK K1, RSCI)

205. Пожаркова, И. Н. Исследование температурного режима пожара в подземной исследовательской лаборатории на основе численного моделирования // Пожаровзрывобезопасность. – 2024. – Т. 33. – № 4. – С. 22–35. (BAK K1, SA(pt))

206. Пожаркова, И. Н. Распознавание траекторий струй огнетушащего вещества из пожарного ствола на основе цифровых изображений // Программные продукты и системы. – 2024. – № 2. – С. 262–269. (BAK K1, RSCI)

207. 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. (BAK K1)

208. 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. (BAK K1, RSCI)

209. 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. (BAK K1, RSCI)

210. Пожаркова, И. Н. Использование метода контекстно-зависимого аннотирования в информационных системах мониторинга чрезвычайных ситуаций // Информационные технологии. – 2022. – Т. 28. – № 1. – С. 43–47. (BAK K1, RSCI)

211. Пожаркова, И. Н. Автоматизация оценки прогрева конструкций при пожаре в промышленных помещениях значительного геометрического объема //

Промышленные АСУ и контроллеры. – 2026. – № 2. – С. 34–43. (ВАК K2)

212. Пожаркова, И. Н. Имитационное моделирование автоматического охлаждения пожарными роботами криволинейных ограждений тоннельного сооружения // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2025. – № 3. – С. 3–12. (ВАК K2)

213. 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. (ВАК K2)

214. 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. (ВАК K2)

215. Пожаркова, И. Н. Автоматизация обработки результатов численного моделирования развития пожара // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 2(122). – С. 292–300. (ВАК K2)

216. 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. (ВАК K2)

217. Пожаркова, И. Н. Прогнозирование распространения атмосферных загрязнений с учетом рельефа на основе моделей вычислительной гидродинамики // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 8. – С. 55–58. (ВАК K2)

218. Пожаркова, И. Н. Анализ задач и методов математического моделирования пожаров в тоннельных сооружениях // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 5(113). – С. 1–15. (ВАК K2)

219. Анализ процессов протекающих при свободной конвекции огнетушащего вещества в напорном пожарном рукаве / В. П. Малый, И. Н. Пожаркова, С. О. Куртов [и др.] // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12. – № 4(64). – С. 64–71. (ВАК K2)

220. Pozharkova, I. N. Efficiency improving of emergency monitoring and forecasting based on the information system // Siberian Journal of Science and Technology. – 2020. – V. 21. – № 3. – P. 323–332. (BAK K2, RSCI)

221. 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. (RSCI, Scopus Q4)

222. Pozharkova, I. Real-Time Forecasting of a Fire-Extinguishing Agent Jet Trajectory from a Robotic Fire Monitor Under Disturbances / I. Pozharkova, S. Chentsov // Robotics. – 2025. – V. 14. – № 12. – P. 188. (Scopus Q1, WoS Q1)

223. 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. (Scopus Q3, CA(pt), GeoRef)

224. 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. (Scopus Q3, CA(pt), GeoRef)

Монография

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

Патенты по теме диссертации

226. 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 [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет».

227. 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.] ; заявитель ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР».

*Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ
по теме диссертации*

228. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026660615 Российская Федерация. Программа для оценки характеристик газожидкостных потоков на основе сети Колмогорова – Арнольда : заявл. 02.04.2026 : опубл. 14.04.2026 / **И. Н. Пожаркова**.

229. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618499 Российская Федерация. Программа для построения потоковых характеристик по результатам численного моделирования свободных струй : заявл. 04.04.2025 : опубл. 04.04.2025 / **И. Н. Пожаркова** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий».

230. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618500 Российская Федерация. Программа для трехмерной реконструкции свободных струй на основе фотограмметрии : заявл. 04.04.2025 : опубл. 04.04.2025 / **И. Н. Пожаркова** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская

пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий».

231. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667572 Российская Федерация. Программа для распознавания струи огнетушащего вещества из ствола пожарного робота на основе цифровых изображений : № 2024665098 : заявл. 02.07.2024 : опубл. 26.07.2024 / **И. Н. Пожаркова**, А. А. Мельников ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий».

232. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615784 Российская Федерация. Программа для прогнозирования распространения выбросов ТЭЦ с учетом окружающего ландшафта и застройки : № 2023614978 : заявл. 20.03.2023 : опубл. 20.03.2023 / **И. Н. Пожаркова**, А. В. Гапоненко ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий».

233. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619451 Российская Федерация. Программа для оценки эффективности пожарных роботов с использованием имитационного моделирования : № 2022618747 : заявл. 16.05.2022 : опубл. 23.05.2022 / **И. Н. Пожаркова**, Е. А. Мельников, И. Ю. Сергеев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

234. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680889 Российская Федерация. Программа генерации FDS-кода, имитирующего развертывание противопожарного экрана : № 2021680624 : заявл. 16.12.2021 : опубл. 16.12.2021 / **И. Н. Пожаркова** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия» Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

Другие научные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science:

235. Evaluating the Effectiveness of Fire Robots for the Protection of Transport Infrastructure Facilities / **I. Pozharkova**, D. S. Abdul-Zahra, D. L. Ngo-Hoang [et al.] // Transportation Research Procedia : Collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability, Irkutsk-Krasnoyarsk. Vol. 68. – Krasnoyarsk: Elsevier B.V., 2023. – P. 499–504.

236. A Simulation Modeling Method for Cooling Building Structures by Fire Robots / **I. Pozharkova**, A. Aljarbouh, S. H. Azizam [et al.] // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – V. 502. – P. 504–511.

237. Pozharkova, I. N. Technological processes parameters evaluation in the fire risk industrial objects analysis // Journal of Physics: Conference Series : II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021), St.Petersburg. Vol. 1889. – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 52003.

238. Pozharkova, I. Construction metal structures simulation cooling by fire robots // AIP Conference Proceedings. Vol. 2402. – Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021. – P. 50021.

239. Simulation of industrial area protection by fire barriers / A. Minkin, **I. Pozharkova**, S. Klochkov [et al.] // AIP Conference Proceedings, Krasnoyarsk. Vol.

2402. – Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021. – P. 40013.

240. Creation of a software complex for fire safety regulatory document use automation / S. V. Klochkov, S. N. Masaev, A. N. Minkin, **I. N. Pozharkova** // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1679. – Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 032072.

241. Pozharkova, I. N. Features of modeling the combustion processes of flammable liquids with high ignition temperature in FDS software // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1679. – Krasnoyarsk, Russian Federation: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 22048.

242. Pozharkova, I. Modelling the Water Jet Trajectory of a Robotic Fire Monitor in the SimInTech Dynamic Modelling Environment // Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems : Proceedings of 4th Computational Methods in Systems and Software 2020. Vol. 1295. – Vsetin: Springer Nature, 2020. – P. 837–844.

Публикации в изданиях, индексируемых в РИНЦ:

243. Пожаркова, И. Н. Прогнозирование траектории свободной струи на основе MLP и KAN моделей // Информационные технологии. Физика и математика : Материалы 89-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием). – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2025. – С. 96–99.

244. Пожаркова, И. Н. Алгоритм построения линии максимальных скоростей потока // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 536–539.

245. Пожаркова, И. Н. Оценка геометрических параметров свободных струй на основе цифровых изображений // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций :

Материалы научно-практической конференции. – Железногорск: Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС РФ, 2025. – С. 232–237.

246. Пожаркова, И. Н. Использование методов распознавания изображений при решении задач обеспечения пожарной безопасности // Актуальные проблемы пожарной безопасности : Материалы XXXVI Международной научно-практической конференции, посвященной 375-й годовщине образования пожарной охраны России. – Москва: ВНИИПО МЧС РФ, 2024. – С. 319–324.

247. Пожаркова, И. Н. Алгоритм первичного выделения контуров струи огнетушащего вещества на цифровом изображении // Пожарная и аварийная безопасность : Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, посвященной 375-летию пожарной охраны России. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС РФ, 2024. – С. 540–545.

248. Пожаркова, И. Н. Прогнозирование траектории струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола при возмущающих воздействиях // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 21 апреля 2023 года. – Железногорск: ФГБОУ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2023. – С. 11–13.

249. Исследование формирования температурного поля при свободном остывании воды в пожарных рукавах / В. П. Малый, **И. Н. Пожаркова**, О. С. Малютин [и др.] // Енисейская теплофизика : Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 181–183.

250. Пожаркова, И. Н. Применение методов машинного обучения для прогнозирования траектории струи огнетушащего вещества из лафетного ствола // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы XXXV Международной научно-практической конференции. – Москва: ВНИИПО МЧС РФ, 2023. – С. 334–341.

251. Пожаркова, И. Н. Методы машинного обучения в задачах управления пожарными роботами // Проблемы и перспективы развития IT- и VR-технологий в

области комплексной безопасности : материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Екатеринбург: Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023. – С. 41–44.

252. Пожаркова, И. Н. Оценка эффективности использования пожарных роботов для защиты объектов теплоэнергетического комплекса // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций : Сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Красноярск: ФГБОУ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 122–126.

253. Пожаркова, И. Н. Оценка эффективности пожарных роботов с использованием имитационного моделирования // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : сборник материалов Дней науки с международным участием, посвященных 90-летию Гражданской обороны России. В 2-х частях. Том Часть 1. – Екатеринбург: Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. – С. 144–147.

254. Пожаркова, И. Н. Разработка технологии имитационного моделирования охлаждения строительных конструкций пожарными роботами // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Железногорск: ФГБОУ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 458–461.

255. Пожаркова, И. Н. Моделирование системы аварийной вентиляции в среде SIMINTECH / И. Н. Пожаркова, А. Н. Авдеев // Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности : сборник научных статей IX международной научной конференции / Научно-производственное предприятие «Медпромдеталь». – Волгоград: ООО «Конверт», 2021. – С. 92–94.

256. Пожаркова, И. Н. Построение зоны покрытия струи пожарного роботизированного ствола на основе моделирования в среде SIMINTECH // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : Сборник материалов Всероссийской научно-

практической конференции. – Железногорск: ФГБОУ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 218–222.

257. Пожаркова, И. Н. Оценка эффективности охлаждения строительных металлоконструкций пожарными роботами // Робототехника и искусственный интеллект : Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Железногорск: Литера-Принт, 2019. – С. 340–345.

258. Пожаркова, И. Н. Моделирование траектории струи пожарного роботизированного ствола в среде динамического моделирования SimInTech // Робототехника и искусственный интеллект : Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Железногорск: Литера-Принт, 2019. – С. 346–350.

259. Пожаркова, И. Н. Моделирование пожаров в машинных отделениях объектов теплоэнергетического комплекса / И. Н. Пожаркова, М. В. Елфимова, А. Н. Лагунов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2019. – № 1(12). – С. 39–45.

Приложение А

Блок-схемы алгоритмов

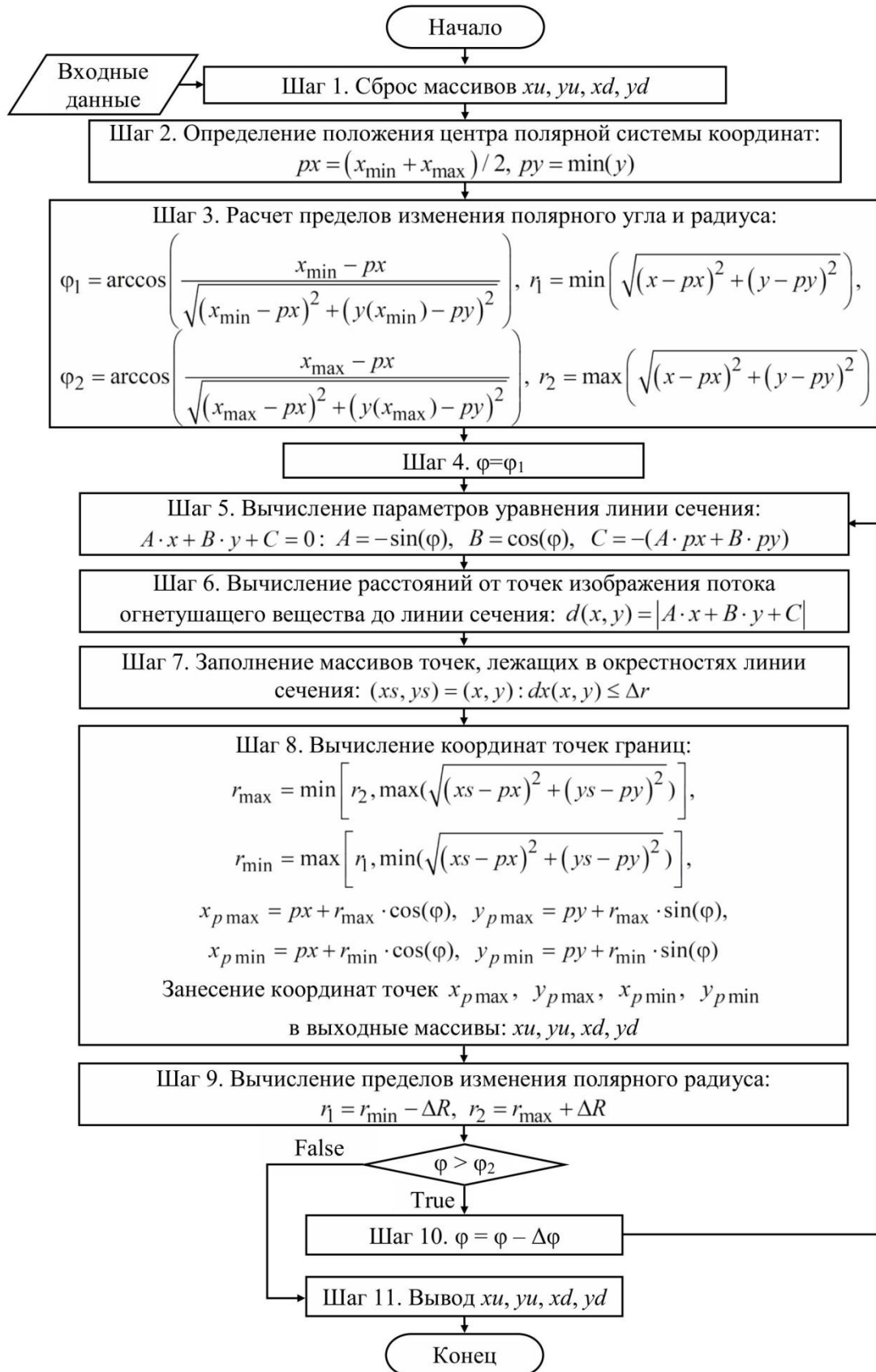


Рисунок А.1 – Блок-схема алгоритма первичного выделения контуров границ
потока огнетушащего вещества

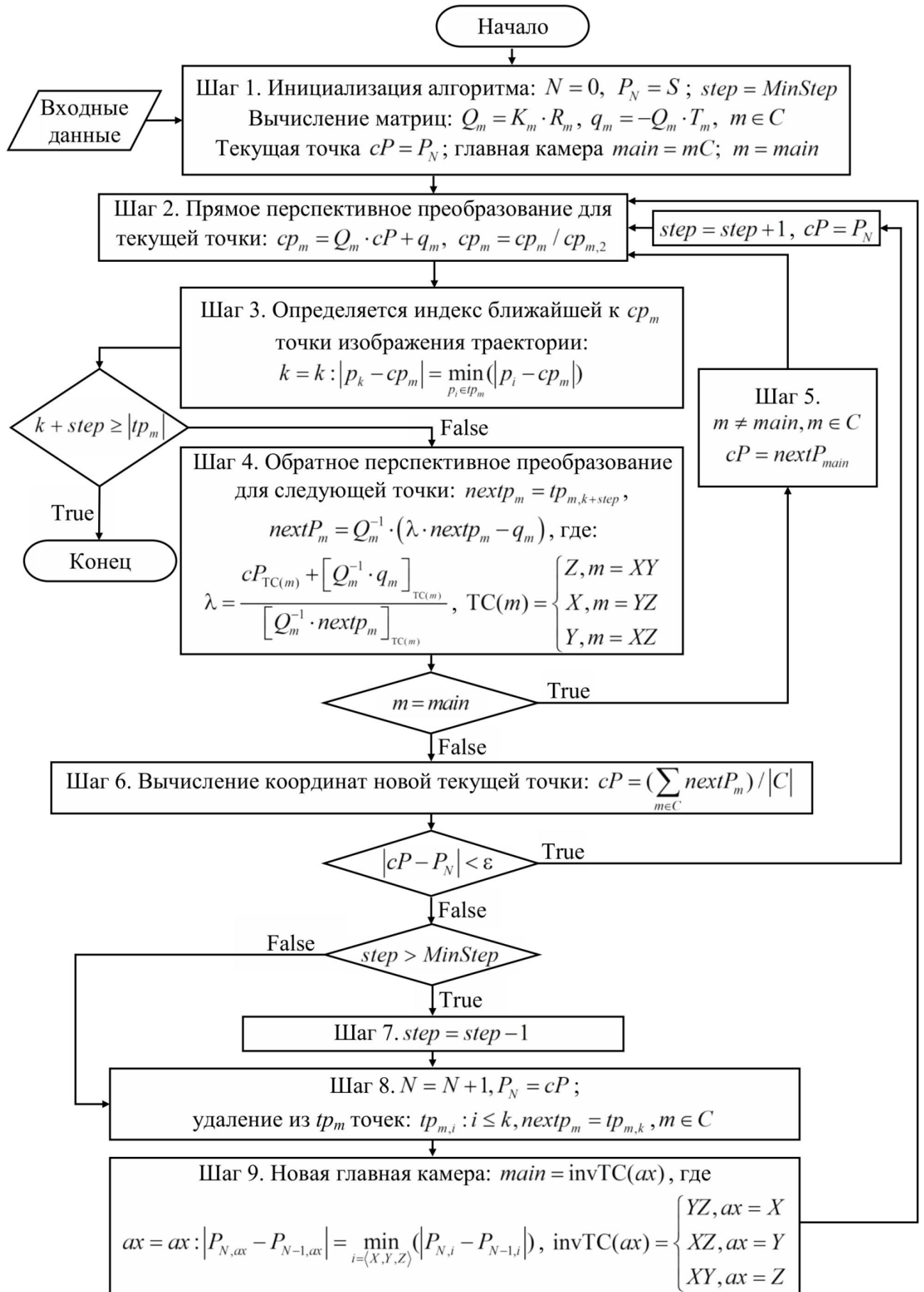


Рисунок А.2 – Блок-схема алгоритма трехмерной реконструкции траектории газожидкостного потока по результатам натурных испытаний

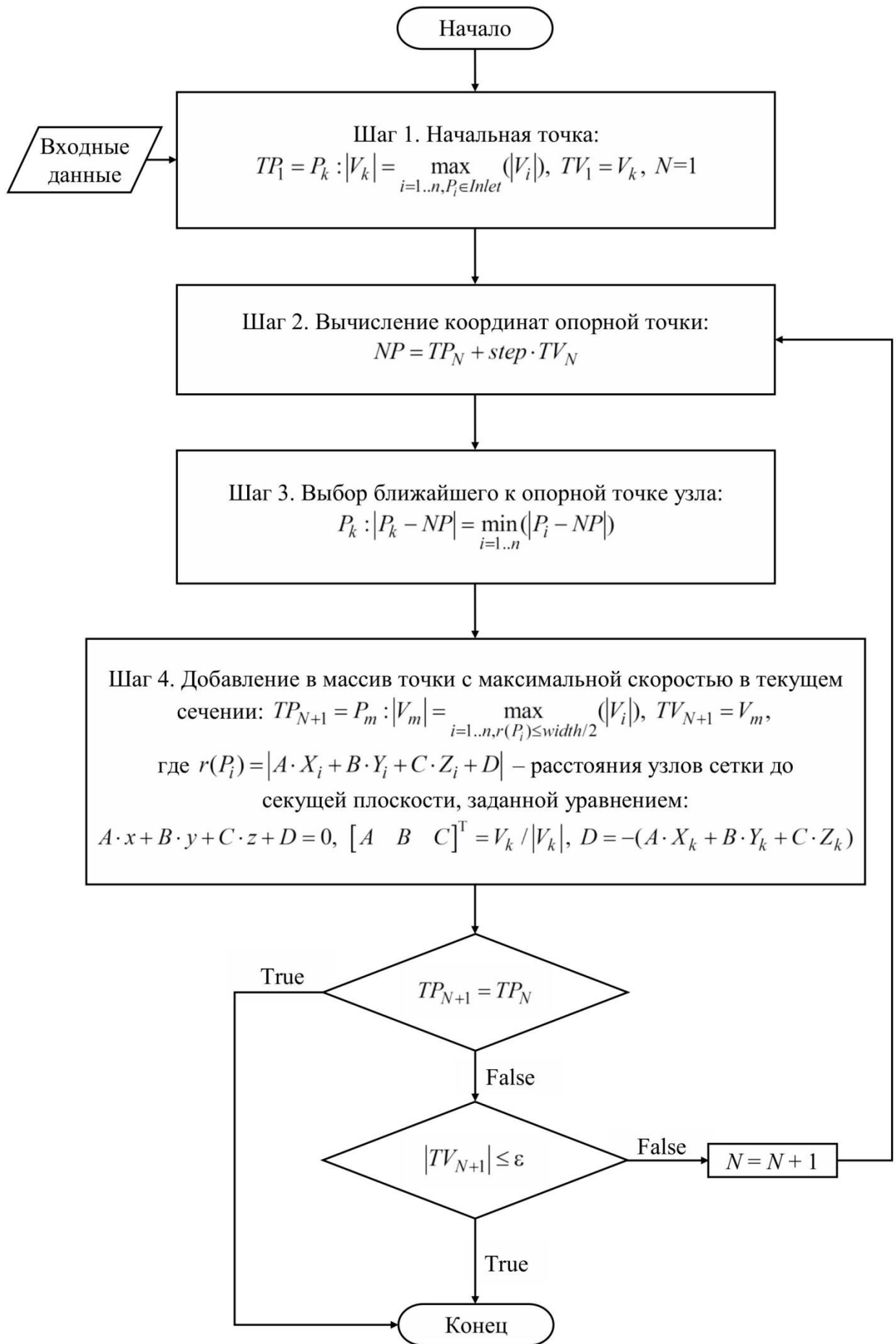


Рисунок А.3 – Блок-схема алгоритма построения максимальных скоростей потока



Рисунок А.4 – Блок-схема алгоритма аппроксимации потока эллиптическими сечениями

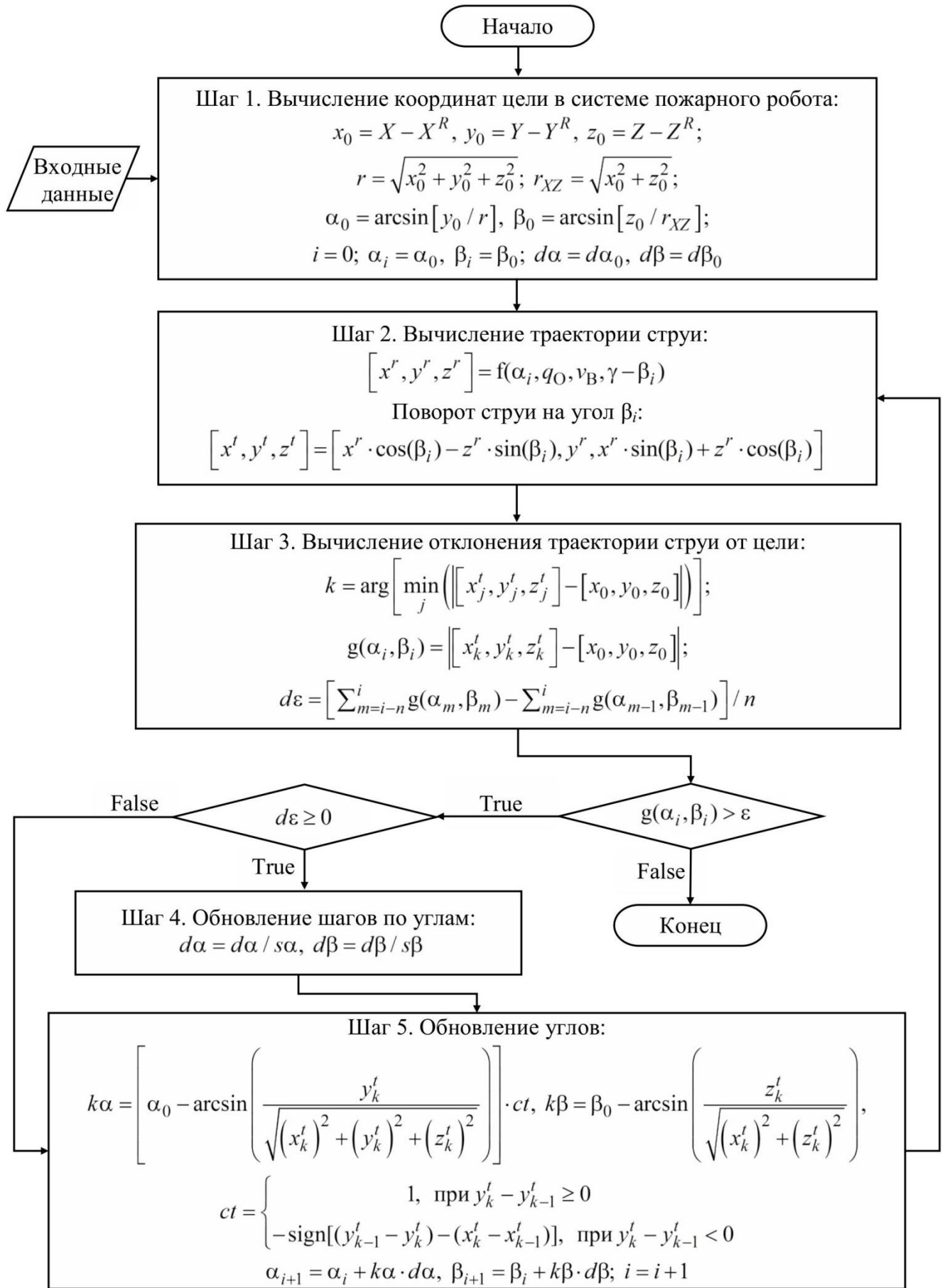


Рисунок А.5 – Блок-схема алгоритма расчета углов наведения газожидкостного потока из ствола пожарного робота на цель

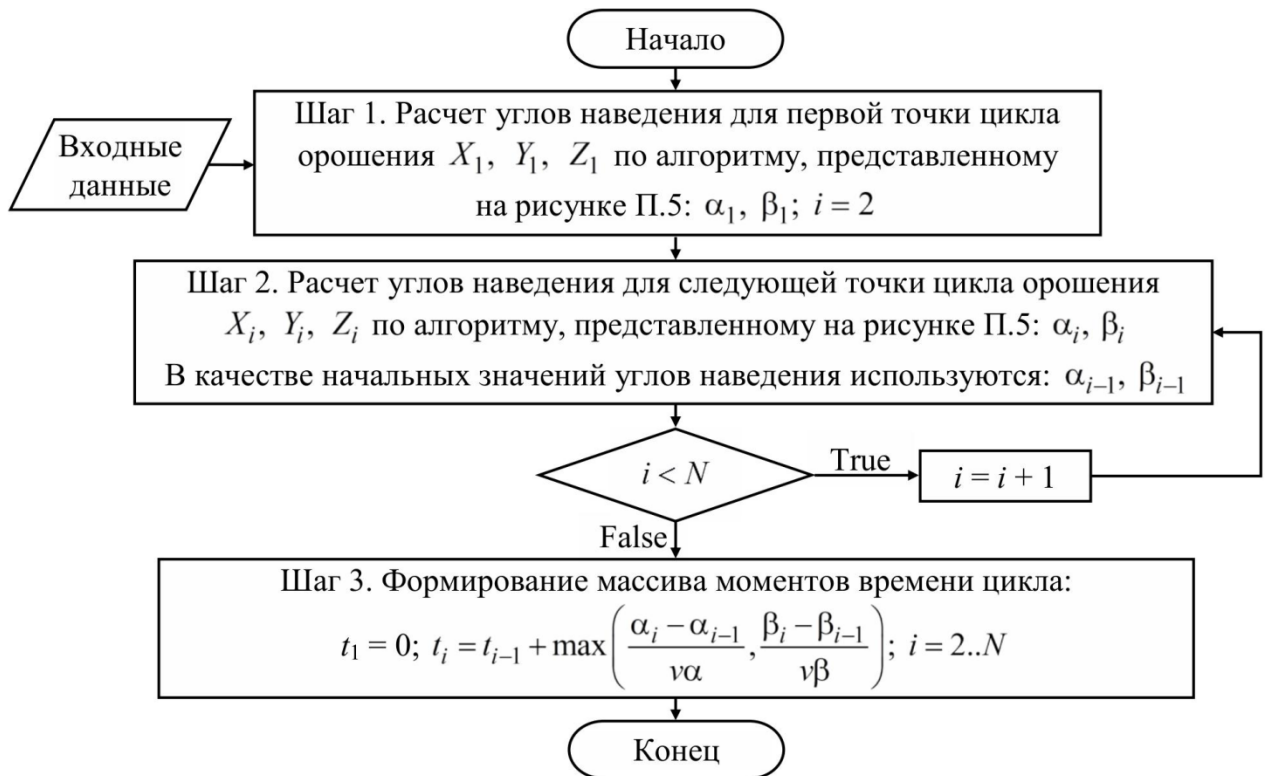


Рисунок А.6 – Блок-схема алгоритма синтеза закона управления пожарными роботами при орошении защищаемых поверхностей

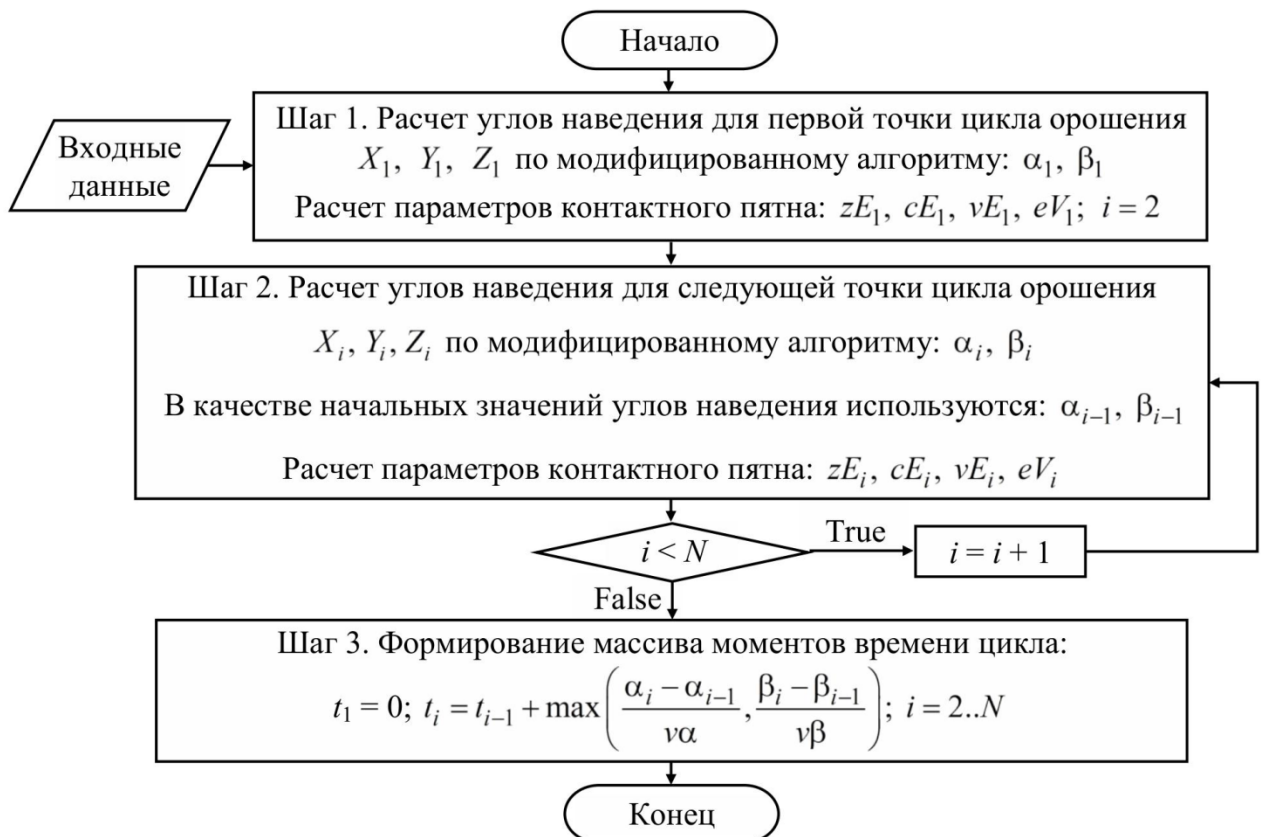


Рисунок А.7 – Блок-схема алгоритма синтеза закона управления пожарными роботами при орошении защищаемых поверхностей с использованием аппроксимации потока эллиптическими сечениями

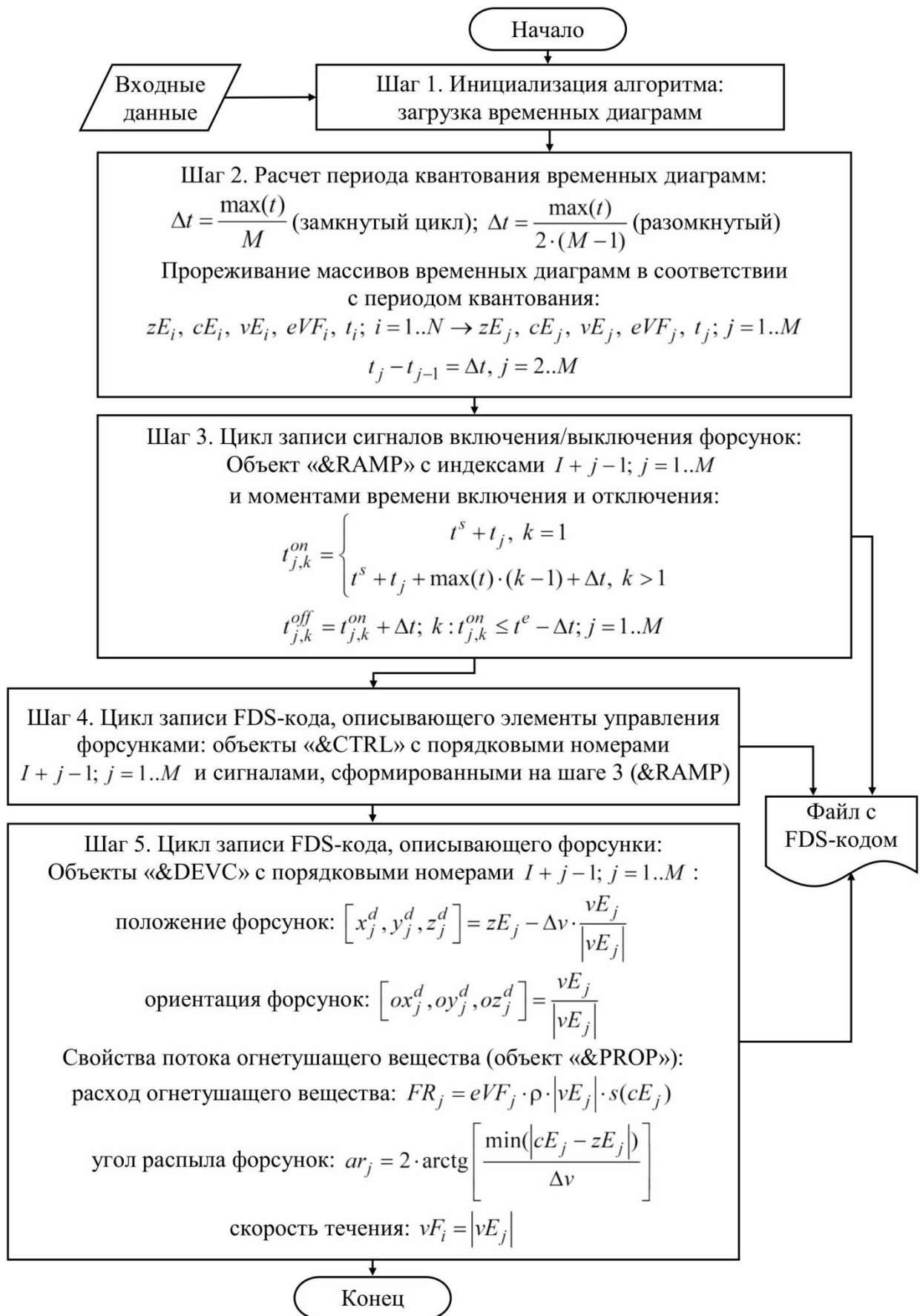


Рисунок А.8 – Блок-схема алгоритма генерации FDS-кода для имитации орошения струей воды из ствола пожарного робота заданной поверхности

Приложение Б
Патент на изобретение № 2830398

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2830398

**Способ прогнозирования траектории струи
огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола
при воздействии на нее ветра на базе нейросетевой
модели и математического моделирования**

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
"Инженерный центр пожарной робототехники "ЭФЭР"
(RU)*

Авторы: *Пожаркова Ирина Николаевна (RU), Горбань Юрий
Иванович (RU), Немчинов Сергей Георгиевич (RU), Ченцов
Сергей Васильевич (RU), Цариченко Сергей Георгиевич (RU)*

Заявка № 2024106218

Приоритет изобретения 11 марта 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 ноября 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 11 марта 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 0692e7c1a63300b5412401670bca2026

Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.11.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



Приложение В
Патент на изобретение № 2843123

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2843123

Способ построения трехмерной модели траектории
струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного
ствола

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Сибирский федеральный университет" (RU)*

Авторы: *Пожаркова Ирина Николаевна (RU), Ченцов Сергей
Васильевич (RU), Климов Алексей Сергеевич (RU),
Краснобаев Юрий Вадимович (RU)*

Заявка № 2025102184

Приоритет изобретения 03 февраля 2025 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 07 июля 2025 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 03 февраля 2045 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 0492e761a6300b54240f670bca2026

Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов



Приложение Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026660615

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026660615

Программа для оценки характеристик газожидкостных
потоков на основе сети Колмогорова-Арнольда

Правообладатель: *Пожаркова Ирина Николаевна (RU)*Автор(ы): *Пожаркова Ирина Николаевна (RU)*

Заявка № 2026619519

Дата поступления 02 апреля 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 апреля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 00a570e4f7d4c38d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

Приложение Д

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025618500

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025618500

Программа для трехмерной реконструкции свободных струй на основе фотограмметрии

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий" (RU)*

Автор(ы): *Пожаркова Ирина Николаевна (RU)*

Заявка № **2025617329**

Дата поступления **04 апреля 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **04 апреля 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0492e1c1a633005f54240f670bca2026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Приложение Е

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025618499

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025618499

**Программа для построения потоковых характеристик
по результатам численного моделирования свободных
струй**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Сибирская пожарно-спасательная академия"
Государственной противопожарной службы Министерства
Российской Федерации по делам гражданской обороны
чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий
стихийных бедствий" (RU)*

Автор(ы): *Пожаркова Ирина Николаевна (RU)*



Заявка № 2025617328

Дата поступления 04 апреля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 04 апреля 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 0492e1c1a33005f54240f870b0ca2026

Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.02.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

Приложение Ж

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024667572

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024667572

**Программа для распознавания струи огнетушащего
вещества из ствола пожарного робота на основе
цифровых изображений**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Сибирская
пожарно-спасательная академия" Государственной
противопожарной службы Министерства Российской
Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным
ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий" (RU)*

Авторы: *Пожаркова Ирина Николаевна (RU), Мельников Алексей
Александрович (RU)*



Заявка № 2024665098

Дата поступления 02 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 июля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b5a0fe3b53164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение И

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023615784

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023615784

Программа для прогнозирования распространения выбросов ТЭЦ с учетом окружающего ландшафта и застройки

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны чрезвычайным ситуациям ликвидации последствий стихийных бедствий" (RU)*

Авторы: *Пожаркова Ирина Николаевна (RU), Гапоненко Арина Викторовна (RU)*



Заявка № 2023614978

Дата поступления 20 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 марта 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e0bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Приложение К

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022619451

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022619451

**Программа для оценки эффективности пожарных
роботов с использованием имитационного
моделирования**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий" (RU)*

Авторы: *Пожаркова Ирина Николаевна (RU), Мельников Евгений Александрович (RU), Сергеев Иван Юрьевич (RU)*

Заявка № 2022618747

Дата поступления 16 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 мая 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e0bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 24.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Приложение Л

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021680889

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021680889

**Программа генерации FDS-кода, имитирующего
развертывание противопожарного экрана**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Сибирская пожарно-спасательная академия"
Государственной противопожарной службы Министерства
Российской Федерации по делам гражданской обороны,
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий
стихийных бедствий" (RU)*

Автор(ы): *Пожаркова Ирина Николаевна (RU)*



Заявка № 2021680624

Дата поступления 16 декабря 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 декабря 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0x02A5CFB00B1ACFS9A40A2F08092E9A118
Владелец: Ивлиев Григорий Петрович
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

Приложение М

Акт внедрения ООО «Инженерный центр пожарной робототехники «ЭФЭР»



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ПОЖАРНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ «ЭФЭР»
(ООО «Инженерный центр «ЭФЭР»)

Limited liability company «Engineering centre of fire robots technology «FR»
(«Engineering centre «FR», LLC)

185031, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Заводская (Северная промзона р-н), д.4

Тел./факс: +7(814 2) 77-49-23, 77-49-31, 57-11-27

e-mail: info@efer.pro, www.firerobots.ru

ИНН 1001293680, КПП 100101001, ОГРН 1151001001898

25.05.2026 г.

Акт

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени
доктора технических наук
Пожарковой Ирины Николаевны

Настоящим удостоверяется, что результаты диссертационной работы Пожарковой Ирины Николаевны, которая посвящена разработке методов и алгоритмов оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах, использованы при решении задач повышения эффективности управления пожарными роботами. Основным объектом внедрения является патент на изобретение RU 2830398 C1 «Способ прогнозирования траектории струи огнетушащего вещества из пожарного лафетного ствола при воздействии на нее ветра на базе нейросетевой модели и математического моделирования».

Использование разработанного способа позволяет повысить точность и скорость оценки параметров струи огнетушащего вещества из ствола пожарного робота при возмущающих воздействиях.

Генеральный директор



С.Г. Немчинов

Приложение Н

Акт внедрения ООО «КОРУФАЙЕР»



АКТ

на внедрение и использования результатов,
полученных в ходе диссертационной работы
Пожарковой Ирины Николаевны

Комиссия в составе: главного конструктора Азаренкова П.В. ООО «КОРУФАЙЕР» и инженера-системотехника ООО «КОРУФАЙЕР» Ткаченко И.В., составила настоящий Акт о том, что при проведении испытаний пожарных лафетных стволов роботизированных, разработанных ООО «КОРУФАЙЕР», использовались методы и алгоритмы оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах, разработанные в ходе диссертационной работы Пожарковой Ирины Николаевны.

Основными объектами внедрения являются: методика проведения натурных испытаний пожарных стволов с использованием многокамерной синхронизированной цифровой съемки, а также методы и алгоритмы расчета по результатам натурных испытаний целевых характеристик газожидкостных потоков, в том числе находящихся под возмущающими воздействиями, позволяющие осуществлять трехмерную реконструкцию траектории струй огнетушащего вещества значительных геометрических размеров.

Внедрение данных методов и алгоритмов позволило оптимизировать процесс проведения испытаний и сократить время на расчет целевых характеристик газожидкостных потоков, а также обеспечить объективную оценку работоспособности оборудования и минимизировать погрешности при моделировании работы пожарных лафетных стволов производства ООО «КОРУФАЙЕР».

Главный конструктор
ООО «КОРУФАЙЕР»
«10» 06 2026 г.

П.В. Азаренков

Инженер-системотехник
ООО «КОРУФАЙЕР»
«10» 06 2026 г.

И.В. Ткаченко

ИНН 7736609718
ОГРН 1097746672495
ОКПО 63740471

ТЕЛ: +7 (495) 725 - 43 - 46
INFO@KORUFIRE.RU
WWW.KORUFIRE.RU

117342, РОССИЯ, Г. МОСКВА,
УЛ. ВВЕДЕНСКОГО, Д.3, К. 1.
СТР. 1 ПОМЕЩ. 1

Приложение П

Справка о внедрении ИБРАЭ РАН



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО
РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Б. Тульская ул., 52, Москва, 115191 • тел: (495) 955 22 86, факс: (495) 958 11 51
pbl@ibrae.ac.ru, www.ibrae.ac.ru • ОГРН 1027700196468, ИНН 7726077310, КПП 772601001

№ _____
На № _____ от _____

Справка
о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук
Пожарковой Ирины Николаевны
«Методы и алгоритмы решения задач оценки характеристик газожидкостных
поток в противопожарных роботизированных системах»

Основные научные и практические результаты диссертационной работы Пожарковой Ирины Николаевны были представлены и рассмотрены на семинаре Научного руководителя создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов - ИБРАЭ РАН (приказ Госкорпорации «Росатом» от 05.10.2020 № 1/1161-П).

По результатам рассмотрения представленные в диссертационной работе методы, математические модели и алгоритмы приняты к использованию 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 (Красноярский край).

Объектом внедрения являются разработанные в диссертационной работе методы и алгоритмы оценки характеристик газожидкостных потоков, численного моделирования параметров свободных струй огнетушащего вещества, прогнозирования их пространственных характеристик и синтеза законов управления противопожарными роботизированными установками.

Практический эффект внедрения заключается в повышении научной обоснованности принимаемых проектных и технических решений при выборе параметров противопожарных роботизированных систем.

Заместитель директора

МП



О.В. Цацулина

Исп.
Тел./ Факс:

Приложение Р

Акт внедрения ГУ МЧС России по Красноярскому краю

УТВЕРЖДАЮ

ИО Начальника управления
организации пожаротушения и
проведения аварийно-
спасательных работ Главного
управления МЧС России по
Красноярскому краю
подполковник внутренней службы

А.В. Метелица



АКТ

о внедрении результатов докторской диссертационной работы Пожарковой Ирины Николаевны

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы **«Методы и алгоритмы решения задач оценки характеристик газожидкостных потоков в противопожарных роботизированных системах»** Пожарковой Ирины Николаевны, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, имеют практический интерес при обосновании применения пожарных роботов для защиты различных объектов.

Использование представленных в работе методов и алгоритмов позволяет выполнить синтез законов управления пожарными роботами для тушения пожара и защиты от нагрева до критических температур строительных конструкций и оборудования с учетом различных факторов.

Высокую значимость результаты диссертационной работы Пожарковой И.Н. имеют с точки зрения решения задач разработки и оценки эффективности средств противопожарной защиты на основе роботизированных установок пожаротушения применительно к нефтеперерабатывающим предприятиям. Это особо актуально для обеспечения безопасности соответствующих объектов, являющихся критически важными для народного хозяйства, в том числе при атаках беспилотными летательными аппаратами.

Начальник отдела организации пожаротушения
Главного управления
МЧС России по Красноярскому краю
подполковник внутренней службы

Д.А. Рабецкий