

На правах рукописи



Балабанов Иван Дмитриевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ВОДЯНЫХ
АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СДЕРЖИВАНИЯ ПОЖАРА**

2.10.1 – Пожарная безопасность

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт–Петербург

2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Бондар Александр Иванович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
доцент
Крутолапов Александр Сергеевич

Кандидат технических
наук, доцент
Елфимова Марина Владимировна

ООО «Пожтехзащита», генеральный директор,
г. Санкт-Петербург

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий", заместитель начальника института по научной работе, г. Екатеринбург

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Академия государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва

Защита состоится **«28» ноября 2025 г.** в **16:00** часов на заседании диссертационного совета У.2.10.1.33 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главный учебный корпус, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» 202__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

А.П. Бызов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена следующими обстоятельствами:

В п.1 ст.117 Федеральном законе №123–ФЗ применен термин «сдерживания пожара», однако в российской нормативной базе определение, разъяснение и требование к данному понятию отсутствует. В то же время, в зарубежной практике уже несколько лет применяются системы, способные не только ликвидировать пожар, но и сдержать его распространение до прибытия пожарных подразделений, подтвердившие свою эффективность.

Системы сдерживания пожара могут быть востребованы для защиты ряда объектов, где применение традиционных автоматических установок пожаротушения (АУП) затруднено или нецелесообразно, например:

- театры, музеи, объекты культурного наследия, где огнетушащее вещество может нанести ущерб;
- объекты в засушливых районах или с экстремально низкими температурами, где недостаточно воды для АУП;
- помещения лечебных и научных учреждений, а также большой площади при отсутствии противопожарных преград.

На сегодняшний день более 50 % перечисленных объектов защищать известными спринклерными автоматическими установками пожаротушения (АУП) технически невозможно или экономически нецелесообразно и большинство из них должны находиться в районах выезда пожарной части, караулами которых обеспечивается проведение боевых действий по тушению пожара, регламентируемых Боевым уставом (приказ МЧС России от 16.10.2017 №444).

Однако до настоящего времени нормативных документов, регламентирующих общие технические требования к спринклерным автоматическим установкам сдерживания пожара (АУСП) и методам их испытаний, позволяющих эффективно реализовать требования Федерального закона №123–ФЗ в части п.1 ст.117 по «снижению скорости увеличения площади пожара и образования его ОФП» не разработано, при этом в зарубежных документах существуют конкретные требования к системам похожих на АУСП, например, в NFPA 13 аналогичный подход именуется «fire control» и подразумевает достаточно широкую трактовку с учётом различий в пожарном законодательстве Российской Федерации. Поэтому для внедрения систем сдерживания пожара в российскую практику необходима разработка нормативных документов, регламентирующих общие технические требования к таким системам и методам их испытаний.

Таким образом, разработка научно–обоснованных подходов к созданию систем сдерживания пожара, адаптированных к российским условиям, является актуальной научно–практической задачей.

Степень разработанности темы.

Состояние и современные тенденции рассматриваемой предметной области актуализируют вопрос о проведении специального исследования, направленного на совершенствование методов и средств в части проектирования АУСП и их применения.

В области разработки методов и средств сдерживания пожаров в помещениях до сегодняшнего дня не было похожих исследований, однако в иностранной нормативной базе учеными такими как Ren, N., Baum, H., Marshall A., было внедрено такое понятие как «fire control», которое было положено в основу исследования систем АУСП. Вопросам динамики опасных факторов пожара (ОФП) в помещениях посвящены исследования Батчера Е., Драйсдейла Д., Кошмарова Ю.А., Парнелла А., Пузача С.В., Снегирёва А.Ю. и др.

Однако состояние и современные тенденции рассматриваемой предметной области актуализируют вопрос о проведении специального исследования, направленного на совершенствование методов и средств в части проектирования АУСП и их применения.

Цель диссертационной работы

- Исследование нового вида автоматической противопожарной защиты – «сдерживания пожара». Разработка автоматических установок сдерживания пожаров класса А и нормативное обоснование их применения.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать содержание понятия «сдерживание пожара» и определить область применения АУСП;
- определить предельные параметры АУСП, при достижении которых обеспечивается сдерживание пожара;
- разработать составные компоненты, обеспечивающие реализацию АУСП;
- обосновать проектно–монтажное решение для реализации системы АУСП;
- сформулировать рекомендации по корректировке нормативной документации в части понятия «сдерживание пожара».

Научная новизна работы

1. Обоснован и введен в научные и нормативно–технический оборот (ГОСТ и СП) термин «автоматическая установка сдерживания пожара» (АУСП) как новый вид автоматической противопожарной защиты, отличающийся от традиционных установок пожаротушения по назначению, принципу действия и критериями эффективности и термин допустимая площадь сдерживания пожара как площадь, в пределах которой пожар может быть ликвидирован силами одного прибывшего караула пожарной охраны.

2. Разработан и апробирован опытный образец АУСП, ориентированный на раннее обнаружение пожара, включающей в себя новый специальный

спринклерный оросители низкого давления с принудительным пуском пожара.

3. Предложена модель динамики развития и обнаружения пожара с учетом действия АУСП позволяющая количественно оценить эффективность сдерживания пожара в различных сценариях пожара и обосновать область целесообразного применения (для объектов 1 и 2 группы).

4. Определены оптимальный конструктивные параметры и технические характеристики новых спринклерных оросителей, обеспечивающие эффективное сдерживание пожара в составе системы АУСП.

5. Установлен методами математическими моделирования и подтвержден подтверждён натурными испытаниями механизм функционирования работы АУСП в условиях сдерживания пожара класса А. Выявлены зависимости влияния интенсивности орошения на распространение пожара, мощность его тепловыделения и концентрацию токсичных продуктов горения.

6. Разработаны и обоснованы методики испытаний и критерии оценки эффективности АУСП допустимые до последующего в требования при оценке эффективности сдерживания пожара на этапе технического нормирования и сертификации.

Теоретическая значимость научных положений, изложенных в работе, состоит разработке теоретической модели процесса сдерживания пожара, включающая ключевые параметры теплообмена, динамики распространения ОФП и отклика системы АУСП, что позволяет спрогнозировать эффективность системы в различных сценариях развития пожара. Обоснованы и введены в научный оборот термины автоматическая установка сдерживания пожара и предельная допустимая зона сдерживания применительно к функционированию автоматических установок противопожарной защиты нового типа.

Практическая значимость результатов исследования в том, что разработаны рекомендации для проектирования и расчета АУСП, включающие определения зоны эффективного покрытия, время пожара в пределах допустимого и сдерживающей интенсивности огнетушащего вещества. Сформулированы предложения по включению системы АУСП в нормативно-техническое регулирования, включая проект нового национального стандарта (ГОСТ Р), критерии оценки эффективности и методы испытания. Предложен новый подход к проектированию и нормированию автоматических систем противопожарной защиты, основанной на концепции превентивного ограничения распространения пожара в том числе за счет предварительного смачивания пожарной нагрузки, а не полной ликвидации горения. Получены патенты на технические решения в области сдерживания пожара, подтверждающие оригинальность разработанных конструкций.

Методология и методы исследования основаны на компьютерном и физическом моделировании ОФП в помещениях, теории марковских процессов, основных научных принципах и положениях пожарного дела.

Положения, выносимые на защиту. Соискателем получены следующие основные результаты, выносимые на защиту:

1. Теоретическое обоснование термина «АУСП» как самостоятельный тип автоматической противопожарной защиты и «зоны предельно допустимой площади» как зоны ограничения развития пожара до прибытия подразделения пожарной охраны.

2. Способ сдерживания пожара, заключающийся в подаче огнетушащего вещества с дозированной интенсивностью для ограничения роста площади пожара и развития ОФП, защиты конструктивных элементов и проёмов.

3. Модель функционирования АУСП на основе марковских цепей, подтверждённая результатами натурных испытаний и отражающая особенности запуска, режима работы системы и согласованностью со временем прибытия первых прибывших пожарных подразделений.

4. Конструктивные параметры и технические характеристики спринклерных оросителей и иных элементов, обеспечивающие эффективную реализацию функции сдерживания пожара в составе систем АУСП.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований в части обоснования способа сдерживания ОФП при пожаре класса А на защищаемых объектах.

6. Практические рекомендации по проектированию и применению АУСП, а также нормативные положения в национальный стандарт ГОСТ Р 71080 и СП 485.1311500.2020.

Степень достоверности основных полученных в диссертации результатов обеспечивается корректной постановкой задачи, корректностью использования математического аппарата, непротиворечивостью и согласованностью результатов работы с результатами, полученными другими авторами, корректным использованием апробированных методик, а также результатами экспериментов. Результаты экспериментальных исследований и апробации установок в условиях натурных огневых испытаний на базе атtestованных лабораторий подтверждают теоретические положения и эффективность разработанных решений.

Тема отвечает следующим направлениям исследования паспорта специальности 2.10.1 – Пожарная безопасность: п.13 «Разработка научных основ создания систем, методов и технических средств обнаружения, предупреждения и ликвидации аварий, пожаров и взрывов», п.15 «Исследование условий, разработка и совершенствование методов оценки и способов снижения пожарных рисков на объектах защиты и прилегающих к ним территориях» и п.17 «Разработка и научное обоснование систем противопожар-

ной защиты и технических средств, а также объёмно–планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, обеспечивающих безопасность людей и ограничение распространения опасных факторов пожара, аварий и взрывов».

Перспектива исследования:

- 1) Введены и обоснованы термины АУСП как отдельных класс противопожарных систем, ориентированных на сдерживания очага пожара до прибытия первых прибывших подразделений и
- 2) Введен и обоснован термин предельная площадь сдерживания
- 3) Экспериментально обосновано влияние интенсивности АУСП на распространение пожара, тепловыделения пожара. Показано, что до такой интенсивности сдерживается, а после нет
- 4) Определены и обоснованы оптимальные параметры АУСП и конструктивных параметров площадь, технические характеристики,

Апробация результатов. Основные результаты, полученные в процессе проведенных исследований, обсуждались и получили одобрение научной общественности на Международных конференциях.

Реализация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы внедрены в Санкт–Петербургском университете ГПС МЧС России. Внедрение результатов диссертационного исследования подтверждается соответствующими актами.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ (7 из них – в журнале, входящем в международную базу, 2 – в базу Scopus), а также в материалах научно–практических конференций. Получены 2 патента РФ на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, 4 главы с выводами, заключение, список сокращений, словарь терминов, список литературы из 113 наименований и приложения; изложена на 115 страницах (без учёта приложений), включает 59 рисунков и 11 таблиц.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определена степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, определена методология исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведена степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе – «Водяные автоматические установки сдерживания пожара как важная составляющая систем противопожарной защиты» приведены основные сведения о водяных автоматических установках пожаротушения. Значительное внимание уделено сравнительному анализу трех основных стандартов для проектирования и установки водяных

автоматических систем сдерживания пожара: EN 14972 (Европейский стандарт), NFPA 750 (американский стандарт) и недавно разработанному российскому стандарту ГОСТ Р 71080–2023.

Отличие стандартов к проектированию заключается в количестве существующих систем и подходов. У европейских и американских стандартов система сдерживания пожара является независимой частью комплекса противопожарной защиты. При этом у российского стандарта система сдерживания пожара входит в состав более широкой системы защиты от пожаров и при отсутствии воды или длительном времени работы системы реализация тушения пожара становится невозможной.

В связи с этим проектировщики по европейским и американским стандартам закладывают альтернативные системы пожаротушения, указанные в таблице 1. Это позволяет обеспечить эффективную защиту от пожаров даже при отсутствии воды или длительном времени работы системы.

Сравнительный анализ показывает, что европейские и американские стандарты обеспечивают более гибкий и эффективный подход к проектированию систем водяных автоматических систем пожара. Они учитывают различные условия применения и требуют комплексного тестирования системы. Поэтому в России был разработан стандарт ГОСТ Р 71080–2023, который учитывает опыт европейских и американских стандартов, но сохраняет при этом уникальные особенности российской системы защиты от пожаров.

Показано, что в России особым видом водяных автоматических установок пожаротушения являются АУСП, которые должны применяться в помещениях, где использование других АУП нецелесообразно или технически невозможно. Необходимость разработки АУСП установлена на законодательном уровне.

Основные задачи АУСП:

- а) сдерживание роста площади пожара;
- б) сдерживание распространения ОФП;
- в) защита строительных конструкций и проёмов.

На рис.1 приведена характерная схема АУСП применительно к решению данных задач, хотя конкретный её вид должен выбираться проектировщиком, исходя их особенностей защищаемого объекта.

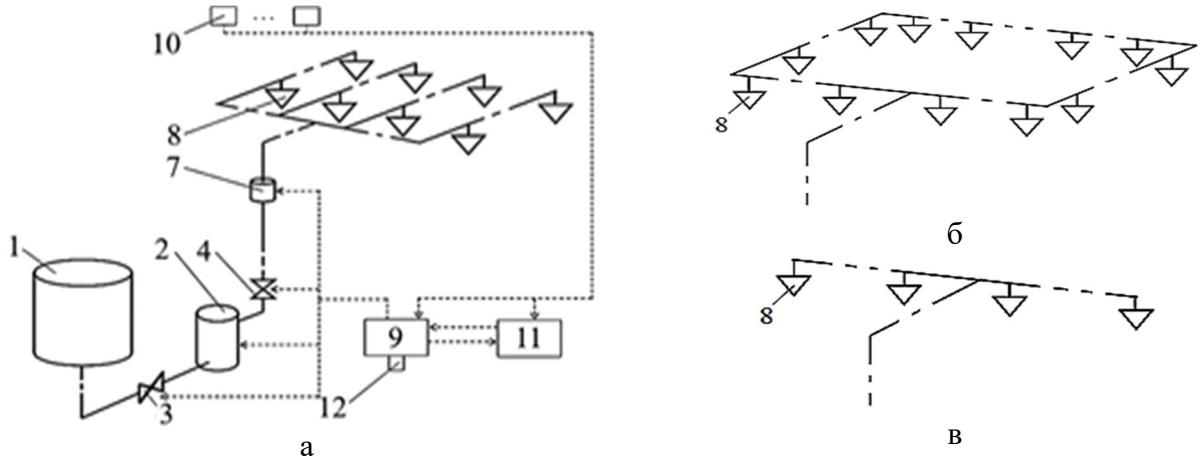


Рисунок 1 – Схема АУСП (а – с расположением оросителей применительно к решению задачи «а»; б, в – расположение оросителей для решения задач «б» и «в» соответственно). Обозначения: 1 – ёмкость для воды; 2 – насосная установка; 3–6 – вентили; 7 – регулятор интенсивности подачи воды; 8 – оросители; 9 – блок управления; 10 – пожарные извещатели; 11 – диспетчерская; 12 – пускатель.

Применительно к задаче «а» сформулировано условие: площадь пожара S на момент первого прибывшего пожарного караула должна быть не больше такой, ликвидировать горение на которой он может самостоятельно без привлечения дополнительных сил и средств. Динамика площади пожара при срабатывании АУСП может быть оценена из выражения:

$$S(t) = k_{\phi} \pi \left\{ \left[\int_0^{t_a} V_h(t) dt \right]^2 + \left[\int_{t_a}^t V_I(t) dt \right]^2 \right\}, \quad (1)$$

где t , t_a – текущее время и время активации оросителя АУСП (в течение времени t_a пожар развивается свободно), отсчитываемые от начала возгорания, с; V_h – нормативная (табличная) линейная скорость распространения пламени по пожарной нагрузке; V_I – линейная скорость распространения пламени при подаче ОТВ (воды) АУСП с интенсивностью I ($\text{л}/\text{с}/\text{м}^2$); k_{ϕ} – коэффициент формы (например, $k_{\phi}=1$ при круговой форме пожара, $k_{\phi}=0,5$ при пожаре у стены помещения, $k_{\phi}=0,25$ при пожаре в углу).

Величина V_I зависит от интенсивности I подачи воды спринклерами АУСП и может быть оценена по выражению:

$$V_I \approx V_h \left(1 - \frac{I}{I_h} \right) \quad (2)$$

(I_h – нормативная интенсивность подачи ОТВ, например, для культурно-зрелищных объектов $I_h=0,15 \div 0,20 \text{ л}/\text{с}/\text{м}^2$).

На рис.2 приведен сопоставительный график изменения площади пожара S и расхода воды q , подаваемой на площадь пожара с применением АУП и АУСП.

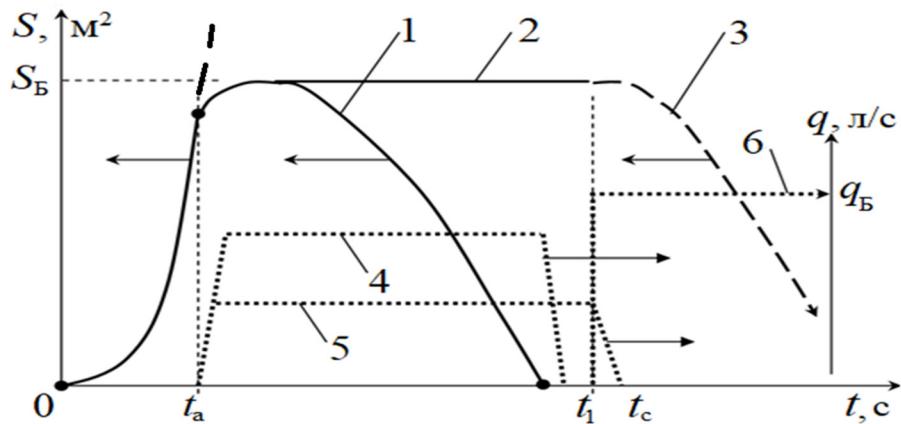


Рисунок 2 – Сопоставительный график изменения площади пожара S и расхода воды q , подаваемой на площадь пожара с применением АУП и АУСП (1 – динамика площади пожара при тушении АУП; 2 – площадь пожара при включении АУСП; 3 – снижение площади пожара при подаче стволов пожарными; 4, 5 – расходы воды при срабатывании АУП и АУСП соответственно; 6 – расход стволов, подаваемых на тушение прибывшим пожарным подразделением; S_B – площадь, на которой пожар сдерживается; q_B – расход воды, подаваемый пожарными; t_1 – время начала подачи воды пожарными; t_c – время окончания работы АУСП)

Во второй главе – «Основные принципы проектирования автоматических установок сдерживания пожара» приведены выражения для оценки необходимых расходов воды q_B применительно к задачам сдерживания распространения ОФП (в т.ч. увлажнения пожарной нагрузки на пути распространения пожара) и защиты строительных конструкций и проёмов.

Показано, что АУСП могут применяться для защиты проёмов (окна, двери) в стенах (рис.3-а) и разделения помещения большой протяжённости на зоны «цепью» оросителей (рис.1-в). При этом важным моментом работы АУСП является смачивание (увлажнение) пожарной нагрузки на пути развития пожара (рис.3-б), что позволяет замедлить его развитие.

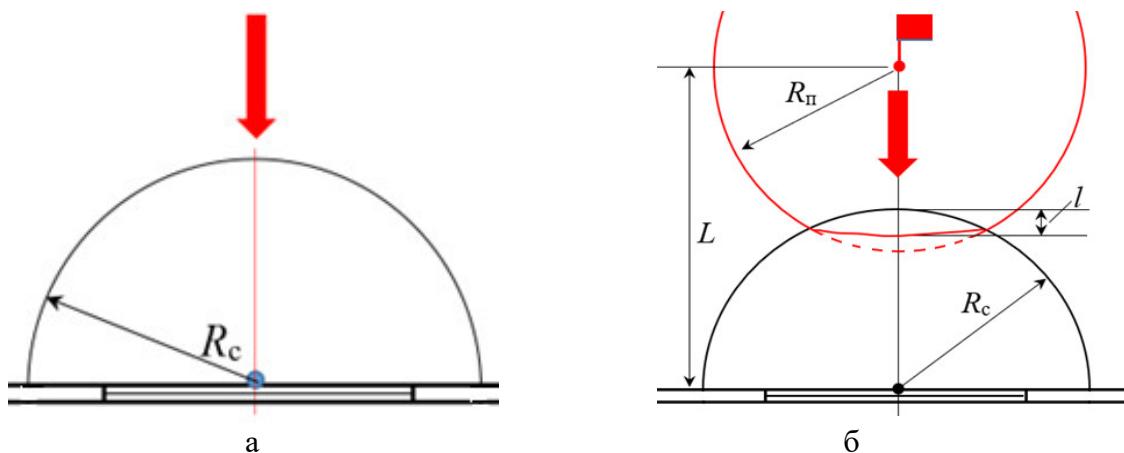


Рисунок 3 – Расчётные схемы для оценки эффективности АУСП (а – защита проёма в стене, б – увлажнение площади помещения для замедления развития пожара к проёму)

Основные показатели функционирования АУСП в режиме увлажнения пожарной нагрузки представлены на рис.4, откуда следует, что чем

больше масса m воды подана на орошающую площадь пожарной нагрузки ($m_{\text{п}}$ – масса воды, соответствующая полному насыщению; t_{A} – время активации оросителя АУСП; $t_{\text{п}}$ – время насыщения пожарной нагрузки; t_{h} – время достижения фронтом пламени участка, защищаемого АУСП; l_0 – глубина защищаемого участка, например, для схемы на рис.3–а, $l_0=R_c$), тем меньше линейная скорость V распространения пламени (рис.4–б) и тем меньший путь l пройдёт фронт пламени (рис.4–в).

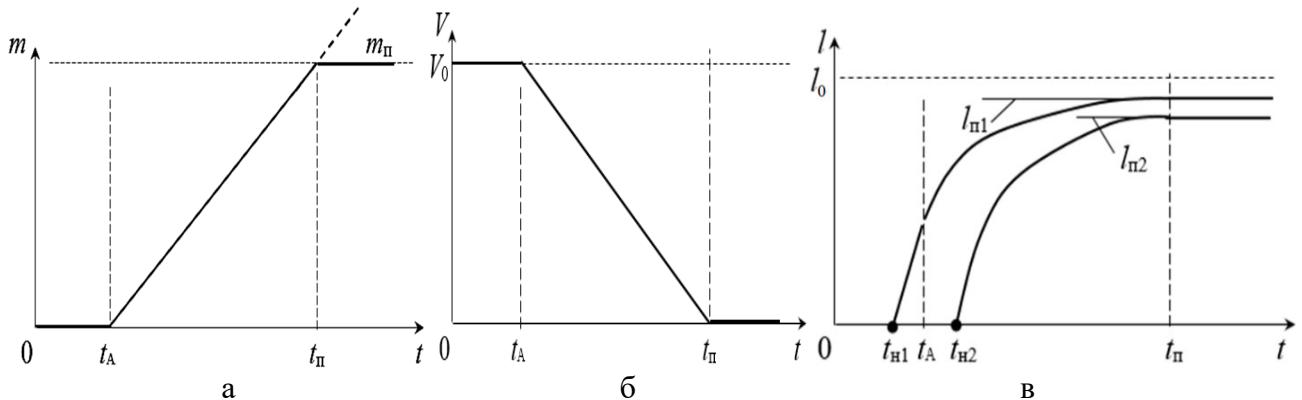


Рисунок 4 – Показатели, определяющие функционирования АУСП (а – динамика увлажнения пожарной нагрузки, б – снижение линейной скорости V распространения пламени при увлажнении пожарной нагрузки; в – динамика пути l , пройденного фронтом пламени)

Показано, что необходимый запас ОТВ (воды) $m_{\text{АУСП}}$ для АУСП в зависимости от установленного времени t_c сдерживания пожара и расхода $G_{\text{АУСП}}$ (кг/с) можно оценить с использованием следующего выражения:

$$m_{\text{АУСП}} \geq t_c G_{\text{АУСП}}. \quad (3)$$

При этом масса $m_{\text{АУСП}}$ будет значительно отличаться в меньшую сторону от необходимого запаса воды для АУП.

Применительно к задаче «в» Удельный расход воды q_v [кг/с/м] из оросителей АУСП для сдерживания нагрева вертикальной поверхности высотой h и шириной L может быть оценен из выражения:

$$q_v \approx k_z \frac{(Q_{\text{п}} - Q_{\text{k}})hL}{r_z L_o} \quad (4)$$

($k_z \geq 1$ – коэффициент запаса; $r_z \approx 2,3$ МДж/кг – удельная теплота парообразования; L_o – ширина орошения; $Q_{\text{п}}$, Q_{k} – удельная мощность соответственно излучения от пожара и допустимая для защищаемой конструкции, кВт/м²). Величину q_v , поскольку 1 кг воды ≈ 1 л, можно трактовать как интенсивность сдерживающего орошения, а для защиты проёма можно полагать $Q_{\text{k}} \approx 0$.

Сравнительный анализ (табл.2) показывает, что оба стандарта имеют свои сильные стороны и могут быть применены в различных условиях. Выбор конкретного стандарта зависит от специфики объекта, местных норм и требований к пожарной безопасности. Важно учитывать, что использование систем сдерживания может иметь различные последствия для окружающей

среды и здоровья людей, поэтому необходимо тщательно оценивать преимущества и недостатки каждого подхода.

Таблица 1 – Сравнение особенностей нормативных документов

Документы	NFPA 750	ГОСТ Р 71080
Стандарты охватывают различные аспекты проектирования и установки систем	В основном фокусируется на автоматических противопожарных системах	Подразделяет АУСП по функциональному назначению, по типу оросителей (дренчевые, спринклерные с принудительным пуском) и по времени срабатывания
Различия в подходах к расчету и проектированию: Реализация системы сдерживания пожара у них и у нас	Использует более детальный подход к расчету количества оросителей и распределительных сетей	Предлагает более гибкий подход, учитывающий специфику различных помещений и объектов.
Основные требования к двум подходам	Имеет строгие требования к материалам и конструкциям зданий для обеспечения надежности системы, а также требования, которые будут в дальнейшем к данным системам применяться	Более адаптирован к российским условиям эксплуатации и строительства

В главе приведена структура ГОСТ Р 71080–2023, включающая область применения, нормативные ссылки, термины и определения, сокращения, классификацию, общие технические требования, методы испытаний, транспортировку и хранения, а также приложения А, Б и библиографию.

В третьей главе – «Реализация технологии систем АУСП и ее моделирование» приведены сведения о моделях, позволяющих оценивать уровни и динамику ОФП. Показано, что к настоящему времени в пожарной охране известны и активно применяются следующие модели пожара (табл.3), позволяющие оценить динамику его ОФП в помещении: интегральная, зонная и полевая, а также пожарно-тактическая.

Важное место в работе занимает моделирование этапов цикла функционирования АУСП с использованием теории цепей Маркова. Приведены основные теоретические положения этой теории и построена модель, включающая этапы нормальной работы защищаемого объекта (АУСП не задействуется), штатного и нештатного срабатывания АУСП; отказа, ложного срабатывания и др. Показано, что с учётом общепринятых допущений объект, защищаемый АУСП, может пребывать в 9-и состояниях $S_1 \div S_9$ (табл.4), связанных между собой интенсивностями переходов $\{\lambda\}$, как показано на графике (рис.5).

Таблица 2 – Модели пожара, применяемые для оценки ОФП

Характе- ристики	Модели			
	интегральная	зонная	полевая	Пожарно-тактическая
Этапы	Свободное развитие пожара		Все – от возгорания до ликвида- ции	
Что позво- ляет	Оценить дина- мику среднеобъем- ных величин ОФП	Оценить ди- намику ОФП в зонах кон- вективной ко- лонки, резер- вуара дыма и остальном пространстве помещения	Оценить динамику ОФП в каждой точке по- мещения (в здании, сооруже- нии)	Оценить динамику площади по- жара, площади тушения и риск разрушения конструкций от огне- вого воздействия, определить ранг (номер) вероятного пожара, доста- точность противопожарного водос- набжения, дать заключение о привлечении необходимых сил и средств пожарной охраны и реко- мендации участникам тушения и администрации объекта
	Определить необходимое время эвакуации и риска наступления предельного состояния ограждающих и несущих конструкций			
Исход- ные данные	Размеры по- мещения и проемов, вид и масса по- жарной нагрузки	Размеры помещений и про- емов, вид, масса и расположение пожарной нагрузки		Размеры (этажность) здания, со- оружения, помещений; категории по ВПО; пределы огнестойкости ограждающих и несущих кон- струкций; вид и расположение по- жарной нагрузки; генплан;
Досто- инства	Большая про- стота, наличие аналитиче- ских выраже- ний	Относитель- ная простота, наличие ана- литических выражений	Высокая точность	Относительная простота, нагляд- ность, наличие справочных дан- ных и аналитических выражений
Недо- статки	Ограниченнaя точность и применимость для относи- тельно не- больших по- мещений	Ограниченнaя точность	Необходи- мость спе- циального программ- ного обес- печения	Ограниченнaя точность и учет только двух ОФП – площади по- жара и зоны задымления, субъек- тивизм (многовариантность реше- ний)

Таблица 3 – Состояния объекта, защищаемого АУСП

Состояния	Пояснения
S_1	Режим нормального функционирования, АУСП не задействована
S_2	Пожар
S_3	АУСП сработала штатно, пожар ликвидирован первичными средствами
S_4	АУСП сработала, но задачу не выполнила
S_5	АУСП не сработала (отказ) или отключена
S_6	Тушение пожара прибывшими пожарными подразделениями
S_7	Проведение ремонтно–восстановительных работ
S_8	Ложное срабатывание АУСП
S_9	Восстановление готовности АУСП

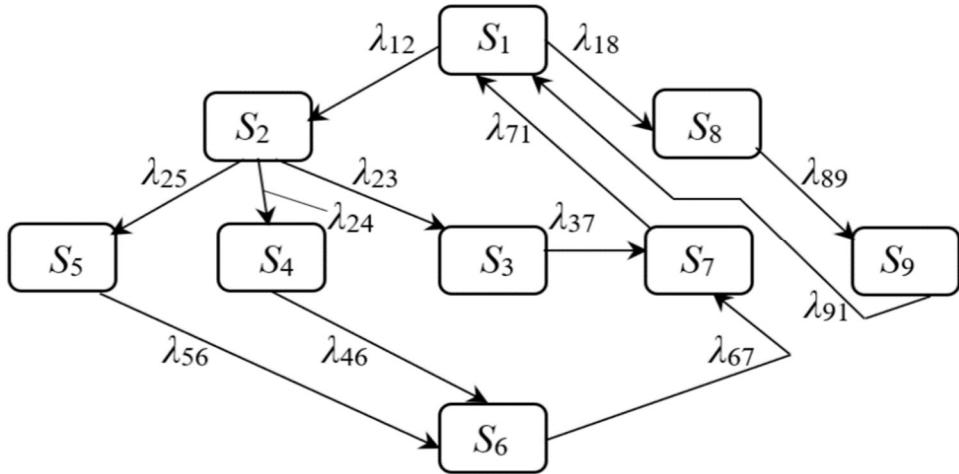


Рисунок 5 – Граф переходов применительно к функционированию АУСП

Численные значения некоторых интенсивностей могут быть найдены из справочной литературы. Например, для музеев частота возникновения пожаров $\lambda_{12}=1,38 \cdot 10^{-2}$ год $^{-1}$. Также может быть учтено, что частота отказов оросителей $1,7 \cdot 10^{-4}$ год $^{-1}$, частота их нештатного срабатывания $0,08$ год $^{-1}$, неисправностей трубопроводов $7,3 \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$. Частота ложных срабатываний АВСП λ_{18} может быть оценена статистическими методами.

Показано, что графу переходов на рис.5 соответствует система линейных дифференциальных уравнений ($\{p\}$ – вероятности состояний $\{S\}$):

$$\begin{cases} p_1 = \left[1 + (\alpha_{23} + \alpha_{24} + \alpha_{25})^{-1} \left(1 + \frac{\alpha_{23}}{\alpha_{37}} + \frac{\alpha_{24}}{\alpha_{46}} + \frac{\alpha_{25}}{\alpha_{56}} + \frac{\alpha_{24} + \alpha_{25}}{\alpha_{67}} \right) + \frac{1}{\alpha_{71}} + \frac{\alpha_{18}}{\alpha_{89}} + \frac{\alpha_{18}}{\alpha_{91}} \right]^{-1}, \\ \begin{bmatrix} p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} = \frac{p_1}{\alpha_{23} + \alpha_{24} + \alpha_{25}} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha_{23}\alpha_{37}^{-1} \\ \alpha_{24}\alpha_{46}^{-1} \\ \alpha_{25}\alpha_{56}^{-1} \\ (\alpha_{24} + \alpha_{25})\alpha_{67}^{-1} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} p_7 \\ p_8 \\ p_9 \end{bmatrix} = p_1 \begin{bmatrix} \alpha_{71}^{-1} \\ \alpha_{18}\alpha_{89}^{-1} \\ \alpha_{18}\alpha_{91}^{-1} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

(здесь $\alpha_{ij} = \lambda_{ij}/\lambda_{12}$ – нормированная интенсивность).

Система уравнений (5) позволяет решать задачи анализа и синтеза АУСП. В первом случае по заданным интенсивностям переходов $\{\lambda\}$ или $\{\alpha\}$ можно определить вероятности состояний $\{p\}$ и, прежде всего, вероятность p_1 нормального функционирования объекта, защищаемого АУСП. Если вероятность p_1 больше или равна допустимому значению $p_1^{\text{доп}}$, то защита АУСП признаётся эффективной. Иначе необходимо принимать меры по повышению вероятности p_1 . Во втором случае (синтез АУСП), соответствующем проектированию или модернизации АУСП, по заданному условию $p_1 \geq p_1^{\text{доп}}$

и интенсивности λ_{12} возникновения пожаров подбираются другие интенсивности, например, λ_{37} и/или λ_{71} .

В главе показано, что наиболее приемлемой для моделирования развития и сдерживания пожара является полевая модель, реализуемая в программе FDS с учётом визуализации с помощью PyroSim. Проведенное моделирование на примере помещения класса функциональной пожарной опасности Ф1.2 показало, что на 20–й секунде (рис.6–а) наблюдается устойчивое горение, на 34–й секунде запускается АУСП, на 122–й секунде пожар сдержан и к моменту прибытия пожарного подразделения его площадь не более 49 м^2 (рис.6–б), т.е. пожар может быть потушен одним подразделением.

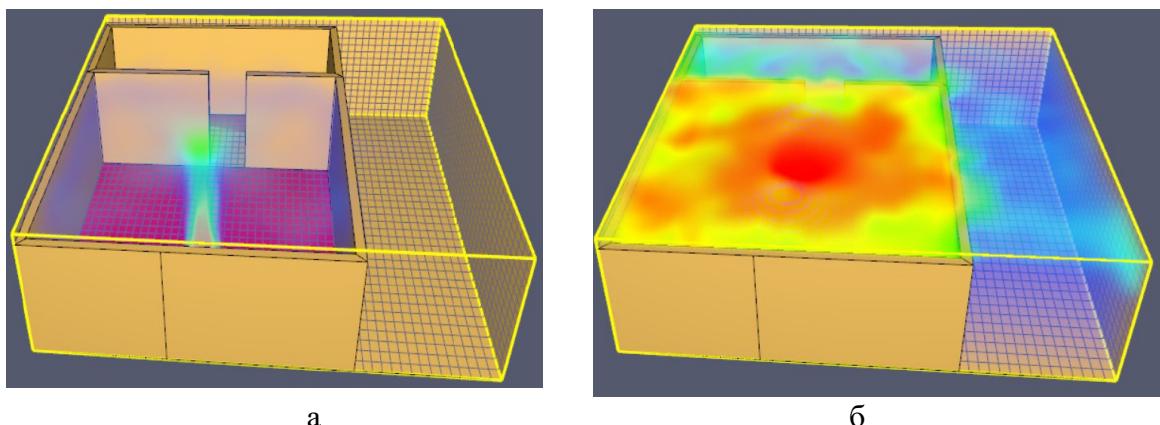


Рисунок 6 – Моделирование распространения и сдерживания пожара с использованием полевой модели и Pyrosim

Сделан вывод о необходимости экспериментальных исследований для оценки эффективности АУСП.

Третья глава – «Экспериментальные исследования и рекомендации к практическому применению АУСП» посвящена вопросам разработки специального оросителя (рис.7–а), который может использоваться в АУСП, а также рекомендации к практическому применению данных систем. При этом решались две взаимосвязанные задачи:

- определение равномерности орошения для спринклеров с различными дефлекторами (рис.7–б,в,г);
- оценка возможности сдерживания развития пожара посредством увлажнения пожарной нагрузки;
- оценка возможности сдерживания ОФП при пожаре в углу помещения из CLT–панелей, поскольку такой пожар, во–первых, развивается быстрее, а, во–вторых, его пламя и тепловой поток воздействуют непосредственно на несущие конструкции помещения.

Для решения задачи «а» был использован экспериментальная стенд (рис.8–а) с 20–ю мерными банками, располагаемыми на равных расстояниях $\sim 3,8 \text{ м}$ в плане от испытуемого оросителя (рис.8–б) из условия орошения

площади 36 м². Предполагается, что если ороситель способен обеспечить необходимую интенсивность орошения в местах расположения мерных банок, то и внутри зоны орошения она также будет обеспечена.

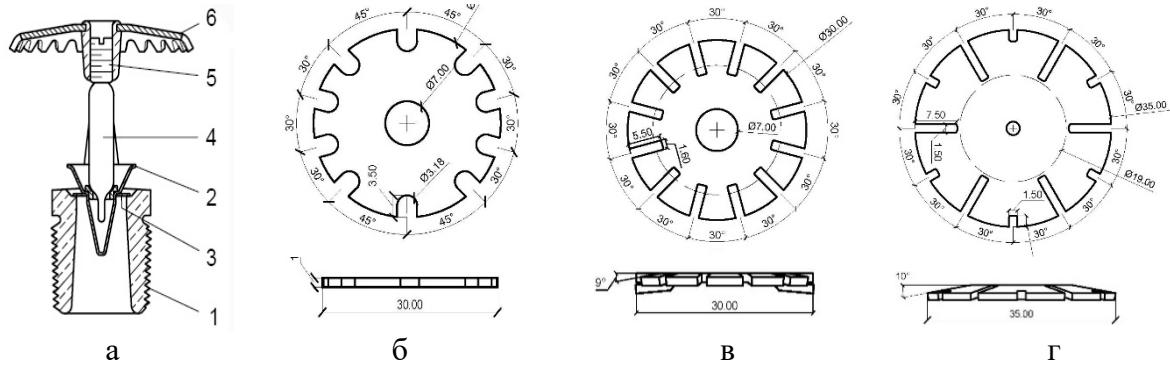


Рисунок 7 – Оросители для АУСП – общая схема (а) и варианты исполнения дефлектора (б–г). Обозначения: 1 – корпус, 2 – заглушка клапана, 3 – уплотнительный узел, 4 – колба, 5 – прижимной винт, 6 – дефлектор/розетка

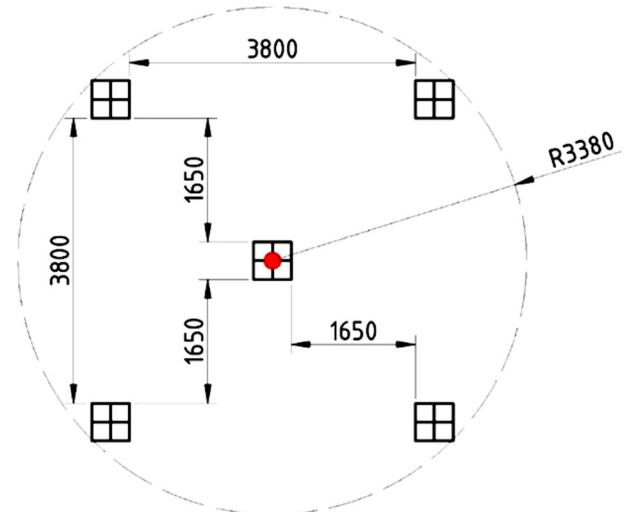


Рисунок 8 – Экспериментальный стенд (а) и план расположения мерных банок на плане (б). Испытуемый ороситель расположен в середине и отмечен красной точкой

В ходе испытаний поочерёдно осуществлялась проливка всех трёх типов дефлекторов (рис.7-б,в.г) в течение $t_3=180$ с при давлении на входе оросителя 0,3 МПа для двух коэффициентов производительности корпуса спринклера – $K=0,42$ и $0,3 \text{ л/с} \cdot \text{м}^{0,5}$. Было проведено 6 экспериментов, по (табл.5) окончании каждого с помощью электронных весов производилось взвешивание воды, оказавшейся в каждой i -й банке, после чего определялась интенсивность:

$$I_i = \frac{V_i}{S_6 t_3}, i=1,\dots,n, \quad (6)$$

где V_i – объём воды, собранный в i -й мерной банке, л; t_3 – продолжительность орошения, с; S_6 – площадь мерной банки, м²; n – число мерных банок.

Результаты оценок интенсивностей по выражению (6) для экспериментов 1÷6 при $t_3 = 180$ с, $S_6 = 0,0625$ м² и $n=20$ приведены в табл.6.

Таблица 4 – Эксперименты по определению равномерности орошения

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6
K , л/с/м ^{0,5}		0,42			0,30	
Дефлектор, рис.11	б	в	г	б	в	г

Таблица 5 – Результаты определения интенсивностей орошения

№ банки	№ эксперимента					
	1	2	3	4	5	6
1	0,04089	0,03733	0,04444	0,02667	0,03022	0,01956
2	0,04444	0,05511	0,03733	0,03200	0,03200	0,02844
3	0,03022	0,04267	0,04267	0,02489	0,02844	0,01600
4	0,03911	0,05333	0,03022	0,05333	0,04978	0,02133
5	0,05156	0,05511	0,03022	0,04267	0,03200	0,03200
6	0,03911	0,03200	0,01956	0,03556	0,02133	0,02844
7	0,04444	0,06044	0,01778	0,04089	0,03022	0,03911
8	0,03022	0,03556	0,01067	0,03200	0,01956	0,03200
9	0,02489	0,05156	0,02844	0,03733	0,02667	0,03378
10	0,02489	0,04800	0,03022	0,03911	0,02133	0,04978
11	0,02311	0,04978	0,01956	0,03200	0,01244	0,03378
12	0,01600	0,05156	0,02311	0,03200	0,01422	0,03378
13	0,02311	0,05333	0,03200	0,01422	0,01600	0,02844
14	0,02489	0,04800	0,02844	0,01600	0,01778	0,02133
15	0,02489	0,04622	0,03733	0,01600	0,02133	0,02667
16	0,02133	0,04089	0,02844	0,01600	0,01778	0,01956
17	0,02311	0,04622	0,03022	0,01600	0,02844	0,03378
18	0,02489	0,06933	0,04089	0,01600	0,03378	0,03733
19	0,02489	0,05333	0,04089	0,01778	0,02844	0,03733
20	0,02667	0,06044	0,05156	0,01600	0,03022	0,03200
I_{cp}	0,03013	0,04951	0,03120	0,02782	0,02560	0,03022
σ	0,00959	0,00901	0,01013	0,01153	0,00868	0,00805
R	0,31827	0,18208	0,32469	0,41425	0,33901	0,26651
K	0,6	0,45	0,6	0,5	0,45	0,45

Обработка результатов испытаний позволила определить средние интенсивности и среднеквадратические отклонения соответственно

$$I_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - I_{cp})^2}{n-1}}, \quad (8)$$

для каждого типа дефлектора, а по величинам I_{cp} и σ – коэффициент равномерности орошения

$$R = \frac{\sigma}{I_{\text{cp}}} . \quad (9)$$

Значения I_{cp} , σ и R , рассчитанные по выражениям (7)–(9), приведены в нижней части табл.6.

Учитывая, что коэффициент R не должен превышать 0,5 при средней нормативной интенсивности не менее нормативного и количество банок с интенсивностью менее 50% от нормативного не должно превышать двух, то успешно прошедшими испытания считается ороситель в опыте №2.

Для обоснования процесса замедления скорости распространения пламени по пожарной нагрузке при её увлажнении с использованием АУСП (задача «б») был проведен эксперимент, в ходе которого был оборудован специальный очаг пожара, состоящий из двух частей (рис.9–а). Вначале воспламенялась меньшая (правая) часть очага и начинала увлажняться большая часть очага (рис.9–б), ход эксперимента регистрировался также в инфракрасном диапазоне (рис.9–в,г). В результате был подтверждён эффект снижения линейной скорости распространения пламени при увлажнении пожарной нагрузки.



Рисунок 9 – Экспериментальное исследование замедления скорости развития пожара (а – модельный очаг; б – начальная стадия горения; в – подача воды для сдерживания, фото в ИК диапазоне; г – догорание при сдерживании, фото в ИК диапазоне).

Также обоснована возможность функционирования АУСП в режиме осаждения дыма и токсичных продуктов горения для обеспечения эвакуации людей. Для этого были проведены испытания на базе модельного стенда с помещениями, имитирующими офис и коридор (рис.10–а). В эксперименте был использован модельный очаг 0,1А (рис.10–б), а для замера уровней ОФП – газоанализатор МАГ–6 П (рис.10–в) и регистратор термопар «Интеграф».

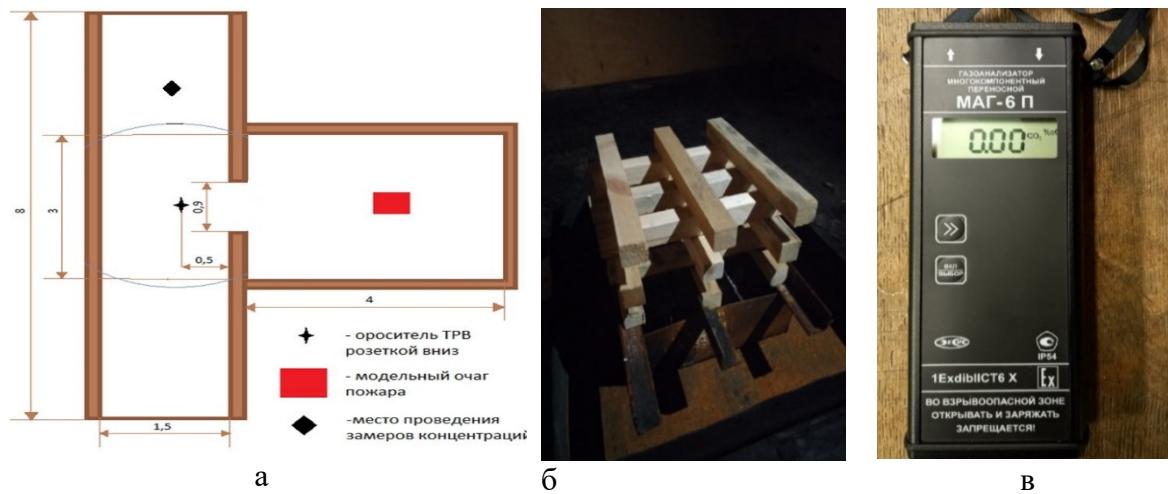


Рисунок 10 – Стенд для проведения натурных испытаний (а), модельный очаг (б) и газоанализатор (в)

Поскольку наибольшую опасность при эвакуации людей при пожаре могут представлять окись и двуокись углерода (CO и CO_2), в ходе экспериментов измерялась их концентрация как при свободном развитии пожара, так и при срабатывании оросителей АУСП. Была получена динамика концентрации CO (рис.11–а) и CO_2 (рис.11–б) как при свободном развитии пожара, так и при срабатывании АУСП на 3–й минуте пожара. Результаты испытаний показали, что оборудование помещений АУСП позволяет сдерживать рост ОФП и обеспечить тем самым эвакуацию людей при пожаре.

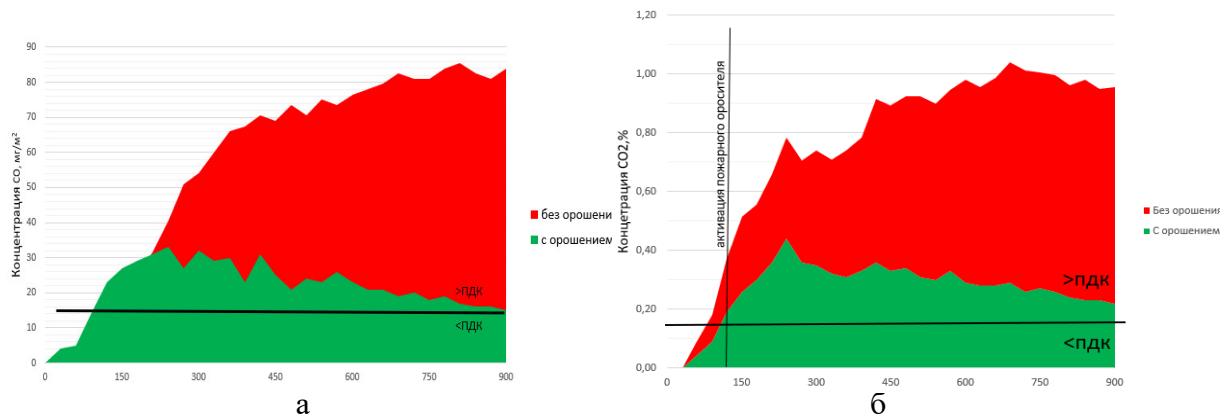


Рисунок 11 – Динамика концентрации CO (а) и CO_2 (б) при свободном развитии пожара (красный цвет) и при срабатывании АУСП (зелёный цвет). По горизонтальной оси время в секундах

Для решения задачи «в» по исследованию сдерживания пожара углу помещения многоэтажного здания из деревянных CLT–панелей влажностью 10–20% был создан стенд (рис.12). В качестве очага пожара был использован модельный очаг класса 1А по ГОСТ Р 51057–2001 (рис.13–а). Было установлено 3 термопары: в очаге (термопара №9), на стене (термопара №13) и над очагом (термопара №14).

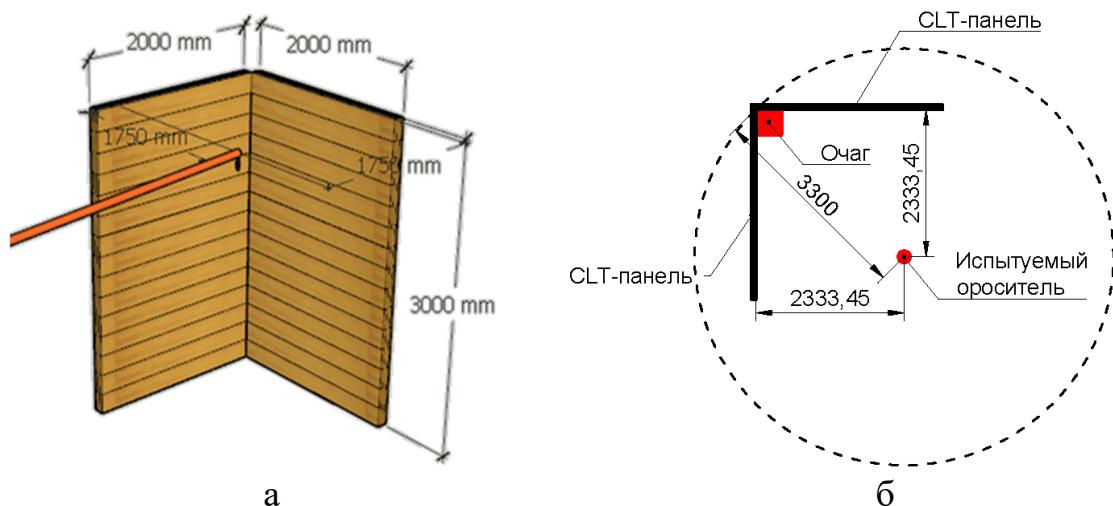


Рисунок 12 – Схема экспериментального стенда (а) для испытаний АУСП на сдерживание пожара в углу помещения из CLT–панелей и вид стендса в плане (б) с очагом пожара класса 1А по ГОСТ Р 51057–2001

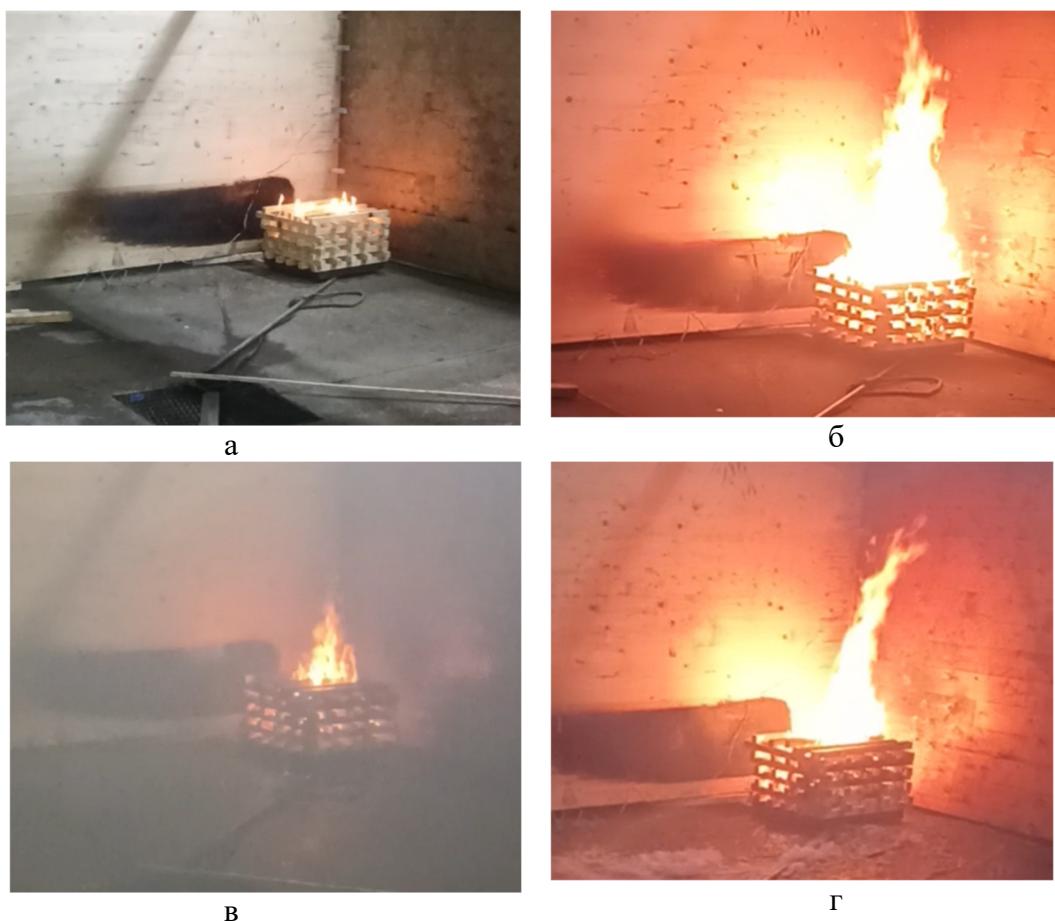


Рисунок 13 – Результаты экспериментального исследования работы АУСП по сдерживанию горения модельного очага пожара в углу помещения из CLT–панелей (а – начало горения, б – устойчивое горение очага; в – сдерживание процесса горения при включении АУСП; г – повторное воспламенение после прекращения подачи воды)

Результаты эксперимента по сдерживанию горения при его орошении спринклерами АУСП с интенсивностью $I=0,08$ л/с/м² представлены на рис.13 и 14. Эксперимент показал, что сдерживание пожара возможно даже если орошение начнётся, когда пожар перешёл в фазу устойчивого горения (рис.13–б,в). Однако выявлен новый негативный эффект: риск повторного возгорания очага при прекращении его орошения (рис.13–г).

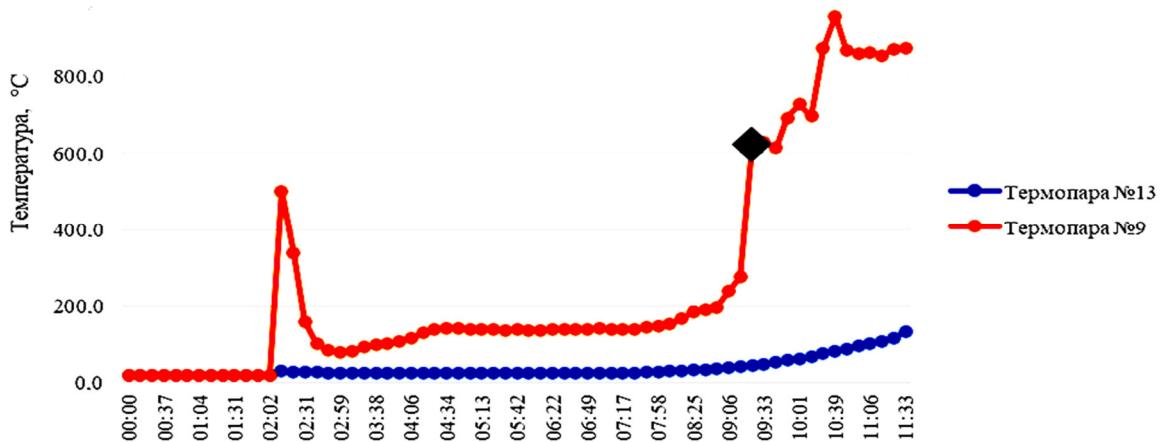


Рисунок 14 – Динамика температуры при горении очага в углу помещения из CLT–панелей

Особое внимание в главе уделено снижению дымообразования и обеспечению видимости для эвакуирующихся при работе АУСП. Для этого на базе ФНПП «Гефест» проведены испытания на специально оборудованном стенде (рис.15–а) с использованием ИМПОД 5М (рис.15–б,в), позволяющем измерять различные параметры дыма, в т.ч. оптическую плотность, являющуюся критически важным ОФП. Результаты приведены на рис.16.

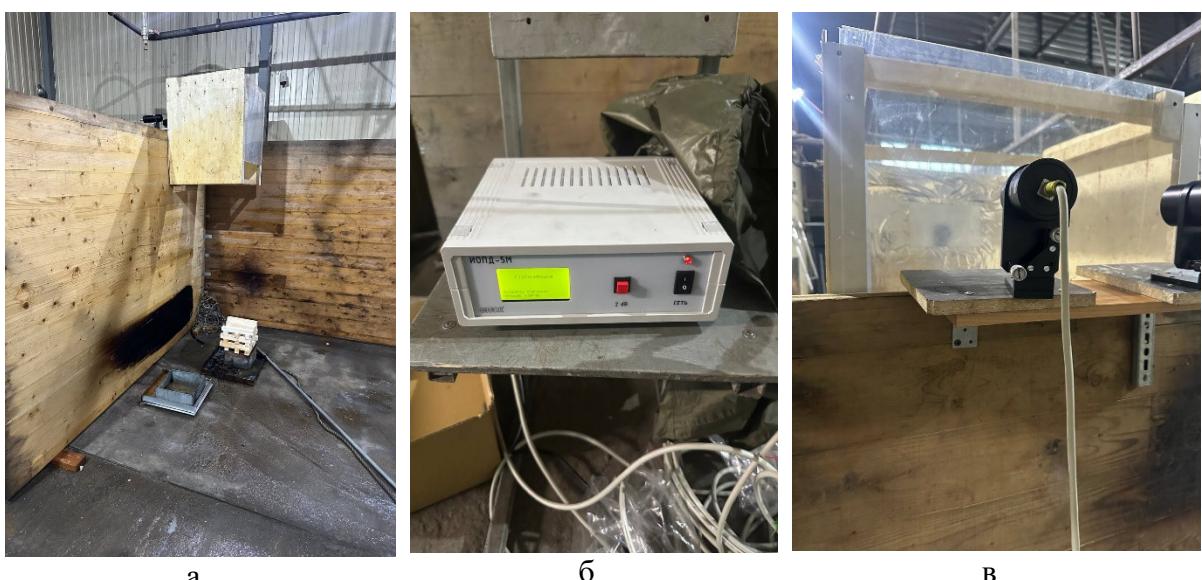


Рисунок 15 – Стенд (а) для замера оптической плотности дыма и регистрирующие приборы (б, в)

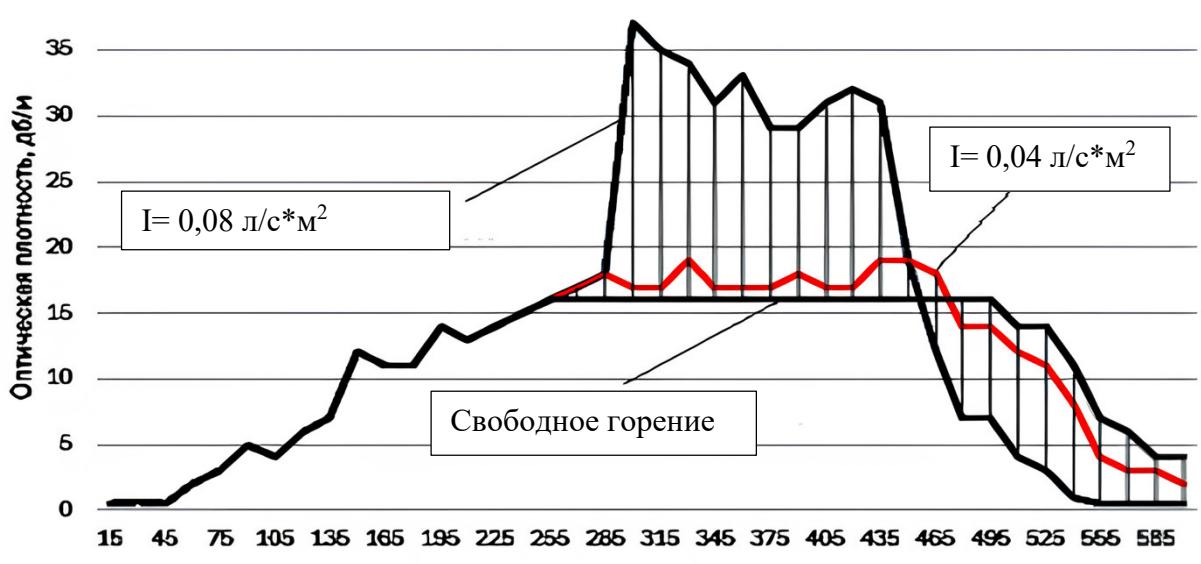


Рисунок 16 – Результаты оценки оптической плотности дыма при сдерживании горения очага пожара при интенсивности $0,04 \text{ л/с} \cdot \text{м}^2$, при тушащей интенсивности $0,08 \text{ л/с} \cdot \text{м}^2$ (чёрная кривая – горение без сдерживания, красная при сдерживании), время в секундах

Также показано, что ограниченный расход ОТВ из оросителей АУСП не препятствует движению эвакуирующихся.

Таким образом, проведённый комплекс экспериментальных исследований эффекта работы АУСП позволил получить важные количественные параметры сдерживания и подтвердить теоретические оценки, позволяющие рекомендовать АУСП к использованию на различных объектах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведён сравнительный анализ отечественных и зарубежных документов требований к АУП и методов их испытаний. Показано, что при наличии требований Федерального закона № 123–ФЗ (ст.117) к АУСП отсутствуют нормативные документы в части проектирования АУСП, задания общих технических требований к ним и методов испытаний, что делает актуальным разработку такого документа на уровне ГОСТа. Приведён возможный перечень объектов, для противопожарной защиты которых целесообразно применять АУСП.

2. Предложен и обоснован способ сдерживания пожара класса А в помещениях защищаемых объектов, предполагающий подачу воды с дозированным расходом для решения задач ограничения площади распространения пожара и распространения его ОФП, защиты конструкций и проёмов в помещениях. Приведено теоретическое обоснование требуемой интенсивности орошения для решения указанных задач. Предложена и обоснована структура АУСП.

3. Проведено компьютерное моделирование развития ОФП с учётом срабатывания АУСП на базе сертифицированной программы PyroSim, реализующей полевую модель пожара. В результате моделирования количественно установлено влияние интенсивности орошения на скорость распространения пожара и показана возможность сдерживания площади пожара, которую может потушить первое прибывшее пожарное подразделение без привлечения дополнительных сил и средств.

4. Проведен комплекс экспериментальных исследований, в результате чего выбран и обоснован вид дефлектора для спринклера АУСП. На базе НИИПИиИТ в ОБЖ при Санкт–Петербургском университете ГПС МЧС России проведен эксперимент, позволяющий обосновать интенсивность орошения пожарной нагрузки для сдерживания пожара. Также экспериментально установлена возможность сдерживания углового пожара в здании из деревянных CLT–панелей до прибытия первого пожарного подразделения.

Разработана и подведена модель функционирования модель функционирования АУСП описывающая ее поведение в различных сценариях возгорания

5. С использованием математического аппарата марковских процессов построена модель функционирования АУСП с учётом как штатного режима сдерживания пожара, так отказов и ложных срабатываний, которая может использоваться для решения задач анализа и синтеза АУСП.

Сформулированы предложения по нормативной базе на объектах различного назначения. Проект ГОСТ Р

6. С учётом результатов проведённых исследований разработан ГОСТ Р 71080–2023 Установки сдерживания пожара автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

I. Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Balabanov I., Tanklevskiy L., Tarantsev A., Murashkevich E., Lobov D., Mel'nik A. The Problem of Fire by Automatic Fire Extinguishing System // E3SWeb of Conferences 320, 02001 (2021). <https://doi.org/10.1051/e3conf/2021322002001>.

2. Балабанов И.Д., Танклевский Л.Т., Бондар А.И., Таранцев А.А. Особенности реализации автоматических установок сдерживания пожара // Журнал «Пожаровзрывобезопасность», №5, (т.31), 2022, с.43–53. DOI:22227/0869–7493.2022.31.05.43–53.

3. Балабанов И.Д., Танклевский Л.Т., Бондар А.И., Таранцев А.А. О применении водяных систем сдерживания пожара в помещении // Журнал «XXI век: итоги прошлого проблемы настоящего плюс», №3(63), т.12, 2023, с. 134–140.

4. Балабанов И.Д., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А. О моделировании функционирования автоматической системы пожаротушения с использованием цепей Маркова // Журнал «XXI век: итоги прошлого проблемы настоящего плюс», №2(66), т.13, 2024, с.175–180.

5. Балабанов И.Д., Танклевский Л.Т., Таранцев А.А. Моделирование процесса эксплуатации систем противопожарной защиты с использованием марковских цепей // Журнал «Пожаровзрывобезопасность», №2 (23), 2024, с.59–67.

6. Балабанов И.Д., Минкин Д.Ю., Савельев Д.И. Исследование эффективности работы автоматических установок сдерживания пожара // Вестник Санкт–Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России», №2, 2022, с.25–32.

7. Балабанов И.Д., Танклевский Л.Т., Гришина Е.А. Применение установок сдерживания пожара для учреждений здравоохранения // Проблемы управления рисками в техносфере, №3, 2022, с.21–31.

8. Прикладные вопросы моделирования систем противопожарной защиты с использованием цепей Маркова / Л. Т. Танклевский, А. А. Таранцев, И. Д. Балабанов [и др.] // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2025. – Т. 14, № 1(69). – С. 129-135.

II. Другие публикации автора:

1. Balabanov I.; Shtonda D.; Nikitina M. Research of noise-proof feature of addressable fire indication system with sequential addressing // <http://elibrary.ru/item.asp?id=43222298>

2. Балабанов И.Д.; Савельев Д.И. Анализ эффективности тушения высокостеллажных складов оросителями повышенной производительности // <http://elibrary.ru/item.asp?id=48576087>

3. Leonid Tanklevskiy, Aleksandr Tarantsev, Ivan Balabanov, Elena Murashkevich, Denis Lobov, Anton Mel'nik. The Problem of Fire Control by Automatic Fire Extinguishing System // E3S Web of Conferences, 2021 <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202132002001>

4. Vasilieva M.; Zybina O.; Balabanov I.; Vasiliev M. Comparative study of corrosion resistance of sprinkler sprinklers of domestic and foreign production // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019 <http://elibrary.ru/item.asp?id=45068203>

5. Balabanov I. Tanklevskiy A. Yusupdzhanov V. Babikov I. Arakcheev A. Effect of coatings on the sprinkler deflector // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, St. Petersburg; Russian Federation; 20–21 June 2019, Код 156583.

III. Нормативный документ РФ:

1. ГОСТ Р 71080–2023 Установки сдерживания пожара автоматические. Общие технические требования. Методы испытаний / Танклевский Л.Т., Балабанов И.Д. и др. М.: Российский институт стандартизации, 2023.

IV. Патенты РФ:

1. Автостоянка закрытого типа с повышенной взрывопожарной безопасностью и способ использования данной автостоянки / Л.Т. Танклевский, А.А. Таранцев, О.А. Зыбина, Д.А. Поташев, Д.А. Колесников, И.Д. Балабанов // Патент RU 2803032 С1, зарегистрирован в госреестре изобретений РФ 05.09.2023.

2. Способ сдерживания пожара в помещении и установка для реализации такого способа / Л.Т. Танклевский, О.А. Зыбина, А.А. Таранцев, А.И. Бондар, И.Д. Балабанов // Патент RU 2834895 С1, зарегистрирован в госреестре изобретений РФ 17.02.2025.