

На правах рукописи

Ивченко Ольга Александровна

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕЛЕЙ ДЛЯ БОРЬБЫ С ЛЕСНЫМИ
НИЗОВЫМИ ПОЖАРАМИ
(на материалах Саратовской области)**

06.03.03 – Агролесомелиорация и защитное лесоразведение, озеленение населенных пунктов, лесные пожары и борьба с ними

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Саратов – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»

Научный руководитель: **Панкин Кирилл Евгеньевич**
кандидат химических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Залесов Сергей Вениаминович,**
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Уральский государственный
лесотехнический университет», кафедра
«Лесоводство», заведующий кафедрой

Буряк Людмила Викторовна
доктор сельскохозяйственных наук, доцент,
филиала ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной
пирологии», главный научный сотрудник
лаборатории пирологии

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный
аграрный университет»

Защита состоится 4 февраля 2022 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.08 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. № 325 им. А.В. Дружкина

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и на сайте www.sgau.ru

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1.

E-mail: dissovet01@sgau.ru

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Татьяна Анатольевна
Панкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Борьба с лесными пожарами является важной народнохозяйственной задачей, т.к. лесные массивы и лесонасаждения играют важную роль в функционировании лесного хозяйства с получением товарных древесных и недревесных продуктов леса. Лесные массивы также осуществляют экологическую функцию по фиксации атмосферного углерода, повышению влажности воздуха, смягчению климата и т.п. Защитные лесонасаждения выполняют функции по снегозадержанию, защиты от суховеев, помогают бороться с эрозийными процессами на объектах сельского хозяйства.

Количество лесных пожаров и ущерб от них в последние десятилетия только возрастает. Определенный вклад в это дает изменение климата в сторону потепления: повышение среднегодовых температур, повышение максимальной температуры теплого сезона, перераспределение осадков с их уменьшением в теплый период и т.п. Пожароопасный период на территории Саратовской области длится шесть месяцев с апреля по октябрь. Статистика лесных пожаров с 2016 по 2020 годы показывает устойчивый рост числа пожаров: в 2014 году количество пожаров составило 14 на площади 111,1 га; в 2015 году – 95 на 535,9 га; в 2016 г. – 10 на 19,7 га; в 2017 г. – 33 на 543,8 га; в 2018 г. – 94 на 1409,2 га, в 2019 г. – 50 на 214,7 га, в 2020 г – 135 на 276,8 га [приложения А, Б].

Статистические данные по ущербу от лесных пожаров, нанесенному лесному хозяйству в Саратовской области и затратам на тушение лесных пожаров представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические данные по ущербу и затратам на тушение лесных пожаров в Саратовской области 2014-2020 гг.

Год	Ущерб от лесных пожаров, тыс. руб.	Затраты на тушение, тыс. руб.
2014	47106,09	582,06
2015	3968,07	253,27
2016	245,01	144,09
2017	39238,17	805,10
2018	173,53	18,21
2019	534,01	590,05
2020	8708,12	880,41

Поэтому профилактика и тушение лесных пожаров являются важными составляющими деятельности лесного хозяйства, а указанные данные в таблице 1 обуславливают актуальность проводимого исследования для разработки эффективных способов борьбы с возникновением и распространением лесных пожаров. Одним из критериев эффективности противопожарных мероприятий, является повышение огнезащитной и огнетушащей способности применяемых составов. Поэтому целью данной работы явилось разработка технологии профилактики и тушения лесных пожаров с применением гидрогеля алюминия.

Степень научной разработанности темы. Развитием тематики борьбы с лесными пожарами занимались такие ученые, как И.М. Абдурагимов (2011, 2012,), Е.С. Арцыбашев (2014, 2015, 2018), Г.Д. Главацкий (2001,2002), В.Д. Захматов (2012, 2013, 2015). Прогнозирование возникновения и сценарии развития лесных пожаров осуществлялись такими учеными как Г.В. Соколова (1993), С.М. Матвеев (2002), В.В. Чеботарев (2002), А.В. Волокитина (2006), М.А. Софронов (2006), Н.В. Зукерт (2011), Г.А. Доррер (2011, 2012, 2017), В.С. Коморовский (2011), А.И. Березовский (2012) , Ю.Ф. Сосновчик (2016), А.В. Волокитина (2020). Оценку запасов углерода и лесных горючих материалов, пожарной опасности в лесу проводили А.С. Исаев (2001), Д.Г. Замолодчиков (2001, 2012, 2013), В.И. Грабовский (2012, 2013), Шуляк П.П. (2013), А.З. Швиденко (2013, 2014), В.С. Коморовский (2015), П.В. Михайлов (2015), С.В. Залесов (2016). Вопросами условий протекания лесных пожаров, факторами, способствующими и препятствующими развитию лесных пожаров занимались И.С. Мелехов (1965), Н.П. Курбатский (1964), А.З. Швиденко (2013), П.А. Цветков (2013, 2014, 2019), Н.Д. Гуцев (2015), А.В. Селиховкин (2016), Б.Г. Поповичев (2016), Е.П. Белоусова (2016), И.В. Латышева (2016). Способами создания эффективных противопожарных барьеров и тушением пожаров были посвящены работы таких ученых как Г.Д. Главацкий (2001, 2002), В.М. Груманс (2001, 2002), С.В. Залесов (2014, 2015, 2016, 2018), В.Г. Гусев (2011, 2015, 2016, 2017), Н.Д. Гуцев (2013, 2015, 2016, 2017), Е.С. Арцыбашев (2015, 2018), А.М. Ерицов (2015, 2016), Н.В. Михайлова (2015, 2016), Г.Н. Куприн (2016). Последствиям лесных пожаров и их влиянию на процессы лесовосстановления посвятили свои труды С.Э. Вомперский (2007), М.В. Смагина (2007), К.К. Калинин (2010), Г.И. Клобуков (2010), К.В. Дорохов (2014), В.П. Шелуха (2014), С.А. Денисов (2015, 2017), М.А. Козаченко (2015, 2019), Н.М. Дебков (2018), А.С. Ильинцев (2018), Н.М. Ковалева (2018), С.В. Залесов (2019).

Цель исследования – разработка технологии применения гидрогеля алюминия для обеспечения эффективной борьбы с возникновением и развитием лесных низовых пожаров.

Задачи исследования:

- 1) провести анализ природно-климатических условий с возникновением и развитием лесных пожаров в Саратовской области;
- 2) провести исследования по выявлению огнетушащих и огнезадерживающих свойств гидрогелей алюминия и влияние их применения на распространение лесного низового пожара;
- 3) разработать технологию и технологические параметры применения гидрогеля алюминия для тушения лесных низовых пожаров в лесных массивах и лесосаждениях;
- 4) разработать математическую модель переноса горящих частиц для определения дальности их переноса ветром и выявления оптимальных геометрических параметров огнезащитных барьеров;

5) определить экономическую эффективность использования гидрогеля алюминия для профилактики и тушения лесных низовых пожаров в сравнении с существующими технологиями и техническими приемами.

Объект исследования: пожарная опасность лесных массивов.

Предмет исследования: огнезадерживающая и огнетушащая способность гидрогеля алюминия на процесс тушения лесных пожаров

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1) установлена взаимосвязь между погодными условиями, числом лесных пожаров и ущербом от них в Саратовской области;

2) определены минимальные требования к геометрическим параметрам противопожарных барьеров, способных эффективно бороться с распространением лесных низовых пожаров;

3) экспериментально установлены оптимальные технологические условия применения гидрогеля алюминия для профилактики и тушения лесных низовых пожаров;

4) разработана технология применения гидрогеля алюминия для борьбы с лесными низовыми пожарами.

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Теоретическая значимость исследования заключается в установлении взаимосвязи между погодными условиями и возникновением лесных низовых пожаров. Разработана математическая модель условий преодолемости противопожарных барьеров частицами лесных горючих материалов, переносимых ветром с конвективными потоками и разработаны критерии ограничения их распространения.

Практическая значимость работы заключается в получении положительных результатов лабораторных и полевых испытаний огнетушащих и огнезащитных свойств гидрогелей алюминия и их воздействие на процесс горения во фронте лесного низового пожара. Предложен способ тушения пожара с применением гидрогеля алюминия (патент на изобретение №2614963 от 31.03.2017), а также метод обработки почвенного травяного покрова гидрогелями алюминия с целью понижения их пожароопасных свойств для профилактики возникновения и распространения низового пожара. Результаты исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» по специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность» при изучении дисциплин: «Физико-химические основы развития и тушения пожара», «Физико-химические основы возникновения горения, взрыва и тушения пожара», «Противопожарное обустройство территорий». Результаты исследований внедрены в деятельность службы по обеспечению противопожарной защиты с. Мироновка Питерского района Саратовской области и лесничеств Левобережной части Саратовской области.

Методология и методы исследования. Для проведения моделирования пожароопасной обстановки применялись математические и физические модели поведения горячей частицы под влиянием скорости ветра и высоты выпадения из конвективного потока. Экспериментальную основу исследований составляли

лабораторные исследования и полевые испытания огнетушащих и огнезащитных свойств гидрогелей алюминия и влиянием на их свойства на динамику фронта лесного низового пожара при различных внутренних и внешних условиях (концентрации, плотности напочвенного травостоя, скорости ветра). При лабораторных исследованиях огнетушащей способности применялись стандартные методики тушения пожара, а полевая методика разработана на основе анализа литературных источников. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с применением стандартных методик математической обработки результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1) Обоснование взаимосвязи погодных условий с возникновением лесных пожаров.

2) Математическая модель огнезадерживающей способности противопожарного барьера непреодолимого для лесного низового пожара.

3) Технологические показатели, отвечающие оптимальному применению гидрогелей алюминия для создания противопожарных барьеров – огнезащитных полос для сдерживания распространения кромки лесного низового пожара,

4) Методика применения гидрогелей алюминия для тушения лесных низовых пожаров.

5) Оценка экономической эффективности использования гидрогеля алюминия для профилактики и тушения лесных низовых пожаров.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность лабораторно-полевых исследований подтверждается большим объемом экспериментальных данных огнетушащих свойств гидрогелей алюминия и огнезадерживающих свойств противопожарных барьеров на его основе. При сборе и обработке данных осуществлялся анализ результатов, полученных при использовании госстандартов, общепринятых методик, а также апробация результатов исследования.

Материалы диссертационной работы изложены на международных, национальных и всероссийских конференциях: II Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях» (Саратов, 2015); IV Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность-2017» (Саратов, 2017)», IV Национальная научно-практическая конференция «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях» (Саратов, 2018); V Международная научно-практическая конференция «Техногенная и природная безопасность-2019» (Саратов, 2019); I Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (FIRESAFETY 2019)» (Уфа, 2019), IV Национальной научно-практической конференции «Актуальные научно-технические средства и сельскохозяйственные проблемы» (Кемерово, 2020), а также на ежегодной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ с 2014 по 2021 годы.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 15 печатных работ, 3 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и две статьи в международных журналах Scopus и WOS, общим объемом 5,06 п.ч., в т. ч. авторских 2,3. Получен один патент РФ на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 192 страницах и включает 2 страницы приложений, 40 таблиц и 43 рисунка. Список литературы представлен 193 наименованиями, из них 17 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень научной разработанности темы, дана общая характеристика работы, ее практическая значимость, изложены основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту. Сформулированы цель, задачи и объект исследований, приводится теоретическая и практическая значимость исследований, дана методология и методы исследований, а также степень достоверности результатов и их апробация.

В первой главе «Современное состояние проблемы борьбы с лесными пожарами (Саратовская область)» представлен анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы о причинах, условиях возникновения и развития лесных низовых пожаров, их последствиях и способах, приемах борьбы с ними. Проанализированы статистические данные и сформулированы особенности возникновения, и развития лесных пожаров в Саратовской области. Проведен анализ способов и приемов тушения лесных низовых пожаров и обустройства противопожарных преград. Проанализировано состояние растительности Саратовской области и их роль в обеспечении возникновения и развития лесных низовых пожаров.

Во второй главе «Материалы, методы и методики оценки эффективности огнетушащего и огнезащитного действия» изложены методы, методики для испытания эффективности огнетушащего и огнезащитного действия соединений на основе алюминия, магния, бора, натрия. Обоснован выбор веществ, а также установлены критерии сравнимости эффективности огнетушащих и огнезащитных свойств выбранных химических соединений в лабораторных и полевых условиях (рис. 1 и 2).



Рисунок 1 - Получение гидрогеля в полевых условиях



Рисунок 2 – Лабораторный метод исследования эффективности тушения

В третьей главе «Мониторинг обстановки с лесными пожарами. Взаимосвязь пожаров с погодными условиями» Изложены результаты мониторинга пожароопасной обстановки и ее взаимосвязь с погодными

условиями. Для проведения мониторинга нами были запрошены сведения по количеству лесных пожаров в лесничествах Саратовской области. Анализ данных позволяет сделать выводы, что наибольшее число пожаров (135 ед.) отмечено в 2020 г. К пожароопасным сезонам относятся 2015 и 2018 гг., т.к. в течение теплого сезона произошли 95 и 94 ед. пожаров, соответственно. Наименьшее количество пожаров (10) зафиксировано в 2016 году.

Наибольшая суммарная площадь пожаров отмечена в 2018 году – 1409,2 га. По параметру суммарной площади за пожароопасный период 2017 и 2015 годы практически одинаковы – 543,8 и 535,9 га соответственно (хотя количество пожаров в 2015 году больше в 2,5 раза). Наименьшая площадь пожаров отмечена в 2016 году – 19,7 га. По показателю средней площади лесного пожара лидирует 2020 год – 84 га. В остальные годы средняя площадь лесного пожара находится в интервале от 7,3 до 26,5 га.

Для анализа распределения метеорологических величин (средняя температура воздуха, количество осадков, влажность воздуха, средняя скорость ветра) за пожароопасный период на территории Саратовской области запрашивались сведения с метеостанций, расположенных в Левобережье (г. Красный Кут, г. Новоузенск, г. Маркс) и Правобережье (г. Саратов, г. Красноармейск, г. Балашов).

Для анализа выявления взаимосвязи метеоусловий с возникновением пожароопасной обстановки были проведены вычисления взаимосвязи погодных условий с количеством пожаров, путем вычисления корреляции Пирсона. При анализе полученных результатов по отдельным районам было выявлено, что в Правобережной части Саратовской области наилучшая взаимосвязь проявилась между числом пожаров и средней относительной влажностью воздуха (-0,67; -0,76) в 2018 и 2019 гг., а также между числом пожаров и суммой осадков (-0,79) в 2018г., в Левобережной части обнаружена взаимосвязь между числом пожаров и суммой осадков (-0,66; 0,78) в 2019 и 2020 гг., а также между числом пожаров и средней температурой воздуха (0,75) в 2018 г.

Объединены данные о произошедших пожарах и условий погоды для крупных частей Саратовской области Левобережной и Правобережной, результаты отображены в таблице 2.

Таблица 2 Взаимосвязь количества пожаров с показателями погодных условий по Саратовской области

Наименование части	Год	Средняя температура	Средняя относительная влажность	Сумма осадков	Средняя скорость ветра
Правобережная часть Саратовской области	2018	0,44	-0,77	-0,14	0,21
	2019	0,30	-0,72	-0,47	-0,61
	2020	-0,53	0,07	-0,68	-0,13
Левобережная часть Саратовской области	2018	0,58	-0,55	-0,13	-0,38
	2019	0,72	-0,59	0,38	-0,74
	2020	-0,43	-0,16	-0,87	-0,26

При анализе полученных результатов было выявлено следующее, что в Правобережной части Саратовской области наилучшая взаимосвязь, проявилась между числом пожаров и средней относительной влажностью воздуха (0,77; 0,72) в 2018 и 2019 гг., в Левобережной части обнаружена взаимосвязь между числом пожаров и суммой осадков (0,87) в 2020 г., между числом пожаров и средней скоростью ветра (0,74) в 2019 г. и между числом пожаров и средней температурой воздуха (0,72) в 2019 г.

В четвертой главе «Разработка технологии тушения и предупреждения возникновения и распространения пожара, а также его тушения на любой стадии развития» приведены результаты лабораторных и полевых испытаний огнетушащих и огнезащитных свойств соединений на основе алюминия, магния, бора, натрия, в том числе тех, которые способны образовывать гидрогели при взаимодействии с водой: соединения алюминия и магния. Разработаны технологические параметры для создания огнезащитной полосы (ручной ОП – 209 «Жук») и механизированный (ОПШ-24-3000) способы опрыскивания и для применения гидрогеля алюминия для тушения кромки природного пожара с применением ранцевого огнетушителя типа РП-18 («Ермак», Россия).

Испытания огнетушащих свойств в лабораторных условиях проводили согласно методике. Экспериментальные результаты испытания огнетушащих составов представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты испытаний огнетушащих составов

№ п/п	Состав огнетушащего средства	Масса огнетушащего вещества, пошедшая на тушение модельного очага пожара, кг	Время на тушение (первый подход), сек.	Количество операций дотушивания	Общее время тушения модельного очага пожара, сек.
1	Вода	13,5 ± 1,0	186 ± 25	6 ± 2	248 ± 25
2	Сода (насыщенный)	12,0 ± 1,0	206 ± 30	5 ± 1	276 ± 25
3	Гидрогель (260гр)	4,0 ± 1,5	63 ± 15	2 ± 1	85 ± 15
4	Гидрогель (130гр)	4,0 ± 1,5	50 ± 15	2 ± 1	95 ± 15
5	Гидрогель (52гр)	3,5 ± 1,5	38 ± 15	3 ± 1	83 ± 15
6	Гидрогель (26гр)	8,0 ± 1,5	94 ± 15	4 ± 1	122 ± 20
7	Сульфат натрия (52гр)	11,5 ± 1,0	102 ± 25	6 ± 2	142 ± 20

Анализ представленных результатов показывает выявление огнетушащего эффекта гидрогеля алюминия. Применяя гидрогель с концентрациями 52-260 г/15 кг воды удалось снизить расход огнетушащего раствора практически в 3 раза с 13,5 кг для воды до 3,5-4 кг для гидрогеля на основе гидроксида алюминия. Отмечено, общее снижение времени тушения пожара (см. табл. 3, ст. 4,6) и количество операций дотушивания (см. табл. 3, ст. 5). При использовании водных растворов гидрогеля алюминия с концентрацией ниже 52 г/15 кг воды огнетушащий эффект значительно снижался (повышался расход огнетушащего состава). Экспериментальные

испытания проводили при различных условиях: влажности древесины и погоды.

Для полевых испытаний огнетушащих свойств была разработана собственная методика проведения исследований. Она заключалась в розыске участков покрытых равномерным слоем ЛГМ (травяного напочвенного покрова и растительных остатков), противопожарного обустройства путем опашки, поджога слоя ЛГМ и его тушения с контролем расхода испытуемого огнетушащего состава взвешиванием заполненного ранцевого огнетушителя до и после проведения эксперимента. Размеры экспериментальных участков выбирались таким образом, чтобы запаса ОТС в ранцевом огнетушителе хватило на тушение кромки лесного низового пожара.

Тушение кромки пожара осуществлялась в два этапа: (1) подачей огнетушащего вещества в зону(ы) горения ручным способом до исчезновения пламенного горения – по мере тушения кромки пожара осуществлялся переход к следующему участку горения (вдоль кромки пожара) до полного подавления процесса пламенного горения; (2) заключался в наблюдении за выделением дыма на экспериментальном участке и осуществления (в случае необходимости) операции дотушивания при повторном самопроизвольном возникновении горения. Тушение осуществляли водой, водными растворами гидрогеля алюминия различных концентраций и водными растворами соединения бора - *буры* (табл. 3). В задачу тушения входило прекращение горения с минимально возможным расходом ОТС. Результаты исследований представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Определение расхода ОС при тушении кромки пожара

Наименование ОС	№	Расход ОС на периметр, кг/м	Расход ОС на площадь, кг/м ²	Расход ОС на массу природного горючего материала, кг/кг	Абсорбция энергии горения единицей массы ОТС*, МДж/кг
Вода	24	0,22±0,05	0,50±0,10	≈0,63	≈21,5
Гидрогель алюминия (1,7 г/л)	3	0,19±0,09	0,56±0,15	≈0,54	≈24,9
Гидрогель алюминия (3,5 г/л)	3	0,1±0,04	0,24±0,12	≈0,29	≈47,3
Гидрогель алюминия (7 г/л)	3	0,09±0,04	0,25±0,10	≈0,26	≈52,5
Гидрогель алюминия (14 г/л)	3	0,11±0,03	0,23±0,11	≈0,31	≈43,0
Гидрогель алюминия (28 г/л)	3	0,10±0,05	0,22±0,09	≈0,29	≈47,3
Гидрогель алюминия (7 г/л) через 60 мин после получения	3	0,25±0,04	0,61±0,07	≈0,71	≈18,9
Сульфат натрия (28 г/л)	3	0,23±0,04	0,55±0,12	≈0,66	≈20,5
Карбонат натрия (насыщенный раствор)	3	0,25±0,09	0,49±0,18	≈0,71	≈18,9

Полученные данные показывают, что на тушение 1 м кромки низового пожара, в среднем, потребовалось 0,21 кг воды (при средней ширине кромки пожара 0,3÷0,4 м), а ГА потребовалось только 0,09-0,1 кг, что 2,3 раза меньше, чем воды. При оценке эффективности тушения пожара на его общую площадь площади пожара ушло, в среднем, 0,52 кг/м² воды, а ГА только 0,23 кг, что, также, в среднем 2,3 раза меньше, чем воды. Наименьший средний расход ГА для тушения кромки пожара составил 0,09-0,11 кг/м при концентрации 3,5-14 г/л. При этом увеличение концентрации ГА в воде с 7 до 28 г/л, т.е. в 4 раза не дает сколь-нибудь значительной прибавки в эффективность тушения, и ведет, фактически, только к перерасходу ОТС. Результаты расчетов показывают, что расход ОТС составляет 0,25-0,3 кг/м².

Определив среднюю массу природных горючих материалов растительного происхождения (травяного покрова и растительных остатков) на исследуемых участках в 0,7-1,1 кг/м², то есть возможность рассчитать расход ОТС на единицу массы природного горючего материала (см. табл. 4). Это значение в ходе эксперимента с применением в качестве ОТС - ГА (3,5-7,0 г/л) составило 0,27-0,36 кг/кг. Ориентируясь на низшую теплоту сгорания соломы, которая при 20% влажности составляет 13,5 МДж/кг можно рассчитать энергию горения, которую способна поглотить единица массы ОТС. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Следует учесть, что в столбцах 5 и 6 (табл. 4) представлены данные, полученные при использовании как собственных экспериментальных данных, так и известных литературных значений. Полученные результаты, представленные в 5 и 6 столбцах (табл. 4) несут в себе некоторый условный характер.

Если предположить (довольно условно), что общая огнетушащая способность является суммой огнетушащих эффектов, складывающих процесс тушения, то вычитая из общего вклада в огнеподавление, который обеспечивает ГА (7 г/л), который способен противостоять тепловыделению 52,5 МДж/кг, вклад который дает вода (21,5 МДж/кг), тогда получаем, что общий вклад в тушение путем изоляции и ингибирования позволяет бороться с тепловыделением в 30 МДж/кг или 57% против 43% энергии поглощаемой водой (охлаждением). Косвенно о наличии взаимодействия ГА и горючих веществ можно судить по снижению остаточного дымообразования после тушения им - эффективно бороться с одной из серьезнейших проблем – очагами тления.

Проведены испытания огнетушащей способности насыщенного раствора карбоната натрия (сода) и сульфата натрия (28 г/л), как примесей к ГА. Данные, представлены в таблице 4, свидетельствуют об отсутствии серьезных огнетушащих свойств указанных компонентов. Использование тетрабората натрия – *бурь* (8-32 г/л) не выявило огнетушащего эффекта – сгорели все экспериментальные секторы. Тем не менее, осмотр сгоревших секторов выявил наличие беглого характера, но системности в огнестойкости от концентрации ОЗС выявить не удалось.

Для тушения кромки пожара с применением ранцевого огнетушителя типа РП-18 («Ермак», Россия) оптимальным решением при определении технологических параметров является создание рабочего раствора с концентрацией 630 г/15 л, с расходом 0,0125 л/м². В таком случае одной заправки опрыскивателя «Ермак» РП 18 (15 л) хватит на обработку 90 м² (см. табл. 5).

Таблица 5 - Технологические параметры для тушения кромки пожара жидким раствором сульфата алюминия при помощи ранцевого огнетушителя РП-18 («Ермак», Россия)

Норма внесения порошка сульфата алюминия в объём жидкости, г/л	Объём жидкости, для растворения нормы порошка сульфата алюминия, л	Норма внесения порошка сульфата алюминия в объём жидкости 15л, г/15л	Площадь, обработанная раствором, м ²	Расход раствора, л/м ²
7	15	105	15	1
14		210	30	0,5
21		315	45	0,25
28		420	60	0,05
35		525	75	0,025
42		630	90	0,0125
49		735	105	0,0056
56		840	120	0,0028
63		945	135	0,0014
70		1050	150	0,0007

Экспериментальные испытания огнезащитных свойств соединений алюминия и бора проводили в двух режимах: фронтальном и фланговом распространении кромки низового пожара. При фронтальном кромка низового пожара распространяется перпендикулярно расположению секторов на участке (см. рис. 3), а при фланговом кромка низового пожара распространяется вдоль экспериментальных секторов на участке (см. рис. 6). Результаты экспериментальных исследований огнезащитного действия при фронтальном распространении пламени представлены на рисунках 4 и 5, которые показывают, что огнестойкость проявили только секторы №1-3. Остальные секторы оказались неспособными сдержать распространение пламени, тем более удивительно сгорел участок, обработанный водой (№4), причем он обрабатывался последним и был более влажным. Анализ Сектора №6 показал, что распространение пламени приобрело явно выраженный беглый характер – выгоранию подвергся только травяной покров, а отмерзшие растительные остатки на поверхности почвы подверглись воздействию пламени лишь частично. Вполне вероятно, что высокая водорастворимость исследуемых ОЗС не позволяют им в нужном количестве удержаться на листьях и стеблях

травянистых растений, поэтому огнезащитный эффект проявляется при повышении концентрации ОЗС.

Сектор 1 14 г/л	Сектор 2 21 г/л	Сектор 3 28 г/л	Сектор 4 Вода	Сектор 5 (без обработки)	Сектор 6 7 г/л	Сектор 7 1.7 г/л	Сектор 8 3.5 г/л
↑ Сектор розжига ↑							

Рисунок 3 - Схема расположения экспериментальных секторов при фронтальном движении низового пожара. Стрелками указано направление движения кромки низового пожара



Рисунок 4 - Результаты исследования огнезадерживающих свойств экспериментальных секторов обработанных ГА – фото участка справа



Рисунок 5 - Результаты исследования огнезадерживающих свойств экспериментальных секторов обработанных ГА – фото участка слева

Выявить пределы огнестойкости был призван следующий эксперимент проводимый во фланговом режиме (рис. 6), для которого были выбраны наибольшие концентрации ГА (21 и 28 г/л).

→ Сектор розжига →	Сектор №1 (21 г/л)	Сектор №2 (28 г/л)
--------------------------	-----------------------	-----------------------

Рисунок 6 – Расположение экспериментальных секторов, обработанных ГА при фланговом распространении низового пожара. Стрелками указано направление распространения пламени

Для усиления горения на сектор розжига была добавлена сухая солома из расчета 250-300 г/м² (таким образом, плотность травостоя увеличилась на 20-25%). Для исключения влияния влажности в этом типе эксперимента сушка участка осуществлялась в течение 12 часов (огневой эксперимент проводился на следующий день). Для усиления горения на участок розжига была добавлена сухая солома в количестве 250-300 г/м². На рис.7 и 8 представлены экспериментальные результаты.



Рисунок 7 - Эксперимент с фланговым распространением пламени - вид со стороны сектора розжига



Рисунок 8 - Эксперимент с фланговым распространением пламени - вид на секторы с правого фланга

Анализ данных, полученных с экспериментального участка, показал, что Сектор №1 сдержал распространение пламени даже в случае прироста плотности ЛГМ на 20-25 %.

Обработанный травяной покров в Секторе №2 (ГА, 28 г/л) обгорел только по краям. На рисунке 7 хорошо видно, что кромка низового пожара обошла огнестойкие секторы справа и слева. На рисунке 8 видно, как кромке низового пожара удалось проникнуть в Сектор №1 на 0,2-0,3 м и погасла на нем. Исследование обгоревших участков показало наличие преимущественно устойчивого горения травяного покрова и растительных остатков.

Были определены **оптимальные технологические параметры**:

- **ручной способ** (при применении пневматического опрыскивателя типа Жук ОП-209): создание рабочего раствора с концентрацией 105 г/л, с расходом 0,2 л/м². В таком случае одной заправки опрыскивателя ОП-209 (5 л) хватит на обработку 25 м²;
- **механизированный способ** (с применением штангового опрыскивателя (ОПШ-24-3000): скорость движения ОШ 6-7 кг, расход РР не менее 660 л/га, концентрация рабочего раствора (сульфата алюминия) 310-320 г/л. В таком случае одной заправки ОПШ-24-3000 (3000 л) хватит на обработку до 4,5 га.

Предложена **математическая модель** огнезадерживающей способности противопожарного барьера непреодолимого для лесного низового пожара, Рассчитана дальность перелета горящих частиц по уравнению: $L = K_n \cdot V_g \cdot t_{пад}$, где K_n – коэффициент переноса частицы по ветру (безразм.), значение которого изменяется от 0 до 1; V_g – скорость ветра, м/с; $t_{пад}$ – время падения горячей частицы.

Анализ полученных результатов показывает, что горящие частицы, забрасываемые на высоту 5-20 метров конвективным потоком способны пролететь от 1,45 до 36,18 метров, что в значительной степени превышает среднюю ширину минерализованной полосы (1,4 - 4,2 м), увеличивать размеры минерализованной полосы не целесообразно. При разработке эффективных противопожарных мероприятий, учитывались геометрические размеры

барьеров, которые будут являться непреодолимыми для горящих частиц. Был выбран противопожарный барьер в виде огнезащитной полосы.

В пятой главе “Экономическое обоснование применения гидрогелей на основе алюминия для профилактики и тушения низовых лесных пожаров” приведен расчет экономической эффективности использования гидрогеля алюминия для обустройства огнезащитного барьера. Показано, что обустройства огнезащитной полосы в 4,5 раза дешевле обустройства минерализованной полосы. При оценке затрат на 1 м² затраты на обустройство минерализованной и огнезащитной полосы составили 0,09 и 0,02 рубля соответственно, что подтверждает экономическую эффективность выбора обустройства противопожарного барьера в пользу огнезащитной полосы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализирована растительность района исследования, найдена взаимосвязь лесных пожаров с погодными условиями. Проведен анализ последствий лесных пожаров и их дальнейшее влияние на природу, и хозяйственную деятельность человека. Наилучшая взаимосвязь, проявилась между числом пожаров и средней относительной влажностью воздуха, между числом пожаров и суммой осадков.

2. Разработана технология тушения лесных низовых пожаров с применением гидрогеля алюминия, на основании лабораторных и полевых испытаний его огнетушащего действия. Получены экспериментальные значения расходов ОТС (на единицу площади, единицу длины кромки низового пожара) на основе гидрогеля алюминия и их значения сравнены с расходами на тушение воды. Показано, что гидрогель алюминия (с концентрацией 3,5 г/л) расходуется в 2-3 раза меньше по сравнению с водой при тех же условиях. Применение соединения алюминия позволяет на 57% повысить огнетушащую способность ОТС по сравнению с водой и с добавками других химических веществ на основе бора, натрия и магния.

3. Разработана технология обустройства и технические параметры противопожарных барьеров – огнезащитных полос – участков местности, покрытых ЛГМ, обработанных ОЗС. Наиболее эффективным ОЗС, по результатам лабораторных и полевых исследований явился гидрогель алюминия, который при концентрации выше 21 г/л (и расходе 1 л/м²) обладает огнезадерживающими свойствами и способен при ширине в 1 м удержать распространение кромки лесного низового пожара.

Определены технологические параметры применения гидрогеля алюминия:

а) для тушения кромки пожара с применением ранцевого огнетушителя типа РП-18 («Ермак», Россия): создание рабочего раствора (РР) с концентрацией 630 г/15 л, с расходом 0,0125 л/м².

б) для создания огнезащитной полосы (ручной и механизированный способы опрыскивания):

- ручной способ (при применении пневматического опрыскивателя типа «Жук» ОП-209): создание рабочего раствора с концентрацией 105 г/л, с расходом 0,2 л/м².

- механизированный способ (с применением штангового опрыскивателя (ОПШ-24-3000): скорость движения ОШ 6-7 км/ч, расход РР не менее 660 л/га, концентрация рабочего раствора (сульфата алюминия) 310-320 г/л. 4. На основании оценки дальности переноса горящих частиц ветром определены требования к противопожарному барьеру (ширина и степень огнестойкости). Показано, что при падении с высоты 20 метров горящей частицы размером 5 мм при силе ветра 5 м/с ширина полосы должна составить не менее 36 м. Полоса шириной 4,2 м преодолима при падении с высоты 5 м фрагмента ЛГМ размером 7 мм при скорости ветра 5 м/с. Степень огнестойкости ЛГМ, обработанных ОЗС должна составить не менее 20 мин.

4. На основании оценки дальности переноса горящих частиц ветром определены требования к противопожарному барьеру (ширина и степень огнестойкости). Показано, что при падении с высоты 20 метров горящей частицы размером 5 мм при силе ветра 5 м/с ширина полосы должна составить не менее 36 м. Полоса шириной 4,2 м преодолима при падении с высоты 5 м фрагмента ЛГМ размером 7 мм при скорости ветра 5 м/с. Степень огнестойкости ЛГМ, обработанных ОЗС должна составить не менее 20 мин.

5. Проведена оценка экономической эффективности обустройства огнезащитной полосы в сравнении с минерализованной полосой. Показано, что расходы на обустройство огнезащитной полосы в 4,5 раза ниже, чем для обустройства минерализованной полосы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

1. Для обеспечения эффективности мероприятий по предупреждению возникновения лесных низовых пожаров необходимо не только определять степень пожарной опасности лесных массивов по условиям погоды, но и учитывать характер деятельности человека в лесных массивах и на сельскохозяйственных угодьях (посевная, сбор урожая озимых и яровых, сенокос и т.п.), а также и рекреационную функцию лесного массива, связанную с отдыхом людей на объектах в праздничные дни (1-10 мая), а также во время летних и осенних отпусков.

2. Для эффективного тушения лесных низовых пожаров необходимо использовать гидрогель алюминия, получаемый растворением в воде сульфата алюминия, в количестве 52 г на 15 литров воды. Полученную смесь тщательно перемешать и применить для тушения кромки лесного низового пожара в течение 15-20 минут, это позволит снизить расход ОТС в 2-2,5 раза по сравнению с расходом воды.

3. Для ограничения распространения пламени лесного низового пожара необходимо создавать огнезащитные полосы – участки местности покрытые травянистой растительностью, обработанные водным раствором гидрогеля алюминия в количестве 21 г/л, при расходе в 1 л/м². Это позволяет установить фронт распространения лесного низового пожара, распространяющийся по

сухому травостойю плотностью 1-1,3 кг/м². При этом достаточная ширина огнезащитной полосы составляет 1 м.

4. Снижению расходов на профилактические мероприятия по ограничению распространения лесного низового пожара будет способствовать обустройство огнезащитной полосы, которая при сравнимой площади на 1 м² экономически выгоднее в 4,5 раза обустройства минерализованной полосы.

Перспективы дальнейшей разработки предлагаемого направления исследований заключаются в:

1) дальнейшем исследовании огнетушащего и огнезащитного действия гидрогелей на основе других химических элементов – магния, железа и кальция;

2) исследовании механизма огнетушащего и огнезащитного действия гидрогелей для разработки приемов наиболее оптимального их применения при тушении лесных пожаров, а также пожаров на лесоперерабатывающих и деревообрабатывающих предприятиях;

3) совершенствовании подачи водных растворов гидрогелей в зону горения ручным или механизированным способом, а также совершенствовании состава водных растворов гидрогелей с целью повышения их смачивающих свойств и, тем самым, повышения огнестойкости ЛГМ;

4) разработке методологии создания огнезащитных полос и установление взаимосвязи их месторасположения, ширины и степени огнестойкости с характером местности и погодными условиями.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. **Ивченко, О.А.** Тушение лесных горючих материалов гидрогелями на основе гидроксида алюминия / О.А. Ивченко, К.Е. Панкин // **Лесотехнический журнал**. – 2019. – № 1. – С. 76- 84.

2. **Ивченко, О.А.** Испытания огнетушащей способности гидрогеля алюминия при тушении модельных природных низовых пожаров / О.А. Ивченко, К.Е. Панкин // **Лесотехнический журнал**. – 2020. – Т. 10. – № 1. – С. 38–49.

3. **Ивченко, О.А.** Испытание огнезащитного действия соединений алюминия и бора для борьбы с низовыми пожарами/ О.А. Ивченко, К.Е. Панкин // **Лесотехнический журнал**. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 47–59.

Патенты:

4. **Патент на изобретение №2614963(RU) МПК А62D 1/00.** Способ тушения пожаров / О.А. Ивченко, Панкин К.Е., Савченко Т.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова». - №2015152537; заявл.:16.12.2015; опубл.:31.03.2017.

Статьи Scopus, Web of Science

5. **Ivchenko O.A.** Experimental Studies on the Flameproofing Efficiency of Some Inorganic Substances upon the Inflammation of Wood and Fibrous Materials / O. A. Ivchenko, K. E. Pankin, E. V. Kusmartseva, S. A. Anisimov, A.V. Tutin // **Helix**, 2020, Vol. 10 No 5. P. 109-113.

6. **Ivchenko O.A.** Use of fireproofing compositions in order to prevent forest fires / O. A. Ivchenko, Pankin K.E., Nadezhkina G.P., Udalova O.G., Rybalkin D.A. // *Modern S&T Equipments and Problems in Agriculture*, 2020, P. 98-107.

Статьи в научных сборниках и журналах:

7. Ивченко О.А. Концепция применения малого пожарного комплекса для тушения лесных и степных пожаров / Ивченко О.А., Панкин К.Е., Шаров С.С., и т.д. // II международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях». Кафедра «Техносферная безопасность и транспортно-технологические машины».- Саратов.- 2015. С. 88-91.

8. Ивченко О.А. Исследования достоверности методики оценки огнетушащей способности веществ и материалов / Ивченко О.А., Панкин К.Е. // Техногенная и природная безопасность Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. - 2017. С. 26-29.

9. Ивченко О.А. Испытания огнетушащей способности алюмогеля / Ивченко О.А., Панкин К.Е. // Техногенная и природная безопасность Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции. Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. - 2017. С. 21-25.

10. Ивченко О.А. Концепция создания огнезащитной полосы для профилактики и тушения лесных и степных пожаров / Ивченко О.А., Ивашина О.М., Панкин К.Е., и т.д. // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях Материалы IV международной научно-практической конференции. 2018. С. 357-361.

11. Ивченко О.А. Оптимизация группировки сил и средств тушения лесных пожаров / Ивченко О.А., Беляева Е.А., Тютин А.В., и т.д. // Техногенная и природная безопасность Материалы V международной научно-практической конференции. 2019. С. 28-32.

12. Ивченко О.А. Экспериментальные исследования эффективности огнезащитного действия некоторых неорганических веществ на воспламенение древесины и волокнистых материалов / Ивченко О.А., Савченко Т.А., Панкин К.Е. // Техногенная и природная безопасность Сборник научных трудов V международной научно-практической конференции. 2019. С. 80-84.

13. Ивченко О.А. Экспериментальные исследования тушения кромки степного пожара гидрогелем алюминия / Ивченко О.А., Панкин К.Е. // Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (Firesafety 2019) Материалы I Всероссийской научно-практической конференции: в 2 томах. Уфимский государственный авиационный технический университет; Главное Управление МЧС России по Республике Башкортостан. 2019. С. 28-32.

14. Ивченко О.А. Сравнительный анализ огнетушащей эффективности алюмогеля при исследовании в лабораторных и полевых условиях / Ивченко О.А., Панкин К.Е. // Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (Firesafety-2019) Материалы I Всероссийской научно-практической конференции: в 2 томах. Уфимский государственный авиационный технический университет; Главное Управление МЧС России по Республике Башкортостан. 2019. С. 108-114.

15. Ивченко О.А. Экспериментальные исследования огнезащитных свойств гидрогеля алюминия при обработке им травяного покрова / Ивченко О.А., Панкин К.Е. // Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (Firesafety-2019) Материалы I Всероссийской научно-практической конференции: в 2 томах. Уфимский государственный авиационный технический университет; Главное Управление МЧС России по Республике Башкортостан. 2019. С. 134-139.