

*На правах рукописи*

Панкин Кирилл Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО БОРЬБЕ С  
ЛЕСНЫМИ НИЗОВЫМИ ПОЖАРАМИ В ЛЕСОСТЕПНОЙ И  
СТЕПНОЙ ЗОНАХ ПОВОЛЖЬЯ**

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

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора сельскохозяйственных наук

Саратов 2022

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

**Научный консультант:** **Соловьев Дмитрий Александрович**, доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Буряк Людмила Викторовна** доктор сельскохозяйственных наук, доцент филиала ФБУ ВНИИЛМ «Центр лесной пирологии», главный Научный сотрудник лаборатории пирологии

**Иванов Валерий Александрович** доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», кафедра «Лесоводство, охрана и защита леса», профессор

**Михин Вячеслав Иванович** доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра «Лесные культуры, селекция и лесомелиорация», заведующий кафедрой

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.08 на базе Федерального государственного 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 текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и на сайте [www.sgau.ru](http://www.sgau.ru)

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

E-mail: [dissovet01@sgau.ru](mailto:dissovet01@sgau.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Татьяна Анатольевна  
Панкова

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Тушение лесных пожаров является одной из важных задач лесоуправляющих организаций. Для эффективного тушения лесных пожаров необходима организационная и техническая подготовка службы лесного пожаротушения, которая немыслима без актуальной информации об особенностях возникновения и развития пожаров, а также о возможностях по противодействию им и эффективности действия огнетушащих средств.

В последние десятилетия во всех странах, богатых лесными ресурсами, наблюдается рост числа лесных пожаров. Если в середине XX века в мире насчитывалось до 200 тыс. лесных пожаров в год, то к концу столетия их происходило от 2 до 3 млн, а во второй декаде XXI века фиксируется от 6 до 7 млн лесных пожаров. В последние 10-15 лет в Российской Федерации происходит от 10 до 35 тыс. лесных пожаров на площади от 500 тыс. до 9 млн га, большая часть которых приходится на районы Сибири и Дальнего Востока. Ущерб от лесных пожаров достигает 20 млрд руб., из них от 3 до 7 млрд - ущерб лесному хозяйству (потери древесины). Остальные потери - расходы на тушение и последующую расчистку горелых площадей, ущерб от гибели животных, загрязнения продуктами горения, затраты на восстановление леса и так далее.

Обстановка с лесными пожарами является отражением мощности антропогенного воздействия на окружающую среду, выражающуюся в потеплении климата и увеличении темпов эксплуатации лесных массивов, поэтому для защиты лесов от пожаров уже недостаточно разработанных и применяемых в производственном процессе противопожарных мер. Происходящие изменения в природе должны привести к эволюционным изменениям в профилактике и тушении лесных пожаров. Модернизации должна быть подвергнута если не вся система борьбы с лесными пожарами, то отдельные ее элементы. Необходимо проанализировать проблемные вопросы по профилактике и тушению лесных пожаров и найти решения, которые в комплексе привели бы к качественному повышению эффективности борьбы с ними. Из всех видов деятельности с научной точки зрения наиболее перспективными являются обоснование защитного действия противопожарных барьеров и применение средств тушения лесных пожаров. Оба эти направления являются единым целым, т.к. базируются на одном принципе: препятствование горению и свободному распространению пожаров, путем исключения взаимодействия лесных горючих материалов с кислородом воздуха. Модернизация противопожарных мероприятий и борьба с лесными пожарами наиболее необходима в тех местах, где существуют серьезные трудности с послепожарным восстановлением лесов. К таким территориям относятся лесостепная и степная зоны, где ведется интенсивное сельскохозяйственное производство, а на лесные массивы возложены защитная и экологические функции. В этом случае, лесной пожар наносит

двойной удар и по ведению лесного хозяйства, и по эффективности сельскохозяйственного производства.

Современное техническое и технологическое состояние мероприятий по обеспечению пожарной безопасности и средств пожаротушения в недостаточной степени отвечает разнообразию и особенностям природных условий местонахождения лесных массивов в Российской Федерации, их видового состава, что требует индивидуальных подходов в борьбе с лесными пожарами. Важной научной проблемой в этом вопросе является выявление особенностей возникновения и развития лесных пожаров и эффективных мер в борьбе с ними. Для решения данной проблемы в лесостепной и степной зонах необходимо провести сравнение с возникновением, развитием пожаров и существующими методами борьбы с ними в лесных зонах и предложить эффективные технические средства и технологические противопожарные мероприятия для рассматриваемой территории. На основании выявленных недостатков в противопожарных мероприятиях и средствах тушения лесных пожаров необходимо разработать меры по повышению защитных свойств противопожарных барьеров и повышению эффективности применения огнетушащих средств при пожаротушении.

Указанное выше обуславливает актуальность проводимого исследования для разработки надежных способов прогнозирования вероятности, сценария развития, последствий лесных пожаров, а также эффективных способов борьбы с возникновением, распространением лесных пожаров и их эффективного тушения.

**Степень разработанности темы.** Обеспечение пожарной безопасности в лесах является сложным комплексом организационных и технических мероприятий, состоящих из реализации следующей последовательности действий: противопожарная профилактика, противопожарное обустройство лесных массивов, мониторинг лесопожарной обстановки и обнаружение лесных пожаров, тушение и локализация лесных пожаров.

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). Проблема 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), П.А. Цветков (2011-2021). Прогнозирование лесных пожаров, их профилактика и предотвращение, борьба с ними, а также проблемы тушения лесных пожаров изучались такими учеными, как И.М. Абдурагимов (2011, 2012), Е.С. Арцыбашев (2014, 2015, 2018), Л.В. Буряк (1999-2021) Г.Д. Главацкий (2001,2002), В.Д. Захматов (2012, 2013, 2015), С.В. Залесов (2014, 2015, 2016, 2018), Г.А. Доррер (2011, 2012, 2017), Д.Г. Замолодчиков (2001, 2012, 2013), И.С. Мелехов (1934-1965), Н.П.

Курбатский (1964), В.Г. Гусев (2011, 2015, 2016, 2017), Н.Д. Гуцев (2013, 2015, 2016, 2017), М.А. Козаченко (2015, 2017, 2019), Ю.В. Подрезов (2000-2021).

**Цель исследований** – повышение эффективности применения огнезащитных и огнетушащих средств в лесном хозяйстве за счет системных подходов к профилактике и тушению лесных низовых и ландшафтных пожаров.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие научные задачи:

1) проанализировать проблемные вопросы профилактики и тушения лесных низовых и ландшафтных пожаров, а также функционирования систем борьбы с лесными пожарами;

2) провести анализ процессов возникновения и распространения лесных низовых и ландшафтных пожаров, а также действия огнетушащих средств для совершенствования приемов и средств их предотвращения и тушения;

3) разработать и обновить подходы к обеспечению пожарной безопасности в лесах и ландшафтах, а также новые огнезащитные и огнетушащие составы;

4) провести апробацию и внедрение различных приемов и средств обеспечения пожарной безопасности в лесах и лесного пожаротушения;

5) определить экономический эффект от внедрения усовершенствованных приемов и средств борьбы с лесными низовыми и ландшафтными пожарами.

**Объект исследований.** Лесные пожары, их возникновение и способы тушения.

**Предмет исследований.** Тушение и профилактика лесных пожаров с использованием огнетушащих и огнезащитных составов.

**Научная новизна** заключается в следующем:

- разработана математическая модель, которая на основании погодных условий позволяет вычислить геометрические размеры и положение противопожарного барьера для защиты лесов и населенных пунктов от лесных и ландшафтных пожаров;

- применены новые подходы комплексного использования огнетушащих средств для тушения лесных пожаров с минимальным расходом воды;

- предложены запатентованные технологические решения: в качестве огнезащитных и огнетушащих средств применять двухкомпонентные огнетушащие составы на основе воды и неорганических веществ, образующих гидрогели (гидрогель алюминия), предложен мобильный комплекс пожаротушения в виде легкового автопоезда, переоснащение и доукомплектование пожарной автоцистерны для тушения лесных пожаров.

Новизна технических и технологических решений профилактики и тушения лесных и ландшафтных пожаров подтверждена патентами РФ на изобретение №2552995, №2614963.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость исследования заключается в выработке подхода к модернизации элементов системы борьбы с лесными пожарами с поиском эффективных приемов и средств предотвращения распространению лесных и ландшафтных пожаров и их тушению.

Практическая значимость работы заключается в результатах лабораторных и полевых испытаний огнетушащих и огнезащитных свойств струи тонкораспыленной воды, переохлажденного водяного пара, водных неорганических веществ для создания средств пожаротушения с минимальным расходом воды.

**Реализация результатов исследований.** Результаты исследования внедрены в научно-исследовательскую, образовательную и производственную деятельность ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ, ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ. Технические и технологические решения внедрены в практическую деятельность Министерства природных ресурсов и экологии Саратовской области, Главного управления МЧС России по Саратовской области, службу по обеспечению противопожарной защиты администрации с. Мироновка Питерского района Саратовской области.

**Методология и методы исследования.** Для проведения моделирования пожароопасной обстановки применялись математические и физические модели поведения изучаемых объектов под влиянием внешних условий. Для оценки эффективности противопожарных барьеров их геометрические размеры сравнивались с результатами расчетов дальности переноса горящих, адекватность которой в свою очередь подтверждалась результатами собственных исследования и данными литературы. Анализом эффективности применения сил и средств при тушении лесных пожаров установлено преобладающая эффективность воды, а также разработана модель оценки количества воды, необходимого на тушение лесного низового пожара.

При лабораторных исследованиях огнетушащей способности применялись стандартные методики тушения пожара, полевая методика разработана самостоятельно, и подтверждена ее адекватность. Лабораторные и полевые исследования огнезащитных свойств гидрогелей алюминия также разработаны самостоятельно. Полученные экспериментальные данные обрабатывались с применением стандартных методик математической обработки результатов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) анализ проблем профилактики и тушения лесных низовых и ландшафтных пожаров и существующих систем борьбы с ними;
- 2) анализ процессов возникновения и распространения лесных низовых и ландшафтных пожаров для разработки более совершенных приемов и средств их предотвращения и тушения;
- 3) новые огнезащитные и огнетушащие средства для профилактики и тушения лесных низовых и ландшафтных пожаров;
- 4) внедрение предлагаемых приемов и средств профилактики и тушения лесных низовых и ландшафтных пожаров в лесостепной и степной зонах Поволжья;
- 5) экономическая оценка эффективности разработанных приемов и средств борьбы с лесными низовыми и ландшафтными пожарами.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается достаточным

количеством наблюдений, современными методами исследования, которые соответствуют цели работы и поставленным задачам. Сформулированные в тексте диссертации научные положения, выводы и практические рекомендации основаны на фактических данных, продемонстрированных в приведенных таблицах и рисунках. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа.

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 Национальной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях» (Саратов, 2018); V Международной научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность-2019» (Саратов, 2019); I Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (FIRESAFETY 2019)» (Уфа, 2019), VI Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность (ТПБ-2021)» (Саратов, 2021), IX Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях», а также на ежегодной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ с 2013 по 2022 годы.

**Публикации.** По результатам исследования опубликовано 45 научных работ общим объемом 14,89 п.л., в том числе с долей автора 11,43. В журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, опубликовано четыре статьи с участием автора 1,25 п.л., и опубликовано восемь статей в международных журналах, индексируемых WoS и Scopus с участием автора 2,32 п.л. Получено два патента РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 352 наименования, из которых 51 на иностранных языках. Общий объем работы – 387 страниц компьютерного текста, 377 страниц основного текста, 10 страниц приложений, 89 таблиц и 83 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Диссертация состоит** из введения; пяти разделов; заключения; списка литературы и приложений.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, из которой сформулирована цель исследования и задачи, решение которых позволит достичь цели, определены объект и предмет исследований, сформулирована

новизна исследования, обоснованы теоретическая и практическая значимость результатов работы, определены методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация работы, а также реализация и внедрение результатов исследования.

***В первом разделе «Анализ существующих систем профилактики и тушения лесных пожаров»*** представлен анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы о причинах, условиях возникновения и развития лесных пожаров, их последствиях и способах, приемах борьбы с ними. Анализ ситуации с лесными пожарами выявил, что в условиях, предпринимаемых противопожарных мер, отсутствует тенденция к снижению их числа и, наоборот, происходит рост числа пожаров и ущерба от него. Наблюдается сокращение межпожарных интервалов – периода времени между годами повышенной лесопожарной активности, который сократился с 5-6 лет до 2-3 лет, что свидетельствует о неподчинении ситуации стохастическим законам. Лесные и степные пожары возникают в определенных местах – на границах соприкосновения лесного массива и техногенного объекта (граница лес/город) и природа источников зажигания зависит от характера деятельности человека: лесообустройство, лесозаготовки, строительство, сельское хозяйство, рекреация и т.п. На выявление таких участков, а также на разработку мероприятий по борьбе с возникновением и развитием лесных пожаров необходимо сосредоточить свое внимание.

Проведен анализ достижений в сфере борьбы с лесными пожарами, выявлен ряд проблем снижения эффективности противопожарных мероприятий. Выявлен потенциал модернизации организационных и технических мероприятий по борьбе с лесными пожарами. Внимание уделено совершенствованию противопожарной защиты лесов - созданию барьеров, непреодолимых для лесного пожара, в том числе и с применением огнезащитных составов, а также тушению лесных пожаров с применением способов, повышающих эффективность применения воды и позволяющих снизить ее расход. Сформулирована программа исследований и дано краткое описание замысла ее решения.

***Во втором разделе «Теория применения огнетушащих и огнезащитных средств для борьбы с лесными пожарами»*** обсуждаются теоретические вопросы горения лесных горючих материалов, факторов способствующих горению, принципов пожаротушения и их реализации на практике, действию средств тушения пожара и огнезащитных составов.

Лесные горючие материалы преимущественно состоят из двух биополимеров – целлюлозы и лигнина, термический распад которых производит целое семейство газообразных и легколетучих органических веществ, способных воспламеняться и гореть с высокой теплоотдачей [9,10, 17,18]. В состав газообразных продуктов термического распада входят метан, монооксид углерода, водород и т.п. К легколетучим соединениям, образующимся в результате пиролиза, относятся фенолы ( $\approx 50\%$  мас.), спирты ( $\approx 14\%$  мас.), альдегиды ( $\approx 3\%$  мас.), кетоны ( $\approx 12\%$  мас.), карбоновые кислоты ( $\approx 15\%$  мас.), эфиры ( $\approx 4\%$  мас.) [10]. Кроме этого, древесина и кора некоторых

растений содержат в себе экстрактивные вещества терпены, смоляные и жирные кислоты [9], что объясняет высокую теплоту сгорания древесины некоторых хвойных (сосна, ель) и лиственных растений (береза).

Для тушения лесных и степных пожаров на практике применяют табельные средства тушения: ручной и механизированный инструмент. Анализируя производительность применяемых средств лесного пожаротушения, можно определить, что применение ранцевых лесных огнетушителей в 1,5...2 раза эффективнее использования лопат и подручных средств, а применение лесопожарных машин (автоцистерн и вездеходов), увеличивает скорость тушения в 30-40 раз. Тем не менее значительным недостатком применения воды является необходимость постоянного пополнения ее запасов, что требует введения дополнительных операций - доставку воды к месту тушения. В связи с этим исследователи обязаны разработать такие огнетушащие средства и способы тушения, позволяющие снизить потребление воды [2-4,44,45]. Для этого необходимо использовать термодинамические основы горения и пожаротушения.

Пожар – это процесс самопроизвольного выделения энергии ( $Q$ ), запасенного в горючем веществе. Тогда условием самопроизвольности процесса горения является

$$Q = E_a + E_p, \quad (1)$$

где  $E_a$  – энергия активации, Дж;  $E_p$  – энергия рассеивающаяся в окружающей среде, Дж, при этом доказано, что в абсолютном большинстве случаев  $E_a \ll E_p$ , тогда справедливо неравенство  $Q \gg E_a$ .

Вода при тушении пожара выступает в качестве инертного теплоносителя, поглощает выделяющуюся при пожаре теплоту  $Q_{\text{пож}} \rightarrow Q_{\text{погл}}$  и превратившись в пар, переносит ее в атмосферу, т.е.

$$Q_{\text{погл}} = E_{\text{нагр}}(\Delta U) + E_{\text{исп}}(A), \quad (2)$$

где,  $E_{\text{нагр}}$  – энергия, расходуемая на нагревание массы воды, до температуры кипения, Дж;  $E_{\text{исп}}$  – энергия, расходуемая на парообразование, Дж.

Учитывая (1) и (2), получим

$$Q_{\text{пож}} = E_a + E_{\text{нагр}}(\Delta U) + E_{\text{исп}}(A). \quad (3)$$

Если  $Q_{\text{пож}} \rightarrow Q_{\text{погл}}$  представить как равенство  $Q_{\text{пож}} = Q_{\text{погл}}$ , то  $Q_{\text{пож}} = E_{\text{нагр}}(\Delta U) + E_{\text{исп}}(A)$  и тогда  $E_a = 0$ . Исходя из этого следует, чем больше энергии, выделяемой при пожаре будет поглощено водой, тем меньше энергии перейдет в  $E_a$  и будет осуществлено тушение пожара

$$Q_{\text{пож}} < E_a, \quad (4)$$

Выделение и поглощение энергии осуществляется единым актом и контролируется законом сохранения энергии. Объем, подаваемой в зону горения воды, можно рассчитать по уравнению

$$q_k = 3600 * q_{cm} / V_k, \quad (5)$$

где  $q_{cm}$  – расход воды через ствол (гидропульт), л/с;  $V_k$  – скорость тушения кромки лесного низового пожара, м/ч. Применив уравнение (5), зная расходы воды через пожарные стволы или гидропульты, получаем расход воды на тушение кромки лесного низового пожара. Анализ данных показывает, что

наибольший расход на 1 м кромки лесного низового пожара наблюдается при применении лесопожарной автоцистерны ( $\approx 24 \text{ дм}^3/\text{м}$ ), а наименьший у лесопожарной воздуходувки-опрыскивателя типа «Ангара»  $\approx 0,15 \text{ дм}^3/\text{м}$ . Исследования автора, а также литературные данные показали, что расход воды на тушение низового пожара при применении ранцевого лесного огнетушителя составляет  $0,2-0,5 \text{ дм}^3/\text{м}$  [3].

Если лесной низовой пожар удастся потушить с расходом  $0,15 \text{ дм}^3/\text{м}$ , то возьмем его в качестве базового значения, для расчета  $Q_{\text{ногл}}$

$$Q_{\text{ногл}} = C_p * m(\text{вода}) * (100 - t_{oc}), \quad (6)$$

где  $C_p$  – теплоемкость воды в диапазоне  $0-100 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $4,19 \text{ кДж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ );  $m(\text{вода})$  – масса воды, кг;  $t_{oc}$  – температура окружающей среды, ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Используя уравнение (6), возможно вычислить энергию, необходимую для выполнения условия (4), которая составляет около  $47 \text{ кДж}$ , т.е. экспериментально подтверждена справедливость неравенства  $Q \gg E_a$ . Применение при тушении лесных пожаров струи тонкораспыленной воды обладает одним недостатком – необходимостью формировать поток воздуха со скоростью  $18-20 \text{ м/с}$ . При этом полученный аэрозоль содержит в себе больше воздуха, чем воды и при определенных условиях может осуществлять поддув зоны горения. Для исключения этого явления необходимо снизить концентрацию кислорода в аэрозоле, но сделать это можно только формированием струи переохлажденного водяного пара, огнетушащая эффективность которого подтверждена экспериментально. Тем не менее отсутствие образцов оборудования (портативных парогенераторов) ограничивает применение данного способа тушения лесных пожаров.

Существует другой путь модификации воды, не требующий больших энергетических затрат, - это образование водой истинных и коллоидных растворов с органическими и неорганическими веществами. Образование водных растворов формирует системы, физические и химические свойства которых отличны от свойств воды. Физические свойства водных растворов изменяются из-за влияния растворенных веществ на пространственную сетку водородных связей [13,14], которое в свою очередь ведет к изменению теплоемкости системы, а также состава паровой фазы. По закону Ф.М. Рауля (1887 г.), водные растворы электролитов и неэлектролитов имеют более высокие температуры кипения, а по закону Д.П. Коновалова (1881 г.) паровая фаза обогащается более легколетучим компонентом. В этом случае, если для пожаротушения применять водные растворы, к примеру этиленгликоля или моноэтаноламина, то паровая фаза таких растворов будет богата парами, т.к. температуры их кипения выше, чем у воды и составляют  $181$  и  $151 \text{ }^\circ\text{C}$ . Таким образом, перспективными для создания новых огнетушащих средств являются водные растворы высококипящих веществ [19].

В лесопожарных мероприятиях нашли широкое применение смачиватели, а в последние десятилетия воздушно-механические пены, на основе поверхностно активных веществ. Их применение позволяет повысить смачиваемость лесных горючих материалов, а также изолирует лесные горючие материалы от доступа кислорода. Для дополнительного расширения

свойств огнетушащих средств в научной литературе и в результатах патентного поиска предложены сложные смеси содержащие: электролиты, неэлектролиты, поверхностно-активные вещества, в домицеллярной концентрации (смачиватели), пены (ПАВ в мицеллярных концентрациях), гидрогели [25,26,29] и т.п. Эти составы можно применять как для тушения лесных пожаров, так и для противопожарной профилактики – строительства заградительных полос. Учитывая все перечисленное, необходимо сосредотачивать свои усилия на наиболее простых с экономической, технической и технологической точек зрения огнезащитных и огнетушащих средствах, доступных для широкого применения.

**В третьей главе «Совершенствование обеспечения пожарной безопасности в лесах и лесное пожаротушение»** изложен анализ проблемных вопросов обеспечения пожарной безопасности и лесного пожаротушения в лесах лесостепной и степной зон Поволжья. Предрасположенность лесов и лесных культур данной зоны к пожарам обусловлена географическими, климатическими и погодными условиями, из-за которых леса существуют на грани своих возможностей и в теплый период года находятся в предельно сухом состоянии. На данной территории наблюдается переход климата с умеренного континентального (лесостепная зона) к континентальному (степная зона) Граница климатических зон проходит по р. Волга [39]: Правобережье характеризуется умеренным континентальным климатом, а Левобережье – континентальным. По территории Саратовской области проходит граница лесостепи со степью [5,16]. Типичная лесостепная зона сформировалась в Пензенской области, в Саратовской области южнее Вольского района уже наблюдается зона степей. Волгоградская область - типичная степная зона, только 4,5% территории которой покрыты лесными культурами. Заволжские степи переходят в Великую степь республики Казахстан, и там наблюдаются уже аридный тип климата, а древовидные растения растут только в поймах немногочисленных рек.

Данные о состоянии лесов лесостепной и степной зон на примере Саратовской области представлены в таблице 1, где видно, что лесостепная и степная зоны содержит участки лесов и лесных культур I-го и II-го классов, которые занимают 20 % площади [16]. Средневзвешенный показатель степени пожарной опасности лесов составляет 2,9.

Таблица 1 - Распределение лесов на примере Саратовской области по классам пожарной опасности (на 1 января 2018 года)

Классы пожарной опасности	Площадь, тыс. га	Процент данного класса к общей площади лесов
I	97,53	13,5
II	47,906	6,7
III	453,233	62,8
IV	89,072	12,3
V	34,112	4,7

Возникновению и развитию лесных пожаров способствует устройство самого леса или лесной культуры, выполняющее вполне определенную роль – экологическую и агролесомелиоративную: защитные лесные полосы (в том числе агролесомелиоративные), пойменные леса/ЛК, экологические ЛК и питомниковые см. рисунки 1 и 2.



Рисунок 1 - Лесной массив, расположенный в 1,1 км к северо-западу от г. Маркс Саратовской области



Рисунок 2 - Лесной массив, расположенный в 7,5 км к западу от г. Маркс Саратовской области

Анализ состояния лесов и лесных культур показывает их компактное месторасположение с опушкой значительной длины и изрезанного характера, внутри лесных массивов присутствуют прогалины и признаки лесоустройства и лесовосстановления - линейные структуры и просеки. Все это способствует проникновению ветра в лесной массив и его влиянию на рост и развитие лесного пожара. Лесные массивы захламлены лесным опадом, валежем, буреломом, не очищены от кустарника и подроста, что является «пищей» для лесных низовых пожаров и затрудняет тушение.

Для подготовки к реализации противопожарных мероприятий необходимо знать особенности возникновения и развития лесных пожаров, главным из которых является место возникновения пожара и скорость его распространения. Время возникновения пожара узнать просто - в пределах пожароопасного сезона (с апреля по октябрь), но более точно, установить пока не удастся. Для выявления влияния природных и погодных факторов на скорость распространения лесного пожара был применены следующий прием [6,15] и следующие допущения: (1) условиях распространения пожара остаются неизменными как во время его свободного развития, так и во время тушения; (2) при пожаре тушению подвергается не его площадь, а кромка лесного пожара; (3) развитие пожара не прекращается при начале его тушения (обратное может наблюдаться только при очень малых значениях площади пожара, в этом случае лесные пожарные могут атаковать пожар по всей длине его кромки); (4) на момент начала тушения пожара длина потушенной кромки равна нулю, т.е.  $l_m=0$ ; (5) к моменту локализации пожара длина потушенной

кромки равна общей длине кромки,  $l_m=l_k$ ; (б) зная время начала и завершения тушения пожара, а также соответствующие им показатели площади и длины кромки, можно определить только средние показатели скорости, а коэффициент при аргументе свидетельствует о скорости развития (тушения) кромки пожара (м/мин). Графическое представление разработанной модели представлено на рисунке 3.

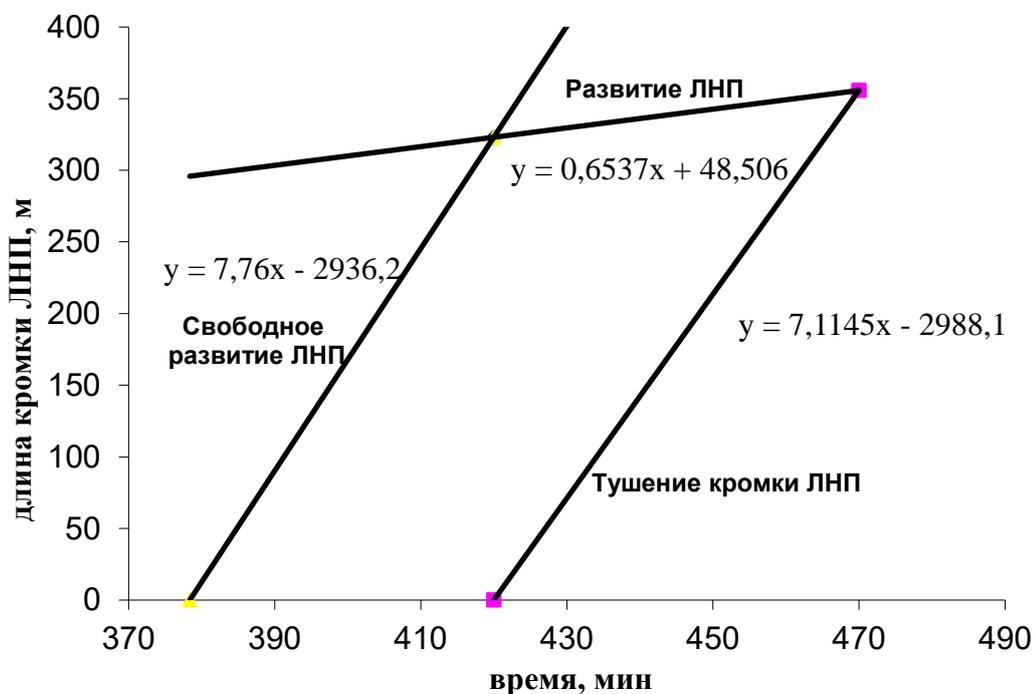


Рисунок 3 - Графическая зависимость развития лесного низового пожара и его тушения

Применение линейных зависимостей при оценке динамики развития и тушения лесных пожаров является наряду с общепринятой практикой еще и вынужденной мерой, т.к. фактически имеются только начальные и конечные точки – начало и завершение пожара и его тушения. По известным начальным и конечным точкам можно вычислить средние скорости развития и тушения пожара – коэффициенты  $a$  в уравнениях вида  $y=ax+b$ , означающие прирост длины кромки ЛНП к единице времени (часу, минуте и т.п.). Таким образом, учитывая модельные представления, необходимо сложить между собой скорость развития пожара  $a_1=V_{pn}$  и  $a_2=V_{mn}$  и получить скорость свободного развития лесного пожара (до начала его тушения)  $V_{cpn}=V_{pn}+V_{mn}$ . Была проведена оценка скорости распространения ЛНП в хвойных (*Pinus sylvestris* L., 1753) и лиственных (*Quercus robur* L., 1753) лесах. Результаты такой оценки представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты оценки скоростей распространения лесного низового пожара в хвойных (*Pinus sylvestris* L., 1753) и лиственных (*Quercus robur* L., 1753) лесах и лесных культурах на примере Саратовской области [6,15]

Класс ПО УП	Тип ЛМ	Класс ПО типов леса	V <sub>лп</sub> , м/ч
III	Сосна	I	4-900
IV	Сосна	I	320-650
V	Сосна	I	70-780
IV	Дуб	II,III	70-2600
V	Дуб	II,III	70-3700

Анализ полученных результатов показывает, что динамика лесных низовых пожаров в лесостепной и степной зонах Поволжья превышает справочные значения в 5 раз для лиственных лесов (*Quercus robur* L., 1753) и в 10 раз для хвойных лесов (*Pinus sylvestris* L., 1753). Данные о скоростях развития лесных низовых пожаров представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Примерные показатели развития и распространения лесных низовых пожаров в лесах и лесных культурах различных типов в зависимости от классов пожарной опасности по условиям погоды

Типы лесов (Класс ПО)	Вид пожара (Класс ПО УП)	Скорость распространения тактических элементов (в числителе - пределы, в знаменателе – средняя скорость), м/ч			Примечание
		фронт	фланги	тыл	
Сосняки (I)	Низовой (I-II)	10...1400 750	100...250 175	50...100 75	Минимальные скорости распро- странения низовых пожаров при ветре до 1 м/с, максимальные - при ветре от 6 м/с и более
	Низовой (III-V)	300...3000 1800	100...250 175	50...100 75	
Дубняки (II и III)	Низовой (I-II)	75...150 120	75...100 90	25...75 60	Минимальные скорости распро- странения низовых пожаров при ветре до 1 м/с, максимальные - при ветре от 6 м/с и более
	Низовой (III-V)	150...600 375	100...200 150	5...75 60	

Используя данные, представленные в таблице 3, можно рассчитать скорость развития лесного низового пожара в природных и погодных условиях лесостепной и степной зон при проведении прогнозирования лесопожарной обстановки.

Для снижения пожарной опасности в лесах проводят комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на удаление источников загорания, препятствование свободному распространению лесного пожара и, наконец, обеспечению мероприятий по тушению пожаров. Эффективность данных мероприятий выражается количественно, так, например, сравнительное небольшое число лесных пожаров от 80 до 140 в год (6-7 месяцев) на территории Саратовской области, свидетельствует о том, что пожар - это скорее исключение, чем правило. Применение предложенной модели позволяет, довольно точно, вычислить время начала пожара и время реагирования на лесной пожар. Более половины (62%) лесных пожаров возникли днем, 28% обнаружены в утренние часы, 5% пожаров обнаружены в вечернее время и еще 5% обнаружены ночью. Такое распределение явно показывает искусственное происхождение пожара: неосторожное обращение с огнем или поджоги. Время реагирования на пожар находится в среднем в пределах 45-90 минут.

Эффективность тушения лесных пожаров также выражается количественно в скорости тушения кромки лесного низового пожара, которую можно отнести к количественным характеристикам группировки сил и средств [35]. В большинстве случаев (75%) лесные пожары были потушены сотрудниками лесхозов и лесничеств, в 16% случаев потребовалось привлечение волонтеров (местных жителей и фермеров) и в 9% случаев требовалась дополнительная помощь штатных сотрудников Противопожарной службы МЧС России. Они оказались способны тушить лесные низовые пожары со следующими скоростями: 1-3 м/мин (20 пожаров - 55%), 3-10 м/мин (14 пожаров - 38%) и >11 м/мин (2 пожара - 7%). При этом скорость тушения кромки низовых пожаров в хвойных лесах в среднем 4,0 м/мин, а в лиственных - 2,28 м/мин, что, возможно, связано с наличием подроста (кустарников) в лиственных лесах, затрудняющих перемещение лесных пожарных, снижая качество тушения кромки низового пожара. Тем не менее сравнение реальной производительности группировки лесных пожарных с расчетной показывает наличие серьезных отклонений. Так скорость тушения в хвойных лесах Правобережной части Саратовской области приблизительно в 7,2 раза ниже расчетной, а в лиственных лесах эффективность снижается в 21 раз. Для того чтобы выяснить, влияет ли численность группировки сил и средств на эффективность тушения лесного низового пожара, отдельно на рисунках 4 и 5 представлены графические зависимости.

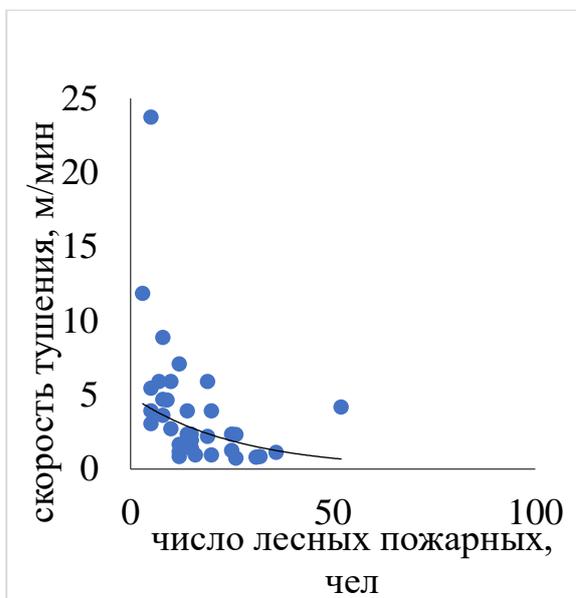


Рисунок 4 - Зависимость времени тушения пожара от численности пожарных

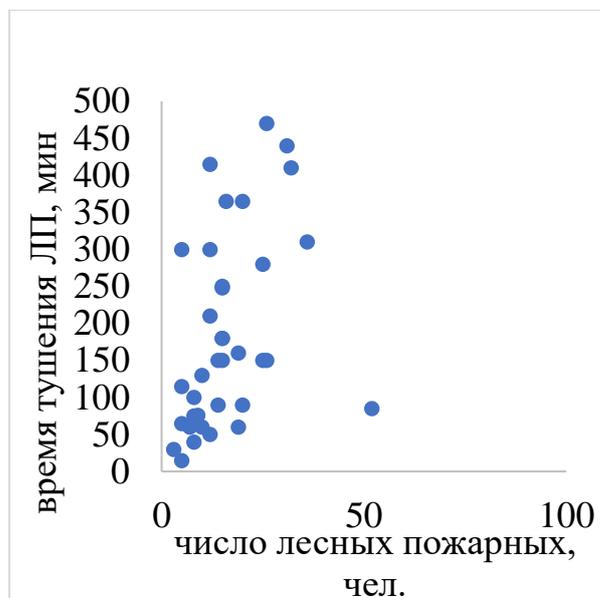


Рисунок 5 - Зависимость скорости тушения пожара от численности пожарных

Анализ результатов, представленных на рисунках 4 и 5, показывает прямую зависимость времени тушения пожара, а скорость тушения показывает обратную зависимость от численности группировки, что является отражением сложного характера местности и устройства лесов. Поэтому привлекать большие группировки к тушению лесных пожаров не целесообразно, в связи с трудностями в их управлении и обеспечении.

Потребность в воде при тушении определяется ее массой, затраченной на тушение, с учетом всех технологических потерь. Под последними понимаются расходы воды на заполнение паразитных объемов насосов, рукавов, не сливаемых объемов цистерн и пр. Для снижения расходов воды необходимо выявить, какое оборудование наиболее экономно расходует воду при тушении пожара, в том числе меньше ее теряет. Доставить к месту тушения силы и средства можно как с помощью лесопожарных автоцистерн, так и мобильных комплексов пожаротушения [20-23,31,43], а можно и обычными транспортными средствами – легковыми и грузовыми автомобилями при условии, что средства тушения пожара уже находятся рядом с местом тушения [41]. Можно оценить расходы воды на тушение кромки лесных низовых пожаров, используя данные о производительности применяемого оборудования и расходов воды через пожарные стволы или гидропульты [42]. Результаты такой оценки представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Сравнительная характеристика эффективности тушения низовых пожаров с помощью пожарных автомобилей на грузовом и легковом шасси

Лесопожарная техника	Шасси	Экипаж, чел	Объем цистерны, м <sup>3</sup> /л	Тип насоса/расход*, л/м	Длина кромки ЛНП**, м / время тушения, ч
АЦЛ-1,6	ГАЗ-33081	6	1,6/1600	ПН / 24,3	66 / 0,16
АЦЛ-3,2	ГАЗ-3308	3	3,2/3200	ПН / 24,3	130 / 0,32
МПК-0,8	УАЗ-39094	4	0,8/800	УПВД / 0,65	1230 / 4,5
МПК-0,9	УАЗ-330365	2	0,9/900	УПВД / 0,65	1380 / 5,0
Автопоезд МПК-0,9 и МПК-0,5	УАЗ-330365	2	1,6/1600	УПВД / 0,65	2460 / 8,9

\* расход (л/м) через пожарный ствол или гидропульт (см. п. 2.6);

\*\* длина кромки ЛНП которую возможно потушить (без учета потерь).

Результаты расчетов показывают, что автоцистерны уступают в эффективности расходования воды мобильным комплексам пожаротушения, созданным на базе легковых автомобилей [40]. Если создать мобильный комплекс пожаротушения на базе легкового автопоезда, то автономный запас воды в них приблизится к запасу в автоцистерне, т.е. до 1,6 м<sup>3</sup>, при этом даст возможность тушить 2500 м кромки.

Существует оригинальное решение проблемы расхода воды при тушении лесного пожара –использовать либо механическое воздействие на кромку, либо засыпку ее грунтом [37, 40]. Для подтверждения такой эффективности был проведен расчет эффективности, который представлен в таблице 5.

Таблица 5 - Сравнительная характеристика эффективности применения сил и средств тушения лесного низового пожара

ЛПТ	Шасси	Экипаж, чел	Объем цистерны, м <sup>3</sup> /л	Тип насоса/расход*, л/м	Длина кромки ЛНП**, м / время тушения, ч
ПТ	УАЗ-2206	7	-	-	1050 / 5,0
ГПТ и МПК-0,5	УАЗ-2206	7	0,5/500	УПВД / 0,65	1013 / 2,7
МПК-0,8	УАЗ-39094	4	0,8/800	УПВД / 0,65	1500 / 4,5
МПК-0,9	УАЗ-330365	2	0,9/900	УПВД / 0,65	1380 / 5,0
Автопоезд МПК-0,9 и МПК-0,5	УАЗ-330365	2	1,6/1600	УПВД / 0,65	2460 / 8,9

\* расход (л/м) через пожарный ствол или гидропульт (см. п. 2.6);

\*\* длина кромки ЛНП которую возможно потушить (без учета потерь).

Анализ представленных в таблице 5 результатов показывает, что заменить средства тушения пожара (воду) силами (людьми) можно, но это закономерно приведет к снижению эффективности в 15-20 раз, а если учесть быстрое снижение трудоспособности людей при тушении лесных пожаров, то снижение эффективности может достигнуть 30-ти раз.

Для оценки эффективности тушения лесных низовых пожаров была создана модель, учитывающая одновременно и расходы воды на тушение и ее потери

$$V_{\text{воды}} = (V_n + V_{\text{пн}} + V_p) + (q_{\text{пн}} \cdot K_b \cdot K_m \cdot v_{\text{срп}} \cdot (t_{\text{оп}} + S_d/v_d) + q_{\text{пн}} (v_{\text{рп}} t_{\text{рп}})), \quad (7)$$

где  $v_{\text{рп}}$  – средняя скорость развития низового пожара, м/мин;  $t_{\text{рп}}$  – среднее время тушения низового пожара, мин.

Уравнение (7) является многопараметрическим и отражает сложную зависимость объема воды, требуемого для тушения ЛНП, являющейся многомерным пространством, объединяющем условия развития и тушения ЛНП. Для табличного или графического представления зависимости необходимого количества воды необходимо выбрать не более 3-х параметров, играющих наиболее важную роль в развитии и тушении ЛНП. Расчет потребности в воде при тушении лесного низового пожара по уравнению (7) с применением лесопожарных автоцистерн и мобильных комплексов пожаротушения представлены на рисунках 6 и 7.

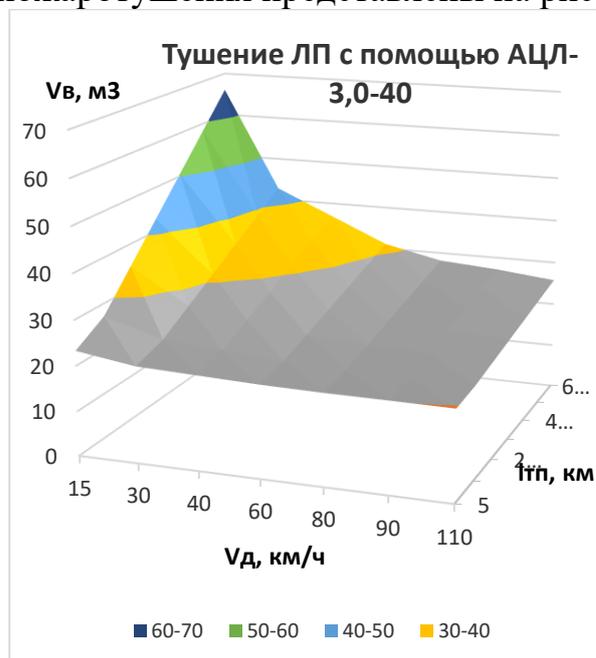


Рисунок 6 - Запас воды необходимый для тушения лесного низового пожара с помощью АЦЛ-3,0-40:

$V_n = 80$  л;  $V_{\text{пн}} = 15$  л;  $V_p = 200$  л;  
 $q_{\text{пн}} = 24,3$  л/м;  $v_{\text{срп}} = 8$  м/мин;  
 $K_b = 1$ ;  $K_m = 1$ ;  $t_{\text{оп}} = 60$  мин;  
 $v_{\text{рп}} = 1,8$  м/мин  $t_{\text{рп}} = 170$  мин

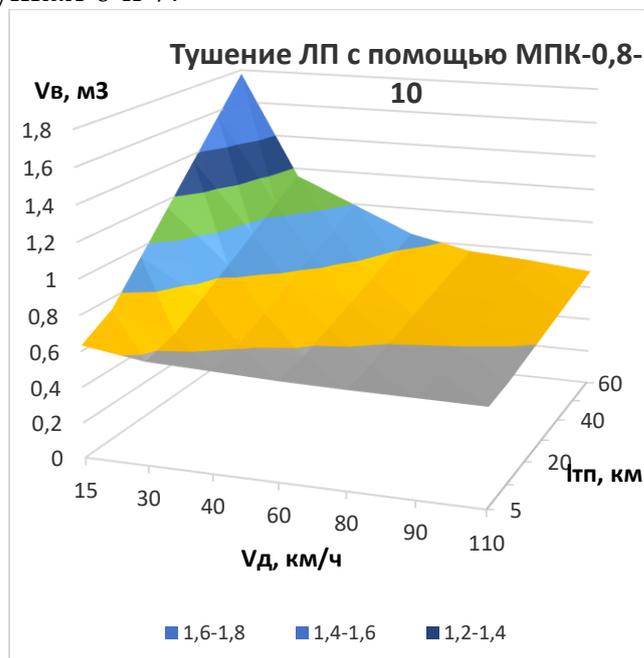


Рисунок 7 - Запас воды необходимый для тушения лесного низового пожара с помощью МПК-0,8-10:

$V_n = 15$  л;  $V_{\text{пн}} = 2$  л;  $V_p = 0,1$  л;  
 $q_{\text{пн}} = 0,65$  л/м;  $K_b = 1$ ;  $K_m = 1$ ;  
 $t_{\text{оп}} = 60$  мин;  $v_{\text{срп}} = 8$  м/мин;  
 $v_{\text{рп}} = 1,8$  м/мин;  $t_{\text{рп}} = 170$  мин

Представленные диаграммы показывают, что на тушение лесных низовых пожаров при прочих равных условиях для АЦЛ-3,0-40 потребуется воды практически в 30 раз больше, чем с использованием МПК-0,9, т.е. 65 м<sup>3</sup>, против 1,8 м<sup>3</sup>, т.е. последние более эффективны [20, 22, 23].

Тушению пожаров в лесной местности препятствуют возможности добраться до места тушения пожара [40]. Лесохозяйственные и пожарные дороги в лесных массивах не отвечают требованиям безопасности, а местами труднопроходимы для транспортных средств. Еще более трудной задачей является движение по лесной местности на автопоезде. Для обеспечения движения необходимо повысить его проходимость и маневренность, которые определяются радиусами продольной проходимости, поперечной проходимости, углом въезда и динамическим коридором [1]. Большинство параметров связано с длиной дышла (см. таблицу 6).

Таблица 6 - Параметры легкового автопоезда в зависимости от длины дышла

Длина дышла, мм	Радиус продольной проходимости, м	Высота кузова АП, мм	Угол поворота, гр.	Динамический коридор легкового автопоезда, м
440	1,7	380	34	4,91
700	2,0	600	57	4,92
1162	2,5	1000	>90	4,97
1395	2,9	1200	>90	4,99
1802	3,5	1550	>90	5,02

АП – автомобильный прицеп

Анализ представленной в таблице 6 информации показывает, что для обеспечения максимальных параметров по проходимости и маневренности необходима длина дышла 0,7 м [20].

Создан мобильный комплекс пожаротушения, состоящий из квадроцикла, используемого в качестве транспортного средства, к которому посредством тягово-сцепного устройства присоединен одноосный прицеп (рисунок 8а), для профилактики и тушения лесных низовых пожаров (патент РФ на изобретение №2552995) [7].

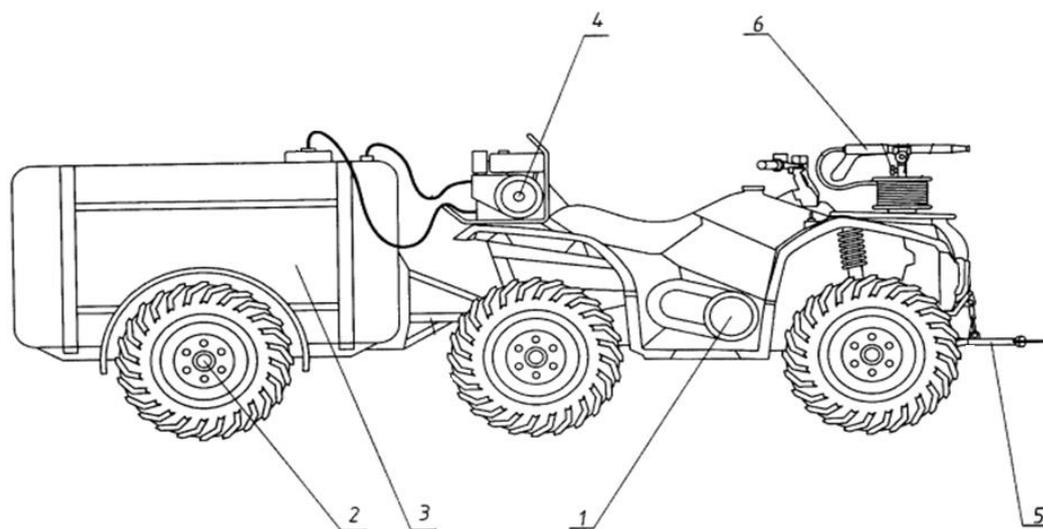


Рисунок 8 - Мобильный комплекс пожаротушения [7]

Предлагаемый комплекс предназначен для доставки к месту тушения пожара одного или двух лесных пожарных, запаса воды и установки пожарной высокого давления. Комплекс обладает малыми размерами и достаточной маневренностью, что делает его пригодным для применения в труднодоступных местах. Использование предлагаемого комплекса позволит осуществлять тушение лесных пожаров в условиях значительного удаления или отсутствия открытых источников воды в районе очага возгорания. Предлагаемый мобильный комплекс пожаротушения [7,43] дешев в приобретении, эксплуатации и обслуживании, экономичен в расходе топлива. Мобильный пожарный комплекс состоит из транспортного средства (квадроцикла) 1 и прицепа 2, в котором размещена емкость 3. Установка пожарная высокого давления 5 установлена на квадроцикле над его задней осью, для сокращения длины всасывающего трубопровода, а рукава высокого давления подают воду к боковым пожарным стволам 5 и ручному пожарному стволу (гидропульту) 6, применяемым для тушения как отдельных очагов низовых пожаров, так и кромки на расстоянии не более 15-20 м от комплекса.

Возможности снижения расхода воды при профилактике и тушении лесного низового пожара лежат еще и в области равномерности ее подачи в зону горения. В лесостепной и степной зонах низовые пожары проще всего тушить и локализовать либо до подхода кромки к лесному массиву, либо при ее выходе на опушку. В этом случае пожар попадает в зону с равномерным распределением горючих материалов и его тушение потребует равномерности распределение огнетушащих составов [44,45].

Лесной пожар сам по себе является чрезвычайной ситуацией, но и при его тушении нередко лесные пожарные подвергают риску и себя, и лесопожарную технику. Для защиты лесопожарного автомобиля от тепла, выделяемого при пожаре, его необходимо окружить водяной завесой по схеме, представленной на рисунке 9, с двойным перекрытием оросителя и с максимальной интенсивностью орошения в зоне А и Б, которые расположены по бокам, спереди и сзади от машины [44.45].

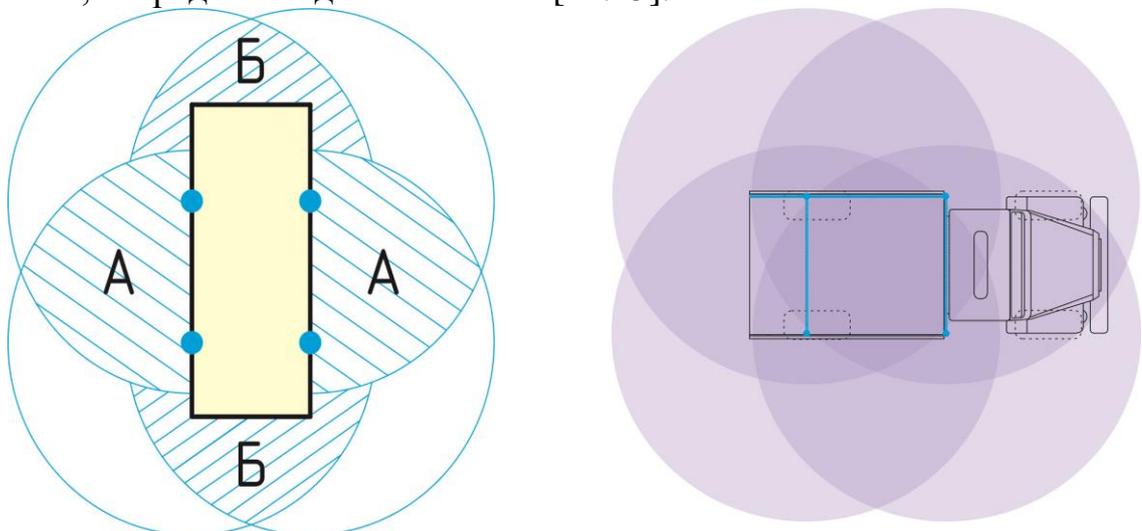
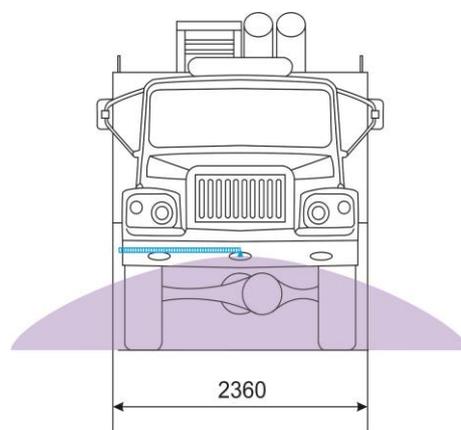


Рисунок 9 - Схема орошения вокруг машины пожарной

Самые уязвимые части автомобиля – движители (колеса), топливный и масляный баки, тормозные магистрали и т.п. располагаются снизу (рисунок 10а) и уязвимы для пламенного горения при низовом пожаре, для защиты от него предложено разместить на переднем бампере секторный ороситель (рисунок 10б), подавая через который воду, можно прокладывать себе безопасный путь в зоне горения. Расчеты показывают, что слой дождя секторного оросителя после прохода пожарной машины при скорости 8 км/час составит – 22 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>. А также то, что слой дождя от секторного оросителя постепенно уменьшается до нуля к краям зоны орошения. При изменении скорости движения пожарной автоцистерны объем капель воды, падающих на горючие материалы или на дорогу и из-под колеса, будет изменяться.



а



б

Рисунок 10 - Секторный ороситель впереди пожарной машины (фото машины)

В четвертом разделе «*Апробация и внедрение эффективных систем обеспечения пожарной безопасности в лесах и лесное пожаротушение*» обсуждаются результаты практической оценки теоретических представлений о возникновении, развитии лесных пожаров, а также борьбы с ними.

Для разработки эффективных мероприятий по борьбе с лесными пожарами необходимо установить влияние погодных условий на число лесных пожаров и ущерб от них. Исследования показали, что не существует однозначной связи количества лесных пожаров ни с отдельными параметрами погодных условий (температура воздуха, относительная влажность воздуха, количество осадков), ни с комплексными показателями, такими как гидротермический коэффициент (по Селянинову) и комплексным показателем пожарной опасности по условиям погоды (по Нестерову) [16]. Все это свидетельствует о преимущественно антропогенном происхождении лесных пожаров. Из-за особенностей климатических условий в лесостепной и степной зонах Поволжья отсутствует такие погодные явления как весна и осень, т.к. в течение 10-12 дней после схода снежного покрова в лесах может сформироваться III класс пожарной опасности по условиям погоды, а лесные

пожары могут наблюдаться уже при I классе [5]. Календарная осень часто бывает засушливой, сухая погода может длиться до середины ноября, а в конце ноября может сформироваться снежный покров. В общем виде леса и лесные культуры формируют I-IV классы пожарной опасности по породному составу и I-V классы по погодным условиям.

При возникновении лесного пожара первым препятствием на его пути становится противопожарный барьер. От полноты и качества строительства таких барьеров зависит остановка фронта (кромки) низового пожара. Анализ литературы показал, что ни противопожарные разрывы, ни минерализованные полосы не являются эффективными барьерами для защиты от распространения лесных пожаров. Для приближения их эффективности к необходимому уровню нужно увеличивать их размеры в 3-4 раза [26]. Наиболее сложной ситуацией является перенос горящих частиц ветром над противопожарным барьером. Для ответа на данный вопрос создана модель [15], связывающая дальность переноса и скорость ветра, через специальный пересчетный коэффициент ( $K_n$ )

$$L=K_n \cdot V_{ветр} \cdot t_{пад}, \quad (8)$$

где  $V_{част}$  – скорость ветра, м/с;  $K_n$  – коэффициент переноса ( $K_n=V_{част}/V_{ветр}$ );  $t_{пад}$  – время падения горящей частицы с некоторой высоты, которая определяется из соотношения

$$t_{пад} = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad (9)$$

где  $h$  – высота падения частицы, м;  $g$  – ускорение свободного падения тела в гравитационном поле Земли, м/с<sup>2</sup>, ( $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>). Анализ уравнения (9) показывает, что время падения частицы не зависит от ее массы, таким образом, изменением массы горящей частицы при переносе ветром можно пренебречь. Однако нужно помнить, что самые крупные частицы, способные к переносу ветром, могут гореть до 450 с (20 мин). Понятно, что конвективный поток поднимет в воздух частицы разного размера, часть которых сгорит, находясь во взвешенном состоянии, но часть продолжит свое горение и после падения на травяной покров или на крону деревьев или кустарников. Анализ литературных данных показывает, что частицы, переносимые ветром, чаще всего имеют форму шара или цилиндра. Применяв уравнение (1), зная время падения и скорость горизонтального переноса, можно вычислить дальность переноса ( $L_{пер}$ ) частицы заданной формы, размеров и массы. В таблице 7 представлены результаты расчетов коэффициентов переноса для шарообразных тел диаметром от 5 до 12 мм.

Таблица 7 - Зависимость коэффициента переноса горящих частиц от высоты подъема и размера горящей частицы (шар)  $C_x=0,47$  [15]

$h_{пад}$ , м	$V_в$ , м/с	Значения коэффициентов переноса							
		$D=5$ мм	$D=6$ мм	$D=7$ мм	$D=8$ мм	$D=9$ мм	$D=10$ мм	$D=11$ мм	$D=12$ мм
5	1	0,159	0,133	0,114	0,100	0,089	0,080	0,072	0,066
	2	0,319	0,266	0,228	0,199	0,177	0,159	0,145	0,133

	3	0,478	0,399	0,342	0,299	0,266	0,239	0,217	0,199
	5	0,797	0,664	0,570	0,498	0,443	0,399	0,362	0,332
10	1	0,226	0,188	0,161	0,141	0,125	0,113	0,103	0,094
	2	0,451	0,376	0,322	0,282	0,251	0,226	0,205	0,188
	3	0,677	0,564	0,483	0,423	0,376	0,338	0,308	0,282
	5	<b>1,128</b>	0,940	0,805	0,705	0,626	0,564	0,513	0,470
15	1	0,276	0,230	0,197	0,173	0,153	0,138	0,126	0,115
	2	0,552	0,460	0,395	0,345	0,307	0,276	0,251	0,230
	3	0,829	0,691	0,592	0,518	0,460	0,414	0,377	0,345
	5	1,381	1,151	0,986	0,863	0,767	0,691	0,628	0,575
20	1	0,319	0,266	0,228	0,199	0,177	0,159	0,145	0,133
	2	0,638	0,532	0,456	0,399	0,354	0,319	0,290	0,266
	3	0,957	0,797	0,683	0,598	0,532	0,478	0,435	0,399
	5	<b>1,595</b>	<b>1,329</b>	<b>1,139</b>	0,997	0,886	0,797	0,725	0,664

Анализ данных, представленных в таблице 7, показывает, что большинство значений коэффициента переноса меньше единицы, тем не менее часть величин превышает значение единицы. С точки зрения классической физики это невозможно, т.к. при движении тела в потоке с ростом его скорости уменьшается действие побуждающей силы, которая при равенстве  $V_{\text{част}}=V_{\text{потока}}$  становится равной нулю. Поэтому имеет смысл приравнять все значения коэффициентов переноса, превышающие единицу к единице. Применяя уравнение (8) и учитывая значения  $K_n$ , были рассчитаны дальности переноса горящих частиц в форме шара, выпавших из воздушного потока на высоте 5-20 м при скоростях ветра 1-5 м/с. Результаты расчетов представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Зависимость дальности перелета фрагментов горящего материала (шар) от высоты падения и размера горячей частицы – шар  $C_x=0,47$  [15]

$h_{\text{пад}}$ , м	$V_6$ , м/с	Дальность переноса, м							
		$D=5$ мм	$D=6$ мм	$D=7$ мм	$D=8$ мм	$D=9$ мм	$D=10$ мм	$D=11$ мм	$D=12$ мм
5	1	0,36	0,28	0,22	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10
	2	1,44	1,10	0,87	0,71	0,59	0,50	0,44	0,39
	3	3,24	2,48	1,95	1,58	1,34	1,12	0,99	0,87
	5	7,21	5,50	4,35	3,52	2,97	2,50	2,20	1,93
10	1	1,02	0,78	0,61	0,50	0,42	0,35	0,31	0,27
	2	4,08	3,11	2,46	1,99	1,68	1,41	1,25	1,09
	3	9,18	7,00	5,53	4,49	3,78	3,18	2,80	2,46
	5	18,09	15,55	12,28	9,97	8,40	7,07	6,23	5,45
15	1	1,87	1,43	1,13	0,91	0,77	0,65	0,57	0,50
	2	7,50	5,71	4,51	3,66	3,09	2,60	2,29	2,00
	3	16,86	12,86	10,16	8,24	6,95	5,85	5,15	4,51
	5	27,13	24,82	22,57	18,31	15,43	13,00	11,44	10,02
20	1	2,88	2,20	1,74	1,41	1,19	1,00	0,88	0,77
	2	11,54	8,80	6,95	5,64	4,75	4,00	3,52	3,09
	3	25,96	19,79	15,64	12,68	10,69	9,00	7,93	6,94
	5	36,18	33,10	30,50	28,19	23,76	20,01	17,62	15,43

Анализ данных, представленных в таблице 8, показывает, что согласно модельным представлениям (см. уравнение 8) дальность переноса горящих частиц, имеющих форму шара, может составлять до 36 метров при падении с высоты 20 м и скорости ветра 5 м/с. Противопожарный барьер шириной 1,5 м преодолет частица диаметром 8 мм, падающая с высоты 5 м при скорости ветра 3 м/с. А если учесть, что большая часть подобных барьеров обустраивается с шириной менее 1 м, то их защитные характеристики проявятся только в штиль. Проведенные экспериментальные исследования показали совпадение с расчетными на 91-99% [15].

Знать требования к геометрическим размерам противопожарных барьеров недостаточно, нужно понимать, возможно ли построить их в лесах и лесных культурах. Слишком широкие противопожарные разрывы (100 и более метров нецелесообразны), т.к. необходимо проводить вырубку значительных площадей. То же самое распространяется на минерализованные полосы, ширина которых на практике не превышает 1,5-2 м, а для гарантированной остановки распространения лесного низового пожара необходимо не менее 20 метров [26,32]. Для расширения возможностей уже имеющихся противопожарных барьеров, требуется создание условий для обеспечения невозможности поджога массы лесных горючих материалов, расположенной на защищаемой территории [25,26,29]. Для этого применяются заградительные полосы, создаваемые увлажнением, обработка переохлажденным водяным паром, применение пены, в т.ч. быстротвердеющей горючих материалов. Заградительные полосы пригодны даже для остановки распространения кромки верховых пожаров. Еще с середины 50-тых гг. XX века было высказано предложение о применении химических составов огнеподавляющего действия для снижения пожарной опасности лесных горючих материалов, а также пожаротушения [25,26]. С тех пор исследованы сотни составов, но только единицы из них нашли свое применение в области борьбы с лесными пожарами. Причин этому несколько: (1) сложный характер получения смесей и их применения; (2) высокая цена и недоступность компонентов для внедрения в лесное хозяйство страны. Для решения данного вопроса необходимо искать вещества/материалы, производимые тысячами тонн, достаточно дешевые, водорастворимые и обладающие заметным огнеподавляющим действием.

Для внедрения химических препаратов в технологию борьбы с лесными пожарами необходимо, чтобы они отвечали следующим требованиям: совмещались с горючими материалами, не мигрировали по его поверхности, не смывались водой; не ухудшали роста и развития растения; не отравляли почву; были нетоксичными при их применении для людей и животных, не выделяли при горении токсичных продуктов и уменьшали дымообразование, были бесцветны, атмосферостойки, обладали высокими диэлектрическими показателями [25]. Для удовлетворения все перечисленных требований чаще всего применяются смеси различных огнезащитных материалов с поверхностно-активными веществами.

Повышать эффективность противопожарных барьеров необходимо оперативно в условиях роста и развития лесного пожара. Для этого предлагается применять либо водосливные устройства (типа ВСУ), доставляемые к месту тушения пожара вертолетами, либо ручную подачей растворов лесными ранцевыми огнетушителями. Есть еще один способ обработки, пригодный для реализации в лесостепной и степной зонах, - применение штанговых опрыскивателей с шириной захвата 24-36 м. Ограничением применения штангового опрыскивателя является отсутствие возможности формирования пены, но для подачи смесей огнезащитных составов со смачивателем они пригодны.

Для увеличения возможностей тушения можно применять вещества, способные образовывать гидрогели [2-4,8,11,12,24-27,30,33,34,36,38]. Такими свойствами обладают многие вещества, оксиды и гидроксиды которых плохо растворимы или не растворимы в воде, к примеру, оксид и гидроксид алюминия ( $Al_2O_3$ ,  $Al(OH)_3$ ). Указанные вещества можно получить путем взаимодействия соли алюминия – например сульфата (хлорида, нитрата и т.п.) алюминия с водой (т.е. гидролизом). Сульфат алюминия -  $Al_2(SO_4)_3$  – хорошо растворим в воде (34,25 г/100 гр воды), что позволяет получить раствор с концентрацией до 34,2% (мас.), но водные растворы солей алюминия не существуют, т.к. подвергаются гидролизу с образованием гидроксида алюминия по схеме



Тем не менее прежде чем образовать твердую кристаллическую фазу гидроксид алюминия образует коллоидный раствор – гидрогель, обладающий стабильностью в течение некоторого времени (30-40 мин при 25 °С).

Для того чтобы разработать технологию строительства заградительной полосы, огнезащитный состав удобнее всего применять в виде жидкости и помещать на поверхность горючих материалов путем распыления при ручном или механизированном способе подачи. При применении ручного способа опрыскивания проявляются два его недостатка: (1) при низких концентрациях увеличивается расход рабочего раствора; (2) при высоких концентрациях снижается равномерность опрыскивания территории. Первый недостаток обусловлен большим объемом рабочего раствора, наносимого на 1 м<sup>2</sup> обрабатываемой площади, что увеличивает расход воды и время, затрачиваемое на обработку участка. Второй недостаток обусловлен отсутствием надежного контроля расхода рабочего раствора на обработку участка, что приведет к «пятнистому» распределению состава по защищаемой площади. По-видимому, истина лежит где-то посередине – оптимальным решением является создание рабочего раствора с концентрацией 105 г/дм<sup>3</sup>, с расходом 0,2 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>. В таком случае одной заправки опрыскивателя типа «Жук» ОП-209 (5 дм<sup>3</sup>) хватит на обработку 25 м<sup>2</sup>.

Обстановка с пожарами относится к высокодинамичным, поэтому требует оперативного принятия решений и их исполнения. Критериям скорости выполнения процесса обработки горючих материалов конечно же

отвечает применение штанговых опрыскивателей. Тем не менее данное устройство зависит от снабжения его водой, перебои с ее поставкой вызовут простой оборудования и увеличению сроков проведения работ. Экспериментальные исследования показали, что сульфат алюминия проявляет огнезащитные свойства при расходе не менее 21 г/м<sup>2</sup> [4,11,12]. Разрабатываемая технология должна обеспечить такой расход путем распыления некоторого объема водного раствора гидрогеля алюминия на единицу площади – 1 м<sup>2</sup>.

Для того чтобы увеличить площадь обработки необходимо уменьшить расход на единицу площади. Штанговый опрыскиватель ОПШ-24-3000, взятый за основу, позволяет обеспечить минимальный расход жидкости - 70 дм<sup>3</sup>/га или 7 см<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>. Такое количество жидкости даже при максимальной растворимости сульфата алюминия в воде (342 г/л) позволит внести только 2,3 г на 1 м<sup>2</sup>, что почти в 10 раз ниже, чем это необходимо. Реализация таких технологических параметров обработки травяного покрова имеет два существенных недостатка: (1) трудно получить качественные растворы вблизи пределов растворимости вещества; (2) вызывает сомнение возможность равномерного распределения жидкости в объеме 7 см<sup>3</sup> на площадь 1 м<sup>2</sup>, особенно при учете индекса листовой поверхности 3 (3 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>) для разнотравья.

Поэтому для получения раствора принято решение снизить концентрацию сульфата алюминия в растворе до 210 г/дм<sup>3</sup>, тогда для обеспечения 21 г/м<sup>2</sup> на 1 м<sup>2</sup> необходимо подать 100 см<sup>3</sup>. При таком расходе 3000 м<sup>3</sup> хватит на опрыскивание 30000 м<sup>2</sup> или 3 га. Длина пробега ОПШ-24-3000 при ширине захвата 24 м составит 1250 м. Используя данный алгоритм расчета были получены результаты связывающие расходы раствора с величиной обрабатываемой площади (см. таблице 9).

Таблица 9 - Расчет расхода рабочего раствора (РР) в зависимости от скорости движения штангового опрыскивателя (объем бака – 3 м<sup>3</sup>, расход подающего насоса – 185 дм<sup>3</sup>/мин, ширина захвата – 24 м)

Скорость, км/ч	Время движения, мин	Длина, м	Площадь, га	Расход РР, дм <sup>3</sup> /га	Расход РР, л/м <sup>2</sup>	Конц РР г/дм <sup>3</sup>	Примечание
6	16,2	1622	3,9	770,8	0,077	272,4	Возможно
7	16,2	1892	4,5	660,7	0,066	317,8	Возможно
8	16,2	2162	5,2	578,1	0,058	363,2	Не возможно
9	16,2	2432	5,8	513,9	0,051	408,6	Не возможно
10	16,2	2703	6,5	462,5	0,046	454,1	Не возможно
11	16,2	2973	7,1	420,5	0,042	499,5	Не возможно
12	16,2	3243	7,8	385,4	0,039	544,9	Не возможно

Анализ представленных результатов показывает, что невозможно подобрать технологические режимы работы штангового опрыскивателя для обустройства заградительной полосы. При низких расходах рабочего раствора (70-600  $\text{дм}^3/\text{га}$ ), отсутствует возможность получения самого раствора, т.к. предполагаемая концентрация раствора в 1,02-8,78 раза превышает максимально возможную растворимость сульфата алюминия в воде. Кроме этого, выбранная конструкция штангового опрыскивателя (ОПШ-24-3000) не позволяет обеспечивать расход более 400  $\text{дм}^3/\text{га}$ . В этом случае, необходимо воспользоваться еще одной степенью свободы штангового опрыскивателя – скоростью его движения. Технические характеристики штангового опрыскивателя позволяют двигаться с рабочей скоростью 6-12 км/ч или (1,7-3,7 м/с). Если сопоставить расход рабочего раствора через насос штангового опрыскивателя – 185  $\text{дм}^3/\text{мин}$  и при это обеспечить скорость его движения от 6 до 12 км/ч, то появляется дополнительная возможность регулировать расход рабочего раствора на единицу площади поверхности. Анализ данных представленных в таблице 10 показывает, что при движении на низких скоростях 6-7 км/ч, появляется возможность обработать травяной покров с расходом огнетушащего средства с массой 21  $\text{г}/\text{м}^2$ . Более высокая скорость 8-12 км/ч предполагает меньший расход на 1  $\text{м}^2$  рабочего раствора, что в свою очередь предполагает увеличение концентрации огнетушащего средства. Тем не менее сульфат алюминия имеет ограниченную растворимость в воде, поэтому растворы большей концентрации приготовить не удастся.

Для исследования принципиальной возможности применения водяного пара для тушения кромки низового пожара была сконструирована экспериментальная установка - переносной парогенератор, парообразование в котором осуществлялось сжиганием жидкого топлива в кожухе, от тепла, производимого сжиганием жидкого топлива (дизельного топлива или керосина) в паяльной лампе (рисунок 13). Применение переносного парогенератора для тушения низового пожара представлено на рисунке 14.



Рисунок 11 - Автономный парогенератор



Рисунок 12 - Технология тушения лесного низового пожара

Анализ процесса тушения позволил определить, что воздействие струи пара на очаг горения приводило к уменьшению пламенного горения и его срыву с лесного горючего материала, но не приводило к смещению в

пространстве самого очага горения. Результаты исследования расхода водяного пара представлены в таблица 10.

Тушение сложной смеси лесных горючих материалов, состоящей из стеблей и листьев травянистых растений, проводилось по аналогичной схеме, но из-за более развитой поверхности материалов, подвергающихся горению, сама скорость горения значительно выше, поэтому тушение осуществляли спустя 30-45 секунд, а массу лесных горючих материалов для проведения эксперимента выбирали таким образом, чтобы по истечении этого времени пламенем было охвачено не более трети от объема лесных горючих материалов. Результаты тушения лесных горючих материалов водным паром, состоящих из стеблей и листьев, а также остатков смеси прошлогодней травы, представлен в таблице 11.

Таблица 10 - Количественные характеристики пожаротушения при тушении модельных очагов, сложенных брусками древесины

Убыль массы ЛГМ при горении, кг	Расход водяного пара на тушении, кг	Средний расход водяного пара на тушение, кг/кг
0,56	1,15	1,80
0,75	1,65	2,20
0,35	0,72	2,05
1,56	3,05	1,95
1,12	2,14	1,91
1,45	3,05	2,10
1,07	2,30	2,15
Среднее значение:		<b>2,02</b>

Таблица 11 - Количественные характеристики пожаротушения при тушении модельных очагов, сложенных стеблями и листьями остатков смеси прошлогодней травы

Убыль массы ЛГМ при горении, кг	Расход водяного пара на тушении, кг	Средний расход водяного пара на тушение, кг/кг
0,56	0,308	0,55
0,75	0,51	0,68
0,35	0,1645	0,47
1,56	0,6396	0,41
1,12	0,4368	0,39
1,45	1,334	0,92
1,07	1,0165	0,95
Среднее значение:		0,62

Анализ представленных результатов показал, что в среднем расход водяного пара на 1 кг лесных горючих материалов составляет 0,62 кг. Для осуществления теплофизического расчета в литературе представлены данные по теплотворной способности только для пшеничной соломы и соломы рапса, которые в среднем составляли 1,3-1,4 МДж/кг. Исходя из аналогичного

предположения, на охлаждение зоны горения травы потребуется 1,4 кг водяного пара. Это позволяет заключить, что водяной пар расходуется на тушение в меньшем количестве, чем это может быть предсказано теоретически. Это можно объяснить тем, что при горении травяного покрова происходит более интенсивное рассеяние тепла в окружающей среде. Это подтверждается данными, полученными с тепловизора, который показал температуру в зоне горения 400-450 °С. Из-за малой плотности в объеме растительного материала отсутствуют места для сохранения очагов тления. Поэтому срыв пламени с компактной кучи травы не приводит к его дальнейшему развитию после прекращения подачи огнетушащих средств в зону горения.

Исключить недостатки способов получения тонкораспыленной воды и водяного пара для тушения лесного пожара можно созданием водных растворов органических и неорганических веществ, которые одновременно с растворением образуют гидрогели. Разработан способ тушения пожара (патент РФ на изобретение № 2614963) [2,3,8] в котором в качестве огнетушащего вещества был использован гидрогель алюминия. Результаты применения гидрогелей и водных растворов некоторых других неорганических веществ представлены в таблице 12. Достоверность методики исследования подтверждена экспериментально [28].

Таблица 12 - Результаты испытаний огнетушащих составов [2]

№ п/п	Состав огнетушащего средства	Расход ОТС, кг	Время на тушение (первый подход), сек.	Количество подходов	Общее время тушения модельного очага пожара, сек.
1	Вода	13,5 ± 1.0	186 ± 25	6 ± 2	248 ± 25
2	Сода (насыщенный)	12 ± 1.0	206 ± 30	5 ± 1	276 ± 25
3	Гидрогель (260гр)	4 ± 1.5	63 ± 15	2 ± 1	85 ± 15
4	Гидрогель (130гр)	4 ± 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 ± 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. Так, 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 алюминия. Кроме этого, отмечено общее снижение времени тушения пожара (см. таблицу 12) и количества операций дотушивания (см. таблицу 12) при применении огнетушащих составов на основе гидрогеля алюминия. При использовании гидрогеля алюминия с концентрацией ниже 52 г/15 кг воды огнетушащий эффект значительно снижался.

Результаты лабораторно-практических исследований проходили подтверждение при полевых испытаниях. Концентрации растворов гидрогеля алюминия подбирали так, чтобы обеспечить приемлемую огнетушащую эффективность в определенном ряду от 1,7, 3,5, 7, 14 и 28 г/дм<sup>3</sup>. Для выявления эффективности тушения гидрогеля алюминия результаты тушения сравнивали с тушением водопроводной водой в тех же условиях. В качестве объектов сравнения и для выявления природы огнетушащей способности были использованы дополнительно водные растворы карбоната натрия – соды (насыщенный раствор) и сульфата натрия (28 г/дм<sup>3</sup>). Результаты исследований представлены в таблице 13.

Таблица 13 - Определение расхода огнетушащего средства при тушении кромки пожара [3,36]

Наименование ОС	N	Расход ОС на периметр, кг/м	Расход ОС на площадь, кг/м <sup>2</sup>	Расход ОС на массу природного горючего материала, кг/кг	Абсорбция энергии горения единицей массы ОС, МДж/кг
Вода	24	0,22±0.05	0,50±0.10	≈0,63	≈21,5
Гидрогель алюминия (1.7 г/дм <sup>3</sup> )	3	0,19±0.09	0,56±0.15	≈0,54	≈24,9
Гидрогель алюминия (3.5 г/дм <sup>3</sup> )	3	0,1±0.04	0,24±0.12	≈0,29	≈47,3
Гидрогель алюминия (7 г/ дм <sup>3</sup> )	3	0,09±0.04	0,25±0.10	≈0,26	≈52,5
Гидрогель алюминия (14 г/ дм <sup>3</sup> )	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/ дм <sup>3</sup> ) через 60 мин после получения	3	0,25±0,04	0,61±0.07	≈0,71	≈18,9
Сульфат натрия (28 г/ дм <sup>3</sup> )	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 пожара, в среднем, потребовалось 0,21 кг воды (при средней ширине кромки пожара

0,3-0,4 м), а гидрогеля алюминия потребовалось только 0,09-0,1 кг, что в 2,3 раза меньше, чем воды. При оценке эффективности тушения пожара на его общую площадь расходуется воды, в среднем, 0,52 кг/м<sup>2</sup>, а гидрогеля алюминия только 0,23 кг, что также в среднем в 2,3 раза меньше, чем воды. Наименьший средний расход гидрогеля алюминия для тушения кромки пожара составил 0,09-0,11 кг/м при концентрации 3,5-14 г/дм<sup>3</sup>. При этом увеличение концентрации гидрогеля алюминия в воде с 7 до 28 г/дм<sup>3</sup>, т.е. в 4 раза не дает сколько-нибудь значительной прибавки в эффективность тушения и ведет, фактически, только к перерасходу огнетушащего средства. Такой результат можно объяснить тем, что при интенсивном горении лесных горючих материалов в условиях малой влажности и малой величины запаса горючих материалов на почве, большая часть выливаемого жидкого раствора просто не попадает на горящий материал, а того количества, которое все же входит в контакт с горящими материалами, хватает для тушения (3,5-7 г/дм<sup>3</sup>).

Анализ информации, представленной в литературе, и проведенные автором исследования позволили сопоставить расходы воды при различных способах ее применения (см. таблицу 14).

Таблица 14 - Сравнительный анализ расхода огнетушащего состава при применении различного оборудования для ее подачи в зону горения

Оборудование для подачи огнетушащего состава в зону горения / огнетушащий состав	Расход огнетушащего состава, дм <sup>3</sup> /м
Насос ПН-30 (АЦ-1,6-30) / вода	10,51
УПВД «Ермак» / вода	7,14
<b>Парогенератор / водяной пар</b>	<b>0,23</b>
<b>Воздуходувка «Ангара» / вода</b>	<b>0,11</b>
РЛО (РП-18) / вода	0,54
РЛО (РП-18) / вода+смачиватель	0,38
<b>РЛО (РП-18) / гидрогель алюминия</b>	<b>0,10 (0,22)</b>

Информация, представленная в таблице 14, свидетельствует, что наименьший расход огнетушащего состава на единицу длины кромки лесного низового пожара наблюдается при применении парогенератора (0,23 дм<sup>3</sup>/м), воздуходувки «Ангара» (0,11 дм<sup>3</sup>/м) и гидрогеля, подаваемого в зону горения из ранцевого лесного огнетушителя – РП-18 (0,10-0,2 дм<sup>3</sup>/м). При этом отмечено, что при применении гидрогеля алюминия можно использовать более простое и дешевое технологическое оборудование – ранцевый лесной огнетушитель, что увеличивает надежность при лесном пожаротушении. Таким образом, водной пар и гидрогель алюминия дают значительную экономию огнетушащего состава при лесном пожаротушении, что свидетельствует о реализации скрытых возможностей физической и химической модификации воды для обеспечения пожаротушения.

**В пятой главе «Экономическая эффективность противопожарных мероприятий в лесах и в тушении лесных пожаров»** показано, что затраты на оборудование лесопожарной автоцистерны системой орошения кузова и

установкой веерной форсунки для орошения зоны перед автомобилем составляют 21805,0 руб. при стоимости самой автоцистерны (на март 2022 г) 3400000 руб., что определяет ее экономическую эффективность.

Расходы на строительство минерализованной полосы составляет 229,16 руб./км (в ценах 2021 г), а затраты на строительство заградительной полосы, обработку травяного покрова водным раствором гидрогеля алюминия с нормой 21 /м<sup>2</sup> - 498,59 руб./км. Наблюдается снижение эффективности при строительстве заградительного барьера в сравнении с минерализованной полосой, но если осуществить пересчет расходов на единицу площади, то строительство заградительной полосы по предлагаемой технологии составит обойдется в 4,5 раза дешевле.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Анализ обстановки с лесными и степными пожарами является следствием неэффективности мероприятий по борьбе с ними, заключающимися в недостаточности или в неработоспособности применяемых мер. Полностью предотвратить возникновение лесных пожаров невозможно, в таком случае необходимо сосредоточиться на мероприятиях по препятствованию распространения лесных и степных пожаров и повышению эффективности лесного пожаротушения.

2. Созданы математические модели, которые позволяют вычислить скорости распространения лесных низовых пожаров, определить скорости их тушения и время начала пожара. Полученные результаты свидетельствуют, что скорости распространения лесных низовых пожаров в лесостепной и степной зонах Поволжья для дубовых лесов в 5 раз, а для сосновых лесов в 10 раз больше справочных значений, что свидетельствует о неэффективности защиты лесов от пожаров. Сопоставление полученных скоростей с данными о погоде (скорости ветра и КППО) выявило, что скорость ветра оказывает большее влияние на скорость распространения пожара, чем комплексный показатель пожарной опасности. Установлено, что условия возникновения и развития лесных пожаров в лесостепной и степной зонах Поволжья в значительной степени отличаются от таковых для лесных и таежных зон Европейской и Сибирской частей. Это выражается в формировании I-V классов пожарной опасности по условиям погоды, а леса в исследуемой зоне имеют I-III классы, причем возникают лесные пожары уже при I классе пожарной опасности, а в течении 10-15 дней после схода снежного покрова достигается III класс по условиям погоды. На исследуемой территории нет крупных лесных массивов, а их опушка имеет значительную протяженность, что определяет влияние ветра на рост и распространение лесного низового пожара. Поэтому природные пожары в Поволжье часто возникают как степные и только потом, проникнув в лесной массив, превращаются в лесные низовые пожары. Высокие скорости распространения низовых пожаров являются отражением неэффективности противопожарных барьеров, т.к. дальность переноса частиц ветром превышает размеры барьеров. Применяемые табельные приемы и средства борьбы с лесными пожарами в сочетании с

природными условиями дают возможность тушить лесные низовые пожары в сосновых и в дубовых лесах со скоростями в 5-10 раз и в 10-20 раз меньше справочных значений. Самым эффективным средством тушения пожара является вода, однако применение ее не всегда эффективно. Так на основании законов термодинамики определено, что при тушении пожара водой достаточно поглотить не более 1/12 части теплоты, выделяющейся при горении, при этом на практике расходуется воды при тушении значительно больше.

3. Для совершенствования мероприятий по профилактике необходимы барьеры шириной 20-30 м, а для верховых пожаров – разрывы 50-70 м. Выполнить такие требования можно, применяя заградительные полосы в сочетании с минерализованными полосами и противопожарными разрывами. Заградительные полосы необходимо строить обработкой территории огнезащитными составами. Тушение лесных низовых пожаров эффективнее всего осуществлять с применением воздуходувок, установок высокого давления, а также при применении огнетушащих средств – гидрогелей алюминия, расширяющих огнетушащие возможности воды. Доставку воды к месту тушения пожара необходимо осуществлять мобильными комплексами пожаротушения на базе легковых транспортных средств.

4. Проведена апробация технических и технологических решений по профилактике и тушению лесных низовых и ландшафтных пожаров. Предложено обрабатывать лесные горючие материалы и травяной покров гидрогелями алюминия с расходом гидрогеля не менее 21 г/м<sup>2</sup> территории. Разработаны технологические условия для применения штанговых опрыскивателей для строительства заградительных полос. Для тушения лесных низовых пожаров предложен мобильный комплекс пожаротушения на базе легкового автопоезда. Для тушения кромки лесного низового пожара предложен парогенератор, который обеспечивает расход воды на тушение 0,23 дм<sup>3</sup>/м. Разработаны технологические режимы тушения ландшафтного пожара водным раствором гидрогеля алюминия (3,5 г/дм<sup>3</sup>), подаваемым в зону горения лесным ранцевым огнетушителем, который обеспечивает расход 0,1-0,2 дм<sup>3</sup>/м при тушении кромки низового пожара.

5. Установлено, что геометрические размеры заградительных полос, строящихся в лесостепной и степной зонах, ограничиваются только запасом огнезащитного состава и временем, отведенным на строительство. Экономическая эффективность заградительной полосы с применением гидрогеля алюминия в 4,5 раза выше, чем строительство минерализованной полосы той же площади.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРОИЗВОДСТВУ**

Разработку планов подготовки сил и средств к тушению лесных пожаров, а также табелей привлечения сил и средств к тушению для лесостепных и степных зон рекомендовано проводить с учетом скоростей распространения лесных пожаров, указанных в справочниках, умноженных на 5 для лиственных лесов (преобладающая порода – дуб черешчатый) и

умноженных на 10 для хвойных лесов (преобладающая порода – сосна обыкновенная). Для подготовки сил и средств тушения к пожароопасному сезону необходимо ориентироваться на их эффективность, указанную в справочниках, деленную на коэффициент 10-15.

Для гарантированной остановки лесных и ландшафтных пожаров необходимы барьеры шириной более 50-70 м, их необходимо строить путем сочетания постоянных противопожарных барьеров (разрывов, полос) с временными (заградительными полосами). Временные заградительные полосы необходимо строить как в случае повышенной пожарной опасности в лесах по условиям погоды (III-V классы) по периметру лесного массива, так и для остановки распространения фронта (кромки) лесного пожара в пределах леса/лесной культуры.

Для строительства заградительной полосы в качестве огнезащитного состава предлагается использовать гидрогель алюминия. Дозировка нанесения должна составлять 21 г/м<sup>2</sup> площади, покрытой травяным покровом с массой травостоя 0,9-1,1 кг/м<sup>2</sup>. При кратном увеличении массы травостоя необходимо применять кратное увеличение концентрации раствора. Для защиты лесных массивов и населенных пунктов от ландшафтных пожаров рекомендуется применять штанговый опрыскиватель с шириной захвата 24-36 м, к примеру, ОПШ-24-3000. Технологическими условиями при его применении являются следующие: концентрация раствора сульфата алюминия (дающего при гидролизе гидрогель алюминия) в баке 317 г/дм<sup>3</sup>, расход раствора 0,07 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>, скорость движения опрыскивателя 6 км/ч. Применение такого способа обработки снизит затраты на технологическую операцию в 4,5 раза по сравнению со строительством минерализованной полосы.

Для повышения эффективности лесного пожаротушения рекомендуется применять доставку сил и средств к месту тушения лесного пожара мобильными комплексами пожаротушения на базе легковых автопоездов, которые комплектуются пожарными установками высокого давления, позволяющими снизить расход воды на тушение кромки низового пожара в 20-30 раз по сравнению с расходом лесопожарной автоцистерны. Для максимального снижения радиуса продольной проходимости динамического коридора и обеспечения угла въезда легкового автопоезда на базе автомобиля УАЗ-2206 с автомобильным прицепом с кузовом высотой 1 м длина дышла должна составить не более 700 мм.

При тушении лесного низового пожара необходимо оснащать лесных пожарных носимыми ручными и механизированными установками пожаротушения: ранцевыми лесными огнетушителями (0,2-0,5 дм<sup>3</sup>/м); лесопожарными воздуходувками (0,1-0,2 дм<sup>3</sup>/м), применяющими воду в качестве огнетушащего средства. Производительность таких средств в 5-10 раз выше других типов ручных средств тушения пожара (лопат, грабель, хлопушек), а расход воды при этом в 20-50 раз меньше, чем при применении лесопожарных автоцистерн (20-23 дм<sup>3</sup>/м). Хорошо зарекомендовала себя установка по получению переохлажденного пара, показавшая расход воды на тушение 0,1-0,2 дм<sup>3</sup>/м.

Для тушения лесного низового пожара рекомендуется применять гидрогель алюминия, водный раствор которого с концентрацией 3,5 г/дм<sup>3</sup> (52 г/15 дм<sup>3</sup>) позволяет снизить расход воды с применением ранцевых лесных огнетушителей для тушения лесного низового пожара до уровня 0,1-0,2 дм<sup>3</sup>/м, что дает экономию воды в полевых условиях в 2-2,5 раза по сравнению с применением водопроводной воды.

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ**

1) Совершенствование методик оценки лесопожарной обстановки и разработки эффективных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности в лесах и лесных культурах лесостепной и степной зон Поволжья, направленных на прогнозирование состояния лесных горючих материалов и их предрасположенности к горению.

2) Поиск управляющих факторов возникновения лесных пожаров путем сочетания типа леса, условий погоды и вида антропогенной нагрузки на лесной массив с переходом от мероприятий по защите леса общего характера к целенаправленным – только для территорий большого лесопожарного риска.

3) Совершенствование технологии применения огнезащитных и огнетушащих составов на основе гелеобразующих веществ/материалов на объектах природного ландшафта для обеспечения огнезадержания и пожаротушения

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Рецензируемые научные издания, рекомендованные 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.76-82.

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

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

4. Козаченко, М.А. Процессы пожарного созревания лесных горючих материалов в лесах саратовского лесничества саратовской области / М.А. Козаченко, О.Г. Удалова, **Панкин К.Е.** и др.// **Успехи современного естествознания**. - 2021. - № 9. - С. 5-12.

### *Патенты*

5. Патент на изобретение №2552995 С1 МПК А62С3/00. Мобильный комплекс пожаротушения / Соловьев Д.А., Лихачев М.В., Бахтиев Р.Н., Кузнецов Р.Е., Анисимов А.С., **Панкин К.Е.**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова». - № 2014115881; заявл.: 22.04.2014. опубл.: 10.06.2015.

6. 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 WoS и Scopus*

7. Kuzmina, R.I. Estimating the biofuel combustion heat on the basis of extracted substances from wooden wastes (Оценка теплоты сгорания биотоплива на основе экстрактивных веществ из древесных отходов) /R.I. Kuzmina, S.N. Shtykov, **Pankin К.Е.** // **Chemistry and Technology of Fuels and Oils.**- 2009.- Vol.45.- N6.- P. 443-447.

8. **Pankin, К.Е.** Estimated heats of combustion of biofuels based on wood and wood-waste pyrolysis products (Оценка теплоты сгорания биотоплив, полученных пиролизом древесины и древесных отходов) // **Chemistry and Technology of Fuels and Oils.**- 2016.- Vol. 52.- N 4.- P.396-401.

9. Ivchenko, O.A. Experimental Studies on the Flameproofing Efficiency of Some Inorganic Substances upon the Inflammation of Wood and Fibrous Materials (Экспериментальное исследование огнезащитных свойств некоторых неорганических соединений для снижения пожарной опасности древесины и волокнистых материалов) /О.А. Ivchenko, **К.Е. Pankin**, E.V. Kusmartseva et al // **Helix.**- 2020.- Vol.10.- N 5.- P. 109-113.

10. Ivchenko, O.A. Use of fireproofing compositions in order to prevent forest fires (Применение огнезащитных составов для предотвращения лесных пожаров) / О.А. Ivchenko, **Pankin К.Е.**, Nadezhkina G.P. et al. // **Modern S&T Equipments and Problems in Agriculture.**- 2020.- P.98-107.

11. Kartsev, V.N. Simulation of water internal pressure within temperature range of 0–370 °С (Моделирование внутреннего давления воды в температурном диапазоне 0-370 °С) / V.N. Kartsev, S.N. Shtykov, **К.Е. Pankin** // **Journal of Molecular Liquids.**- 2020.- Vol.310.- P.113223-113233.

12. Kartsev, V.N. Search for functions that model temperature dependencies of internal pressure of associated liquids (Поиск функции для моделирования температурной зависимости внутреннего давления ассоциированных жидкостей) / V.N. Kartsev, S.N. Shtykov, **К.Е. Pankin** // **Journal of Molecular Liquids.**- 2020.- Vol.319.- P.114199-114209.

13. Ivchenko, O.A. An approach to estimating the range of wild fire firebrands transportation by wind (Подход к оценке дальности переноса горящих частиц ветром при лесном пожаре) / О.А. Ivchenko, A.V. Tiutin, **К.Е. Pankin** et al. // **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.**- 2022.- N979.- P.012158.

14. Ivchenko, O.A. A relationship between weather conditions and a number of forest fires (Связь погодных условий с числом лесных пожаров) / О.А. Ivchenko, A.V. Tiutin, **К.Е. Pankin** et al.// **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, 979 (2022) 012121.

*Статьи в сборниках конференций*

15. Кузьмина, Р.И. Высокотемпературная переработка пищевых отходов / Р.И. Кузьмина, С.Н. Штыков, **К.Е. Панкин** и др. // **Пищевая промышленность**. - 2010. - № 7. - С.20-21.

16. Кузьмина, Р.И. Пирогенетическая переработка некоторых древесных отходов и отходов лущения семян / Р.И. Кузьмина, С.Н. Штыков, **К.Е. Панкин** и др. // **Химия растительного сырья**. - 2010. - № 3. - С.61-65.

17. **Панкин, К.Е.** Проходимость и маневренные возможности транспортного средства с прицепом при движении по лесным и проселочным дорогам / К.Е. Панкин, Д.А. Соловьев, Е.В. Кусмарцева и др. // **Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова**. - 2013. - №10. - С.54-56.

18. Батов, Д.В. Комбинированные огнетушащие вещества на основе микроэмульсий вода-ПАВ-галогенуглеводород / Д.В. Батов, В.Н. Карцев, **К.Е. Панкин** и др. // **Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Техносферная и природная безопасность»**. - 2013. - С.20-23

19. Ивченко, О.А. Особенности конструкции малого пожарного комплекса для тушения лесных и степных пожаров / О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин**, С.С. Шаров и др. // **Материалы II Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях»**. - 2015. - С.44-47

20. Ивченко, О.А. Комплектация малого пожарного комплекса противопожарным оборудованием для эффективной борьбы с лесными и степными пожарами / О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин**, С.С. Шаров и др. // **Материалы II Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях»**. - 2015. - С.50-53.

21. Ивченко, О.А. Тактика применения мобильного пожарного комплекса для борьбы с лесными и степными пожарами / О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин**, С.С. Шаров и др. // **Материалы II Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях»**. - 2015. - С.54-57.

22. Ивченко, О.А. Концепция применения мобильного пожарного комплекса для борьбы с лесными и степными пожарами / О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин**, С.С. Шаров и др. // **Материалы II Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях»**. - 2015. - С.58-61.

23. Савченко, Т.А. Экспериментальные исследования эффективности действия антипиренов на воспламенение древесины / Т.А. Савченко, **К.Е. Панкин** // **Материалы III международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях»**. - 2016. - С. 75-79.

24. Савченко, Т.А. Антипирены - ингибиторы горения лесного горючего материала / Савченко Т.А., **К.Е. Панкин** // **Материалы III международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях»**. - 2016. - С. 71-75.

25. Савченко, Т.А. Концепция применения антипиренов для построения огнезащитных полос / Т.А. Савченко, **Панкин**, Курин В.И. // Материалы III международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях».- 2016.- С. 68-71.
26. Ивченко, О.А. Испытания огнетушащей способности алюмогеля / О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин** // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность». - 2017. - С. 21-25.
27. Ивченко, О.А. Исследования достоверности методики оценки огнетушащей способности веществ и материалов / О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин** // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность».- 2017.- С. 26-29.
28. Савченко, Т.А. Огнезащитное действие антипиренов на огнестойкость древесных материалов / Т.А. Савченко, **К.Е. Панкин** // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность». - 2017. - С. 100-103.
29. Савченко, Т.А. Экспериментальные исследования эффективности действия антипиренов на воспламенение древесины и волокнистых растительных материалов / Т.А. Савченко, О.М. Ивашина, **К.Е. Панкин** // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность».- 2017.- С. 104-108.
30. Шаров, С.С. Оптимальное расположение центра тяжести груза в мобильном пожарном комплексе на базе легкового автомобильного прицепа / С.С. Шаров, **К.Е. Панкин** // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность».- 2017.- С. 147-152.
31. Савченко, Т.А. Определение оптимальных технических параметров огнезащитной полосы / Т.А. Савченко, О.М. Ивашина, **К.Е. Панкин** // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность».- 2017.- С.327-332.
32. Ивченко, О.А. Экспериментальные исследования огнезащитных свойств гидрогеля алюминия при обработке им травяного покрова / О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин** // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (FIRESAFETY-2019)».- 2019.- С.134-139.
33. Ивченко, О.А. Сравнительный анализ огнетушащей эффективности алюмогеля при исследовании в лабораторных и полевых условиях / О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин** // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (FIRESAFETY-2019)».- 2019.- С.108-114.
34. Тютин, А.В. Соотношение понятий тактика и техника тушения пожаров / А.В. Тютин, М.Д. Хализова, **К.Е. Панкин** // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (FIRESAFETY-2019)».- 2019.- С. 73-78.
35. Ивченко, О.А. Экспериментальные исследования тушения кромки степного пожара гидрогелем алюминия /О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин** //

Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы пожарной безопасности: теория и практика (FIRESAFETY-2019)».- 2019.- С. 28-32.

36. Беляева, Е.А. Оптимизация группировки сил и средств тушения лесных пожаров / Е.А. Беляева, О.А. Ивченко, **К.Е. Панкин** и др. // Материалы V международной научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность».- 2019.- С. 28-33.

37. Ивченко, О.А. Экспериментальные исследования эффективности огнезащитного действия некоторых неорганических веществ на воспламенение древесины и волокнистых материалов /О.А. Ивченко, Т.А. Савченко, **К.Е. Панкин** // Материалы V международной научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность».- 2019.- С. 80-85.

38. Ивченко, О.А. Влияние погодных условий на возникновение и развитие лесных пожаров в Саратовской области /О.А. Ивченко, А.В. Тютин, **К.Е. Панкин** и др.// Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность».- 2021.- С. 295-301.

39. Охрименко, Д.С. Доставка сил и средств к месту тушения лесного пожара /Д.С. Охрименко, А.В. Тютин, **К.Е. Панкин** // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность».- 2021.- С. 332-337.

40. Потапов, А.С. Контейнерное размещение средств тушения лесных пожаров / А.С. Потапов, А.В. Тютин, **К.Е. Панкин** // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Техногенная и природная безопасность». - 2021. - С. 337-342.

41. Надежкина, Г.П. Лафетные стволы, применяемые для тушения пожаров /Г.П. Надежкина, **К.Е. Панкин**, А.В. Тютин и др. // Материалы I Национальной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование: проблемы и перспективы», 2021.- С. 243-249.

42. Соловьев, Д.А. Мобильный комплекс пожаротушения на базе легкового автопоезда / Д.А. Соловьев, Р.Н. Бахтиев, **К.Е. Панкин** и др. // IX Международная научно-практическая конференция «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях», Саратов, 27-28 апреля 2022. С.307-310.

43. Соловьев, Д.А. Определение параметров оборудования для защиты лесопожарной техники при тушении лесного низового пожара / Д.А. Соловьев, О.В. Карпова, **К.Е. Панкин** и др. // IX Международная научно-практическая конференция «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях», Саратов, 27-28 апреля 2022. С.311-314.

44. Соловьев, Д.А. Определение площади водяной завесы и интенсивности распределения воды вдоль радиуса захвата для оросителей кругового действия / Д.А. Соловьев, О.В. Карпова, **К.Е. Панкин** и др. // IX Международная научно-практическая конференция «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях», Саратов, 27-28 апреля 2022.- С.315-318.