

На правах рукописи

Молокова Светлана Васильевна

**РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ В ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Братск – 2008

Работа выполнена на факультете Транспортных систем
Иркутского Государственного Технического Университета

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Руденко Михаил Георгиевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Янюшкин Александр Сергеевич

доктор технических наук, профессор
Данеев Алексей Васильевич

Ведущая организация: Сибирский Государственный Технологический
Университет

Защита состоится " декабря " 2008 г. в " " часов на заседании
диссертационного совета ДМ 212.018.03 в Братском государственном университете

Просим направлять отзыв в 2-х экземплярах с подписью заверенной печатью
учреждения по адресу по адресу: 665709 г. Братск, ул. Макаренко 40, БрГУ,
ученому секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Братского
государственного университета.

Автореферат разослан "14 ноября" 2008 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент

С. А. Чжан

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы Интенсивное освоение лесных массивов Восточной Сибири, связанное с появлением разветвленной дорожной сети, новых поселков и других объектов социальной инфраструктуры лесозаготовителей, заметно осложнило пожарную обстановку в нарушенной промышленными вырубками тайге. Соответственно увеличению антропогенной нагрузки на лесную территорию возросла и частота лесных пожаров, причем тяжесть возникшей проблемы обусловлена неблагоприятной спецификой горимости в районах концентрированной заготовки древесины. Установлено, что основное количество лесных пожаров связано с местами промышленной заготовки леса. Изменения в лесу, связанные с технологиями лесозаготовок, в частности разреживание древостоев выборочными рубками, накопление на рубках критической массы горючих материалов в виде порубочных остатков способствуют возникновению и развитию лесных пожаров. Лесные пожары приводят к значительным потерям древесины, наносят большой вред лесному хозяйству: уничтожается прирост деревьев, ухудшается состав лесов, затрудняются условия их самовосстановления, усиливаются буреломы и ветровалы, снижается устойчивость деревьев к вредителям и болезням, ухудшаются почвенные условия. Не менее значителен экологический ущерб от лесных пожаров: загрязнение атмосферы продуктами горения, снижение почвозащитных, водоохраных и других средообразующих функций лесов.

Для снижения ущерба от лесных пожаров и для обеспечения условий для возобновления и роста древесных пород и необходимо использовать прогрессивные технологии тушения, позволяющие оперативно локализовать лесные пожары в непосредственной близости от кромки пожара, а также методы очистки лесосек от порубочных остатков. В связи с этим одной из приоритетных задач лесного хозяйства является разработка и совершенствование технологий, направленных на повышение оперативности тушения лесных пожаров и методов очистки лесосек от порубочных остатков.

Выполнение технологического процесса тушения лесных пожаров по существующим технологиям связано с большими затратами энергоресурсов, нарушением лесных биогеоценозов и экологии лесов, ограничено трудностями движения техники по лесу при высокой полноте древостоев. Использование недостаточно производительного ручного труда приводит к увеличению выгоревших лесных площадей. Поэтому поиск путей тушения лесных пожаров на основе применения экологически безопасных, энергосберегающих, экономически выгодных технологий является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка ресурсосберегающей экологически безопасной технологии тушения лесных пожаров на основе применения переохлажденного водяного пара для снижения ущерба лесному хозяйству и сохранения экологических и средообразующих функций лесов.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих технологий и оборудования для тушения лесных пожаров.
2. Провести выбор и обоснование наиболее рациональной технологической схемы применения переохлажденного водяного пара, позволяющей увеличить скорость тушения пожаров средней и высокой интенсивности.

3. Разработать экспериментальную установку для обоснования оптимальных термодинамических параметров потока и геометрических характеристик выходного сопла, а также разработать методику экспериментального исследования увлажняющей способности струи переохлажденного водяного пара.
4. Обосновать параметры основных процессов технологии косвенного тушения на основе применения переохлажденного водяного пара с учетом воздействия на окружающую среду.
5. Провести экспериментальные исследования эффективности технологии косвенного тушения на основе применения переохлажденного водяного пара.
6. Разработать технологические рекомендации по применению разработанных схем тушения.

Научная новизна. Впервые исследованы механизмы взаимодействия переохлажденного водяного пара с поверхностью элементов лесных горючих материалов (ЛГМ), позволяющие обосновать технологические схемы тушения на основе применения переохлажденного пара, с минимизацией экологического и экономического ущерба для лесозаготовок и лесного хозяйства. Получена зависимость между толщиной пленки конденсата, образуемой на поверхности элементов ЛГМ и скоростью осевого перемещения генератора переохлажденного водяного пара, которая позволила обосновать параметры основных процессов ресурсосберегающей технологии косвенного тушения на основе применения переохлажденного водяного пара с учетом воздействия на лесную среду.

Практическая значимость. Разработан новый метод локализации лесных пожаров на основе применения переохлажденного водяного пара, позволяющий снизить потери древесины, ущерб лесному хозяйству и экологический ущерб от лесных пожаров. Новизна подтверждена патентом России на изобретение № 2273503.

Результаты диссертационной работы по новому способу локализации лесных пожаров используются Тайшетским лесхозом (Иркутская область) и в лесхозах Кабанского района республики Бурятия. Соответствующие акты внедрения приведены в приложении к диссертации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования термодинамических параметров потока и геометрических характеристик выходного сопла установки парогенератора;
2. Результаты исследования механизмов взаимодействия переохлажденного водяного пара с поверхностью лесных горючих материалов, позволяющие обосновать технологические схемы косвенного тушения на основе применения переохлажденного пара, а также комбинации пара и тонкораспыленной воды;
3. Параметры основных процессов технологии косвенного тушения лесных пожаров на основе применения переохлажденного водяного пара;
4. Экспериментально подтвержденные рекомендации по применению разработанных технологических схем косвенного тушения на основе применения переохлажденного водяного пара.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обеспечена использованием в работе универсальных и апробированных методик измерения, методов математической статистики и средств программного

обеспечения. Достоверность полученных результатов обеспечена статистически обоснованным объемом опытных данных.

Личный вклад автора. Автором сформулирована цель и задачи работы, разработана программа и методика исследований, выполнены теоретические и экспериментальные исследования.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Деятельность правоохранительных органов и государственной противопожарной службы в современных условиях: проблемы и перспективы развития» (г. Иркутск, 2004 г.); Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (г. Горно-Алтайск, 2004 г.); Российско-Швейцарском научно-практическом семинаре «Проблемы обнаружения, прогнозирования и борьбы с лесными пожарами» (г. Иркутск, 2004 г.); Российско-Монгольском научно-практическом семинаре «Проблемы пожарной профилактики и деятельности государственного пожарного надзора» (Иркутск, 2004 г.); 6-ой Международной конференции «Лесные и степные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия» (Иркутск, 5-11 сентября 2005 г.); Научно-технической конференции факультета транспортных систем Иркутского Государственного Технического Университета (Иркутск, 2006); Международной конференции «Пятое Окуневские чтения» (Санкт-Петербург, 2006); Всероссийской конференции «Проблемы Земной цивилизации» 21-24 июня 2007г., Иркутск, 2007 г.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 22 работы, из них 5 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК. Имеется патент на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, приложений и списка литературы из 120 наименований. Работа содержит 140 страницы текста, 41 рисунок и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, приведены краткие сведения о структуре, содержании и основных результатах диссертации.

В первой главе проведен анализ и систематизация существующих технологических схем и технологий работ по тушению лесных пожаров с учетом особенностей лесного фонда и лесного хозяйства Иркутской области. Особенностью лесного фонда является преобладание хвойных насаждений, весьма опасных в пожарном отношении. Кроме того, леса характеризуются значительной гористостью. К горным отнесено 46% (32827 тыс. га) лесных массивов области.

Обзор и анализ существующих технологий тушения позволил выявить новую технологию, разработанную применительно к условиям горной тайги Восточной Сибири – струей переохлажденного водяного пара, позволяющую примерно в 20 раз сократить расход воды на тушение по сравнению с традиционными методами. Результаты полевых испытаний показали перспективность применения термодинамически неравновесной среды при тушении пожаров, но избранный метод воздействия на зону выделения энергии представляется не оптимальным.

Проблема состоит в том, что максимальная протяженность струи переохлажденного водяного пара составляет порядка 2,5 метра, причем максимальной огнетушащей способностью обладает начальный участок струи с удалением от сопла до 1,5 метра. В целях обеспечения безопасности пожарных расчетов при увеличении интенсивности пламени пожара расстояние от кромки пожара должно быть 1,5 и более метров. На таком удалении от кромки пожара применение струи переохлажденного водяного пара становится не достаточно эффективным. Более того, при больших удалениях возможно раздувание пламени, а не его угнетение. Вместе с тем при исследовании механизмов взаимодействия переохлажденного водяного пара с диффузионным пламенем было отмечено, что в самой струе происходит интенсивная конденсация. Учитывая, что одним из предельных условий распространения лесного пожара является достижение элементами ЛГМ критического уровня влагосодержания, то в данной работе была поставлена задача разработать технологию косвенного тушения лесного пожара с использованием струи переохлажденного водяного пара, позволяющую производить оперативную локализацию лесных пожаров практически любой интенсивности.

Во второй главе приводится математическое обоснование технологии косвенного тушения лесного пожара на основе применения переохлажденного водяного пара.

Используя данные теоретических и экспериментальных предпосылок, автор предложил два варианта технологической схемы косвенного тушения лесного пожара.

В первом варианте предполагается использование созданной при помощи струи переохлажденного водяного пара полосы повышенного влагосодержания в качестве лесопожарного разрыва в непосредственной близости от фронта пожара. Во втором – в качестве опорной полосы для пуска огня отжига в сторону фронта пожара.

В соответствии с каждым из вариантов взаимодействие элемента ЛГМ в зоне полосы увлажнения с фронтом горения будет осуществляться по следующим сценариям:

- 1) нарастание интенсивности теплового потока, что соответствует приближению фронта пожара к рассматриваемому элементу фитоценоза,
- 2) убывание интенсивности теплового потока, что соответствует удалению фронта пожара от рассматриваемого элемента ЛГМ.

В результате теплового излучения горючие материалы, находящиеся в зоне интенсивного увлажнения, нагреваются и теряют влагу. Поэтому в качестве критерия для оценки предложенных вариантов использования струи переохлажденного водяного пара рассматривалась температура элемента ЛГМ на границе с зоной горения.

Интенсивность теплового потока зависит от следующих факторов: состава и влагосодержания ЛГМ, параметров окружающей среды, рельефа местности. В зависимости от соотношения этих факторов, а также при увеличении или уменьшении плотности распределения элементов ЛГМ может иметь место отклонение от основного квадратичного закона изменения интенсивности теплового потока. Для анализа были приняты линейный, квадратичный и кубический законы.

В соответствии с принятыми законами изменения интенсивности излучения

была решена задача определения значений температур на границе элемента ЛГМ.

Рассматриваемая задача сводится к решению уравнения нестационарной теплопроводности в частных производных:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 \leq x \leq L, t > 0 \quad (1)$$

где T – температура (К); L – полутолщина слоя ЛГМ(м); $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость выравнивания температуры в неравномерно нагретом теле (м²/сек); λ – коэффициент теплопроводности $\left(\frac{Вт}{м \cdot К}\right)$; c – теплоемкость, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$; ρ – плотность слоя ЛГМ, $кг/м^3$;

при граничных условиях второго рода:

$$T(0, t) = T(x, t) + \frac{\partial T}{\partial x} dx, \quad (2)$$

где по закону Фурье градиент температур

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(t)}{\lambda} \quad (3)$$

начальные условия имеют вид:

$$T(x, 0) = T_0 \quad (4)$$

Решение параболического уравнения (1) при граничных и начальных условиях (2) и (4) осуществлялось методом конечных разностей.

Для выбора разностной схемы, наилучшим образом аппроксимирующей исходное уравнение (1) в частных производных, рассматривалось 3 способа аппроксимации первой производной по времени: путем замены на право-разностную, центрально-разностную и право-разностную производную. При этом вторая производная по x аппроксимировалась следующим образом:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_m^n \approx \frac{\bar{T}_{m+1,n} - 2\bar{T}_{m,n} + \bar{T}_{m-1,n}}{h^2} \quad (5)$$

В результате анализа расчетных схем производная по x была аппроксимирована право-разностной производной, что привело исходное уравнение к следующему конечно-разностному уравнению:

$$\frac{\bar{T}_{m+1,n} - 2\bar{T}_{m,n} + \bar{T}_{m-1,n}}{h^2} - \frac{\bar{T}_{m,n+1} - \bar{T}_{m,n}}{\tau} = 0 \quad (6)$$

где h – шаг сетки по L , τ – шаг сетки по T

Уравнение (6) имеет второй порядок аппроксимации относительно h и первый порядок аппроксимации относительно τ . Анализ устойчивости разностной схемы осуществлялся с использованием спектрального признака Неймана. Проведенный анализ показал, в случае значительного изменения интенсивности теплового потока принятая вычислительная схема не теряет устойчивости при следующем соотношении шагов сетки: $\frac{\tau}{h^2} \leq \frac{1}{2}$. Результаты решения поставленной задачи представлены на рис. 1.

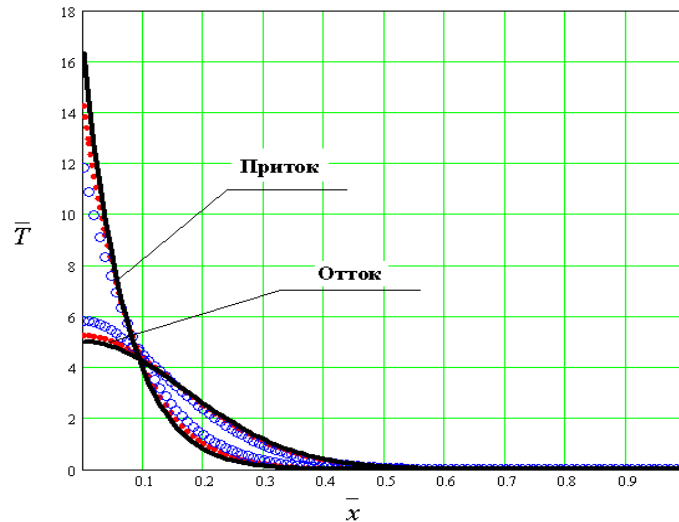


Рис. 1. Графики распределения температур для различных законов изменения интенсивности излучения.

Результаты расчетов показывают, что для всех принятых моделей основным фактором, определяющим температуру поверхности ЛГМ, является знак изменения интенсивности излучения.

Так, при нарастании интенсивности теплового потока температура поверхности в 2-3,5 раза выше по сравнению со случаем его убывания (в зависимости от конкретного закона изменения интенсивности излучения).

Таким образом, в случае использования струи переохлажденного водяного пара, наиболее рациональной является технологическая схема косвенного тушения лесного пожара. При этом следует использовать две операции: создание опорной полосы из увлажненных лесных горючих материалов и одновременный пуск огня отжига от созданной полосы в сторону фронта пожара.

В третьей главе в соответствии с задачами исследований приводится методика экспериментов по обоснованию параметров технологии косвенного тушения лесных пожаров с использованием струи переохлажденного водяного пара.

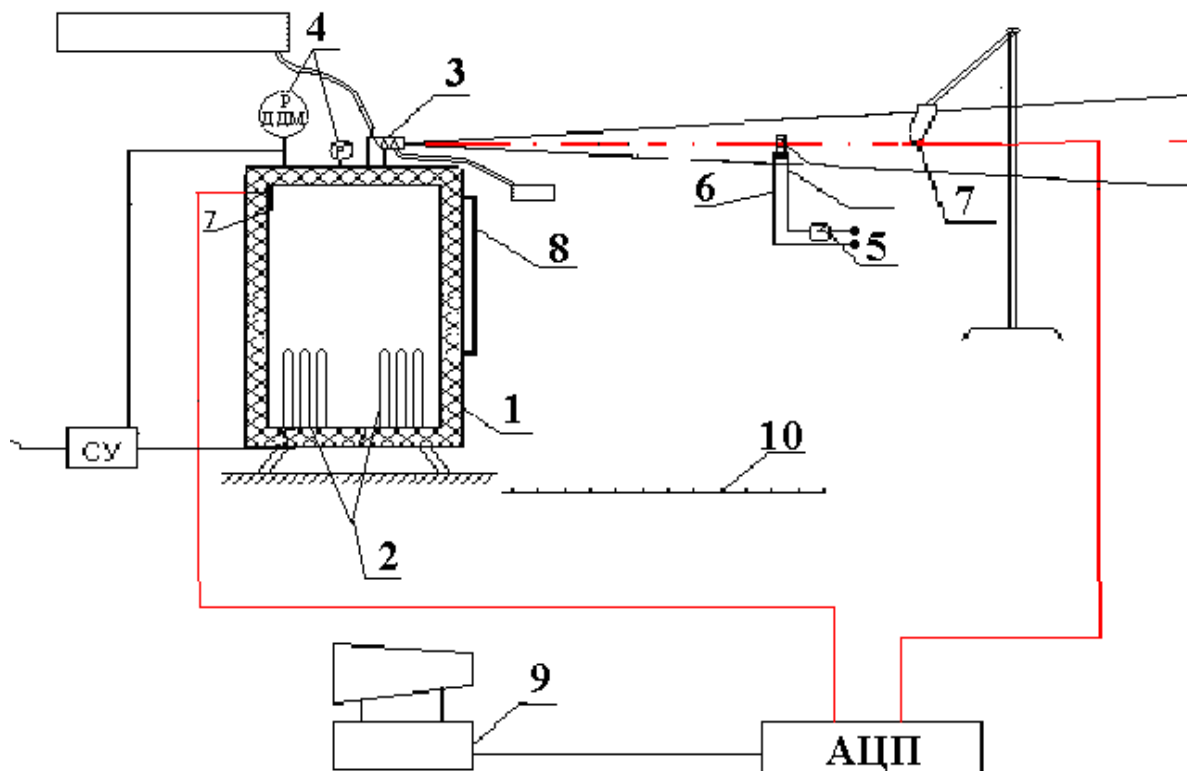
Программой экспериментальных исследований предусматривалось выполнение следующих задач:

- Исследовать влияние начальных термодинамических параметров потока струи переохлажденного водяного пара на ее увлажняющую способность;
- Исследовать параметры струи переохлажденного водяного пара и обосновать технологические особенности увлажнения элементов ЛГМ, обеспечивающие необходимую ширину созданной опорной полосы увлажнения и достижение элементами фитоценоза в области опорной полосы критического уровня влагосодержания;
- Определить зависимость между толщиной пленки конденсата и скоростью перемещения источника переохлажденного водяного пара и оценить на основании полученных данных возможную скорость тушения;
- Исследовать механизмы взаимодействия переохлажденного водяного с элементом фитоценоза и обосновать эффективность технологии косвенного тушения с использованием струи переохлажденного водяного пара

Для исследования влияния начальных термодинамических параметров потока на увлажняющую способность струи переохлажденного водяного пара была

разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить эксперименты при различных параметрах насыщенного пара.

Установка состоит из собственно парогенератора 1, системы контроля и управления параметрами его работы 2 и средств измерений параметров струи истекающего пара 3. Принципиальная схема установки приведена на рис. 2. Отношение длины сопла парогенератора к диаметру выходного сечения составляет $L/d \approx 10$



1-генератор пара; 2- нагревательные элементы; 3- установочный узел для выходного сопла, совмещенный с охладителем пара; 4- датчики манометрического давления; 5-электрический секундомер; 6-выдвижной контейнер для образцов; 7- датчики температур; 8- измеритель уровня воды; 9- компьютер; 10-координатно-измерительное устройство

Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки

В ходе экспериментов по исследованию увлажняющей способности струи пара определялась интенсивность увлажнения W элементов пористых поверхностей помещаемых на ось струи пара на различные расстояния L от среза выходного сопла в диапазоне от 0,05 м до 2,5 м с интервалом 0,05 м. Для этого определялась масса конденсата, которая оседает на единичной площади (m^2) пористой увлажняемой поверхности в единицу времени (с).

$$W = \frac{(m - m_0)}{S \cdot T} \left[\frac{g}{m^2 \cdot c} \right] \quad (7)$$

где m_0 , m –соответственно значения массы образцов в граммах до и после помещения в поток струи переохлажденного пара на различных расстояниях от сопла парогенератора; S – площадь образца; T – время воздействия струи пара на образец.

В качестве увлажняемой поверхности использовались образцы из фильтровальной бумаги в форме круга с диаметром 20 мм. Образец помещали в специальный контейнер, где его крепили на выдвижном устройстве при помощи иголок, чтобы его не снесло потоком струи пара. Выдвижение образца из контейнера и возвращение в исходное положение синхронизировалось по моменту выдвижения в поток струи пара и обратно с замыканием электрического секундомера, имеющего цену деления 0,1. В этом случае исключалось взаимодействие пара с образцом увлажняемой поверхности до попадания последнего в поток струи пара и обеспечивалось равное время обработки паром всей поверхности образца. Масса образцов до и после помещения их в поток струи переохлажденного водяного пара измерялась при помощи аналитических весов с точностью 10^{-4} г.

Для обоснования эффективности технологии косвенного тушения лесных пожаров с использованием струи переохлажденного водяного пара проведены эксперименты по измерению краевых углов смачивания.

Краевой угол смачивания определили методом «сидящей капли». В качестве исследуемых образцов использовались сухие, одинаковые по форме и размерам травинки осоки. Сначала определялся краевой угол смачивания сухих образцов, а затем образцов, обработанных струей переохлажденного водяного пара. Исследовалось влияние на краевой угол смачивания следующих параметров струи переохлажденного водяного пара: расстояния от сопла парогенератора до исследуемого образца; времени обработки паром поверхности образца.

В четвертой главе приводятся результаты проведенных экспериментальных исследований.

Основной термодинамический параметр, определяющий увлажняющую способность струи переохлажденного водяного пара – это температура пара на выходе из сопла парогенератора.

Результаты экспериментов по исследованию влияния параметров торможения потока на температуру пара на выходе из сопла парогенератора представлены на рис. 3.

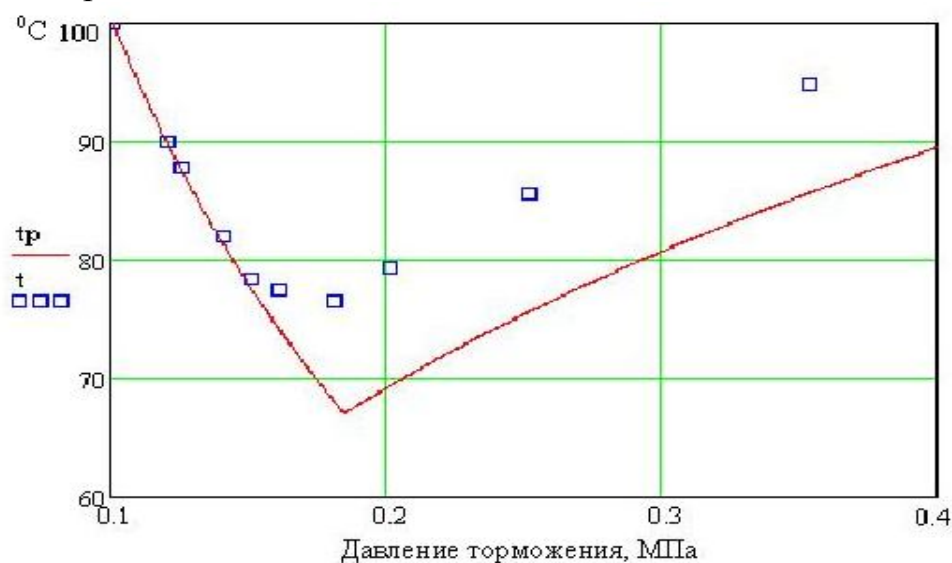


Рис. 3. График зависимости температуры струи водяного пара на выходе из сопла парогенератора от давления торможения потока

Полученные данные показывают, что:

- 1) Минимальная температура пара $76,5^{\circ}\text{C}$, зафиксированная при экспериментах достигается при давлении торможения $0,182\text{ МПа}$, что соответствует околосвуковым режимам истечения.
- 2) В области звуковых режимов истечения экспериментально зафиксированная температура пара t превышает расчетную t_p примерно на 10°C ;

Дальнейшее понижение температуры пара на выходе можно получить посредством использования сопла Лавалья, либо посредством предварительного охлаждения пара перед подачей его в сопло. Однако, согласно результатам исследований Салтанова, использование сопла Лавалья позволяет достичь максимального переохлаждения пара не более $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$, но при этом возникает высокая вероятность образования скачков конденсации при изменении параметров окружающей среды. Поэтому использование сопел Лавалья и, соответственно, сверхзвуковых режимов истечения для получения максимальной температуры переохлаждения может приводить к сбоям в работе парогенератора и, следовательно, представляется недостаточно обоснованным по техническим соображениям.

Таким образом, для генерации переохлажденного пара в технологическом процессе создания опорных полос следует использовать цилиндрические сопла, работающие в области околосвуковых режимов истечения. При этом минимальная температура пара $76,5^{\circ}\text{C}$, достигается при абсолютном давлении торможения $0,182\text{ МПа}$. Для дальнейшего понижения температуры следует использовать дополнительное охлаждение пара перед подачей его в сопло.

Результаты исследования интенсивности увлажнения W элементов пористых поверхностей помещаемых на ось струи пара на различные расстояния L от среза выходного сопла в диапазоне от $0,05\text{ м}$ до $2,5\text{ м}$ с интервалом $0,05\text{ м}$ при давлении торможения потока порядка $0,182\text{ МПа}$ при различных параметрах охлаждения представлены на рис. 4.

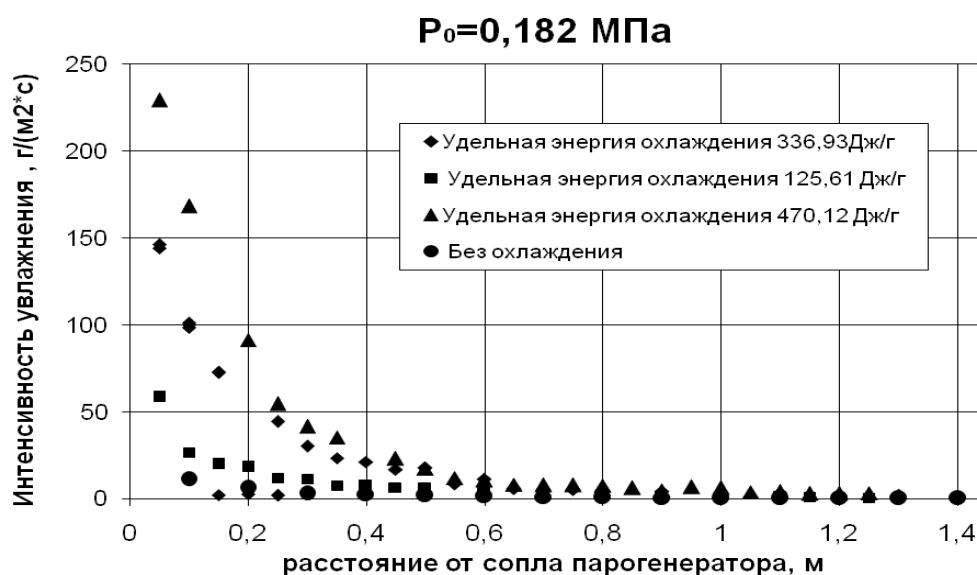


Рис. 4. График изменения интенсивности увлажнения вдоль оси струи при различных значениях параметров охлаждения пара

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, дополнительное охлаждение пара перед входом в сопло парогенератора способствует значительному

увеличению увлажняющей способности струи пара. Наиболее сильное влияние параметры охлаждения оказывают на увлажняющую способность начального участка струи пара, в зоне термодинамической неравновесности.

При обосновании параметров обработки струей переохлажденного водяного пара и технологических особенностей операции создания опорной полосы автор основывался на следующих положениях:

- 1) Ширина опорной полосы повышенного влагосодержания должна составлять не менее 0,3-0,5 м;
- 2) Влагосодержание ЛГМ в зоне опорной полосы должно достигать критических значений.

Результаты экспериментального исследования, представленные на рис. 4, были использованы для обоснования методики определения скорости создания полосы увлажнения, обеспечивающей достижение элементами фитоценоза критического уровня влагосодержания.

Решена задача определения взаимосвязи между толщиной пленки конденсата и скоростью перемещения источника пара.

При этом были приняты следующие допущения:

- элементы фитоценоза не перекрывают друг друга;
- плотность конденсата не изменяется с удалением от сопла;
- скорость перемещения источника пара постоянна.

Исходными данными является интенсивность увлажнения в данной точке струи пара (рис. 4). С учетом плотности конденсата, скорость приращения конденсата в данной точке струи пара:

$$G(L) = \frac{W(L)}{\rho} \quad (8)$$

Толщина пленки конденсата, образовавшегося на поверхности элемента фитоценоза за время t , составит

$$h = \int_t G(L) dt \quad (9)$$

Учитывая, что скорость перемещения источника пара равна

$$V = \frac{dL}{dt} = const \quad (10),$$

имеем:

$$dt = \frac{dL}{V}. \quad (11)$$

Произведя замену переменной в (9), получили:

$$h = \int_t G(L) dt = \int_L G(L) \frac{dL}{V} \quad (12)$$

Учитывая, что скорость перемещения источника пара постоянна ($V = const$), окончательно имеем:

$$V \cdot h = \int G(L) dL \quad (13)$$

Таким образом, интегрирование скорости приращения пленки конденсата в каждой точке струи пара по удалению от сопла, позволяет получить произведение скорости перемещения парогенератора на толщину пленки жидкости, образовавшейся в результате конденсации (рис.5).

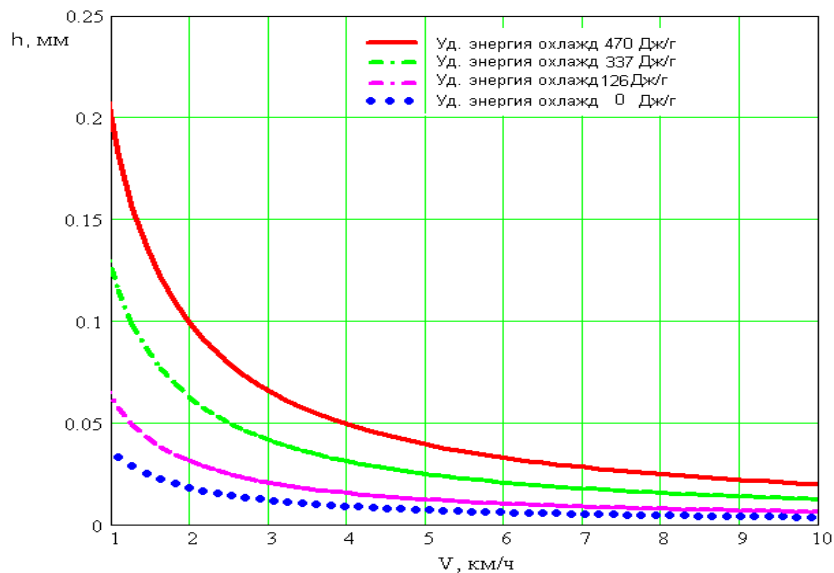


Рис. 5. Зависимость толщины пленки конденсата от скорости перемещения источника пара при различных параметрах охлаждения.

Используя известные результаты экспериментального исследования характеристик и свойств сухих ЛГМ (его толщины, влажности, плотности и т. д.) принято, что для достижения критического уровня влагосодержания толщина пленки конденсата должна составлять не менее 0,1 мм. В этом случае расчетная скорость перемещения источника пара составляет порядка 2 км/ч при удельной энергии охлаждения пара 470 Дж/г. Однако учитывая характеристики ЛГМ, принятые допущения, а также возможные потери пара и другие неучтенные факторы естественно предположить, что реальная скорость создания опорной полосы может быть ниже расчетной.

Получены данные о распределении слоя конденсата по ширине полосы увлажнения при различных скоростях перемещения источника пара (рис. 6).

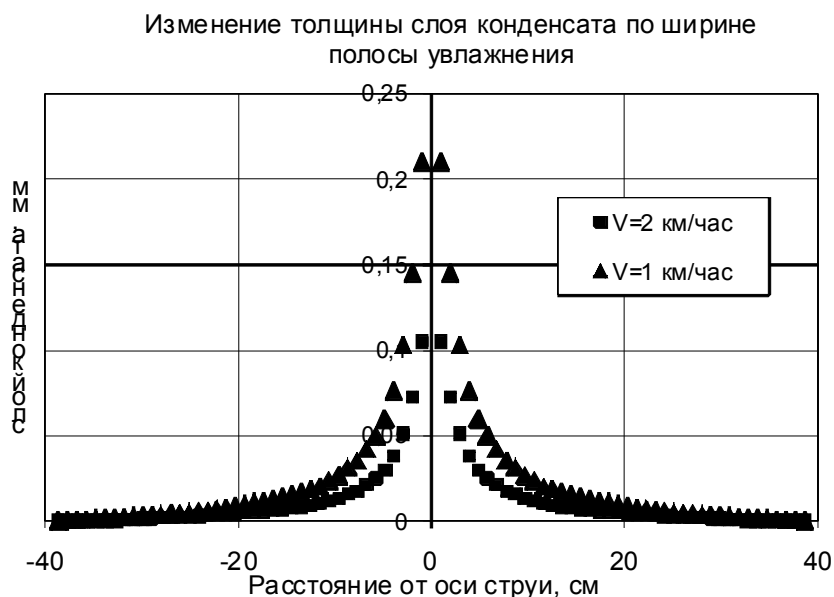


Рис. 6. Распределение конденсата по ширине опорной полосы. Как видно из полученного графика сконденсировавшаяся влага распределяется неравномерно по ширине созданной полосы увлажнения.

Максимальная ширина полосы увлажнения составляет примерно 0,8 м. Область максимального увлажнения, в которой влагосодержание ЛГМ значительно превышает предельные значения, расположена в центре полосы и по мере удаления от центра к периферии интенсивность увлажнения ЛГМ снижается.

С учетом полученных данных, для обеспечения требуемой ширины полосы из увлажненных до критического уровня влагосодержания элементов ЛГМ, необходимо, чтобы скорость создания опорной полосы не превышала 1-1,5 км/ч.

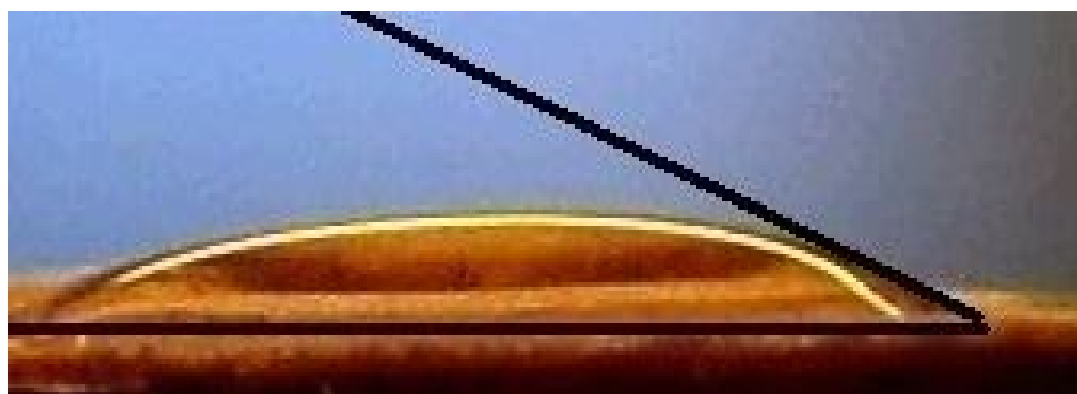
С учетом геометрических характеристик струи, угол наклона оси струи к подстилающей поверхности не должен превышать $10-12^{\circ}$.

Таким образом, технологическая операция создания опорной полосы при помощи струи переохлажденного водяного пара состоит в следующем: оператор, снабженный парогенератором, перемещается вдоль увлажняемой поверхности со скоростью 1-1,5 км/ч. Ось струи пара должна быть направлена под углом $10-12^{\circ}$ к подстилающей поверхности. Учитывая, что ширина опорной полосы составляет порядка 0,8 м, технологическую операцию отжига следует производить на удалении не менее 0,4 м от ее оси.

Для обоснования эффективности технологии косвенного тушения лесных пожаров с использованием струи переохлажденного водяного пара проведены эксперименты по измерению краевых углов смачивания. Исследовалась зависимость краевых углов смачивания от продолжительности обработки и от удаления от сопла парогенератора. Результаты представлены на рис.7-9.



а) Капля воды на сухом элементе ЛГМ



б) Капля на элементе ЛГМ обработанном струей переохлажденного водяного пара.

Рис. 7. Краевой угол смачивания элемента ЛГМ

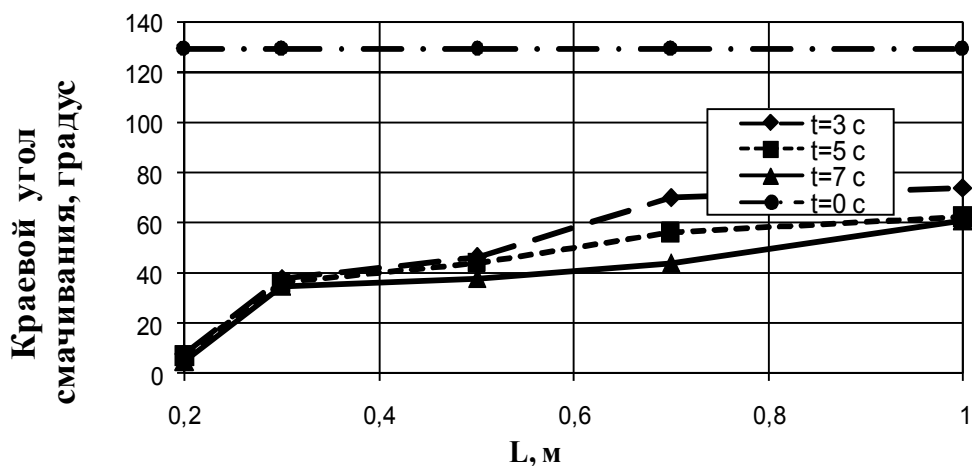


Рис. 8. Зависимость краевого угла смачивания от удаленности от сопла парогенератора при абсолютном давлении торможения потока 0,182 МПа

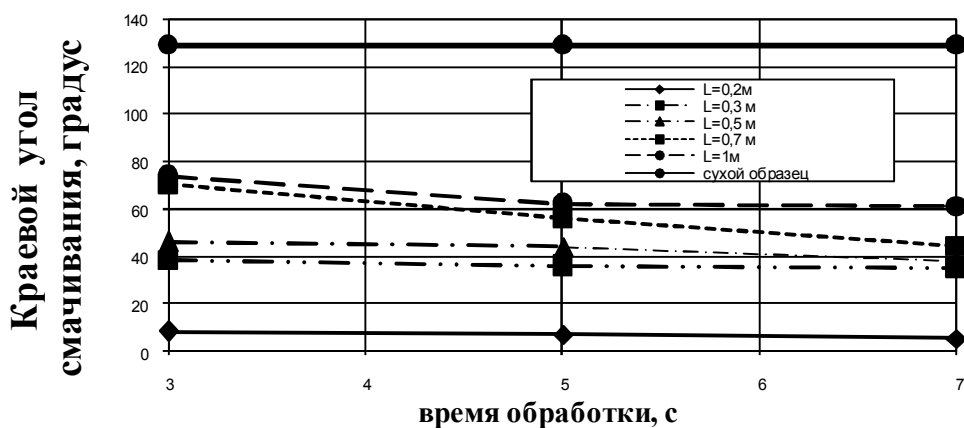


Рис. 9. Зависимость краевого угла смачивания от времени обработки

Полученные данные позволяют утверждать, что:

- 1) Поверхность элемента ЛГМ является несмачиваемой, что предопределяет неэффективность капельного увлажнения;
- 2) В результате взаимодействия переохлажденного пара с гидрофобной поверхностью (элемент ЛГМ) увеличивается ее гидрофильность.

Повышение гидрофильности поверхности можно объяснить преобразованием энергии, выделяющейся при конденсации переохлажденного водяного пара в энергию активации спаренных молекулярных связей и в работу по замещению адсорбированной пленки воздуха на поверхности элемента растительности, адсорбированной пленкой конденсата. Последующая конденсация переохлажденного пара происходит уже не на поверхности твердой фазы, а на адсорбированной пленке жидкости. В связи с этим капля воды растекается по поверхности обработанного в струе пара элемента ЛГМ с меньшим краевым углом смачивания, чем по абсолютно сухой поверхности.

В частности, на это указывает слабая взаимосвязь между краевым углом смачивания и временем обработки.

Для оценки эффективности использования переохлажденного водяного пара в процессе увлажнения элементов фитоценоза введем понятие условной толщины капли (H), как отношение объема капли (V) к площади её контакта с элементом фитоценоза (S) и радиусу исходной капли (R_0):

$$H = \frac{V}{S \cdot R_0}. \quad (14)$$

Используя известные геометрические соотношения, получено выражение для удельной толщины капли в зависимости от краевого угла смачивания (θ):

$$H = \frac{1 - \cos(\theta)}{6} \cdot \left(3 + \frac{(1 - \cos(\theta))^2}{(\sin(\theta))^2} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{(1 - \cos(\theta))^2 \cdot (2 + \cos(\theta))}} \quad (15)$$

При этом предполагается, что:

- 1) поверхность контакта капли с элементом растительности плоская;
- 2) свободная поверхность капли является шаровым сегментом;
- 3) при нанесении на поверхность, объем капли не изменяется.

Используя данные, приведенные на рисунке 9, определена условная толщина капли в зависимости от удаления от сопла парогенератора при времени обработки 3, и 7 с. Результаты отображены на рис. 10. Отметим, что величина условной толщины капли на сухих образцах составляет 2.073.

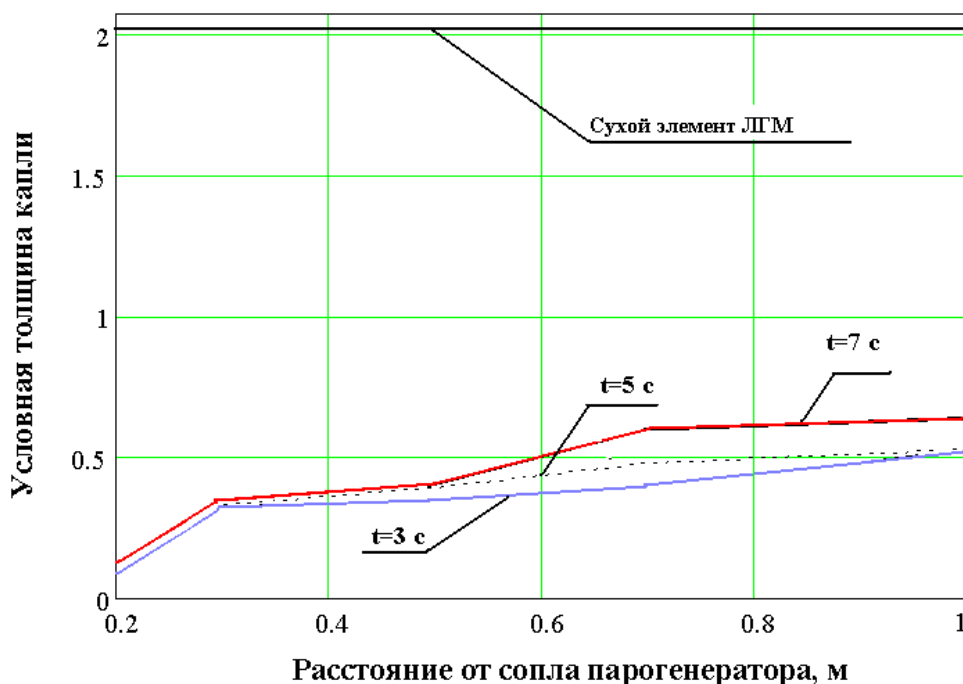


Рис.10. Условная толщина капли в зависимости от удаления от сопла парогенератора

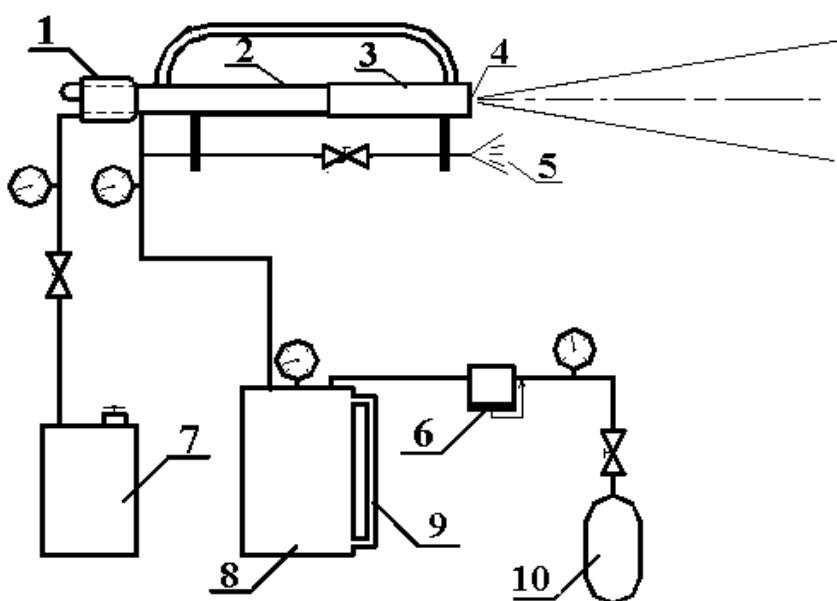
Представленные данные свидетельствуют о том, что после обработки поверхности струей переохлажденного водяного пара условная толщина капли в 3 – 25 раз меньше, чем условная толщина капли на сухом элементе ЛГМ.

Учитывая практически полное растекание капли по элементу ЛГМ после обработки его в струе переохлажденного водяного пара, можно сделать вывод, что переохлажденный пар может использоваться не только как самостоятельное средство увлажнения, но и как средство, значительно повышающее эффективность

увлажнения тонкораспыленной водой. В связи с этим может быть предложена другая технологическая схема тушения, описание которой приводится в следующей главе.

В пятой главе диссертации приводится описание генератора переохлажденного водяного пара, и описание полигонных испытаний технологии косвенного тушения лесных пожаров с использованием струи переохлажденного водяного пара и на основе результатов испытаний приводятся технологические рекомендации по применению разработанных схем тушения.

Для генерации струи переохлажденного водяного пара при испытаниях эффективности технологии косвенного тушения лесных пожаров использовался ранее разработанный и исследованный Щербаковым И. С. парогенератор, модернизированный с учетом проведенных исследований. Схема парогенератора приведена на рис. 11.



1- горелка; 2- генератор пара; 3- охладитель пара; 4- выходное сопло; 5-форсунка тонкого распыла воды; 6-редуктор; 7- емкость для бензина; 8- емкость для воды; 9- измеритель уровня воды; 10-воздушный баллон

Рис. 11. Схема установки для генерации переохлажденного водяного пара

В результате проведенных исследований были рекомендованы две технологические схемы косвенного тушения с использованием переохлажденного водяного пара:

В первой из предложенных схем предполагалось создание опорной полосы только струей переохлажденного водяного пара.

Во второй схеме создание опорной полосы производится при помощи пара и воды, подаваемой через форсунку из общей с парогенератором емкости.

Полевые испытания эффективности предложенных технологических схем проводились весной в пожароопасный период, когда прошлогодняя трава высохла, а новая еще не выросла. Температура воздуха составляла порядка 18-20⁰ С, атмосферное давление 730 мм рт. ст., скорость ветра 1-2 м/с, влажность воздуха 70%. Учитывая, что низовой лесной пожар распространяется по сухой траве,

опавшим хвое, листьям и веткам, в качестве полигона для проведения экспериментов была выбрана поляна, заросшая прошлогодней сухой травой, без свежего подроста. Плотность растительного покрова составляла примерно $0,5 \text{ кг/м}^2$.

В ходе экспериментов для каждой из предложенной схем определялась оптимальная скорость создания опорной полосы, расход воды на увлажнение и отработывалась методика создания опорных полос.

Таблица 1

Показатели эффективности технологической схемы.

Показатель	Технологическая схема 1	Технологическая схема 2
Скорость тушения, км/ч	1-1,5	2,5-3
Масса воды, используемой на создание 1 метра опорной полосы, кг/м	0,02	0,1

Учитывая результаты полевых испытаний, представленные в таблице 1, автор разработал следующие рекомендации по использованию каждой из предложенных схем.

Схема 1. Два оператора, снабженных парогенераторами, производят увлажнение от одной точки, двигаясь одновременно в противоположные стороны со скоростью 1-1,5 км/ч. Ось струи пара должна быть направлена под углом $10-12^{\circ}$ к подстилающей поверхности. Расстояние от кромки низового пожара должно быть таким, чтобы огонь отжига прошел полосу шириной не менее 10 м. Одновременно с увлажнением производится зажигание напочвенного слоя по самому краю только что созданной опорной полосы обращенной к пожару (на удалении не менее 0,4 м от оси перемещения первого оператора). В результате применения разработанной технологической схемы за 1 час тушения бригадой из 4 человек создается полоса отжига протяженностью 2-3 км.



Рис.12. Технологическая схема 1 косвенного тушения лесного пожара при помощи переохлажденного водяного пара

Схема 2. Создание опорной полосы производится паром и тонкораспыленной водой, подаваемой через форсунку из общей с парогенератором емкости. В отличие от первой технологической схемы скорость перемещения оператора составляет 2,5-3 км/ч.

Учитывая полученные результаты, автор рекомендует использовать технологическую схему 1 для косвенного тушения лесных пожаров в условиях необходимости максимальной экономии воды. Скорость тушения одним оператором

составляет 1-1,5 км/ч, а количество воды, расходуемой на создание 1 м полосы увлажнения, составляет 0,02 кг/м.

Применение технологической схемы 2 позволяет увеличить скорость создания опорной полосы до 2,5-3 км/ч, но при этом расход воды на увлажнение увеличивается примерно в 5 раз по сравнению с первой технологической схемой.

Основные результаты и выводы работы:

- 1) Установлено, что переохлажденный пар может использоваться не только как самостоятельное средство увлажнения, но и как средство, повышающее эффективность увлажнения тонкораспыленной водой.
- 2) Обоснованы и предложены две технологические схемы косвенного тушения лесных пожаров с использованием струи переохлажденного водяного пара и разработаны рекомендации их по применению:
 - скорость тушения при воздействии паром на элементы ЛГМ составляет 1-1,5 км/ч, а количество воды, расходуемой на создание 1 м полосы увлажнения, составляет 0,02 кг/м;
 - скорость тушения при совместном использовании пара и тонкораспыленной воды составляет 2,5-3 км/ч, а количество воды, расходуемой на создание 1 м полосы увлажнения составляет 0,1 кг/м.
- 3) Экспериментально и теоретически обоснованы параметры струи переохлажденного пара при создании опорных полос повышенной влажности. В парогенераторе следует использовать цилиндрические сопла, работающие в области околосвуковых режимов истечения. Оптимальное давление торможения потока составляет 0,182 МПа.
- 4) Разработан метод локализации лесных пожаров, не имеющий ограничений по интенсивности горения. Новизна метода защищена патентом России №. 2273503.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. Пат. 2273503 Российская федерация, МПК⁷ А 62 С 3/02. Способ локализации лесного низового пожара [Текст]/ Руденко М. Г., Гришин А. М., Молокова С. В., Щербаков И. С.; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский институт МВД. - № 2004126516/12; заявл. 01.09.2004; опубл. 10.04.2006, Бюл. № 13. – 3 с.

В изданиях, рекомендованных ВАК России для публикации материалов диссертационных работ

2. Молокова, С. В. Использование переохлажденного водяного пара для повышения эффективности капельного увлажнения [Текст] / С. В. Молокова // Вестник ИрГТУ.–2006. - № 1 (25).–С. 245-246.
3. Молокова, С. В. Использование контролируемого отжига в целях повышения безопасности движения [Текст] / С. В. Молокова // Вестник ИрГТУ.–2006. -№ 2 (26).–С. 21-22.
4. Молокова, С. В. Некоторые особенности измерений интенсивности процессов увлажнения в струе переохлажденного водяного пара [Текст] / С. В. Молокова// Вестник ИрГТУ.–2006.- № 4 (28).–С. 25-26.

5. Молокова, С.В. Спектры акустического излучения, сопровождающего интенсивный нагрев жидкости [Текст] / С. В. Молокова, М.Г. Руденко // Вестник ИрГТУ.–2007 - № 2 (30).– С.84-87.
6. Молокова, С.В. Экспериментальное исследование нового метода создания опорных полос с использованием струи переохлажденного водяного пара [Текст] / С.В. Молокова, А.М. Гришин, М.Г. Руденко, И.С. Щербаков// Экологические системы и приборы/ Научтехиздат.–М., 2008. -№ 5.– С. 11-14.

В других изданиях

7. Молокова, С. В. Эффективность тушения низового лесного пожара переохлажденным водяным паром в сравнении с базовыми методами тушения [Текст] / С. В. Молокова, М. Г. Руденко, И. С. Щербаков// 9-я всероссийская научно-практическая конференция: сб. статей / Восточно-Сибирский институт МВД. – Иркутск, 2004г.–С.238-239.
8. Молокова С. В. Способность струи переохлажденного водяного пара увлажнять пористую поверхность [Текст] / С. В. Молокова, М. Г. Руденко// Международная конференция Сопряженные задачи механики, информатики и экологии/ Томский Государственный университет. – Томск, 2004. – С. 185-186.
9. Molokova, S.V. The combination method of quenching of local forest fires [Text] // M.G.Rudenko, V.I.Samojlov, I.S.Sherbakov, Conjugate //Problems of mechanics computer science and ecology: /International conference , 2004. P.326-327.
- 10.Rudenko M.G., Molokova S.V. Influence of dynamics of radiation on temperature of a surface of forest fuels// Forest and steppe fires initiation. Spread, suppressing and ecological consequences// Proceedings of the 6-th International conference September 5-11, 2005.
- 11.Molokova, S.V. Intensity of humidification of a surface of forest combustible materials by the supercooled steam [Text] // S. V. Molokova, M.G Rudenko/ Forest and steppe fires initiation. Spread, suppressing and ecological consequences// Proceedings of the 6-th International conference, 2005. –
- 12.Молокова, С. В. О возможности оперативного создания полос отжига в отдаленных районах [Текст]/ С. В. Молокова, М. Г. Руденко// Восточно-Сибирский авиационный сборник: межвузовский сб. науч. тр. / ИрГТУ. – Иркутск, 2005.– С. 175-178.
13. Молокова, С. В. Интенсивность увлажнения поверхности переохлажденным водяным паром [Текст]/ С. В. Молокова, М. Г. Руденко// Строительные, дорожные машины и гидравлические системы: сб. мат-лов докл. НТК / ИрГТУ. – Иркутск, 2005.– С. 22-24.
- 14.Молокова, С. В. Распределение температур в сплошном теле при вариациях интенсивности излучения [Текст]/ С. В. Молокова, М. Г. Руденко// Строительные, дорожные машины и гидравлические системы: сб. мат-лов докл. НТК/ ИрГТУ. – Иркутск, 2005.–С.25-27.
- 15.Молокова, С. В. Использование переохлажденного водяного пара для локализации лесных и степных пожаров [Текст]/ С. В. Молокова, М. Г. Руденко, И. С. Щербаков // 11-я Международная научно-практическая конференция: сб. трудов: Деятельность правоохранительных органов и

- государственной противопожарной службы в современных условиях/ Восточно-Сибирский институт МВД. – Иркутск, 2004г.–С.250-251.
16. Молокова, С. В. Метод локализации лесных пожаров [Текст]/ С. В. Молокова, М. Г. Руденко, А. А. Гришин, И. С. Щербаков // Международная конференция Пятыне Окуневские чтения: Тезисы докладов /Балт. Гос. Техн ун-т. Санкт-Петербург, 2006.–С. 79-80.
 17. Молокова, С. В. О нагреве бесконечного тела источником переменной интенсивности [Текст]/ С. В. Молокова, М. Г. Руденко// Всероссийская конференция «Проблемы Земной цивилизации»/ ИрГТУ.– Иркутск, 2007. – С. 321-325.
 18. Молокова, С. В. Влияние параметров торможения на температуру истечения водяного пара [Текст]/ С.В. Молокова, М.Г. Руденко // Международная конференция Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: Тезисы докладов/ Томский Государственный Университет.– Томск, 2007.– С. 245-246.
 19. Молокова, С. В. Изменение гидрофильности поверхности под воздействием переохлажденного водяного пара [Текст]/ С.В. Молокова, М.Г. Руденко // Международная конференция Сопряженные задачи механики, информатики и экологии/ Томский Государственный университет. – Томск, 2007. – С. 246-247.
 20. Молокова, С. В. Новые возможности использования переохлажденного водяного пара в борьбе с лесными и степными пожарами [Текст]/ С. В. Молокова, М. Г. Руденко //Сборник статей «Поиск решения проблем выживания, безопасности и развития Земной цивилизации».- Иркутск, 2008 г.– Выпуск девятнадцатый.– С. 172-176.
 21. Молокова, С. В. Экспериментальное исследование метода локализации лесных и степных пожаров с использованием струи переохлажденного водяного пара [Текст] / С. В. Молокова, М. Г. Руденко //Сборник статей «Поиск решения проблем выживания, безопасности и развития Земной цивилизации».– Иркутск, 2008 г.– Выпуск девятнадцатый.– С. 176-178.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными гербовой печатью, просим направлять по адресу:
665709, Иркутская обл., г. Братск, ул. Макаренко 40,
Братский государственный университет
ученому секретарю диссертационного совета Чжан С.А.

телефон-факс: 8-(3953)33-20-08

Молокова Светлана Васильевна

Разработка инженерных методов обеспечения пожарной безопасности в лесном комплексе

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 25.09.08. Формат 60x84 ¹/₁₆

Печ. л. 1,0 Тираж 100 Заказ

Гипография Братского государственного университета
665709, Иркутская обл., г. Братск, ул. Макаренко 40