РАЗДЕЛ IV. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Абразумов В.В., Глебов И.В., Ермоченков М.Г., Котенко В.Д., Синюков Н.В.

Тепловая защита для лесопожарных машин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

(национальный исследовательский университет)

(Россия, Мытищи)

doi:10.18411/spc-12-02-2018-07

idsp: 000001:spc-12-02-2018-07

Аннотация

Анализ разрабатываемых перспективных лесопожарных машин показал, что в них не предусматривается защита пожарного расчёта от интенсивного теплового воздействия.

В аэрокосмической отрасли успешно применяются композиционные материалы (ТЗП) для тепловой защиты аппаратов, подвергающихся воздействию высоких температур. В производстве этих материалов разработаны современные технологии, существенно снизившие их стоимость, что открывает возможности для применения этих материалов и в другой технике, подвергающейся в процессе работы интенсивному тепловому воздействию.

В статье излагаются расчёты, позволяющие оценить возможность применения ТЗП для защиты кабин лесопожарных машин при различных плотностях теплового потока, падающего на защищаемые поверхности. Показано, что при небольших плотностях теплового потока (до 1,2 кВт/м²) ТЗП сохраняют работоспособность в течение 2-х часов без дополнительного охлаждения.

При плотности теплового потока до 100 кВт/м² требуется дополнительное охлаждение ТЗП. Это охлаждение может быть осуществлено запасом воды в лесопожарной машине. Показано, что при запасе 4-х м³ воды при нагреве её от 20 до 450С достаточно для того, чтобы обеспечить работоспособность ТЗП площадью 12...10 м² в течение 2-х часов.

При плотности теплового потока более 20 кВт/м² конструкция защищаемой кабины должна состоять из отдельных панелей, которые подлежат замене при определённой величине деструкции поверхностных слоёв ТЗП.

Ключевые слова: лесопожарные машины, негативные факторы, теплозащитные композиционные материалы, тепловой поток, время работоспособности.

Введение

Ежегодные лесные пожары представляют серьёзную опасность для населения и наносят огромный экономический ущерб. Так, по данным Росстата [1] в 1998 г. в Российской Федерации площадь лесных земель, пройденных пожарами, составила 2497 тыс. га, а на корню сгорело 143 млн. м³ леса.

Тушение лесных пожаров в настоящее время осуществляется:

- пешими пожарными командами, оснащёнными ручными лесными огнетушителями и мотонасосным оборудованием;
- лесопожарными полосопрокладывателями, грунтометами и плугами, устанавливаемыми на лесопожарный или универсальный трактор [2];
- авиационной техникой (самолётами и вертолётами);
- автомобилями гражданских служб пожаротушения (при подступе лесных пожаров к населённым пунктам).

Основными негативными факторами при горении лесного горючего материала являются [3, 4]:

- выделение огромного количества теплоты до $12,27 \cdot 10^{10}$ Дж/га [5], при этом тепловые потоки достигают $1,2 \dots 12$ кВт/м², а в зонах крупных лесных пожаров – $100 \dots 200$ кВт/м²; температура при верховых пожарах в непосредственной близости от кромки лесного пожара, где обычно работает лесопожарная техника, может достигать $300 \dots 700^\circ\text{C}$;
- продукты сгорания лесного горючего материала – выделяется большое количество угарного и углекислого газа, а также мелкодисперсных органических и минеральных частиц.

Эти факторы сильно ограничивают возможности в тушении лесных пожаров пеших пожарных команд и пожарной техники. В связи с этим зарубежными и отечественными фирмами ведутся работы по созданию новых более эффективных типов лесопожарной техники.

Японская фирма Morita разработала пожарный автомобиль Morita Bush Truck [6, 7], рассчитанный на борьбу с быстро распространяющимися лесными пожарами. Автомобиль сочетает в себе функции командного центра и обычного пожарного расчёта и включает спутниковую связь для коммуникации с другими пожарными автомобилями или штаб-квартирой, систему пожаротушения с минимальным количеством воды и светодиодную систему освещения. Машина оборудована новаторской высокоэффективной системой воздушно-пенного тушения CAFS (Compressed Air Foam System).

Американская фирма Magirus для тушения лесных пожаров разработала серию машин, состоящую из 2-х автомобилей CCF-H, CCF-M, тяжёлой автоцистерны CCGC и легкого автомобиля VIR [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Все машины серии оборудованы баком из нержавеющей стали, установкой пенного тушения, насосом среднего (1500 л/мин при 1,5 МПа) и высокого (250 л/мин при 3,6 МПа) давления, защитой надстроек при помощи трубчатых ограждений и защитой шасси от воздействия огня.

Шведская фирма Husqvarna разработала концепт AFG (Autonomous Fire Guard) для создания в будущем автоматических комплексов пожаротушения в сложных лесных условиях [9]. Машина спроектирована как полностью автоматический модуль с возможностью установки различного навесного оборудования на базовое шасси. Автомобиль управляется дистанционно оператором при помощи пульта, а наблюдение за местностью производится при помощи лазерных стереокамер и сенсорных устройств, расположенных на манипуляторе грейдера и на шасси автомобиля. Питание автомобиля осуществляется от литий-ионной батареи, а передвижение производится на четырёхколёсном стальном шасси с раздвижными колёсами для увеличения ширины колёсной базы во время движения.

В России также ведутся работы по разработке новых и совершенствованию существующих машин для тушения лесных пожаров. Рубцовский филиал УралВагонЗавода на базовом шасси МГШ-521М1 разработал новый лесопожарный агрегат ЛПА-521, который предназначен для доставки пожарных и оборудования к месту ведения лесопожарных работ, тушения лесных низовых пожаров огнегасящими жидкостями, воздушно-механической пеной, создания заградительных минерализованных полос, ведения профилактических управляемых выжиганий [10]. Агрегат может нести до 4 м³ огнегасящей смеси, способен преодолевать ров до 2,5 м шириной и брод до 1,2 м глубиной. Кабина рассчитана на размещение 6 человек с водителем, а также имеет два оборудованных спальных места. В течение часа ЛПА-521 может проложить 2,4-8,2 км минерализованной полосы шириной 3,2 м и 2,0 м при использовании клина-толкателя или плуга соответственно. ЛПА-521

авиатранспортабелен, что позволяет оперативно перебрасывать его авиацией в район пожара.

Расширение функциональных возможностей лесопожарной техники, и прежде всего роботизированных комплексов, возможно за счет применения эффективной тепловой защиты пожарного расчёта от продуктов сгорания и интенсивного теплового воздействия. Надежная тепловая защита пожарной техники может существенно расширить ее функциональные возможности, в частности, выполнять спасательные работы в очагах пожара. Тепловая защита пожарного расчёта может быть осуществлена применением абляционных материалов.

В настоящее время абляционные композиционные материалы успешно используются для тепловой защиты аэрокосмических аппаратов. При высокой температуре абляционные материалы подвергаются термодеструкции, которая сопровождается поглощением большого количества теплоты, что ограничивает тепловой поток внутрь материала. Последние исследования в области производства таких композитов позволили разработать новые технологии, существенно снизившие их стоимость [11, 12, 13]. Это открывает возможности для применения абляционных материалов и в другой технике, подвергающейся в процессе работы интенсивному тепловому воздействию.

Ниже производится анализ возможности применения абляционных материалов для защиты от теплового воздействия кабин в лесопожарных машин.

Основная часть

Абляционные теплозащитные покрытия изготавливают из препрегов, которые получают пропиткой многослойных вязально-прошивных полотен (толщиной до 24 мм) из кремнезёмных и кремнезёмно-капроновых тканей растворами фенолоформальдегидной смолы с последующим удалением растворителя сушкой. Препреги обладают хорошими драпировочными свойствами, что позволяет изготавливать из них детали сложной конфигурации. Теплозащитные покрытия, изготовленные из препрегов, имеют следующие свойства: теплопроводность $\lambda = 0,279 \dots 0,465$ Вт/(м·К), удельная теплоёмкость $c = 963 \dots 1215$ кДж/(кг·К), плотность $\rho = 1,33 \dots 1,71$ г/см³. Эти характеристики использовались при проведении расчётов.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения [14,15]:

- теплозащитное покрытие представляет собой композиционный материал состоящий из твердой и газовой фаз;
- при высокой температуре материал термодеструктурирует;
- процесс термодеструкции является многостадийным, стадии рассматриваются как параллельные независимые реакции;
- перенос теплоты в материале осуществляется за счет теплопроводности и за счет конвективного переноса газовой фазы;
- задача решается в одномерной постановке.

С учетом принятых допущений можно записать следующую систему дифференциальных уравнений, описывающую тепломассообмен в теплозащитном покрытии (ТЗП).

Уравнение переноса энергии

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(q^\lambda + q^\kappa) + \frac{\partial \rho}{\partial \tau} U, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала, кг/м³; T – температура, К; τ – время, с; q^λ – поток теплоты за счет теплопроводности, Вт/м²; q^κ – конвективный поток теплоты за счет переноса газовой фазы, Вт/м²; U – тепловой эффект процесса термодеструкции, Дж/кг.

Уравнение переноса массы в твердой фазе

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial \tau} = - \sum_{\gamma_1}^{n_1} \sum_{\Psi_1}^{m_1} \frac{\partial \rho_{\gamma_1, \Psi_1}}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где n и γ – количество и номер компонента композиционного материала соответственно; m и ψ – количество и номер стадии термодеструкции соответственно.

Уравнение переноса газовой фазы

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial \tau} = \text{div}(q^{\text{конв}} + q^D) + \frac{d\rho_2}{d\tau}, \quad (3)$$

где $q^{\text{конв}}$ и q^D – конвективный и диффузионный потоки массы в материале; нижние индексы 1 и 2 относятся к твердой и газовой фазе соответственно.

Задача решалась с граничными условиями 1-го и 2-го рода.

Были проведены расчеты прогрева ТЗП при разной интенсивности тепловых воздействий с граничными условиями 2-го рода. Падающий поток на внешней поверхности соответствовал $q_0=1, 2, 12$ и 100 кВт/м² в холодную стенку. На внутренней поверхности задавался сброс теплоты $q_\delta = -0,5$ кВт/м². Приняты следующие дополнительные условия: толщина покрытия – $\delta=0,024$ м; коэффициент теплопроводности – $\lambda=0,367$ Вт/(м·К); теплоемкость – $c=963$ Дж/(кг·К); плотность – $\rho=1715$ кг/м³.

Времени работоспособности ТЗП соответствует время нагрева защищаемой поверхности до 450°C (318 К).

На рисунке 1 приведены графики изменения температуры защищаемой поверхности по времени при различной интенсивности нагрева.

— - $q_0=1,2$ кВт/м²; — — — $q_0=12$ кВт/м²; — — — $q_0=100$ кВт/м²

Рисунок – 1. Изменение температуры защищаемой поверхности при различной интенсивности и продолжительности нагрева

Как видно из графиков ТЗП работает более 2-х часов только при падающем потоке $q_0=1,2$ кВт/м². При потоке $q_0=12$ кВт/м² время работоспособности теплозащиты не превышает 10 мин. Одним из вариантов увеличения времени работы покрытия является охлаждение защищаемой поверхности водой (в объеме 4 м³), используемой для тушения огня.

Для определения количества необходимой воды были проведены расчеты прогрева ТЗП с граничными условиями 2-го рода на внешней поверхности и 1-го рода на внутренней. Интенсивность падающего потока составляла $q_0=1, 2, 12$ и 100 кВт/м² в холодную стенку, температура задней поверхности $T_\delta=318$ К. Расчет проводился с учетом внутренних источников теплоты и массы, связанных с термической деструкцией ТЗП и изменением при этом теплофизических параметров. На рис. 2

приведены графики изменения тепловых потоков в защищаемую поверхность по времени.

Уменьшение теплового потока в защищаемую поверхность через 20 минут после начала нагрева связано с термической деструкцией внешних слоев покрытия и уменьшением при этом их коэффициента теплопроводности. На внешней поверхности коэффициент теплопроводности уменьшается с $\lambda=0,367$ Вт/(м·К) до значения $\lambda=0,128$ Вт/(м·К).

— - $q_0=1,2$ кВт/м²; — — — $q_0=12$ кВт/м²; — — — $q_0=100$ кВт/м²

Рисунок – 2. Изменение плотности теплового потока в защищаемую поверхность при различной интенсивности и продолжительности нагрева:

Интегрированием по времени можно получить количество теплоты, подведенной к защищаемой поверхности и количество охлаждающей воды. Охлаждающая вода нагревалась от 20 оС до 45 оС. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчетов расхода охлаждающей воды.

Плотность теплового потока на внешней поверхности, кВт/м ²	Время теплового воздействия, ч	Максимальная плотность теплового потока на защищаемой поверхности, кВт/м ²	Количество теплоты, подведенной к защищаемой поверхности, МДж/ч	Максимальный расход охлаждающей воды, кг/(с·м ²)	Количество использованной охлаждающей воды, кг/м ²
1,2	2	0,509	2,89	0,0015	34,9
12	2	4,795	38,11	0,046	328,8
100	2	6,549	58,19	0,062	349,7

Выводы

Исходя из анализа данных, приведенных на рис. 1, 2 и в таблице 1, можно сделать следующие выводы:

- при падающем тепловом потоке $q_0 = 1,2$ кВт/м² ТЗП сохраняет работоспособность в течение 2-х часов без охлаждения защищаемой поверхности;
- при падающем тепловом потоке $q_0 = 12$ кВт/м² и выше защищаемую поверхность необходимо охлаждать водой, при этом 4-х м³ воды достаточно для защиты 12 м² поверхности в течение 2-х часов;
- при падающем тепловом потоке $q_0 = 100$ кВт/м² 4-х м³ воды хватает для охлаждения 10 м² поверхности в течение 2-х часов.

При тепловых потоках $q_0 \geq 20$ кВт/м² происходит частичная термическая деструкция внешних слоев ТЗП. Следовательно, конструкция защищаемой кабины

должна состоять из отдельных панелей, которые подлежат замене при определённой величине деструкции поверхностных слоёв ТЗП.

Представленные расчёты указывают на целесообразность проведения дальнейших работ по применению абляционных материалов для защиты кабин лесопожарных машин от интенсивного теплового воздействия

1. Данные Росстата по лесным пожарам [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/sxles2.htm
2. Воробьёв, Ю.Л. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы. МЧС России / Ю.Л. Воробьёв, В.А. Акимов, Ю.И. Соколов; Под общ. ред. Ю.Л. Воробьёва. – М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. – 312 с.
3. Цай, Ю.Т. Обзор исследований опасных и вредных факторов лесного пожара / Ю.Т. Цай, С.В. Стельмахович, И.В. Косов // Лесной вестник №1(32), 2004 г. – с. 14-24.
4. Цай, Ю.Т. Применение метода экспертных оценок для выбора структуры показателей при комплексной оценке безопасности лесных пожарных / Ю.Т. Цай // Лесной вестник №5(36), 2004 г. – с. 94-104.
5. Сныткин, Г.В. Особенности лесных пожаров в разных формациях, типах леса и методы их тушения в лесах крайнего северо-востока Сибири / Г.В. Сныткин // Лесной вестник №5(20), 2001 г. – с. 37-44.
6. Cimander, S. Morita: Führender Feuerwehrfahrzeughersteller aus Japan [электронный ресурс]. – режим доступа <http://www.fwnetz.de/2010/06/08/-morita-fuhrender-feuerwehrfahrzeughersteller-aus-japan/>
7. Morita new concept car [электронный ресурс] – Morita group. – режим доступа <http://www.morita119.com/en/innovation/awards/in-dex.html>
8. Машины для тушения лесных пожаров Ивеко МАГИРУС [электронный ресурс] – режим доступа <http://www.magirus.ru/forest.shtml>
9. Mert, A. AUTONOMOUS FIRE GUARD for Husqarna [электронный ресурс] – режим доступа <http://aydinmert.net/>
10. Лесопожарный агрегат ЛПА-521 [электронный ресурс] – УралВагонЗавод, Рубцовский филиал. – режим доступа <http://www.uvzrmz.ru/product/105/>
11. Способ изготовления препрега с автоматическим контролем технологического процесса. Патент РФ № 2565709 от 21.09.2015 г.
12. Котенко, В.Д. Вакуумная технология получения препрегов с высоким содержанием полимера/ В.Д. Котенко, И.В. Глебов // Лесной вестник. – 2016. – Т. 20. – № 3. – С. 29-34.
13. Котенко В.Д. Вакуумная технология изготовления многослойных препрегов./ В.В. Абразумов, В.Д. Котенко, И.В. Глебов, Н.В. Синюков// Научные тенденции: Вопросы точных и технических наук. Сборник научных трудов по материалам XII международной научной конференции 12 декабря 2017 г., – С.-Петербург. – с. 48-53.
14. Ермоченков М.Г. Математическое моделирование процессов, протекающих в древесине при термическом модифицировании/ Ермоченков М.Г., Семенов Ю.П.// Лесной вестник. Научно-информационный журнал.– М.: ГОУ ВПО МГУЛ. – 2012 – №4(87). – С 92-97
15. Ермоченков, М.Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины. – М.: Горячая линия – телеком 2017. – 220 с.

Аравенков А.А., Пасынков Ю.А.

Применение анализатора гармоник на основе широтно-импульсной модуляции в задаче оценки качества электрической энергии в системах электроснабжения общего пользования

*Новосибирский Государственный Технический Университет
(Россия, Новосибирск)*

doi:10.18411/spc-12-02-2018-08

idsp: 000001:spc-12-02-2018-08

Аннотация

Статья посвящена рассмотрению метода измерения амплитуд и фаз гармонических составляющих сигналов основанного на широтно-импульсной модуляции и применению его в области оценки качества электрической энергии в системах электроснабжения общего пользования для измерения амплитуд сетевого напряжения и последующего расчета его коэффициента не синусоидальности.