

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

Научный журнал

2024

№ 5

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-83494 от 24 июня 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 28006



Национальный исследовательский
Томский государственный университет
2024

Учредитель:
Национальный исследовательский Томский государственный университет
РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА
«ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»
EDITORIAL COUNCIL
LIFE SAFETY /
SECURITY TECHNOLOGIES

Ю.М. Михайлов – председатель редакционного совета, д-р хим. наук, профессор, академик РАН, почетный доктор НИ ТГУ
Э.В. Галажинский – д-р психол. наук, профессор
И.М. Донник – д-р биол. наук, профессор, академик РАН
А.А. Дынкин – д-р экон. наук, профессор, академик РАН
С.А. Караганов – д-р ист. наук, профессор
С.Д. Каракотов – д-р хим. наук, профессор, академик РАН
А.В. Лопатин – д-р биол. наук, профессор, академик РАН
М.П. Кирпичников – д-р биол. наук, профессор, академик РАН
В.П. Чехонин – д-р мед. наук, профессор, академик РАН
А.Б. Ворожцов – д-р физ.-мат. наук, профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

А.Б. Ворожцов – главный редактор, д-р физ.-мат. наук, профессор
М.Г. Хмелева – ответственный секретарь, канд. физ.-мат. наук

Д.Ю. Баланев – канд. психол. наук
С.М. Бобровников – д-р физ.-мат. наук
Н.А. Глушченко – канд. ист. наук
К.С. Голохваст – д-р биол. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАО
В.М. Грузнов – д-р техн. наук
Е.А. Данилова – д-р полит. наук
А.Н. Ищенко – д-р физ.-мат. наук
В.А. Кагадей – д-р физ.-мат. наук, профессор
Ю.В. Кистенев – д-р физ.-мат. наук, профессор
М.И. Лернер – д-р техн. наук
Е.М. Максимов – д-р техн. наук
А.С. Самойлов – д-р мед. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН
В.И. Сачков – д-р хим. наук, доцент
В.С. Смирнов – канд. хим. наук
В.Г. Султанов – д-р физ.-мат. наук
Н.Н. Сысоев – д-р физ.-мат. наук, профессор
А. Тсатсакис – д-р биол. наук, иностранный член РАН
С.Э. Шипилов – д-р физ.-мат. наук
А.П. Шкуринов – д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН

Yuri M. Mikhailov – Chairman of Editorial Council, Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Honorary Doctor of TSU
Eduard V. Galazhinskiy – Dr.Sc. (Psychology), Professor
Irina M. Donnik – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander A. Dynkin – Dr.Sc. (Economics), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Sergey A. Karaganov – Dr.Sc. (History), Professor
Salis D. Karakotov – Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexey V. Lopatin – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Mikhail P. Kirpichnikov – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Vladimir P. Chekhonin – Dr.Sc. (Medicine), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander B. Vorozhtsov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Vorozhtsov – Editor-in-Chief, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Marina G. Khmeleva – Executive Editor, Cand.Sc. (Physics and Mathematics)

Dmitry Yu. Balanov – Cand.Sc. (Psychology)
Sergei M. Bobrovnikov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikita A. Glushchenko – Cand.Sc. (History)
Kirill S. Golokhvast – Dr.Sc. (Biology), Professor of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Education
Vladimir M. Gruznov – Dr.Sc. (Engineering)
Elena A. Danilova – Dr.Sc. (Politics)
Alexander N. Ishchenko – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Valery A. Kagadey – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Yury V. Kistenev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Marat I. Lerner – Dr.Sc. (Engineering)
Evgeniy M. Maksimov – Dr.Sc. (Engineering)
Alexander S. Samoilov – Dr.Sc. (Medicine), Professor of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences
Victor I. Sachkov – Dr.Sc. (Chemistry), Associate professor
Vladimir S. Smirnov – Cand.Sc. (Chemistry)
Valery G. Sultanov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikolay N. Sysoev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Aristidis Tsatsakis – Dr.Sc. (Biology), Foreign Member of the Russian Academy of Sciences
Sergey E. Shipilov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Alexander P. Shkurinov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет.

E-mail: safety@mail.tsu.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Вальцифер И.В., Шамсутдинов А.Ш., Вальцифер В.А., Стрельников В.Н. Влияние кристаллогидратов солей в огнетушащем порошковом составе на его удельную эффективность тушения легковоспламеняющейся жидкости	5
Малый И.А., Шарабанова И.Ю., Сырбу С.А., Никифоров А.Л. Разработка современных пожаробезопасных материалов и технологий	12
Медведева Т.И., Касымов Д.П., Лобода Е.Л. Исследование термического разрушения некоторых видов строительных материалов в результате воздействия радиационного теплового потока от очага пожара	18
Брыксин С.В., Муранов А.К., Киселев Д.А., Судакова Н.В., Бабич С.Н. Новые способы применения пиротехнических средств вызывания осадков для тушения лесных пожаров	27
Лобода Е.Л., Рейно В.В. Применение методов ИК-термографии для исследования природных пожаров и процессов горения	34
Озеряков С.В. Авиационное средство пожаротушения АСП-500. Разработка, проблемы, перспективы	43
Лобода Е.Л. Природные (лесные, степные, торфяные) пожары: прогноз, обнаружение, тушение	51

CONTENTS

Valtsifer I.V., Shamsutdinov A.S., Valtsifer V.A., Strelnikov V.N. The influence of crystalline salt hydrates in a fire extinguishing powder composition on its specific effectiveness in extinguishing flammable liquids	5
Malyj I.A., Sharabanova I.Yu., Syrbu S.A., Nikiforov A.L. Development of modern fire-safe materials and technologies	12
Medvedeva T.I., Kasymov D.P., Loboda E.L. Study of thermal destruction of certain types of building materials as a result of exposure to radiation heat flow from a fire source	18
Bryksin S.V., Muranov A.K., Kiselev D.A., Sudakova N.V., Babich S.N. New ways of using pyrotechnics for inducing precipitation to extinguish forest fires	27
Loboda E.L., Reyno V.V. Application of IR thermography methods to study wildland fires and combustion processes	34
Ozeryakov S.V. Aerial fire extinguishing equipment ASP-500. Development, problems, prospects	43
Loboda E.L. Wildland (forest, steppe, peat) fires: forecast, detection, extinguishing	51

Научная статья
УДК 614.842
doi: 10.17223/29491665/5/1

Влияние кристаллогидратов солей в огнетушащем порошковом составе на его удельную эффективность тушения легковоспламеняющейся жидкости

Игорь Викторович Вальцифер¹, Артем Шамсутдинов²,
Виктор Александрович Вальцифер³, Владимир Николаевич Стрельников⁴

^{1, 2, 3, 4} *Институт технической химии УрО РАН – филиал
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия*

¹ *valtsifer.i@itcras.ru*

² *shamsutdinov.a@itcras.ru*

³ *valtsifer.v@itcras.ru*

⁴ *info@itcras.ru*

Аннотация. В работе представлена сравнительная оценка удельной пожаротушающей эффективности порошковых составов, содержащих в качестве газогенерирующего компонента соли кристаллогидратов. Методами термодинамических расчетов и экспериментальных испытаний доказано снижение расхода порошковых составов на тушение легковоспламеняющейся жидкостей не менее чем на 30% при использовании в качестве газогенерирующего компонента гексагидрата магний-аммоний фосфата $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Показано преимущество введения мелкодисперсных частиц кристаллогидрата ($d < 20$ мкм), синтезированных в процессе контролируемого осаждения, в сравнении с аналогами, получаемыми в результате механического измельчения ($d < 100$ мкм).

Ключевые слова: огнетушащий порошковый состав, кристаллогидраты, струвит, удельная эффективность тушения

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке правительства Пермского края в рамках научного проекта «Огнетушащий порошковый состав комбинированного газогенерирующего воздействия» (№ С-26/543, 18.03.2021).

Для цитирования: Вальцифер И.В., Шамсутдинов А.Ш., Вальцифер В.А., Стрельников В.Н. Влияние кристаллогидратов солей в огнетушащем порошковом составе на его удельную эффективность тушения легковоспламеняющейся жидкости // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 5–11. doi: 10.17223/29491665/5/1

Original article
doi: 10.17223/29491665/5/1

The influence of crystalline salt hydrates in a fire extinguishing powder composition on its specific effectiveness in extinguishing flammable liquids

Igor V. Valtsifer¹, Artem S. Shamsutdinov², Viktor A. Valtsifer³,
Vladimir N. Strelnikov⁴

^{1, 2, 3, 4} *Institute of Technical Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch
of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation*

¹ *valtsifer.i@itcras.ru*

² *shamsutdinov.a@itcras.ru*

³ *valtsifer.v@itcras.ru*

⁴ *info@itcras.ru*

Abstract. The article presents the comparative evaluation of specific fire extinguishing efficiency of powder compositions containing crystalline hydrate salts as a gas-generating component. Thermodynamic calculations and experimental tests have shown a reduction in the consumption of powder compositions for extinguishing highly flammable liquids by at least 30% when hexahydrate of magnesium-ammonium phosphate $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ is used as a component of fire extinguishing powders. The research has shown the advantage of implementing fine particles of crystalline hydrates ($d < 10 \mu\text{m}$) obtained during the controlled precipitation process compared to analogs manufactured by mechanical grinding ($d < 100 \mu\text{m}$).

Keywords: fire extinguishing powder composition, crystalline hydrates, specific extinguishing efficiency

Acknowledgments: The reported study was supported by the Government of Perm Krai, research project No. C-26/543.

For citation: Valtsifer, I.V., Shamsutdinov, A.S., Valtsifer V.A. & Strelnikov, V.N. (2024) The influence of crystalline salt hydrates in a fire extinguishing powder composition on its specific effectiveness in extinguishing flammable liquids. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 5–11. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/1

Введение

Известно, что ликвидация очага горения огнетушащими порошковыми составами (ОПС) может быть реализована по следующим механизмам [1–5]:

- образование на поверхности горящего материала полимерной пленки полифосфатов и, соответственно, её экранирующее и изолирующее действие (в случае использования порошков на основе фосфатов аммония);

- понижение содержания кислорода воздуха в горючей смеси путем разбавления негорючими газами;

- гомогенное ингибирование, если испарившиеся при введении в зону горения порошков продукты являются химически активными ингибиторами;

- охлаждение зоны реакций вследствие поглощения тепла частицами малой массы с большой суммарной теплоемкостью и тепловоспринимающей поверхностью вследствие протекания эндотермического процесса разложения компонентов ОПС.

На сегодняшний день принцип действия большинства известных промышленно выпускаемых ОПС связан именно с образованием на поверхности горящих материалов изолирующей пленки. Дальнейшее повышение удельной эффективности ОПС может быть достигнуто за счет действия механизмов тушения, связанных с охлаждением зоны горения эндотермическими реакциями разложения и разбавлением горючей смеси выделяющимися парами воды. Данный подход может быть реализован путем использования в качестве компонентов ОПС солей кристаллогидратов, способных значительно снижать температуру очага горения за счет содержания связанных молекул воды [6, 7]. Следовательно, совместное применение в качестве тушащих компонентов фосфатов аммония и солей кристаллогидратов позволит повысить пожаротушащую эффективность составов путем комбинированного действия различных механизмов подавления пламени.

Анализ литературных и патентных источников показал существующие разработки в области создания огнетушащего порошка, содержащего в качестве тушащего компонента соли кристаллогидратов.

Известен патент [8], описывающий получение ОПС на основе неорганических солей сульфатов и сульфидов (сульфата цинка, сульфата железа, сульфида цинка, сульфида железа и сульфата алюминия), содержащих кристаллизационную воду. Согласно па-

тенту [9], в качестве активного огнетушащего компонента ОПС может быть использован кристаллогидрат карбоната натрия (не менее 48% в составе), содержащий 10% связанной воды. Удельная эффективность тушения легковоспламеняющейся жидкости в данном случае составляет 0,83 кг/м². Значительные результаты достигнуты в разработке, представленной в патенте [10], в котором описан способ получения ОПС на основе не растворимых в воде кристаллогидратов неорганических солей, например, $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 22H_2O$, $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, $Al_2O_3 \cdot SO_3 \cdot 9H_2O$, содержащих химически связанную воду в количестве 25–62%. Кристаллогидраты могут применяться в смеси с добавками для улучшения течения (гидрофобный аморфный диоксид кремния) либо с добавлением активного компонента другого класса (фосфаты аммония, хлорид калия, сульфат аммония, бикарбонат натрия), доля которых достигает 25–70%. Удельная тушащая эффективность составов в данном примере варьируется от 0,43 до 0,59 кг/м².

На основе патентно-литературных источников можно сделать вывод о том, что существуют разработки в области создания ОПС, содержащих соли кристаллогидратов, однако данные о внедрении разработок в промышленное производство отсутствуют. Недостатком большинства представленных ОПС является высокая гигроскопичность неорганических солей, входящих в их состав, и, следовательно, склонность к слеживанию. Очевидно, это приводит к ухудшению текучести и эксплуатационных свойств порошков, что в конечном итоге снижает их эффективность. Кроме того, практически все способы получения включают стадию измельчения солей кристаллогидратов до необходимого уровня дисперсности частиц, что приводит к их дегидратации в результате локальных разогревов и, следовательно, к снижению доли связанной воды в готовом ОПС.

В данной статье рассмотрена возможность применения в качестве одного из тушащих компонентов ОПС гексагидрата магний-аммоний фосфата (струвит) $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ (до 44% химически связанной воды), процесс синтеза которого является простым, экологичным и доступным [12–14]. Ранее разработанный способ контролируемого осаждения кристаллогидрата из раствора позволил получить дисперсный компонент со средним размером частиц около 20 мкм и удельной поверхностью до 25 м²/г без применения высокоэнергетического механического из-

мельчения [15]. С целью решения проблемы, связанной с процессами слеживания и перекристаллизации, был создан комплексный супергидрофобный функциональный наполнитель на основе сферических частиц диоксида кремния размером ~ 30 нм, позволяющий создать покрытие для частиц кристаллогидрата, защищающее их от действия влаги воздуха (краевой угол смачивания воды $\sim 160^\circ$) и придающее свободнотекучие свойства [16, 17].

Таким образом, целью настоящего исследования являлась оценка удельной эффективности тушения легковоспламеняющейся жидкости огнетушащим составом, содержащим в качестве основных компонентов моноаммонийфосфат и струвит, в сравнении с существующими патентными и промышленными аналогами.

Методика эксперимента

Для предварительной оценки газогенерирующей способности исследуемого состава и определения продуктов его разложения при тушении легковоспламеняющейся жидкости (бензин) проведены термодинамические расчеты с помощью программного комплекса TERRA, предназначенного для расчета состава фаз и термодинамических свойств произвольных систем с химическими и фазовыми превращениями. Данный программный комплекс позволяет проводить расчет реакций в термодинамически равновесных условиях, происходящих между основными компонентами процесса горения, с определением продуктов сгорания и оценки их количества.

Для получения исследуемого состава комбинированного газогенерирующего воздействия (ОПС КГВ) на основе моноаммонийфосфата и гексагидрата магний-аммоний фосфата (струвит) были изготовлены порошковые смеси, где соотношение компонентов составило: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 65% / $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 30% / SiO_2 5%. Смешение компонентов для равномерного распределения частиц функционального наполнителя в порошковой смеси осуществляли в шаровой мельнице в течение 3 ч. Указанное содержание струвита является максимальным, при котором возможно использование в составе высокодисперсного компонента при сохранении технических характеристик состава в рамках требований ГОСТ [18].

Температурные интервалы и значения энтальпии разложения компонентов порошковых составов определяли методами термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью термогравиметрического анализатора TGA/DSC1 (METTLER-TOLEDO) на

воздухе при скорости нагревания $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур $25\text{--}800^\circ\text{C}$.

Испытания по определению удельной эффективности тушения исследуемым ОПС модельного очага пожара легковоспламеняющейся жидкости проводились в соответствии с методом, представленным в НПБ и ГОСТ [18, 19]. Огнетушащая способность порошка в соответствии с методом оценивалась по его способности тушить очаг пожара класса В площадью $1,75\text{ м}^2$, заполненного 55 л горючей жидкости [20], при подаче порошка из закачного огнетушителя вместимостью 4 кг. Огнетушитель закреплен слева от противня с бензином и защищен теплоизолирующим экраном. Кроме того, в течение первых 60 с [19] после воспламенения и разогрева очага возгорания, огнетушитель был отведен от пламени и направлялся в сторону очага непосредственно перед началом тушения. Система тушения приводилась в действие дистанционно. Удельная эффективность пожаротушения составов определялась из расчета среднего значения массы порошка, пошедшей на тушение модельного очага возгорания заданной площади в результате трех параллельных определений.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В табл. 1 представлены рассчитанные газообразные продукты, которые образуются при горении бензина, а также при его тушении составами на основе моноаммонийфосфата (средняя колонка) и его смеси со струвитом (правая колонка). Согласно результатам термодинамических расчетов, при включении в порошковый состав кристаллогидрата процесс тушения бензина сопровождается снижением температуры продуктов сгорания с 1893 до 1767°C , а газогенерирующая способность (увеличение объема продуктов сгорания) составляет $0,64\text{ м}^3$ на 1 кг ОПС. При этом объем образующегося водяного пара в составе продуктов сгорания увеличивается на $1,02\text{ м}^3$. В процессе тушения исследуемым порошковым составом комбинированного воздействия очевидно не только образование водяного пара, но и снижение объема CO_2 в продуктах реакции, что говорит о прерывании цепных реакций горения раньше момента полного сгорания продуктов.

Повышение пожаротушащей эффективности, спрогнозированное термодинамическими расчетами продуктов взаимодействия порошковых составов с пламенем, было доказано экспериментами по тушению модельного очага пожара легковоспламеняющейся жидкости площадью $1,75\text{ м}^2$ с помощью огнетушителя, снаряженного исследуемым составом с 30% долей струвита (рис. 1).

Таблица 1

Результаты термодинамических расчетов газообразных продуктов, выделяющихся в процессах горения бензина и его тушения огнетушащими порошковыми составами

Бензин, 2008 °С			Тушение ОПС (95% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), 1893 °С			Тушение ОПС (65% $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 30% $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 1767 °С		
	$\text{м}^3/\text{кг}$	%		$\text{м}^3/\text{кг}$	%		$\text{м}^3/\text{кг}$	%
O_2	0,042	0,65	O_2	0,064	1,05	O_2	0,011	0,17
H_2	0,020	0,31	H_2	0,013	0,21	H_2	0,019	0,29
H_2O	0,893	13,5	H_2O	1,469	24,00	H_2O	1,976	30,74
N_2	4,780	72,4	N_2	3,818	62,39	N_2	4,134	64,31
NO	0,017	0,25	NO	0,014	0,23	NO	0,004	0,07
CO	0,093	1,42	CO	0,021	0,35	CO	0,008	0,13
CO_2	0,751	11,38	CO_2	0,469	7,77	CO_2	0,194	3,02
			PO_2	0,189	3,08	PO_2	0,066	1,02
			P_2O_4	0,002	0,03	P_2O_5	0,015	0,23
			P_2O_5	0,054	0,88	SO_2	0,002	0,01
Итого:	6,6	99,91	Итого:	6,110	99,99	Итого:	6,420	99,99



Рис. 1. Процесс тушения модельного очага возгорания бензина (площадь – 1,75 м²) исследуемым огнетушащим порошковым составом (масса заряда огнетушителя – 4 кг)

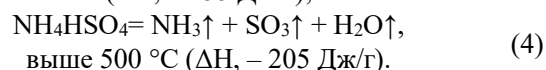
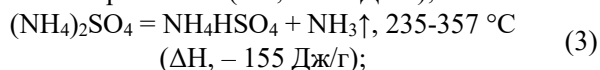
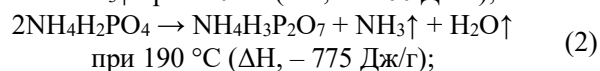
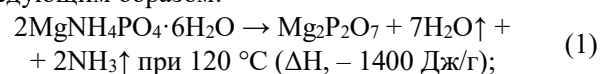
Fig. 1. The extinguishing process of the model fire source of gasoline (area – 1.75 m²) with the tested fire extinguishing powder composition (fire extinguisher charge weight – 4 kg)

Из данных табл. 2 следует, что расход исследуемого ОПС на тушение модельного очага составил менее одного килограмма. Это соответствует значению удельной эффективности тушения, равному 0,3 кг/м². Данный показатель демонстрирует не менее чем на 30% меньший расход исследуемого состава с комбинированным механизмом ингибирования пламени в сравнении с аналогами, представленными в патентах. Данные показатели были достигнуты в том числе за счет ранее указанных особенностей частиц струвита, а именно: высокой дисперсности и удельной площади поверхности, которые увеличивают скорость поглощения тепла.

Таблица 3 содержит результаты экспериментальных испытаний по тушению легковоспламеняющейся жидкости следующими составами: моноаммонийфосфатом, смесью моноаммонийфосфата со струвитом (ОПС КГВ), смесью моноаммонийфосфата с сульфатом аммония. Доля газогенерирующего компонента на основе сульфата аммония в последнем образце соответствует соотношению компонентов в

промышленно выпускаемом ОПС общего назначения, представленном в патенте [21].

Схемы реакций термического разложения компонентов составов при росте температуры выглядят следующим образом:



Из представленных схем очевидны преимущества газогенерирующего компонента на основе струвита (1), (2) в сравнении с сульфатом аммония (3), (4), применяемым в промышленных аналогах: во-первых, в 2 раза более низкая температура начала разложения и, во-вторых, наличие кристаллизационной воды, обеспечивающей значительное превосходство показателя общей теплоты разложения.

Таблица 2

Сравнение характеристик исследуемого огнетушащего порошкового состава с аналогами, содержащими соли кристаллогидратов

Критерии	ОПС КГВ	Аналоги			
		$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
Доля кристаллогидрата, %	30,0	97,0	97,5	98,0	70,0
Содержание связанной воды в порошке, %	15,0	45,7	58,7	43,2	30,9
Доля тушащего компонента другого класса, %	65,0	–	–	–	25,8
Удельная огнетушащая эффективность по классу В, кг/м ²	0,30	0,55	0,41	0,48	0,59

Таблица 3

Сравнение характеристик исследуемого огнетушащего порошкового состава с аналогами

Критерии	ОПС КГВ	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Доля газогенерирующего компонента, %	30	–	50
Доля тушащего компонента другого класса, %	65	95	35
Тепловой эффект разложения, Дж/г	850	775	600
Удельная огнетушащая эффективность по классу В, кг/м ²	0,30	0,44	0,91

Из результатов сравнительной оценки удельной эффективности тушения порошковыми составами легковоспламеняющейся жидкости следует, что введение частиц струвита, полученных по разработанной технологии, в смесь с моноаммонийфосфатом позволяет достигнуть комбинированного воздействия на пламя двух механизмов ингибирования горения и, следовательно, увеличить показатель пожаротушащей эффективности состава ОПС КГВ на 25–60% как по отношению к чистому моноаммонийфосфату, так и его смеси с сульфатом аммония.

Выводы

В рамках предложенного способа получения ОПС, содержащего газогенерирующий компонент на основе гексагидрата магний-аммоний фосфата (струвит), проведены термодинамические расчеты продуктов, образующихся при тушении ОПС возгорания легковоспламеняющейся жидкости. Показано увеличение доли среди выделяющихся газообразных продуктов паров воды и азота в сравнении с повсеместно

используемым моноаммонийфосфатом, что свидетельствует о потенциале применения газогенерирующего компонента в составе огнетушащих порошков.

С целью проверки полученных результатов был изготовлен образец ОПС КГВ, содержащий 30% струвита с размером частиц менее 20 мкм и удельной поверхностью до 25 м²/г. Путем экспериментальных испытаний было доказано превосходство удельной пожаротушащей эффективности предложенного состава на 25% по отношению к показателям существующих аналогов на основе солей кристаллогидратов.

Продemonстрировано преимущество комбинированного действия механизмов пожаротушения моноаммонийфосфата и струвита в сравнении с промышленно выпускаемым составом ОПС общего назначения, содержащим в качестве газогенерирующего компонента сульфат аммония. Показано, что использование разработанного газогенерирующего компонента на основе струвита в составе ОПС КГВ позволяет улучшить на 25–60% показатели удельной эффективности тушения легковоспламеняющейся жидкости по сравнению как с чистым моноаммонийфосфатом, так и его смесью с сульфатом аммония.

Список источников

1. Wang X. Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent // Journal of Physics: Conference Series. 2023. P. 2539. doi: 10.1088/1742-6596/2539/1/012091
2. Nolan D. Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities. Fourth Edition. Gulf Professional Publishing, 2019. P. 522. doi: 10.1016/C2017-0-04314-8

3. Lapshin D.N., Kunin A.V., Semenov A.D. Influence of Chemical Impurities in Ammonium Phosphate and Ammonium Sulfate on the Properties of ABCE Fire Extinguishing Dry Powders // *Russian Journal of General Chemistry*. 2016. Vol. 86. P. 439–449. doi: 10.1134/S1070363216020444
4. Xiaomin N., Chow W.K., Guangxuan L. Discussions on Applying Dry Powders to Suppress Tall Building Fires // *Journal of applied fire science*. 2009. Vol. 18. P. 155–191. doi: 10.2190/AF.18.2.d
5. Kuang K., Huang X., Liao G. A Comparison between Superfine Magnesium Hydroxide Powders and Commercial Dry Powders on fire Suppression Effectiveness // *Process Safety Environ. Protection*. 2008. Vol. 86. P. 182–188. doi: 10.1016/j.psep.2007.11.002
6. Gurchumelia L., Tsarakhov M., Machaladze T., Tkemaladze S., Bejanov F., Chudakova O. Elaboration of New Types, Environmentally Safe Fire-Extinguishing Powders and Establish the Conditions of Extinguish Optimum and Effective Use of Such Powders // *Modern Chemistry & Applications*. 2018. Vol. 6. P. 257–266. doi: 10.4172/2329-6798.1000257
7. Haiqiang L., Ruowena Z., Jiaxina G., Siuning L., Yuana H. A Good Dry Powder to Suppress High Building Fires // *APCBEE Proc*. 2014. Vol. 9. P. 291–295. doi: 10.1016/j.apcbee.2014.01.052
8. Pat. CN102512779B. Dry powder fire extinguishing agent / Suzhou University (publ. date: 27.06.2012).
9. Patent US4149976A. Powder for extinguishing fires of liquid substances or of a mixture of liquid substances / Reuillon M., Mellottee H., Alfille L., Duco J., Fruchard Y., Malet J.-C., Chappellier A., Devillers B. Current Assignee: Commissariat a l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives CEA (publ. date: 17.04.1976).
10. Патент 2277003 Российская Федерация. Огнетушащий порошковый состав / Вершинин С.Н. № 2004118342/15, заявл. 16.06.2004; опубл. 27.05.2006. Бюл. № 15. 11 с.
11. Zhang S., Shi H.-S., Huang S.-W., Zhang P. Dehydration Characteristics of Struvite-K Pertaining to magnesium potassium phosphate cement System in Non-Isothermal Condition // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2013. Vol. 111. P. 35–40. doi: 10.1007/s10973-011-2170-9
12. Shih K., Yan H. The Crystallization of Struvite and its Analog (K-struvite) from Waste Streams for Nutrient Recycling // *Environmental materials and waste*. 2016. P. 665–686. doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00026-3
13. Siciliano A., Limonti C., Curcio G.M., Molinari R. Advances in Struvite Precipitation Technologies for Nutrients Removal and Recovery from Aqueous Waste and Wastewater // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, № 18. P. 1–36. doi: 10.3390/su12187538
14. Пьянкова А.В., Кондрашова Н.Б., Вальцифер И.В., Шамсутдинов А.Ш., Бормашенко Э.Ю. Синтез и термическое поведение мелкодисперсного порошкового огнегасящего агента на основе струвита // *Неорганические материалы*. 2021. Т. 57, № 10. С. 1144–1152. doi: 10.31857/S0002337X21100122
15. Хуо Ян, Вальцифер И.В., Шамсутдинов А.Ш., Кондрашова Н.Б., Замашчиков В.В., Пьянкова А.В. Синтез и применение гидрофобного диоксида кремния для улучшения реологических свойств огнетушащих составов на основе струвита // *Физика горения и взрыва*. 2023. Т. 59, № 6. С. 70–81. doi: 10.15372/FGV2022.9263
16. Valtsifer I.V., Huo Y., Zamashchikov V.V., Shamsutdinov A.S., Kondrashova N.B., Sivtseva A.V., Pyankova A.V., Valtsifer V.A. Synthesis of Hydrophobic Nanosized Silicon Dioxide with a Spherical Particle Shape and Its Application in Fire-Extinguishing Powder Compositions Based on Struvite // *Nanomaterials*. 2023, Vol. 13. P. 1186. doi: 10.3390/nano13071186
17. ГОСТ 27331-87. Пожарная техника. Классификация.
18. ГОСТ Р 53280.4-2009. Установки пожаротушения автоматические. Огнетушащие вещества. Часть 4: Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования и методы испытаний.
19. НПБ 170-98. Порошки огнетушащие общего назначения. Общие технические требования. Методы испытаний.
20. ГОСТ Р 51057-2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний.
21. Патент 2155088 Российская Федерация. Огнетушащий порошок многоцелевого назначения / Кушук В.А., Попов А.В., Сыровцева Л.А., Чумаевский В.А. № 99104700/12, заявл. 11.03.1999; опубл. 27.08.2000. Бюл. № 24. 6 с.

References

1. Wang, X. (2023) Study on Modification Technology of Superfine Dry Powder Fire Extinguishing Agent. *Journal of Physics: Conference Series*. Art. No. 2539. pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2539/1/012091
2. Nolan, D. (2019) *Handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities*. Fourth Edition. Gulf Professional Publishing. doi: 10.1016/C2017-0-04314-8
3. Lapshin, D.N., Kunin, A.V. & Semenov, A.D. (2016) Influence of Chemical Impurities in Ammonium Phosphate and Ammonium Sulfate on the Properties of ABCE Fire Extinguishing Dry Powders. *Russian Journal of General Chemistry*. 86. pp. 439–449. doi: 10.1134/S1070363216020444
4. Xiaomin, N., Chow, W.K. & Guangxuan, L. (2009) Discussions on Applying Dry Powders to Suppress Tall Building Fires. *Journal of Applied Fire Science*. 18. pp. 155–191. doi: 10.2190/AF.18.2.d
5. Kuang, K., Huang, X. & Liao, G.A. (2008) Comparison between Superfine Magnesium Hydroxide Powders and Commercial Dry Powders on fire Suppression Effectiveness. *Process Safety Environ. Protection*. 86. pp. 182–188. doi: 10.1016/j.psep.2007.11.002
6. Gurchumelia, L., Tsarakhov, M., Machaladze, T., Tkemaladze, S., Bejanov, F. & Chudakova, O. (2018) Elaboration of New Types, Environmentally Safe Fire-Extinguishing Powders and Establish the Conditions of Extinguish Optimum and Effective Use of Such Powders. *Modern Chemistry & Applications*. 6. pp. 257–266. doi: 10.4172/2329-6798.1000257
7. Haiqiang, L., Ruowena, Z., Jiaxina, G., Siuning, L. & Yuana, H. (2014) A Good Dry Powder to Suppress High Building Fires. *APCBEE Proceedings*. 9. pp. 291–295. doi: 10.1016/j.apcbee.2014.01.052
8. Patent CN102512779B. Dry powder fire extinguishing agent / Suzhou University. Publication date 27.06.2012
9. Reuillon, M., Mellottee, H., Alfille, L., Duco, J., Fruchard, Y., Malet, J.-C., Chappellier, A. & Devillers, B. (1976) Patent US4149976A. Powder for extinguishing fires of liquid substances or of a mixture of liquid substances / Current Assignee: Commissariat a l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives CEA. Publication date 17.04.1976.
10. Verшинин, S.N. (2006) Patent RU2155088C1. *Ognetushashchii poroshkovyi sostav* [Fire extinguishing composition]. № 2004118342/15, appl. 16.06.2004; publication date 27.05.2006, Bul. No. 15.

11. Zhang, S., Shi, H.-S., Huang, S.-W. & Zhang, P. (2013) Dehydration Characteristics of Struvite-K Pertaining to magnesium potassium phosphate cement System in Non-Isothermal Condition. *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 111. pp. 35–40. doi: 10.1007/s10973-011-2170-9.
12. Shih, K. & Yan, H. (2016) The Crystallization of Struvite and its Analog (K-struvite) from Waste Streams for Nutrient Recycling. *Environmental materials and waste*. pp. 665–686. doi: 10.1016/B978-0-12-803837-6.00026-3
13. Siciliano, A., Limonti, C., Curcio, G.M. & Molinari, R. (2020) Advances in Struvite Precipitation Technologies for Nutrients Removal and Recovery from Aqueous Waste and Wastewater. *Sustainability*. 12 (18). pp. 1–36. doi: 10.3390/su12187538
14. Pyankova, A.V., Kondrashova, N.B., Val'tsifer, I.V., Shamsutdinov, A.S. & Bormashenko, E.Y. (2021) Synthesis and Thermal Behavior of a Struvite-Based Fine Powder Fire-Extinguishing Agent. *Inorganic Materials*. 57 (10). pp. 1083–1091. doi: 10.1134/S0020168521100125
15. Huo, Y., Valtsifer, I.V., Zamashchikov, V.V., Shamsutdinov, A.S., Kondrashova, N.B. & Pyankova, A.V. (2023) Synthesis and application of hydrophobic silicon dioxide to improve the rheological properties of fire extinguishing compositions based on struvite. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 59. pp. 733–743. doi: 10.1134/S0010508223060096.
16. Valtsifer, I.V., Huo, Y., Zamashchikov, V.V., Shamsutdinov, A.S., Kondrashova, N.B., Sivtseva, A.V., Pyankova, A.V. & Valtsifer, V.A. (2023) Synthesis of Hydrophobic Nanosized Silicon Dioxide with a Spherical Particle Shape and Its Application in Fire-Extinguishing Powder Compositions Based on Struvite. *Nanomaterials*. 13. Art. No. 1186. doi: 10.3390/nano13071186.
17. GOST 27331-87. *Pozharnaya tekhnika. Klassifikatsiya* [Fire equipment. Classification].
18. GOST R 53280.4-2009. *Ustanovki pozharotusheniya avtomaticheskie. Ognnetushashchie veshchestva. Chast' 4. Poroshki ognnetushashchie obshchego naznacheniya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Automatic fire extinguishing installations. Fire extinguishing agents. Part 4. Fire extinguishing powders. General technical requirements and test methods].
19. NPB 170-98. *Poroshki ognnetushashchie obshchego naznacheniya. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy* [Fire extinguishing powders. General technical requirements. Test methods].
20. GOST R 51057-2001. *Tekhnika pozharnaya. Ognnetushiteli perenosnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy* [Fire equipment. Portable fire extinguishers. General technical requirements. Test methods].
21. Kushchuk, V.A., Popov, A.V., Surovtseva, L.A. & Chumaevsky, V.A. (2000) Patent RU2155088C1. *Ognnetushashchii poroshok mnogotselevogo naznacheniya* [The multi-purpose fire extinguishing powder]. № 99104700/12, appl. 11.03.1999; publication date 27.08.2000, Bul. No. 24.

Информация об авторах:

Вальцифер Игорь Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Пермь, Россия). E-mail: valtsifer.i@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-9135-2487.

Шамсутдинов Артем Шамилович – кандидат технических наук, научный сотрудник Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Пермь, Россия). E-mail: shamsutdinov.a@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-5731-8429.

Вальцифер Виктор Александрович – профессор, доктор технических наук, заместитель директора на науке Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Пермь, Россия). E-mail: valtsifer.v@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-8671-739X.

Стрельников Владимир Николаевич – член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук, директор Института технической химии УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (Пермь, Россия). E-mail: info@itcras.ru; ORCID: 0000-0003-2538-535X.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Valtsifer Igor V., Cand. Sc. (Engineering), Senior Researcher, Institute of Technical Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russian Federation). E-mail: valtsifer.i@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-9135-2487.

Shamsutdinov Artem S., Cand. Sc. (Engineering), Researcher, Institute of Technical Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russian Federation). E-mail: shamsutdinov.a@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-5731-8429.

Valtsifer Viktor A., Dr. Sc. (Engineering), Professor, Deputy Director for Science, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russian Federation). E-mail: valtsifer.v@itcras.ru; ORCID: 0000-0002-8671-739X.

Strelnikov Vladimir N., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Director, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russian Federation). E-mail: info@itcras.ru; ORCID: 0000-0003-2538-535X.

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

Научная статья

УДК 699.812.3 + 614.841.41

doi: 10.17223/29491665/5/2

Разработка современных пожаробезопасных материалов и технологий

Игорь Александрович Малый¹, Ирина Юрьевна Шарабанова²,
Светлана Александровна Сырбу³, Александр Леонидович Никифоров⁴

^{1, 2, 3, 4} Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Россия

¹ mail@edufire37.ru

² sharabanova@bk.ru

³ syrbue@yandex.ru

⁴ anikiforoff@list.ru

Аннотация. Рассмотрены основные направления в области разработки пожаробезопасных материалов и технологий, реализуемые в Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, и ключевые научные результаты, полученные коллективами академии в данной области, а также возможности проведения на базе академии натурных испытаний новых огнетушащих средств.

Ключевые слова: пожарная безопасность, огнезащита, тушение пожаров

Для цитирования: Малый И.А., Шарабанова И.Ю., Сырбу С.А., Никифоров А.Л. Разработка современных пожаробезопасных материалов и технологий // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 12–17. doi: 10.17223/29491665/5/2

Original article

doi: 10.17223/29491665/5/2

Development of modern fire-safe materials and technologies

Igor A. Malyj¹, Irina Yu. Sharabanova², Svetlana A. Syrbu³, Alexandr L. Nikiforov⁴

^{1, 2, 3, 4} Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Ivanovo, Russian Federation

¹ mail@edufire37.ru

² sharabanova@bk.ru

³ syrbue@yandex.ru

⁴ anikiforoff@list.ru

Abstract. The main directions in the field of development of fire-safe materials and technologies, implemented in Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters and the key scientific results obtained by the Academy's teams in this field are considered. The works are carried out in the field of fire protection of textile materials, fire protection of building materials, assessment of fire hazard of electrical cable products, protection of technological equipment from the formation of pyrophoric chemical compounds, development and research of fire extinguishing ability of fire extinguishing agents.

Keywords: fire safety, fire protection, fire extinguishing

For citation: Malyj, I.A., Sharabanova, I.Yu., Syrbu, S.A. & Nikiforov, A.L. (2024) Development of modern fire-safe materials and technologies. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 12–17. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/2

Введение

Необходимость разработки новых пожаробезопасных материалов и технологий обуславливается увеличением количества техногенных чрезвычайных ситуаций, все более усложняющейся архитектурой потенциально опасных объектов, на которых может произойти

пожар. Увеличение технологических производств и мощностей в различных областях экономики, развитие энергетического потенциала, транспортной инфраструктуры, строительство зданий и сооружений сложной планировки требуют специальной методологии соответствия появляющимся нововведениям, модификации и внедрения новых технологий, позволяющих

реализовывать различные мероприятия в области противопожарной безопасности вне зависимости от характера чрезвычайной ситуации.

В Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России работа в данной области ведется по пяти направлениям:

- огнезащита текстильных материалов;
- огнезащита строительных материалов;
- оценка пожарной опасности и исследование причин возникновения пожаров электрокабельной продукции;
- защита технологического оборудования от образования пирофорных отложений;
- разработка и исследование огнетушащей способности средств пожаротушения.

Огнезащита текстильных материалов

Результатами исследований в области огнезащиты текстильных материалов стали методы оценки пожароопасных свойств текстильных материалов. Методы позволяют охарактеризовать горючесть тканей. Это дает возможность проводить сравнительный анализ эффективности огнезащитной отделки вне зависимости от способа нанесения.

В академии разработан ряд рецептов интумесцентных огнезащитных составов. Данные составы придают материалам водо- и огнезащитные свойства и предназначены для тканей технического назначения из природной целлюлозы. Механизм защитного действия составов состоит в способности вспучиваться и образовывать на поверхности материала слой кокса, предотвращающий дальнейшее горение [1].

Предложена модель экспериментального теплозащитного композиционного материала для боевой одежды пожарного. Материал имеет повышенную стойкость к воздействиям интенсивного теплового излучения, высокой температуры окружающей среды, кратковременного контакта с открытым пламенем и нагретыми предметами, других опасных факторов, возникающих при тушении пожаров и эксплуатационных нагрузках. Применение разработанного композиционного материала позволит обеспечить равномерность распределения температуры во внутреннем пространстве одежды, снизить уровень производственного травматизма пожарных, повысить эффективность выполнения задач по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ. Основой для композиционного материала служит объемная матрица, получаемая с помощью технологии 3D ткачества или трикотажа.

Композиционный полимерный материал, приведенный на рис. 1, состоит из огнезащитного слоя 1, на

который с фронтальной стороны нанесено пленочное покрытие, и теплоизолирующего слоя 3 из термостойких синтетических волокон, с тыльной стороны соединенного с гигиеническим слоем.



Рис. 1. Образец композиционного материала

Fig. 1. Sample of the composite material

Пленочное покрытие выполнено из кремнийорганического полимера с наполнителем из вакуумированных микросфер и отражающим инфракрасное излучение пигментом и обеспечивает защиту от влаги и ветра.

Огнезащитный слой и теплоизолирующий слой соединены друг с другом посредством перемычек 2, которые могут быть выполнены из армированных арамидных, кремнеземных или базальтовых нитей из негорючего материала и отвечают за жесткость материала, что определяется требуемыми защитными характеристиками элемента от механических воздействий. Теплоизолирующий слой 3 с тыльной стороны соединен с гигиеническим слоем, выполненным из хлопчатобумажных нитей, пропитанных биоцидным препаратом, что позволяет обеспечить дополнительную тепловую защиту и комфортные условия при контакте материала с открытыми участками тела [2].

За счет упругости перемычек, выполненных из армированных нитей, обеспечивается высокая межслойная прочность и быстрое восстановление формы материала после механического воздействия, например, сдавливания. Физико-механические показатели композиционного полимерного материала можно регулировать за счет изменения толщины армированных нитей – перемычек, их плотности и вида ткачества.

Такое исполнение композиционного материала обеспечивает оптимально комфортные и безопасные условия работы в боевой одежде [3].

Огнезащита строительных материалов

Одним из ключевых направлений в строительной отрасли является расширение использования материалов на основе производных древесины. В то же время известна высокая пожарная опасность самой

древесины и, следовательно, ее производных. Изучение и оценка пожарной опасности строительных конструкций на основе производных древесины, а также разработка и совершенствование методов оценки показателей их пожарной опасности позволит обеспечить выбор наиболее высокоэффективных материалов для строительства. Использование указанных материалов приведет к снижению пожарной опасности в целом зданий жилого назначения, оптимальному выбору средств огнезащиты, в чем и заключается актуальность исследований в области огнезащиты строительных материалов, проводимых в академии. В академии разработан ряд огнезащитных составов для древесины, отличающихся по механизму действия. Перспективными представляются составы, способные не только защищать конструкции от воспламенения и распространения пламени при высокотемпературном воздействии, но и предохранять материал от термодеструкции. Традиционные огнезащитные композиции при огневом воздействии создают микрповреждения на поверхностном слое древесины, что приводит к снижению прочностных свойств конструкций. Предлагаемые быстротвердеющие пенообразующие огнезащитные составы не нарушают структуры древесины, позволяя ей дольше сохранять свои конструкционные свойства.

Результаты работы по изучению огнезащитных составов включают разработанное устройство для определения наличия огнезащитной обработки на строительных конструкциях из древесины [4]. Принцип работы устройства основан на разнице электропроводности неорганических солей, содержащихся в огнезащитных составах, и воздуха, заполняющего поры древесины при отсутствии антипиренов. Предлагаемая модель может быть использована в качестве портативного прибора неразрушающего контроля при проведении профилактических противопожарных мероприятий и оценки огнестойкости конструкций из древесины. Прибор будет отличаться от аналогичных устройств низкой стоимостью и простотой конструкции.

Оценка пожарной опасности и исследование причин возникновения пожаров электрокабельной продукции

Как показывает статистика [5], одной из наиболее частых причин пожаров является неисправность электрооборудования, нарушение правил его эксплуатации. Нередко это выражается в пробое изоляции, тепловом или электрическом. Одним из факторов, способствующих пробое изоляции, в качестве материала которой выступает продукт переработки поли-

винилхлорида (ПВХ) – пластикат, является его старение. Старение полимеров происходит под воздействием как физических, так и химических процессов на протяжении всего срока службы кабельных изделий. Таким образом, исследования, направленные на оценку влияния воздействия температур на изоляцию из ПВХ-диэлектриков с точки зрения пожарной опасности, представляются весьма актуальными.

Поскольку нагрев в процессе эксплуатации ведет к появлению и накоплению дефектов химической структуры ПВХ-пластиков, одним из методов исследования был предложен синхронный термический анализ, позволяющий диагностировать микроизменения химического состава и строения. Изменение горючести полимерных материалов определялось при помощи показателя кислородного индекса. Исследования проводились на искусственно состаренных образцах. Исследования показали, что количество ПВХ в состаренных образцах уменьшается в результате термической деструкции, что наряду с образованием химических связей между цепочками ПВХ приводит к снижению электроизолирующих свойств материала, тем самым повышая его пожароопасность [6]. На это же указывает и снижение кислородного индекса изоляционного полимера, выявленное в процессе исследования.

Данные исследования позволят разработать научные основы оценки пожароопасных характеристик электрокабельных изделий, произведенных с использованием полимерных электроизоляционных материалов различного состава, с учетом изменения их свойств в процессе эксплуатации, которая сопряжена с термическим и прочими негативными воздействиями.

Защита технологического оборудования от образования пирофорных отложений

Следующее направление в области развития пожаробезопасных технологий связано с разработкой методов защиты технологического оборудования от образования пирофорных отложений.

Пирофорные отложения образуются на внутренней поверхности технологического оборудования, применяемого при переработке и хранении нефти и нефтепродуктов. Опасность пирофорных соединений полисульфидов железа состоит в том, что в присутствии кислорода воздуха они способны самонагреться и самовоспламениться, приводя к воспламенению смеси паров нефтепродуктов и кислорода воздуха. Кроме того, высокое содержание соединений химически активной серы в нефти и нефтепродуктах приводит к ускоренной коррозии технологического

оборудования для их переработки, что может привести к его отказу и остановке технологического процесса.

Для разработки методов защиты оборудования необходимо было получить представление о скорости образования и нагрева пирофорных отложений. В результате исследований, проведенных на базе академии, были получены экспериментальные данные о процессах нагрева пирофорных отложений с различной толщиной слоев на поверхности стали, а также установлены экспериментальные зависимости скорости образования пирофорных соединений на поверхности образцов стали марки «Сталь 3» в паровоздушной среде прямогонного бензина и топочного мазута от времени экспонирования при различных концентрациях сероводорода [7]. Совместно с разработанной математической моделью нагрева пирофорных отложений полученные результаты являются предпосылкой для созда-

ния методов контроля технологического процесса переработки и хранения нефтепродуктов, расчета рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с самовозгоранием пирофорных отложений.

На основе полученных теоретических и экспериментальных данных были разработаны методики получения композиционных материалов, способных защитить внутренние стенки резервуаров от сероводородной коррозии совместно с сероочисткой паров нефти.

Очистка паров производится за счет окислительно-адсорбционных способностей разработанных материалов. Предложен ряд рецептов композитных покрытий с повышенной адгезионной прочностью на основе полимочевины для защиты внутренних поверхностей технологического оборудования для хранения нефтепродуктов, разработана технология их нанесения [8]. Пример защитного действия покрытия приведен на рис. 2.

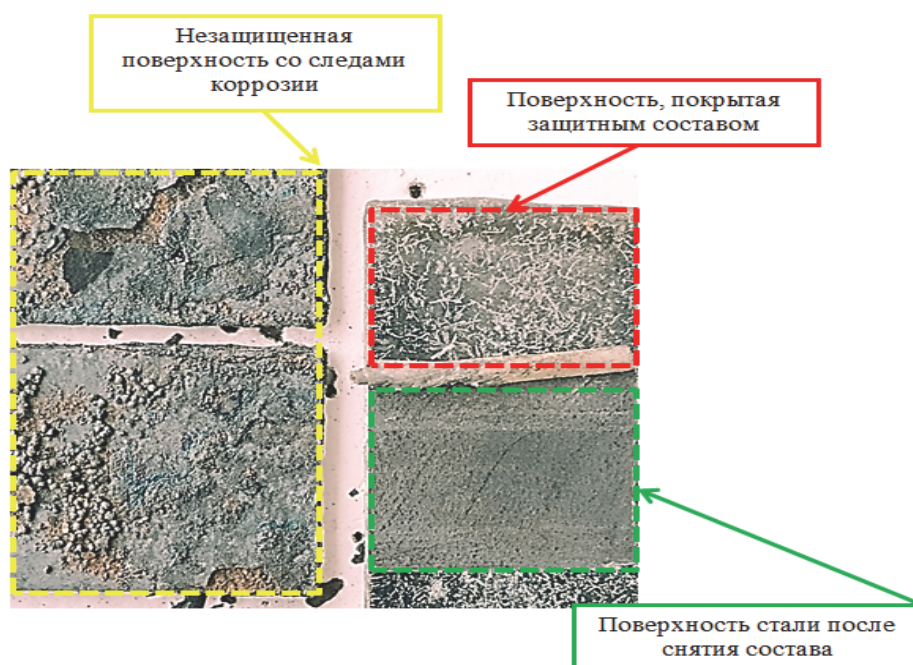


Рис. 2. Сравнение образцов с композитным покрытием и без него после экспонирования образцов в агрессивной среде в течение 90 сут

Fig. 2. Comparison of the specimens with and without composite coating after exposing the specimens in aggressive environment for 90 days

Разработка и исследование огнетушащей способности средств пожаротушения

Если исследования, о которых говорилось выше, направлены на предупреждение возникновения пожаров и чрезвычайных ситуаций, то разработка и исследование огнетушащей способности средств пожаротушения направлены на повышение эффективности тушения. Объектом исследования являются огнетушащие порошковые составы.

Основной результат работы выразился в научном обосновании подбора компонентов и разработке порошковых составов с добавками, значительно повышающими их эксплуатационные свойства.

Научным коллективом академии предложен ряд добавок на основе микрокапсул хладона, окисленного графита, шунгита [9]. Применение модифицированных порошков снижает требуемый для тушения расход от 17 до 39% в зависимости от вида добавки.

В ходе исследований показано, что преобладающим эффектом тушения для разработанных составов является ингибирование процесса горения в гомогенной фазе, которое оказывают микрокапсулы хладона.

Проблема слеживаемости порошковых составов была решена введением гидрофобизирующей добавки на основе химически модифицированного торфа. При этом, как показали испытания, порошка с данным видом добавок для тушения потребовалось меньше на 3,5–23,5% по сравнению с серийно выпускаемыми составами.

Такие результаты обуславливаются термическим разложением компонентов порошка за счет экзотермического разложения торфяной добавки [10]. Необходимо отметить, что для проведения исследований огнетушащей способности порошковых составов в академии была разработана оригинальная методика, позволяющая проводить сравнительную оценку огнетушащей способности порошков, определять минимальную огнетушащую интенсивность прекращения горения, проводить исследования по тушению порошками горючих жидкостей и твердых горючих материалов [10].

Испытания проводились на полигоне Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Полигон располагается на территории учебного центра (п. Бибирево) и позволяет проводить испытания на огнетушащую способность с использованием модельных очагов пожара классов А и В. Также на полигоне проводятся исследования средств огнезащиты строительных конструкций, тепломассообмена в помещениях.

Академия готова к сотрудничеству с другими организациями и предприятиями, занимающимися проблемами обеспечения пожарной безопасности не только в плане проведения совместных научных исследований, но и в плане проведения испытаний новых огнетушащих средств.

Выводы

В области разработки новых пожаробезопасных материалов и технологий в академии выделяются пять направлений.

По направлению огнезащиты текстильных материалов основные результаты заключаются в разработке методов оценки пожароопасных свойств текстильных материалов и рецептур интумесцентных огнезащитных составов. Предложена модель экспериментального теплозащитного композиционного материала для боевой одежды пожарного.

В области огнезащиты строительных материалов разработан ряд огнезащитных составов для древесины, способных защищать конструкции от воспламенения и распространения пламени, а также предохранять материал от термодеструкции.

Исследования, направленные на оценку влияния воздействия температур на изоляцию из ПВХ-диэлектриков, показали, что количество ПВХ в состаренных образцах уменьшается в результате термической деструкции. Это приводит к повышению пожарной опасности изоляционных полимеров.

В результате исследований по защите технологического оборудования от образования пиррофорных отложений разработаны методики получения композиционных материалов, способных защитить внутренние стенки резервуаров от сероводородной коррозии совместно с сероочисткой паров нефти. Предложены рецептуры композитных покрытий с повышенной адгезионной прочностью на основе полимочевины.

Основным результатом исследования огнетушащей способности средств пожаротушения стали порошковые составы с добавками, значительно повышающими их эксплуатационные свойства. Применение модифицированных порошков значительно снижает требуемый для тушения расход.

Внедрение результатов исследований в области разработки современных пожаробезопасных материалов и технологий, проводимых в Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России, будет способствовать снижению уровня техногенной опасности в стране, поддержанию уровня пожарной безопасности на приемлемом уровне.

Список источников

1. Спиридонова В.Г. Исследование пожароопасных свойств текстильных материалов из целлюлозных волокон и совершенствование методов их оценки : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2022. 163 с.
2. Патент № 191460 Российская Федерация. Объемный тканый огне-теплозащитный материал / Сорокин Д.В., Никифоров А.Л., Циркина О.Г., Ульяева С.Н., Шарабанова И.Ю. № 2019113826, заявлено 06.05.2019; опубл. 06.08.2019. Бюл. № 22. 2 с.
3. Сорокин Д.В. Проектирование и исследование свойств теплозащитного композиционного текстильного материала для боевой одежды пожарного: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2021. 153 с.
4. Патент № 217200 Российская Федерация. Устройство для определения наличия огнезащитной обработки на строительных конструкциях из древесины / Никифоров А.Л., Панев Н.М., Винокуров М.В. № 2022126676, заявл. 13.10.2022; опубл. 22.03.2023. Бюл. № 9. 2 с.
5. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году : стат. сб. Балашиха : ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.
6. Богданов И.А., Шабунин С.А., Ульяева С.Н., Никифоров А.Л., Шарабанова И.Ю. Оценка влияния температурных воздействий на пожарную опасность изоляции на основе ПВХ-диэлектриков // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 4 (45). С. 64–70.
7. Азовцев А.Г. Защита оборудования для хранения прямогонного бензина и топочного мазута в условиях сероводородной коррозии : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2022. 149 с.

8. Митрофанов А.С., Сырбу С.А. Разработка технологии нанесения композитных покрытий, препятствующих образованию пиррофорных отложений на внутренних поверхностях технологического оборудования для хранения нефти // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 2 (47). С. 93–98.
9. Патент 2605056 Российская Федерация. Огнетушащий порошок многоцелевого назначения / Дмитриев О.В., Попов В.И., Мисников О.С., Малый И.А., Шарабанова И.Ю. № 2015125928/12, заявл. 29.06.2015; опубл. 20.12.2016, Бюл. № 35. 1 с.
10. Дмитриев О.В. Разработка научно обоснованных подходов к повышению эффективности огнетушащих порошковых составов : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2022. 214 с.

References

1. Spiridonova, V.G. (2022) *Issledovanie požaroopasnykh svoystv tekstil'nykh materialov iz cellyuloznykh volokon i sovershenstvovanie metodov ih ocenki* [Study of fire hazardous properties of textile materials made from cellulose fibers and improvement of methods for their assessment]. Engineering Cand. Diss. Ivanovo.
2. Sorokin, D.V., Nikiforov, A.L., Cirkina, O.G., Ul'eva, S.N. & Sharabanova, I.Yu. (2019) *Ob'emnyy tkanyy ogne-teplozashchitnyy material* [Volumetric woven fire and heat-proof material]. Patent RU 191460. Russia. № 2019113826, appl. 06.05.2019; publication date 06.08.2019, Bul. No. 22.
3. Sorokin, D.V. (2021) *Proektirovanie i issledovanie svoystv teplozashchitnogo kompozitsionnogo tekstil'nogo materiala dlya boevoy odezhdy pozharnogo* [Design and study of the properties of heat-proof composite textile material for firefighter clothing]. Engineering Cand. Diss. Ivanovo.
4. Nikiforov, A.L., Panev, N.M. & Vinokurov, M.V. (2023) *Ustrojstvo dlya opredeleniya nalichiya ognenezashchitnoj obrabotki na stroitel'nykh konstrukciyakh iz drevesyiny* [Device for determining the presence of fire retardant treatment on wood building structures]. Patent RU 217200. Russia. № 2022126676, appl. 13.10.2022; publication date 22.03.2023, Bul. No. 9.
5. Goncharenko, V.S. & et al. (2022) *Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu* [Fires and fire safety in 2021]. Stat. collection. Balashiha : FGBU VNIPO MCHS Rossii
6. Bogdanov, I.A., Shabunin, S.A., Ul'eva, S.N., Nikiforov, A.L. & Sharabanova, I.Y. (2022) Evaluation of the influence of temperature impacts on the fire hazard of insulation based on PVC-dielectric. *Modern Problems of Civil Protection*. 4 (45). pp. 64–68. (In Russian).
7. Azovcev, A.G. (2022) *Zashchita oborudovaniya dlya hraneniya pryamogonnogo benzina i topochnogo mazuta v usloviyakh serovodorodnoy korrozii* [Protection of equipment for storing straight-run gasoline and heating oil under conditions of hydrogen sulfide corrosion]. Engineering Cand. Diss. Ivanovo.
8. Mitrofanov, A.S. & Syrбу, S.A. (2023) Development of a technology for application of composite coatings preventing the formation of pyrophoric deposits on the internal surfaces of technological equipment for oil storage. *Modern Problems of Civil Protection*. 2 (47). pp. 93–98. (In Russian).
9. Dmitriev, O.V., Popov, V.I., Misnikov, O.S., Malyj, I.A. & Sharabanova, I.Yu. (2016) *Ognetushashchij poroshok mnogocелеvogo naznacheniya* [Multi-purpose fire extinguishing powder]. Patent RU № 2605056. Russia. № 2015125928/12, appl. 29.06.2015; publication date 20.12.2016, Bul. No. 35.
10. Dmitriev, O.V. (2022) *Razrabotka nauchno obosnovannykh podkhodov k povysheniyu effektivnosti ognetushashchih poroshkovykh sostavov* [Development of scientifically based approaches to increasing the effectiveness of fire extinguishing powder composites]. Engineering Cand. Diss. Ivanovo.

Информация об авторах:

Малый Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент, начальник Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Иваново, Россия). E-mail: mail@edufire37.ru

Шарабанова Ирина Юрьевна – кандидат медицинских наук, доцент, заместитель начальника Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России по научной работе (Иваново, Россия). E-mail: sharabanova@bk.ru

Сырбу Светлана Александровна – доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Иваново, Россия). E-mail: syrbut@yandex.ru

Никифоров Александр Леонидович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК «Государственный надзор») Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Иваново, Россия). E-mail: anikiforoff@list.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Malyj Igor A., Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Ivanovo, Russian Federation). E-mail: mail@edufire37.ru

Sharabanova Irina Yu., Cand. Sc. (Medicine), Associate Professor, Deputy head of the Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Ivanovo, Russian Federation). E-mail: sharabanova@bk.ru

Syrbu Svetlana A., Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Department of natural sciences, Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Ivanovo, Russian Federation). E-mail: syrbut@yandex.ru

Nikiforov Alexandr L., Dr. Sc. (Engineering), Senior Researcher, Professor, Department of Fire Safety of Protection Facilities (as part of ESC of State Supervision), Ivanovo Fire Rescue Academy of the State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Ivanovo, Russian Federation). E-mail: anikiforoff@list.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

Научная статья
УДК 536.3, 614.84
doi: 10.17223/29491665/5/3

Исследование термического разрушения некоторых видов строительных материалов в результате воздействия радиационного теплового потока от очага пожара

Татьяна Ивановна Медведева¹, Денис Петрович Касымов^{2, 3},
Егор Леонидович Лобода^{4, 5}

^{1, 2, 4} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{3, 5} *Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия*

¹ *kotyayal@gmail.com*

^{2, 3} *denkasymov@gmail.com*

^{4, 5} *loboda@mail.tsu.ru*

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований термического разрушения некоторых видов горючих строительных материалов, обработанных огнезащитными пропитками, в результате воздействия радиационного теплового потока от модельного источника тепла с характерной температурой, соответствующей максимальной температурой во фронте низового лесного пожара. Получены данные о глубине и скорости термического разрушения материалов.

Ключевые слова: природные пожары, горение, термическое разрушение, строительные материалы

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Для цитирования: Медведева Т.И., Касымов Д.П., Лобода Е.Л. Исследование термического разрушения некоторых видов строительных материалов в результате воздействия радиационного теплового потока от очага пожара // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 18–26. doi: 10.17223/29491665/5/3

Original article
doi: 10.17223/29491665/5/3

Study of thermal destruction of certain types of building materials as a result of exposure to radiation heat flow from a fire source

Tatyana I. Medvedeva¹, Denis P. Kasymov^{2, 3}, Egor L. Loboda^{4, 5}

^{1, 2, 4} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

^{3, 5} *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,*

Tomsk, Russian Federation

¹ *kotyayal@gmail.com*

^{2, 3} *denkasymov@gmail.com*

^{4, 5} *loboda@mail.tsu.ru*

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the thermal destruction of certain types of combustible building materials treated with fire retardant impregnations as a result of exposure to radiation heat flow from a model heat source with a characteristic temperature corresponding to the maximum temperature in the front of a ground forest fire. Data were obtained on the depth and rate of thermal destruction of materials.

Keywords: wildland fires, combustion, flame, thermal destruction, building materials

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Development Program of Tomsk State University (Priority 2030) and within the framework of the state assignment of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

For citation: Medvedeva, T.I., Kasymov, D.P. & Loboda, E.L. (2024) Study of thermal destruction of certain types of building materials as a result of exposure to radiation heat flow from a fire source. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 18–26. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/3

Введение

Древесина традиционно значится одним из самых популярных материалов в строительстве. В мировой практике строительной индустрии она находит массовое потребление как строительный материал для зданий и сооружений различного назначения.

Воспламенение построек в зоне раздела природной и городской сред является серьезной проблемой во всем мире из-за крупномасштабных пожаров. Для России, где леса занимают большую территорию, пожары на природно-урбанизированной территории являются значимой проблемой, а ущерб, наносимый реальному сектору экономики, исчисляется десятками и сотнями миллионов долларов в год.

Согласно [1], древесина представляет собой пористую реакционноспособную среду, физико-химические свойства которой изменяются при нагревании и горении. Данный материал может поддерживать как пламенное, так и тлеющее горение [2].

В мировой практике при оценке пожарной опасности строительных материалов и конструкций используются в основном методы испытаний, рекомендованные и утвержденные Международной организацией по стандартизации (ISO), Британскими стандартами (BS), немецкими промышленными стандартами (DIN), Французскими стандартами (NFP), Организацией по стандартизации северных стран (NORDTEST), Американским обществом по испытанию материалов (ASTM) и Национальной противопожарной ассоциацией США (NFPA). Эти системы объединяют более сотни методов, которые отличаются конструкциями приборов и установок, размерами и пространственным расположением образцов при испытаниях, источниками воздействия и зажигания, продолжительностью теплового воздействия и определяемыми показателями.

Скорость горения древесины вглубь является главным критерием при оценке огнестойкости и зависит от температуры окружающей среды, времени горения, влажности, вида древесины и других параметров. Чтобы понять и изменить огнестойкость древесины, необходимо знать как можно более подробно о процессах разложения. Результаты испытаний сильно зависят от различных параметров, включая изменения в составе газа, температуру, скорость нагрева и размер образца. Параметры, влияющие на скорость обугливания, достаточно широко изучены и представлены в литературе [3–10]. На основе полученных данных в настоящее время можно судить о показателях огнестойкости деревянных конструкций, однако большинство методов, используемых для оценки пожарной опасности древесины, относятся к классу

контактных методов (микротермопарная техника, метод молекулярно-пучковой зондовой масс-спектрометрии, методы термического анализа и т.д.). Проведенные исследования показали, что на время воспламенения образцов на основе древесины определяющее влияние оказывает плотность теплового потока.

Принципиально новым подходом является применение высокоточных инфракрасных камер научного класса при оценке пожароопасности строительных материалов из древесины в условиях теплового воздействия. Его перспективность заключается в высоком пространственном и временном разрешении при одновременном повышении оперативности получаемых данных.

Введение в древесину антисептиков, антипиренов, смол, а также пластификация и прессование позволяют улучшить свойства натуральной древесины и получить био- и огнестойкие материалы, обладающие повышенной прочностью, износостойкостью и формоустойчивостью [11]. В настоящее время разработано большое количество средств и способов огнезащиты древесины [2, 11], однако открытым остается вопрос оптимального состава огнезащиты и способа пропитки, так как природа и динамика реакций образования коксового слоя, играющего определяющую роль в механизме огнезащиты древесины, заметно различаются в зависимости от состава [12].

Таким образом, для оценки огнестойкости материалов и конструкций необходимо проведение экспериментов по оценке скорости и глубины термического разрушения различных строительных и изоляционных материалов в результате теплового воздействия, моделирующего воздействие пожара. С этой целью в лабораторных условиях исследовано воздействие эталонного источника теплового потока на характеристики термического разрушения древесных строительных материалов на основе древесины. Кроме того, проанализировано влияние некоторых огнезащитных составов для древесины на скорость и площадь термического разрушения образцов.

Описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента

Экспериментальная установка для исследования теплового воздействия на образцы горючих строительных материалов представлена на рис. 1 и включает в себя: образец 1, ИК-камеру JADEJ530SB 2, видеокамеру 3, источник теплового излучения 4 – модель абсолютно черного тела (АЧТ) – АЧТ 45/100/1100 Омского завода ОАО НПП «Эталон» с диапазоном изменения температуры от 100 до 1100 °С [13], оптический рельс 5 и кронштейн креп-

ления образца с кареткой 6. Температура излучателя выбиралась равной 1100 °С, что соответствует максимальным значениям температуры во фронте низового лесного пожара [14]. Таким образом, моделировался процесс теплового воздействия лучистым потоком от пожара.

Инфракрасная камера научно-исследовательского класса JADEJ530SB применялась для измерения поля температуры на поверхности образцов древесных строительных материалов. Она была укомплектована узкополосным оптическим фильтром с полосой пропускания 2,5–2,7 мкм. Выбор этого фильтра осуществлялся из двух соображений: диапазон измеряемых температур должен был быть достаточным и соответствующим протекающим в ходе эксперимента процессам и позволять при этом однозначно регистрировать появление

пламени. Исходя из этих условий и рекомендаций [15], был выбран упомянутый выше фильтр.

В качестве рассматриваемых образцов использовались древесные строительные материалы, которые наиболее часто встречаются в строительстве и популярны на рынке: фанера березовая ФК (сорт 4/4), древесно-стружечная плита (ДСП) с обычной поверхностью марки П-Б (класс эмиссии формальдегида Е2), ориентированно-стружечная плита (ОСП) Kronospan OSB 3 (применение в условиях умеренной влажности как внутри, так и снаружи зданий, без огнезащитной и водоотталкивающей пропитки) (рис. 2). Кроме этого, в экспериментах был использован древесный массив – осина, лиственница, ель и сосна (рис. 3).

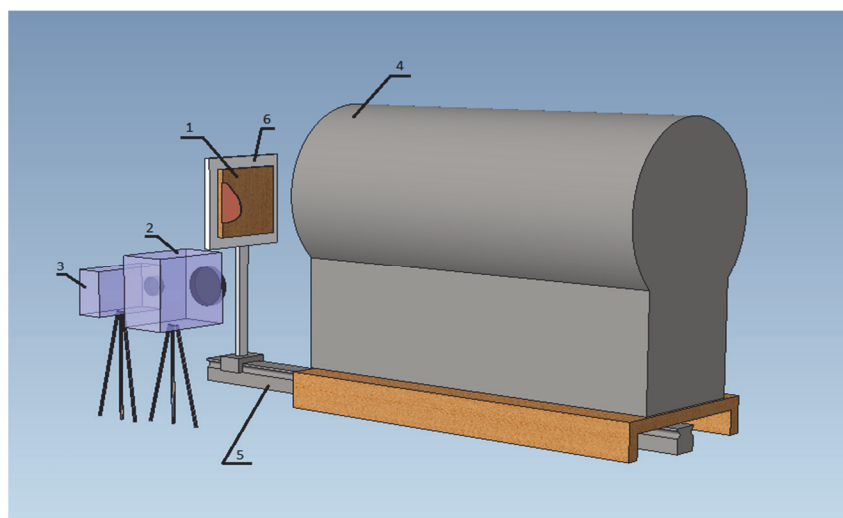


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – образец; 2 – инфракрасная камера JADE J530SB; 3 – видеокамера; 4 – модель абсолютно черного тела; 5 – оптический рельс; 6 – каретка с подставкой

Fig. 1. Experimental setup: 1 – sample; 2 – infrared camera JADE J530SB; 3 – video camera; 4 – black body model; 5 – optical rail; 6 – carriage with stand

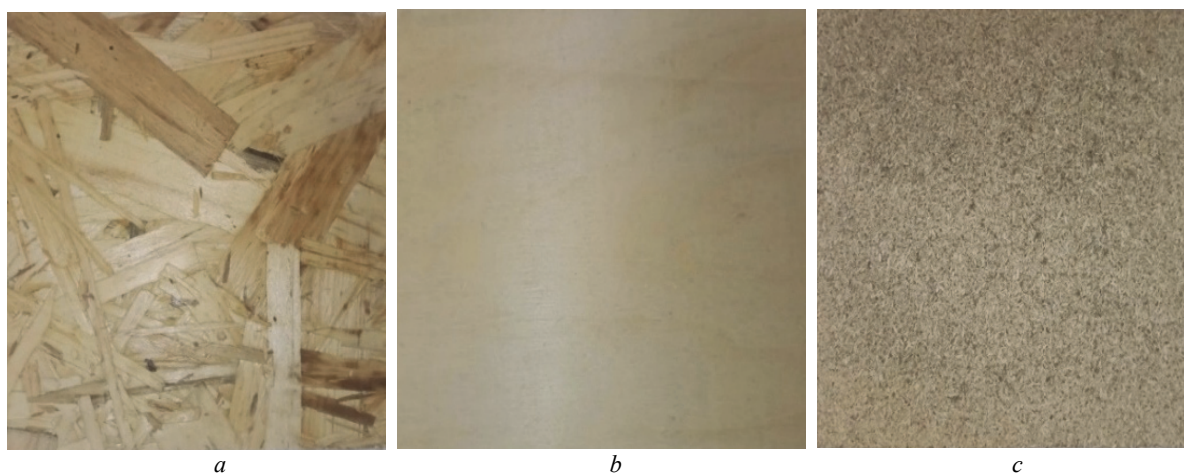


Рис. 2. Исследуемые образцы: а – ориентированно-стружечная плита (ОСП); б – фанера; с – древесно-стружечная плита (ДСП)

Fig. 2. Test samples: а – oriented strand board (OSB); б – plywood; с – particle board (chipboard)



Рис. 3. Исследуемые образцы: осина, лиственница, сосна, ель

Fig. 3. Test samples: aspen, larch, pine, spruce

Рассматриваемые образцы предварительно обрабатывались различными огнезащитными составами (огнебиозащитная пропитка для древесины «ФУКАМ», «ЗОТЕКС Биопирол», «МИГ-09»). Процедура поверхностной пропитки заключалась в нанесении на поверхность древесины и изделий из дерева водных растворов огнезащитных составов (антипиренов). Метод поверхностной пропитки применяется в основном для огнезащиты готовых деревянных конструкций, которые эксплуатируются в условиях, исключающих попадание влаги на защищаемые поверхности.

Отметим, что при поверхностной обработке огнезащитой глубина, на которую проникают антипирены в древесину, не больше 1 мм (поперек волокон) и не больше 5 мм (вдоль волокон), а при высыхании на древесине обычно образуется налет в виде мелких кристаллов.

На рис. 4 представлена кривая зависимости плотности теплового потока, воздействующего на обра-

зец, от расстояния от среза АЧТ, полученная с помощью датчика теплового потока DBG01. Расчет значений в соответствии с калибровкой завода изготовителя производился по методике [4].

Эксперимент проводился следующим образом. На оптический рельс устанавливалась подвижная каретка с фиксатором, на которой была закреплена подставка с образцом (см. рис. 1). После этого каретку с образцом устанавливали напротив АЧТ на определенном расстоянии для соответствующего значения теплового потока.

Расположение образца и оптико-электронной регистрирующей аппаратуры напротив нагревателя выбиралось таким образом, чтобы фиксировать влияние заданного значения теплового потока на торце образца. Тепловое воздействие на образец осуществлялось в течение 10 мин. Во время всего эксперимента производилась непрерывная съемка на ИК-камеру торцевой части образца при тепловом воздействии.

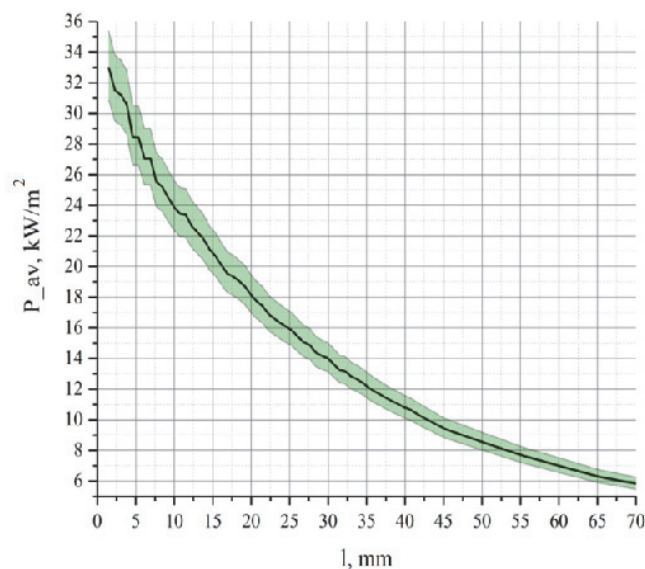


Рис. 4. Изменение теплового потока в зависимости от расстояния между датчиком и АЧТ

Fig. 4. Change in heat flow depending on the distance between the sensor and the black body

По результатам съемки на ИК-камеру были получены последовательности термограмм процесса термического разрушения торцевой части исследуемого образца, дальнейшая обработка которых производилась с использованием программного обеспечения «Altair».

Результаты экспериментов и их анализ

В результате были получены зависимости изменения площади термического разрушения от времени

при тепловом воздействии заданной интенсивности для рассмотренных образцов в отсутствие и при наличии поверхностной огнезащиты. Результаты представлены на рис. 5, *a–d*. Доверительные интервалы были рассчитаны с вероятностью 95%.

Максимальная площадь термического разложения у ДСП (по прошествии 10 мин теплового воздействия) без огнезащитной пропитки составила приблизительно 740,13 мм², что является на 4,6% меньше, чем у фанеры, и на 22,8% меньше, чем у ОСП.

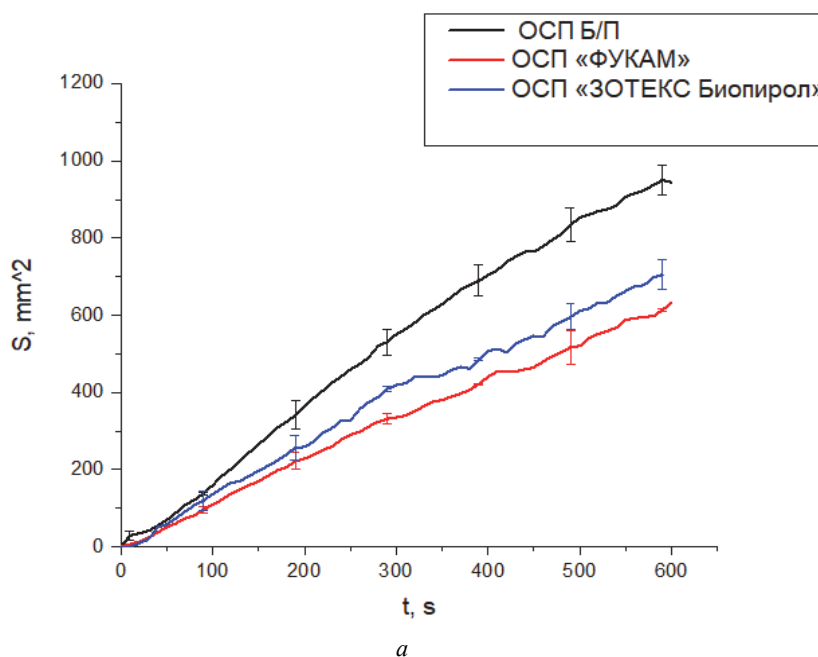


Рис. 5 (начало). График изменения площади обугливания торца материала во времени при 30 кВт/м²

Fig. 5 (beginning). Graph of changes in the charring area of the end of the material over time at 30 kW/m²

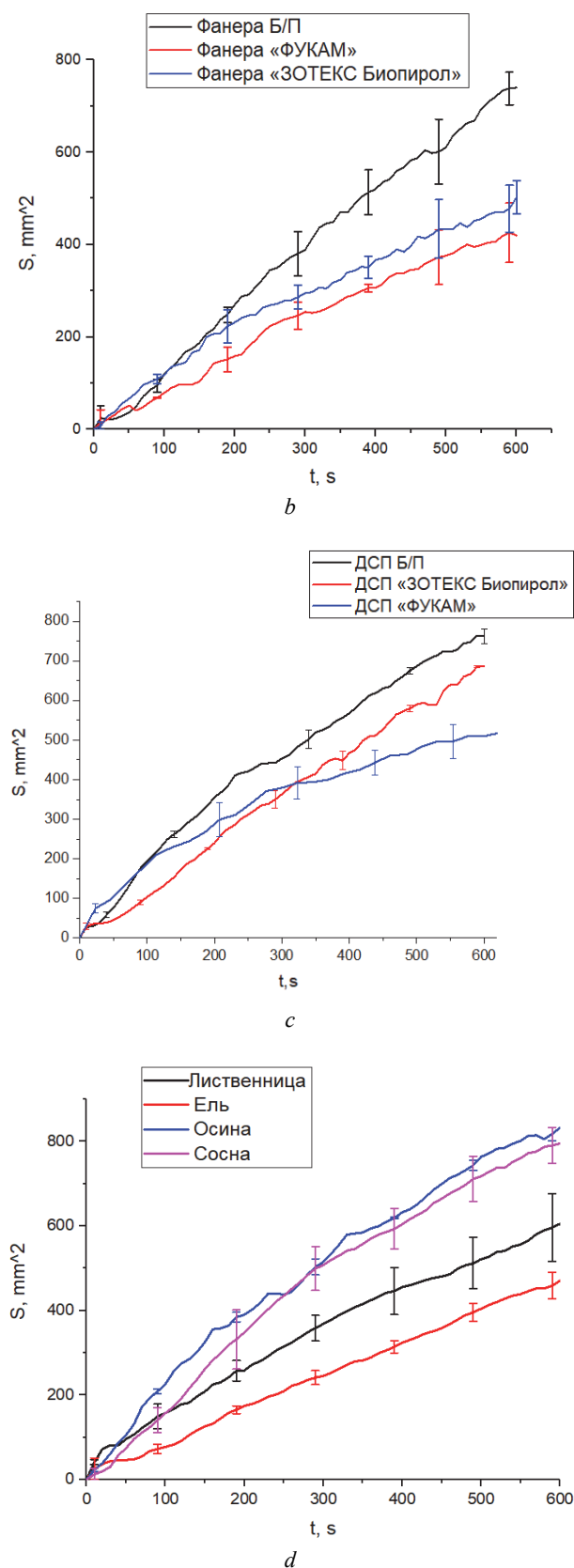


Рис. 5 (окончание). График изменения площади обугливания торца материала во времени при 30 кВт/м²

Fig. 5 (end). Graph of changes in the charring area of the end of the material over time at 30 kW/m²

1. При сравнении разных материалов, обработанных пропиткой «ФУКАМ», наибольшая площадь термического разложения наблюдалась у фанеры (по прошествии 10 мин теплового воздействия) и составила 425,81 мм², что является на 31,9% меньше, чем у ОСП, и на 38,1% меньше, чем у ДСП.

2. Аналогично среди материалов, обработанных огнезащитным составом «ЗОТЕКС Биопирол» (по прошествии 10 мин теплового воздействия), наибольшей площадью термического разложения со значением 754,14 мм² характеризовалась фанера, что является на 13,6% больше, чем у ДСП, и на 7,04% больше, чем у ОСП.

С помощью программного обеспечения «Altair» определена глубина термического разрушения материалов в разные моменты времени эксперимента, результаты представлены в табл. 1. Сравнительный анализ по табл. 1 показывает, что температура поверхности ОСП превышала 850 °С.

В табл. 2 указана максимальная температура образцов в течение 10 мин, результаты усреднялись по 3 экспериментам. По результатам измерения максимальной температуры поверхности древесных строительных материалов при мощности теплового потока 30 кВт/м² в течение 10 мин можно сказать, что самая высокая температура достигалась у образцов без пропитки при выбранных параметрах эксперимента.

Зная изменение глубины обугливания за выбранный момент времени, был произведен расчет по формуле

$$v_{char} = \frac{d_{char}}{t}. \quad (1)$$

Скорость обугливания равна отношению глубины обугливания ко временному промежутку. Полученные значения скорости (полное время сжигания 10 мин) обугливания усреднялись по 3 экспериментам (табл. 3).

Таблица 1

Глубина и скорость обугливания образцов при мощности теплового потока 30 кВт/м²

Время эксперимента	ОСП без пропитки d_{char} , мм	ОСП без пропитки, T , °С
1 мин	2,6	896
3 мин	7,9	886
5 мин	12,1	879
7 мин	14,2	860

Таблица 2

Максимальная температура древесных строительных материалов при мощности теплового потока 30 кВт/м² в течение 10 мин

Материал	ОСП, T , °С	ДСП, T , °С	Фанера, T , °С
Без пропитки	896	895	880
«ФУКАМ»	874	852	874
«ЗОТЕКС Биопирол»	882	861	870

Таблица 3

Скорость обугливания древесных строительных материалов при мощности теплового потока 30 кВт/м² за 10 мин с поверхностной пропиткой

Материал	ОСП		ДСП		Фанера	
	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм	v_{char} , мм/мин	d_{char} , мм
Без пропитки	1,5	14,9	1,4	13,9	1,4	13,6
«ФУКАМ»	1,2	11,6	1,2	12,1	1,2	12,4
«ЗОТЕКС Биопирол»	1,5	14,5	1,3	13,1	1,2	12,1

Если сравнивать поверхностные пропитки, то видно, что у материалов ОСП и ДСП с пропиткой «ФУКАМ» глубина обугливания оказалась меньше, чем в пропитке «ЗОТЕКС Биопирол». А в случае фанеры глубина обугливания с пропиткой «ЗОТЕКС Биопирол» оказалась меньше, чем с пропиткой «ФУКАМ». Это может быть связано с разной структурой образцов.

Выводы

Проведено экспериментальное исследование влияния мощности теплового потока на характеристики

термического разрушения рассмотренных древесных строительных материалов с применением бесконтактных методов ИК-диагностики в узком спектральном интервале инфракрасных длин волн.

В результате проведенных экспериментов определены скорости термического разрушения плоских образцов, подверженных тепловому воздействию от модельного источника излучения, моделирующего радиационный тепловой поток от очага пожара. Кроме того, определена величина глубины термического разрушения образцов древесины в зависимости от

сорта древесины, а также типа применяемого огнезащитного состава. В частности, с помощью методов ИК-диагностики оценена максимальная температура на поверхности образцов в результате теплового воздействия.

Список источников

1. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 1. С. 19–32.
2. Babrauskas V. Charring rate of wood as a tool for fire investigations // Fire Safety Journal. 2005. Vol. 40. P. 528–554. doi: 10.1016/j.firesaf.2005.05.006
3. Гришин А.М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2010. № 2. С. 60–70.
4. Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Перминов В.В., Рейно В.В., Мартынов П.С. Исследование влияния мощности теплового потока на характеристики воспламенения и обугливания древесных строительных материалов с применением методов ИК-диагностики // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 59. С. 65–78.
5. Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Marty'nov P. et al. Thermography of Wood-Base Panels During Fire Tests in Laboratory and Field Conditions // Wood and Fire Safety : Proceedings of the 9th international conference on Wood & Fire Safety 2020. [Cham] : Springer Nature, 2020. P. 203–209.
6. Гилетич А.Н., Хасанов И.Р., Макеев А.А. Пожарная безопасность многоэтажных зданий из деревянных конструкций // Пожарная безопасность. 2014. № 2. С. 116–125.
7. Леонович А.А. Огнезащита древесины и древесных материалов. СПб. : РИО ЛТА, 1994. 148 с.
8. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение древесины и ее пожароопасные свойства. М. : Академия ГПС, 2010. 262 с.
9. Lowden L., Hull T. Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction // Fire Science Reviews. 2013. № 2 (4). P. 1–19.
10. Медведева Т.И., Агафонцев М.В., Касымов Д.П. Исследование влияния типа огнезащиты и способа ее нанесения на пожарную опасность древесины // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии : материалы XXII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко. Томск, 2021. С. 77–79.
11. Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. Fire Protection of Timber Building Structures and Constructions // Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings. 2014. P. 199–226. doi: 10.1007/978-94-007-7460-5_9
12. Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б., Кенжехан С.К. Прогрев и обугливание деревянных конструкций с тонкослойной огнезащитой // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5(81). С. 3–14. doi: 10.18720/MCE.81.1
13. Агафонцев М.В., Касымов Д.П., Рейно В.В., Лобода Е.Л. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018660031 «Tempfild-v.1. Построение и анализ поля температуры по данным, полученным при помощи инфракрасной камеры JADEJ530SB», зарег. 28.08.2018 г.
14. Гришин А.М., Филков А.И., Лобода Е.Л., Кузнецов В.Т., Рейно В.В., Руди Ю.А. Физическое моделирование степных пожаров в природных условиях // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 100–105.
15. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.

References

1. Aseeva, R.M., Serkov, B.B. & Sivenkov, A.B. (2012) Gorenie i pozharinaia opasnost' drevesiny [Combustion and fire safety of wooden materials]. *Pozharovzryvobezопасnost – Fire and Explosion Safety*. 21 (1). pp. 19–32.
2. Babrauskas, V. (2005) Charring rate of wood as a tool for fire investigations. *Fire Safety Journal*. 40. pp. 528–554. doi: 10.1016/j.firesaf.2005.05.006
3. Grishin, A.M. (2010) General physical-mathematical model of ignition and burning of wood. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika I Mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2 (10). pp. 60–70. (In Russian)
4. Kasymov, D.P., Agafontsev, M.V., Perminov, V.V., Reyno, V.V. & Martynov, P.S. (2019) Experimental study of the influence of heat flux capacity on the ignition and charring characteristics of wood construction materials by using infrared diagnostics. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika I Mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 59. pp. 65–78. (In Russian). doi 10.17223/19988621/59/7
5. Kasymov, D.P., Agafontsev, M.V., Marty'nov, P. & et al. (2020) Thermography of Wood-Base Panels During Fire Tests in Laboratory and Field Conditions. *Wood and Fire Safety : Proceedings of the 9th international conference on Wood & Fire Safety*. [Cham] : Springer Nature. pp. 203–209.
6. Giletich, A.N., Khasanov, I.R. & Makeev, A.A. (2014) Fire safety of multistoreyed buildings of wooden structures. *Fire safety*. 2. pp. 116–125. (In Russian).
7. Leonovich, A.A. (1994) *Ognezashchita drevesiny i drevesnykh materialov* [Fire protection of wood and wood materials]. Textbook. Saint Petersburg : LTA.
8. Aseeva, R.M., Serkov, B.B. & Sivenkov, A.B. (2010) *Gorenie drevesiny i ee požaroopasnye svoystva* [Wood combustion and its fire hazardous properties]. Moscow : Academy of GPS.
9. Lowden, L. & Hull, T. (2013) Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*. 2(4). pp. 1–19.
10. Medvedeva, T.I., Agafontsev, M.V. & Kasymov, D.P. (2021) Issledovanie vliianiia tipa ognezashchity i sposoba ee naneseniia na požarnuiu opasnost' drevesiny [Study of the influence of the type of fire protection and the method of its application on the fire hazard

- of wood]. In: *Sopriazhennyye zadachi mekhaniki reagiruiushchikh sred, informatiki i ekologii* [Related problems of mechanics of reacting media, computer science and ecology]. Materials of the XXII All-Russian Scientific Conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician N.N. Yanenko. Tomsk. pp. 77–79.
11. Aseeva, R.M., Serkov, B.B. & Sivenkov, A.B. (2014) Fire Protection of Timber Building Structures and Constructions. *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*. doi: 10.1007/978-94-007-7460-5_9
 12. Polishchuk, E.Yu., Sivenkov, A.B. & Kenzhehan, S.K. (2018) Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection. *Magazine of Civil Engineering*. 81 (5). pp. 3–14. doi: 10.18720/MCE.81.1
 13. Agafontsev, M.V., Kasymov, D.P., Reino, V.V. & Loboda, E.L. (2018) *Tempfild-v.1. Postroenie i analiz polia temperatury po dannym, poluchennym pri pomoshchi infrakrasnoi kamery JADEJ530SB* [Tempfild-v.1. Construction and analysis of the temperature field based on data obtained using the JADE J530SB infrared camera]. Certificate of state registration of computer program 2018660031
 14. Grishin, A.M., Filkov, A.I., Loboda, E.L., Kuznetsov, V.T., Reino, V.V. & Rudi, Yu.A. (2010) Physical modeling of steppe fires in natural conditions. *Fire Safety*. 2. pp. 100–105. (In Russian)
 15. Loboda, E.L., Reino, V.V. & Agafontsev, M.V. (2015) Vybor spektral'nogo intervala dlia izmereniia polei temperatury v plameni i registratsii ekranirovannykh plamenem vysokotemperaturnykh ob'ektov s primeneniem metodov IK-diagnostics [Selection of a spectral interval for measuring temperature fields in a flame and recording high-temperature objects shielded by a flame using IR diagnostic methods]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 58(2). pp. 124–128.

Информация об авторах:

Медведева Татьяна Ивановна – аспирант кафедры физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kotyua1@gmail.com

Касымов Денис Петрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); старший научный сотрудник Лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы СО РАН (Томск, Россия). E-mail: denkasymov@gmail.com

Лобода Егор Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедры физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); главный научный сотрудник Лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы СО РАН (Томск, Россия). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Medvedeva Tatyana I., Postgraduate Student, Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kotyua1@gmail.com

Kasymov Denis P., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: denkasymov@gmail.com

Loboda Egor L., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Chief Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

Научная статья
УДК 614.242:662.1
doi: 10.17223/29491665/5/4

Новые способы применения пиротехнических средств вызывания осадков для тушения лесных пожаров

Сергей Викторович Брыксин¹, Артем Константинович Муранов²,
Дмитрий Александрович Киселев³, Наталия Владимировна Судакова⁴,
Светлана Николаевна Бабич⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} АО «ФНИИЦ «Научно-исследовательский институт прикладной химии», Сергиев Посад, Россия

¹ niiph@niiph.ru
² muranov@niiph.ru
³ demon2809@mail.ru
⁴ sudakov4n@yandex.ru
⁵ svetlbabich@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены существующие технологии искусственного вызывания осадков, принципы создания аэрозольных пиротехнических составов для активного воздействия на облака и успешные опыты тушения лесных пожаров с помощью пиропатронов ПВ-26М, выстреливаемых с борта самолета. Предлагается способ тушения лесных пожаров с пусковых установок кассетного типа, в том числе без отдачи, установленных на беспилотных летательных аппаратах.

Ключевые слова: аэрозольные пиротехнические составы активного воздействия на облака, льдообразующий реагент, иодид серебра, пиропатрон, беспилотный летательный аппарат

Для цитирования: Брыксин С.В., Муранов А.К., Киселев Д.А., Судакова Н.В., Бабич С.Н. Новые способы применения пиротехнических средств вызывания осадков для тушения лесных пожаров // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 27–33. doi: 10.17223/29491665/5/4

Original article
doi: 10.17223/29491665/5/4

New ways of using pyrotechnics for inducing precipitation to extinguish forest fires

Sergey V. Bryksin¹, Artem K. Muranov², Dmitry A. Kiselev³, Natalia V. Sudakova⁴,
Svetlana N. Babich⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} SC «FSPC «Scientific research Institute of applied chemistry», Sergiev Posad, Russian Federation

¹ niiph@niiph.ru
² muranov@niiph.ru
³ demon2809@mail.ru
⁴ sudakov4n@yandex.ru
⁵ svetlbabich@yandex.ru

Abstract. The existing technologies for artificially inducing precipitation, the principles of creating aerosol pyrotechnic compositions for active influence on clouds and successful experiments of extinguishing forest fires using PV-26M cartridges fired from an aircraft are considered. A method is proposed for extinguishing forest fires from cassette-type launchers, including those without recoil, installed on unmanned aerial vehicles.

Keywords: aerosol pyrotechnic compositions for active influence on clouds, ice-forming reagent, silver iodide, pyrocartridge, unmanned aerial vehicle

For citation: Bryksin, S.V., Muranov, A.K., Kiselev, D.A., Sudakova, N.V. & Babich, S.N. (2024) New ways of using pyrotechnics for inducing precipitation to extinguish forest fires. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeiatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 27–33. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/4

Введение

Подлинным бедствием для природных систем, сельского и лесного хозяйства являются засухи. Обширные территории с недостаточным увлажнением имеются и в России (Поволжье, Калмыкия, Астраханская, Ростовская и Оренбургская области, Восточно-Сибирский регион, Южный Урал, степная часть Краснодарского и Ставропольского краев и др.). Важной особенностью ожидаемых изменений климата является практически повсеместный рост засушливости, сопровождающий процессы потепления.

Помимо негативного влияния дефицита влаги, засухи провоцируют многочисленные трудно поддающиеся тушению лесные пожары.

Лесные пожары наносят значительный ущерб народному хозяйству. Существует много способов их тушения, но не всегда они достигают необходимого эффекта. В России, которая обладает самым крупным в мире запасом лесных богатств, создан комплекс мероприятий, направленных на охрану лесов от пожаров и своевременную их ликвидацию. Однако лесные пожары до настоящего времени все еще остаются распространенным явлением в зоне тайги и других лесных районах.

Если же пожар распространяется на площади более 200 га, то наземными средствами невозможно справиться с огнем. Пожар выходит из-под контроля людей и расширяется все более и более до тех пор, пока его не потушат естественные осадки. Такие пожары могут иногда бушевать в течение нескольких недель и даже месяцев, захватывая огромные площади, нанося ущерб не только лесным массивам, но и населенным пунктам.

Борьба с пожарами – трудное дело, особенно в малонаселенных районах Сибири и Дальнего Востока. В этих районах зачастую наблюдаются затяжные крупные пожары.

Отсутствие эффективных мер борьбы с крупными лесными пожарами потребовало поиска и разработки новых путей решения этой проблемы.

Облака в среднем содержат 1000 т воды в 1 км³. При объеме в десятки кубических километров мощные кучевые облака являются естественными природными кладовыми воды.

Первые лабораторные опыты, положившие начало практической реализации идеи активного воздействия на облака, проводились в нашей стране еще в 1921 г. Витольдом Игнатьевичем Виткевичем. В качестве осадкообразующего реагента он использовал заряженный электрическим потенциалом песок [1]. Новый этап исследовательских и опытных работ наступил после открытия в 1946 г. американскими учеными В. Шефером и Б. Воннегатом свойств твердой

углекислоты и йодистого серебра как наиболее эффективных реагентов для переохлажденных облаков.

Первые опыты по активному воздействию на слоисто-кучевые облака с целью оценки возможности применения искусственных осадков для тушения лесных пожаров были проведены в Советском Союзе в 1966 г. Опыты проводились в июле–августе в Ленинградской области. Осадкообразующие реагенты – йодистый свинец и йодистое серебро – последовательно вводились с помощью ракетницы с борта самолета на высоте 4–4,5 км при температуре облака не выше минус 6 °С. Выпадение осадков наблюдалось через 8–12 мин после их обработки. В 12 опытах из 15 осадки доходили до земли и наблюдались в течение от 15 до 40 мин на площади до 12 км² [2]. Исследования, проведенные в 1967 г., подтвердили возможность вызывания искусственных осадков не только из зимних переохлажденных облаков, но и летних, так называемых теплых.

Первый успешный опыт по тушению лесного пожара вызванными осадками произведен в нашей стране в мае 1968 г. в Хабаровском крае [2].

В качестве средств внесения реагента в облако применяются как наземные установки, так и авиационные устройства.

Основной недостаток наземных средств – никогда нельзя быть уверенным, что частицы реагента попадут в облако.

Авиационная технология предусматривает локальный засев зон, питающих облако влагой, с уровня его основания или вершины.

Одним из наиболее эффективных способов введения реагентов в переохлажденную часть облака с целью вызывания осадков для тушения лесных пожаров является применение специальных пиропатронов, выстреливаемых с борта самолета. Засев облаков производится отстрелом пиропатронов в момент пересечения самолетом вершины облака или пролета над ней.

В 1973 г. в России было принято Постановление Правительства «Об усилении охраны природы и улучшении использования природных ресурсов». Оно положило начало разработки научных методов тушения лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками.

В настоящее время практически во всех областях народного хозяйства применяют беспилотные летательные аппараты (БЛА) автоматического или удаленного управления для аэрофотосъемки, мониторинга, съемки сельхозугодий, геофизического сканирования.

Перспективными направлениями использования БЛА в лесном хозяйстве являются мониторинг за распространением пожаров, передача видеoinформации, метеорологические наблюдения за состоянием

атмосферы в зоне пожара, поиск необходимых для вызывания осадков облаков. С помощью беспилотников можно не только получать актуальные сведения о виде пожара, но и использовать их для снаряжения устройствами распыления в облаке частиц реагента для засева зародышей осадков будущего искусственного дождя.

Принципы создания аэрозольных составов для активного воздействия на облака

Основой большинства пиротехнических современных методов воздействия на облака и туманы являются кристаллизирующие аэрозоли, стимулирующие образование в облаках ледяных кристаллов. Практическое применение методов активного воздействия основывается на исследованиях механизма образования конвективных облаков и осадков. Подобные исследования проводились в Советском Союзе с конца 50-х годов прошлого века, и были разработаны физические основы воздействия на конвективные облака с целью предотвращения града и вызывания дополнительных осадков и построены модели кучевых облаков, объясняющие процесс образования осадков и связанные с ними метеорологические явления.

К методам активного воздействия на конвективные облака можно отнести создание в облаке искусственных зародышей града, конкурирующих с естественными за переохлажденную воду, или стимулирование коагуляционных процессов в теплой части облака с последующей кристаллизацией крупных облачных капель [5].

Сущность комбинированного метода заключается в искусственном стимулировании процессов коагуляции в теплой части облака с последующей кристаллизацией образовавшихся крупных капель. Для реализации этого способа воздействия в нижнюю (теплую) часть облака вводят гигроскопический реагент (например, хлорид натрия), а в переохлажденную область – кристаллизирующий реагент. Увеличение концентрации крупных капель должно стимулировать осадки и разрушать нижнюю часть облака, а кристаллизирующий реагент вносится в облако для увеличения концентрации зародышей льда.

Имеются два типа льдообразующих пиротехнических составов (ЛПС): в одних льдообразующий реагент находится в готовом виде, в другом получается в процессе горения состава. Основной величиной, характеризующей эффективность ЛПС, является льдообразующая активность – количество активных центров кристаллизации, полученное с 1 г состава.

Составы первого типа содержат три основных компонента – окислитель, горючее и льдообразующий реагент. Возгонка льдообразующих реагентов с помощью пиротехнических составов имеет ряд преимуществ: возможность получения большого количества активных частиц, простота возгонки и простота доставки реагента в облако. При разработке таких составов особое внимание уделяется выбору льдообразующего реагента. Термические пиротехнические смеси должны обеспечивать оптимальные условия получения активного аэрозоля льдообразующего реагента. Температура горения состава должна быть близка к температуре возгонки льдообразующего реагента. В продуктах горения состава не должно быть веществ, оказывающих дезактивирующее влияние на льдообразующий реагент. Диспергирование льдообразующего реагента пиротехническим способом осуществляется за счет теплоты реакции горения пиротехнического состава. В этом процессе льдообразующий реагент подвергается воздействию высокой температуры и продуктов горения композиции, поэтому к льдообразующим реагентам для термовозгоночных ЛПС наряду с высокой льдообразующей активностью предъявляются следующие требования:

- способность к термической возгонке без существенного разложения;
- достаточная термостойкость реагента и его паров при повышенной температуре;
- отсутствие реакций взаимодействия с продуктами горения из наиболее эффективных льдообразующих реагентов.

В большей степени указанным требованиям удовлетворяет иодид серебра. В термовозгоночной смеси чаще всего используют органические горючие с активными окислителями.

Пиротехнические составы, при горении которых реагент образуется в результате химического взаимодействия между исходными компонентами, отличаются большим содержанием соединений серебра и низкой льдообразующей активностью. В силу своей химической нестойкости и нетехнологичности подобные композиции практического применения не нашли.

В российской практике активного воздействия на атмосферные процессы применяют ЛПС, содержащие реагенты в готовом виде.

Работы по созданию высокоэффективных составов льдообразующего аэрозоля велись в АО «ФНПЦ «НИИ прикладной химии»» с начала 50-х годов.

Первые пиротехнические составы содержали от 40 до 50% йодистого серебра. Из-за дефицита и высокой стоимости йодида серебра проводились работы по созданию пиротехнических составов с более деше-

вым и доступным реагентом. Им стал, после тщательного анализа экспериментальных данных, йодистый свинец. Разработанные составы содержали от 50 до 60% йодида свинца и довольно активно использовались до 1980 г. Токсичность этого компонента заставила разработчиков ЛПС продолжить поиск других пиротехнических смесей. Детальное исследование возможностей более эффективного использования йодистого серебра позволило формировать рецептуры с оптимальными условиями генерирования льдообразующего реагента и последовательным уменьшением его содержания при сохранении льдообразующей активности в целом.

Результатом работ является состав 50-04-11 с 2%-ным содержанием йодида серебра. Данный состав был признан наиболее эффективным в мировой практике активных воздействий. По своей активности и быстродействию он существенно превосходил лучший американский аналог. Состав 50-04-11 нашел широкое применение при работах по искусственному вызыванию осадков в авиационных пиротехнических средствах [6].

Кроме йодидов свинца и серебра, испытывались и другие неорганические вещества, в том числе соединения меди – сульфид меди, селенид меди, оксид меди; серебра – сульфид серебра, оксид серебра, нитрат серебра, но большинство из них оказались недостаточно эффективными. Также испытывались многие органические вещества, флороглюцин, метальдегид, ацетилацетонат меди и др. Основным недостатком органических соединений является сложность получения из них высокодисперсных аэрозолей тепловой возгонкой.

Технологии искусственного вызывания осадков

В основе воздействия на облака с целью вызывания осадков лежит использование неустойчивости фазового состояния атмосферной влаги, значительные объемы которой длительное время существуют в атмосфере в виде переохлажденной жидкокапельной субстанции.

Зародышами частиц осадков в естественных условиях выступают ледяные кристаллы. Они попадают в переохлажденную часть облака из вышележащих слоев того же облака при условии, что его вершина выросла до уровня температуры, при которой происходит самопроизвольное замерзание переохлажденных облачных капель, или образуются в облаке при столкновении переохлажденных облачных капель с присутствующими в атмосфере ядрами кристаллизации.

Естественных зародышей частиц осадков, как правило, все же недостаточно для реализации всех пере-

охлажденных капель в частицы осадков. Поэтому не реализовавшиеся переохлажденные капли постепенно испаряются на боковой границе облака.

Искусственное введение в облако дополнительных зародышей позволяет снизить эти «непроизводительные» потери облачной влаги и повысить эффективность облака как источника осадков.

Многолетний опыт испытаний показывает, что для обеспечения осадковывывания концентрация частиц льдообразующего аэрозоля должна составлять более 10^7 м^{-3} .

Метеорологические наблюдения за состоянием атмосферы в зоне пожара показали, что над пожаром часто появляются мощные конвективные облака, не дающие естественных осадков. Но достаточно ввести в облако специальные вещества-реагенты, обеспечивающие зарождение в нем ледяных частиц, и можно успешно вызвать интенсивные осадки.

Разработанные в настоящее время технологии искусственного вызывания осадков из конвективных облаков могут быть реализованы с помощью различных средств [7]:

- наземных генераторов, в основном эта технология применяется в европейских странах и Латинской Америке;
- авиационных бортовых генераторов и отстреливаемых пиропатронов;
- противораковых ракет.

Методы воздействия отличаются друг от друга способом доставки льдообразующего реагента до цели.

Засев приземного слоя атмосферы частицами льдообразующего реагента с помощью наземных генераторов не может гарантировать, что конвективные потоки занесут кристаллизующие частицы в требуемые области облаков, поэтому эффективность этого метода составляет 41–44%.

Ракетная технология может обеспечить оперативную доставку требуемого количества реагента непосредственно в нужную часть облака.

Авиационная технология предусматривает локальный засев зон, питающих облако влагой с уровня его основания или вершины.

Одним из способов введения реагентов в переохлажденную часть облака является применение специальных пиропатронов, выстреливаемых с борта самолета или самолетных генераторов.

Самолетный генератор состоит из металлической гильзы, пироэлемента, воспламенительного устройства и втулки. Пироэлемент содержит оболочку со вставленной в нее бумажной трубкой и запрессованным составом. Дымовыходное отверстие закрыто фольгой. При подаче электрического напряжения на

воспламенительное устройство от пускового устройства кассеты электровоспламенитель задействует состав льдообразующего действия. Под действием давления от горения состава вскрывается фольга на отверстии втулки, и льдообразующий аэрозоль выходит в атмосферу. При этом образуется трасса высокодисперсного аэрозоля льдообразующего реагента.

Технические характеристики самолетных генераторов представлены в табл. 1.

Засев облаков частицами аэрозоля при отстреле пиропатронов производится в момент пересечения самолетом вершины облака или пролета над ней. Для этих целей в АО «ФНПЦ “НИИ прикладной химии” разработаны пиропатроны ПВ-26 и ПВ-50, обеспечивающие высокий выход активных ядер кристаллизации. При воздействии на конвективные облака один самолет в течение одного полета может успешно выполнить засев облачных скоплений на площади до 25 тыс. км².

Таблица 1

Технические характеристики самолетных генераторов

Характеристика	Генератор САГ-26	Генератор САГ-ПМ
Калибр, мм	26	50
Длина, мм	260	236
Масса, кг	0,47	0,76
Время работы, с	70	175
Выход активного аэрозоля, л/г	1,0×10 ¹³	

Патрон состоит из металлической гильзы, генератора с составом льдообразующего действия 50-04-11, вышибного заряда из дымного ружейного пороха. В гнездо нижней части гильзы установлен электровоспламенитель. Принцип действия патрона: при подаче электрического напряжения на электровоспламенитель пускового устройства, инициирующий состав электровоспламенителя воспламеняет порох вышибного заряда. Пороховые газы выталкивают генератор из гильзы и воспламеняют состав льдообразующего действия. Продукты сгорания состава льдообразующего действия истекают через центральное отверстие диафрагмы. При этом в атмосфере при свободном падении пирозлемента образуется трасса высокодисперсного аэрозоля льдообразующего реагента, который воздействует на переохлажденные облака, вызывая осадки. Характеристики патронов представлены в табл. 2.

Патрон из гильзы и воспламеняют состав льдообразующего действия. Продукты сгорания состава льдообразующего действия истекают через центральное отверстие диафрагмы. При этом в атмосфере при свободном падении пирозлемента образуется трасса высокодисперсного аэрозоля льдообразующего реагента, который воздействует на переохлажденные облака, вызывая осадки. Характеристики патронов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики самолетных пиротехнических патронов ПВ-50-95, ПВ-26-95, ПВ-26-01 и генератора САГ-ПМ

Характеристика	ПВ-50-95	ПВ-26-95	ПВ-26-01	САГ-ПМ
Калибр, мм	50	26	26	50
Длина, мм	200	78	78	236
Масса, г	650	80	80	760
Масса заряда генератора, г	210	40	40	150
Льдообразующий реагент, содержание в % к массе заряда	AgJ, 2	AgJ, 4	AgJ, 8	AgJ, 8
Длина трассы льдообразующего аэрозоля, км	2,5	1,0	2,0	7,5
Тип кассетного устройства	КДС-155	АСО-2И	АСО-2И	КУСАГ-ПМ
Тип используемых самолетов		ИЛ-18, АН-72, АН-12, АН-26 (АН-30), М-101Т «Гжель»		АН-26 (АН-30)
Температурный диапазон применения, °С	±40			
Выход льдообразующих аэрозолей с генератора, не менее:				
при температуре –6 °С	10 ¹⁴	2·10 ¹³	5×10 ¹⁴	8,3×10 ¹⁴
при температуре –10 °С	10 ¹⁵	5×10 ¹⁴	10 ¹⁵	3,75×10 ¹⁵
Время работы генератора, с	150	50	70	175

Одним из примеров применения осадковывающих средств, в частности, патрона ПВ-26М для тушения лесных пожаров, является их использование летом 2021 г. в Республике Саха – Якутия. В интервью газете «Коммерсант» от 27.07.2021 г. глава республики отметил, что самолет-лаборатория для искусственного вызывания осадков АН-26 «Циклон» работал в Якутии все лето во многих районах, когда хоть какая-то облачность появлялась, удавалось вызывать

дожди, которые сбивали пожары и давали передышку для их локализации.

АО «ФНПЦ “НИИ прикладной химии” предлагает использовать в качестве средства доставки и запуска осадковывающих средств беспилотные летающие аппараты (БЛА) с массой полезной нагрузки до 10 кг и высотой подъема не менее 6 км. В качестве устройств выброса могут быть использованы как штатные системы отстрела, так и разработанная в АО «ФНПЦ

“НИИ прикладной химии” установка отстрела кассетного типа, не создающая отдачи в момент запуска. Помимо штатных средств введения в облако реагента, могут применяться патроны и самолетные генераторы других калибров. Применение БЛА кроме значительного снижения стоимости работ по искусственному вызыванию осадков имеет ряд других преимуществ:

- мобильность использования. Не требуется специально оборудованных взлетно-посадочных полос;
- простота управления. Не требуется специально обученный летный состав, достаточно навыков оператора БЛА;
- возможность использования одновременно нескольких БЛА, в том числе и в различных регионах;
- возможность применения различных БЛА в зависимости от текущей метеорологической ситуации.

Расчеты показывают, что при применении БЛА с полезной нагрузкой 10 кг протяженность обрабатываемых облаков изделиями типа ПВ-26М может составлять до 80 км. При средней продолжительности осадков 30 мин и движении облака со скоростью 50 км/ч площадь выпадения осадков от 1 патрона составит не менее 25 км², соответственно, при запуске 200 патронов площадь выпадения осадков составит ориентировочно 5 000 км². При использовании изделий других калибров площадь вызывания осадков может быть увеличена до 1,5 раз.

Большое значение имеет предупреждение лесных пожаров. Для своевременного обнаружения возгораний на предельно малых площадях уже используются БЛА. Снаряжение беспилотников соответствующим оборудованием позволит своевременно ликвидиро-

вать небольшие пожары и проводить профилактические увлажняющие пожароопасных территорий. Как сообщает газета «Аргументы и факты» от 11.08.2022 г., подобный эксперимент успешно был проведен в Республике Саха – Якутия в мае 2022 г., что позволило в последующем в 5 раз снизить количество пожаров в этом году по сравнению с 2021 г.

Тушение пожаров искусственно вызываемыми осадками имеет самые широкие перспективы их применения в охране лесов от пожаров.

АО «ФНПЦ “НИИ прикладной химии” имеет необходимый уровень компетенций как для разработки новых пиротехнических средств для вызывания осадков, так и необходимую производственную базу для серийного изготовления осадковывзывающих патронов в количестве до 1 млн шт. в год.

Заключение

В этой работе рассмотрены существующие технологии искусственного вызывания осадков и механизм повышения эффективности облака как источника осадков с помощью аэрозольных пиротехнических составов на основе йодида серебра.

Для тушения лесных пожаров успешно используется авиационная технология с отстреливанием патронов ПВ-26М.

Применение беспилотных летательных аппаратов позволит значительно снизить стоимость работ, повысить мобильность и оперативность проводимых противопожарных и профилактических операций.

Список источников

1. Виткевич В.И. Научные исследования атмосферы. М., 1923. Вып. 1. 107 с.
2. Арцыбашев Е.С. Тушение лесных пожаров искусственно вызываемыми осадками из облаков. М. : Лесная промышленность, 1973. 87 с.
3. Вернидуб И.И., Жихарев А.С., Сулаквелидзе Г.К. и др. Исследование льдообразующих свойств йодистого свинца // Известия АН СССР. Сер. Геофизическая. 1962. № 9. С. 1286–1293.
4. Плауде Н.О., Соловьев А.Д. Льдообразующие вещества [обзор]. Обнинск : ОНТИ (Мировой центр данных), 1972. 42 с.
5. Вареных Н.М. [и др.] Основы современной пиротехники : учебник : в 2 ч. Ч. 1. Казань : Изд-во КНИТУ, 2014. 502 с.
6. Силин Н.А., Несмеянов П.А. Состояние разработок и применение ПС, средств для активного воздействия на облака и туманы. М. : ЦНИИЭТИ, 1982. 91 с.
7. Вареных Н.М. [и др.] Основы современной пиротехники : учебник : в 2 ч. Ч. 2. Казань : Изд-во КНИТУ, 2014. 454 с.

References

1. Vitkevich, V.I. (1923) *Nauchnye issledovaniia atmosfery. Moskovskaia aerologicheskaya Observatoriia* [Scientific research of the atmosphere. Moscow Aerological Observatory]. Issue 1. Moscow.
2. Artsybashev, E.S. (1973) *Tushenie lesnykh pozharov iskusstvenno vyzyvayemyi osadkami iz oblakov* [Extinguishing forest fires with artificially inducing precipitation from clouds]. Moscow : Lesnaia promyshlennost.
3. Vernidub, I.I., Zhikharev, A.S., Sulakvelidze, G.K. & et al. (1962) *Issledovanie l'doobrazuiushchikh svoistv iodistogo svintsa* [Study of ice-forming properties of lead iodide]. *Izvestiia AN SSSR. Seriya Geofizicheskaya*. 9. pp. 1286–1293.
4. Plaude, N.O. & Solov'ev, A.D. (1972) *L'doobrazuiushchie veshchestva* [Ice-forming substances] : a review. Obninsk.: ONTI (Mirovoi tsentr dannykh).
5. Varenikh, N.M. (2014) *Osnovy sovremennoi pirotekhniki* [Basics of contemporary pyrotechnics]. Textbook. Part. 1. Kazan : Izd-vo KNITU.

6. Silin, N.A. & Nesmeianov, P.A. (1982) *Sostoianie razrabotok i primeneniye PS, sredstv dlia aktivnogo vozdeistviia na oblaka i tumany* [State of development and application of PS, means for active influence on clouds and fogs]. Moscow : TsNIINTI.
7. Varenikh, N.M. & et al. (2014) *Osnovy sovremennoi pirotekhniki* [Basics of contemporary pyrotechnics]. Textbook. Part. 2. Kazan : Izd-vo KNITU.

Информация об авторах:

Брыксин Сергей Викторович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора, главный конструктор по пиротехническим средствам военного назначения АО «ФНПЦ “Научно-исследовательский институт прикладной химии”» (Сергиев Посад, Россия). E-mail: niiph@niiph.ru

Муранов Артем Константинович – кандидат юридических наук, генеральный директор АО «ФНПЦ “Научно-исследовательский институт прикладной химии”» (Сергиев Посад, Россия). E-mail: muranov@niiph.ru

Киселев Дмитрий Александрович – руководитель направления «Активно-реактивные выстрелы» АО «ФНПЦ “Научно-исследовательский институт прикладной химии”» (Сергиев Посад, Россия). E-mail: demon2809@mail.ru

Судакова Наталья Владимировна – инженер-технолог 1-й категории АО «ФНПЦ “Научно-исследовательский институт прикладной химии”» (Сергиев Посад, Россия). E-mail: sudakov4n@yandex.ru

Бабич Светлана Николаевна – инженер-конструктор 1-й категории АО «ФНПЦ “Научно-исследовательский институт прикладной химии”» (Сергиев Посад, Россия). E-mail: svetlbabich@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bryksin Sergey V., Cand. Sc. (Engineering), Deputy General Director – Chief Designer for Military Pyrotechnics, JSC “FSPC “Scientific Research Institute of Applied Chemistry” (Sergiev Posad, Russian Federation). E-mail: niiph@niiph.ru

Muranov Artem K., Cand. Sc. (Law), General Director, JSC “FSPC “Scientific Research Institute of Applied Chemistry” (Sergiev Posad, Russian Federation). E-mail: muranov@niiph.ru

Kiselev Dmitry A., Head of the Department “Active-reactive shots”, JSC “FSPC “Scientific Research Institute of Applied Chemistry” (Sergiev Posad, Russian Federation). E-mail: demon2809@mail.ru

Sudakova Natalia V., 1st Category Industrial Engineer, JSC “FSPC “Scientific Research Institute of Applied Chemistry” (Sergiev Posad, Russian Federation). E-mail: sudakov4n@yandex.ru

Babich Svetlana N., 1st Category Design Engineer, JSC “FSPC “Scientific Research Institute of Applied Chemistry” (Sergiev Posad, Russian Federation). E-mail: svetlbabich@yandex.ru

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

Научная статья
УДК 614.84
doi: 10.17223/29491665/5/5

Применение методов ИК-термографии для исследования природных пожаров и процессов горения

Егор Леонидович Лобода^{1,2}, Владимир Владимирович Рейно³

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{2,3} *Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия*

^{1,2} *loboda@mail.tsu.ru*

³ *reyno@iao.ru*

Аннотация. В статье приведен обзор оригинальных методов исследования природных пожаров и процессов горения с применением скоростной ИК-термографии. Сформулированы основные принципы применения ИК-термографии для исследования процессов горения: поля температуры в пламени, структуры турбулентного пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов, а также применение ИК-термографии для исследования к-фазного горения. Показано, что ИК-термография может применяться на практике для определения кромки пожара в условиях сильного задымления.

Ключевые слова: природные пожары, горение, пламя, ИК-термография, характеристики пламени

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Для цитирования: Лобода Е.Л., Рейно В.В. Применение методов ИК-термографии для исследования природных пожаров и процессов горения // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 34–42. doi: 10.17223/29491665/5/5

Original article
doi: 10.17223/29491665/5/5

Application of IR thermography methods to study wildland fires and combustion processes

Egor L. Loboda^{1,2}, Vladimir V. Reyno³

¹ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

^{2,3} *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

^{1,2} *loboda@mail.tsu.ru*

³ *reyno@iao.ru*

Abstract. The article provides an overview of original methods for studying wildfires and combustion processes using IR thermography. The basic principles of using IR thermography to study combustion processes are formulated, such as temperature fields in the flame, the structure of the turbulent flame formed during the combustion of plant combustible materials, as well as the use of IR thermography to study k-phase combustion. It is shown that the IR thermography can be used to determine the edge of a fire in conditions of heavy smoke.

Keywords: wildland fires, combustion, flame, IR thermography, flame characteristics

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Development Program of Tomsk State University (Priority 2030) and within the framework of the state assignment of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

For citation: Loboda, E.L. & Reyno, V.V. (2024) Application of IR thermography methods to study natural fires and combustion processes. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 34–42. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/5

Введение

Применение методов ИК-термографии в мире широко используется в медицине, в технологических процессах, например, при изготовлении стекла и

пластмассы, определении мест самовозгорания угольных складов и т.д. Но в основном приходится на диагностику электротехнического, теплового оборудования и ограждающих конструкций зданий на предмет теплопотерь. Исследования этих объектов

связаны с определением карты температуры поверхности твердых тел, а точнее, регистрируется температурный контраст частей оборудования по отношению к заведомо исправной части и называется «избыточной температурой» или по отношению к температуре окружающего воздуха и называется «превышением температуры». Так как процесс преобразования тепловизионного электрического сигнала в температуру носит нелинейный характер, то погрешность инфракрасных (ИК) камер в измерении абсолютных значений температур составляет $\pm 2\%$. В то же время высокая чувствительность современных ИК-камер (не хуже $0,07^\circ\text{C}$) к перепадам температур измеряемой поверхности и описанный выше метод ухода от абсолютных значений температуры и измерения только разницы температур позволяют уверенно диагностировать оборудование и элементы зданий на самой ранней стадии дефектов.

Упомянутые выше объекты, по сути, являются серыми телами как минимум в ИК-диапазоне длин волн, их спектр излучения непрерывен и подчиняется закону Планка. Поэтому для повышения чувствительности регистрирующего оборудования измерения производятся в широком спектральном диапазоне. В случае же когда объектом исследования является пламя, то спектр его излучения существенно отличается от спектра излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Этот факт обуславливает необходимость более детального рассмотрения спектра излучения пламени с целью выбора узких рабочих спектральных интервалов.

Необходимо заметить, что ввиду роста доступности ИК-техники «ненаучного класса» в литературе стало появляться значительное число публикаций, где авторы без какого-либо обоснования применяют ИК-технику, не вдаваясь в подробности ни спектральных характеристик прибора, ни спектральных характеристик объекта исследования. При этом, подбирая эффективные значения коэффициентов излучения, получают относительно правдоподобные результаты измерений, полагая, что низкая инструментальная погрешность гарантирует хороший результат.

Однако такие подходы приводят к грубым осреднениям получаемых результатов. Во-первых, следует отметить, что при работе с высокотемпературными объектами применение ИК-камер средневолнового диапазона (с рабочим диапазоном 2–5 мкм) позволяет получить лучший тепловой контраст, чем в случае применения длинноволновых приборов (8–12 мкм). Во-вторых, при работе с высокотемпературными объектами динамический диапазон матриц ИК-камеры накладывает значительные ограничения на диапазон измеряемых температур, который обычно расширяют за счет режима «Multi-IT», но с потерей разрешения

по времени. В-третьих, применение широкого спектрального диапазона при работе с объектами, чей спектр излучения не является непрерывным или существенно отличается от спектра излучения АЧТ, приводит к «размазыванию» термограммы и потере детализации тепловой структуры.

Например, более 25 лет назад в авторском коллективе ИОА СО РАН и ТГУ были получены первые термограммы с помощью ИК-камеры Inframetrics 760 с рабочим диапазоном 3–12 мкм на одноэлементном фотоприемнике. Из анализа изображений термограмм, сделанных в одни и те же моменты времени для одной массы и типа растительных горючих материалов (РГМ) для разных спектральных интервалов 3–5 и 8–12 мкм было установлено, что наиболее информативен для отображения пламени спектральный интервал 3–5 мкм.

На рис. 1, *a* показана термограмма распределения яркостной температуры при горении опада хвойного кедрового леса в спектральном интервале 3–5 мкм при $T_{\text{max}} = 556^\circ\text{C}$, а на рис. 2, *b* показана термограмма в спектральном интервале 8–12 мкм при $T_{\text{max}} = 532^\circ\text{C}$. Из анализа термограммы можно определить, что в диапазоне 3–5 мкм лучше видны само пламя и поднятый передний фронт горения, который формируется за счет продуктов пиролиза. В спектральном интервале 8–12 мкм наблюдается слабая излучательная способность пламени, и его тепловизионное изображение почти не просматривается. Инфракрасное изображение в интервале 8–12 мкм определяется наличием излучения конденсированной фазы продуктов горения. Спектр излучения конденсированных продуктов горения близок к спектру излучения АЧТ и значительно шире среднего ИК-диапазона в сторону длинных волн. При этом величина коэффициента излучения отдельно взятых частиц приближается к значению 1, которая в общем случае требует поправки с учетом концентрации компонентов. На рис. 2 показаны термограммы горения штабеля сосновых досок объемом примерно 4 м^3 . Следует отметить, что даже несмотря на достаточно большую концентрацию конденсированных продуктов горения в пламени в спектральном интервале 8–12 мкм, отчетливо видна только горячая поверхность твердого топлива, а изображение пламени слабое или практически отсутствует.

Из анализа изображений видно, что в спектральном интервале 8–12 мкм изображение более фрагментарно и не замыто излучением пламени. Напротив, в спектральном интервале 3–5 мкм фронтальная поверхность пламени, обращенная к наблюдателю, имеет высокую излучательную способность и слой пламени несколько ослабляет излучение, исхо-

дящее от конденсированной фазы продуктов горения. Значения температур на термограммах (см. рис. 2) не скорректированы под реальные значения

коэффициентов излучения, которые обычно корректируются по средним показаниям термопар до реальных значений.

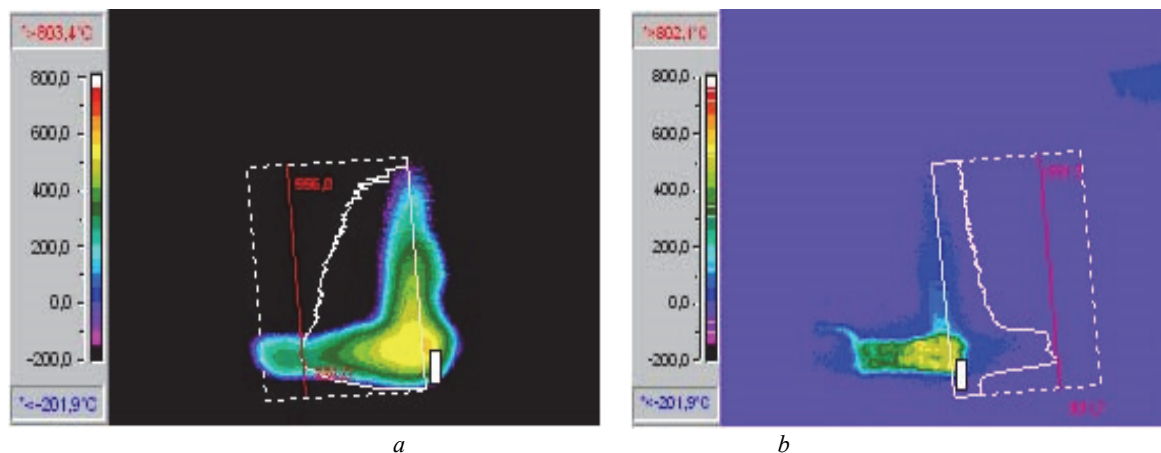


Рис. 1. Термограмма пламени при горении РГМ в диапазоне длин волн: *a* – 3–5 мкм; *b* – 8–12 мкм [1]

Fig. 1. Flame thermogram during RGM combustion in the wavelength range: *a* – 3–5 μm ; *b* – 8–12 μm [1]

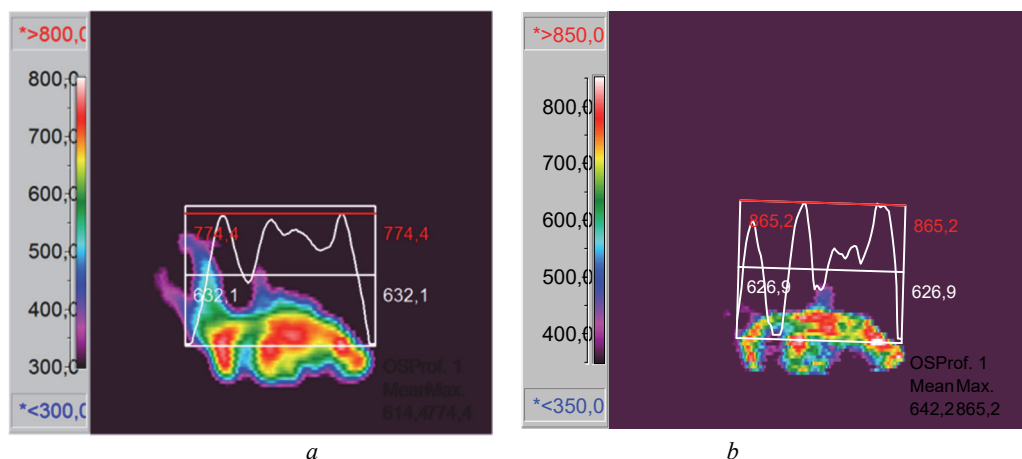


Рис. 2. Термограмма горения штабеля сосновых досок в диапазонах длин волн: *a* – 3–5 мкм; *b* – 8–12 мкм [1]

Fig. 2. Thermogram of combustion of a stack of pine boards in the wavelength ranges: *a* – 3–5 μm ; *b* – 8–12 μm [1]

Очевидно, что спектр излучения основных газообразных продуктов горения сосредоточен в среднем ИК-диапазоне и для успешной работы необходима ИК-камера с рабочим диапазоном длин волн от 2,0 до 5,5 мкм.

Избежать указанных выше недостатков в полной мере или невозможно, или это требует значительных материальных затрат, так как стоимость скоростных ИК-камер «научного класса» неприлично высока, а с 2008 г. еще существует запрет на экспорт в Россию быстросъемных тепловизоров со средневолновым рабочим диапазоном (1,5–5 мкм). Следует отметить, что наиболее широко распространенные камеры на неохлаждаемых болометрах ограничены частотой

считывания кадров 9 Гц и узким диапазоном измерения температур не более 200°. Тем не менее приборы «научного класса» имеются в ряде научных коллективов, и такие камеры позволяют применять узкополосные оптические фильтры. Применяя фильтры, можно селективно обрабатывать излучение исследуемых объектов по участку спектра излучения, а также расширять динамический диапазон измеряемых температур за счет снижения интегрального потока излучения, падающего на матрицу камеры.

Учитывая, что при пламенном горении различных топлив значительный вклад в излучение пламени вносят летучие продукты пиролиза и газообразные продукты горения, а применение узкополосных

фильтров в средневолновом ИК-диапазоне представляется перспективным подходом для определения полей температуры в пламени.

Спектр излучения фронта горения

С точки зрения применения ИК-термографии для определения полей температуры во фронте горения следует отдельно рассматривать пламенный режим горения от к-фазного горения. Далее на примере пламенного горения некоторых видов горючих материалов, в том числе – РГМ, и к-фазного горения на примере торфа показано принципиальное различие в

спектральных характеристиках объекта исследования. Наиболее сложной задачей является измерение температуры в пламени.

На рис. 3 приведены осредненные по времени регистрации спектры излучения пламени (кривая 2), образующегося при горении указанных выше горючих материалов, и спектр излучения АЧТ (кривая 1) при температуре, соответствующей максимальной температуре в пламени при горении рассматриваемых горючих материалов. Эти спектры получены при одинаковых условиях и масштабах проведения экспериментов, по оси ординат отложена амплитуда сигнала в уровнях АЦП, а по оси абсцисс значения длин волн.

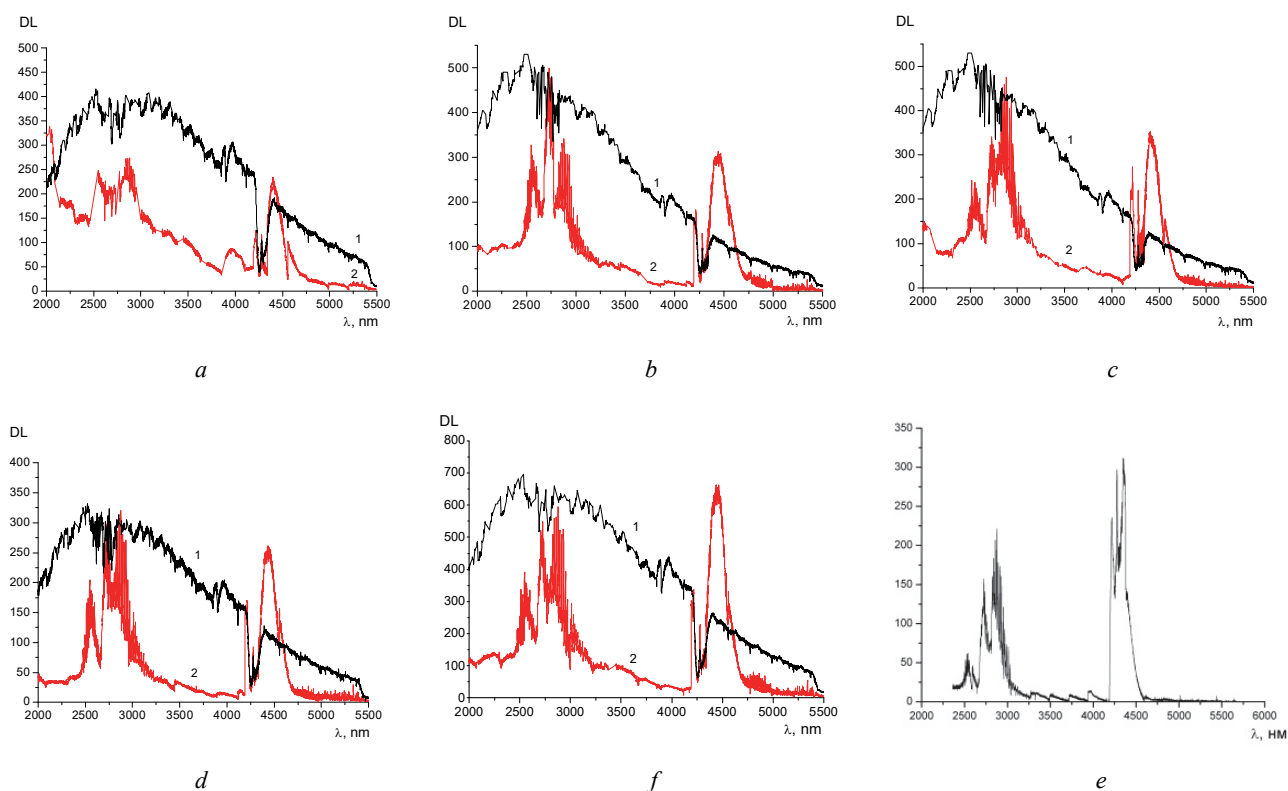


Рис. 3. Спектр излучения АЧТ (кривая 1) и пламени (кривая 2), образующегося при горении: *a* – дизельного топлива; *b* – хвои кедра; *c* – хвои сосны; *d* – древесины сосны; *f* – древесины березы; *e* – спирт [2]

Fig. 3. Radiation spectrum of the blackbody (curve 1) and the flame (curve 2) formed during combustion of: *a* – diesel fuel; *b* – cedar needles; *c* – pine needles; *d* – pine wood; *f* – birch wood; *e* – alcohol [2]

Из анализа рис. 3 и состава продуктов горения рассматриваемых горючих материалов можно сделать вывод, что наиболее мощные полосы излучения соответствуют основным продуктам горения – парам воды и углекислому газу. Это наиболее ярко выражено в спектрах излучения для достаточно простых углеводородов на примере спирта, при горении которых другие компоненты, в особенности конденсированные продукты горения, отсутствуют. В случае горения других горючих материалов в спектре излуче-

ния пламени присутствует излучение разной интенсивности в диапазоне длин волн 3–4 мкм. Это излучение обусловлено в большей степени излучением конденсированных продуктов горения (сажи и дыма), концентрация которых различна для разных видов горючих материалов. Очевидно, что интенсивность излучения конденсированных продуктов горения в пламени связана с их концентрацией, которая, в свою очередь, зависит от типа горючего материала и полноты сгорания.

Необходимо отметить, что при горении РГМ, представленных в данной работе, в спектре излучения пламени в начале спектрального интервала присутствуют полосы излучения, качественно похожие на части спектров излучения пламени в диапазоне 2,0–2,5 мкм, представленные в работах [3–5], а спектр излучения пламени, образующегося при горении спирта, на рис. 3, е качественно практически идентичен спектру, представленному в работе [6], полученному на аналогичном измерительном оборудовании, с отличием в амплитуде измеренного сигнала. Это отличие обусловлено разными режимами горения топлива, которые обеспечивали разное поступление окислителя в зону горения.

При применении методов ИК-термографии для исследования процессов горения необходимо учитывать, что ИК-камеры, представленные в настоящее время на рынке, по рабочему спектральному диапазону делятся в основном на два типа: с рабочим диапазоном 2–5 и 7–12 мкм. Очевидно, что для исследования процессов горения необходимо применять ИК-камеры, позволяющие работать в спектральном интервале 2–5 мкм, так как вторая группа ИК-камер не позволит «увидеть» пламя и может применяться лишь для регистрации экранированных пламенем объектов, таких как горящие дрова или обугленные остатки. Применение же ИК-камер с рабочим спектральным диапазоном 2–5 мкм целесообразно совместно с узкополосными фильтрами, что дает возможность выбрать спектральный интервал для решения конкретной задачи, а в случае решения задачи по определению полей температуры в пламени правильный выбор фильтра обеспечит хорошую детализацию тепловизионного изображения, поправочный эффективный коэффициент излучения, близкий к 1, что позволит уменьшить погрешность измерений. Также следует отметить, что согласно результатам, приведенным в работе [7], необходимо, чтобы технические характеристики ИК-камеры позволяли производить съемку с частотой не менее 40 кадров в секунду, что обусловлено нестационарностью и турбулентными процессами, протекающими в пламени. Способы оценки характеристик турбулентности в пламени при горении РГМ и некоторых видов топлив подробно изложены в работах [8–10].

Кроме того, следует иметь в виду, что ИК-камеры калибруются по излучению АЧТ, и, сравнивая спектр излучения пламени со спектром излучения АЧТ для одной и той же максимальной температуры, можно увидеть, что в диапазоне от 4 до 5 мкм в спектре излучения пламени присутствует излучение, превышающее по интенсивности излучение АЧТ. Из этого следует, что выбор узкого спектрального интервала в

диапазоне 4,0–4,7 мкм нецелесообразен для измерения температуры в пламени, так как в этом случае необходимо учитывать концентрации продуктов горения СО и СО₂ и их вклад в интегральное излучение пламени, ибо в противном случае поправочный эффективный коэффициент излучения пламени будет превышать значение 1.

Для регистрации поля температуры в пламени наиболее предпочтительными являются узкие спектральные интервалы, находящиеся в диапазоне длин волн 2,5–3,0 мкм, так как в этом диапазоне интенсивность излучения пламени не превышает интенсивность излучения АЧТ для соответствующей температуры, причем в этом спектральном интервале находятся достаточно мощные полосы излучения с эффективным коэффициентом излучения, близким к 1. Например, очень удобным на практике является спектральный диапазон 2,5–2,7 мкм, в который попадает излучение паров воды и углекислого газа, образующихся при горении.

Необходимо отдельно обратить внимание, что для корректного определения полей температуры в пламени при проведении исследований необходимо осуществлять подбор эффективного коэффициента излучения пламени по реперным термопарным измерениям, так как коэффициент излучения пламени зависит не только от состава продуктов химических реакций, но и от влагосодержания горючих материалов [1, 7] в случае, если полосы излучения паров воды попадают в рабочий спектральный интервал прибора. Подробно способы определения эффективного коэффициента излучения описаны в работе [1].

В случае если стоит задача регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов или температуры поверхности горючих материалов и при этом не требуется регистрация температуры в пламени, то следует выбирать узкий спектральный интервал, лежащий в диапазоне длин волн 3,3–4,0 мкм, где отсутствуют мощные полосы поглощения и излучения основных продуктов горения и в основном присутствует только излучение конденсированных продуктов горения, интенсивность которого относительно невелика.

Существенно проще представляется задача измерения температуры фронта горения при к-фазном режиме горения. На рис. 4 представлена типичная термограмма тлеющей поверхности торфа, а на рис. 5 показан спектр излучения торфа до границы 5,5 мкм, полученный при помощи спектрографа SOLAR TII MS2001i; в сравнении с расчётной кривой Планка. При сравнении этих кривых видно, что спектр излучения торфа близок к спектру абсолютно черного тела, провалы на огибающей спектра торфа и АЧТ вызваны наличием свободного углекислого газа в атмосфере.

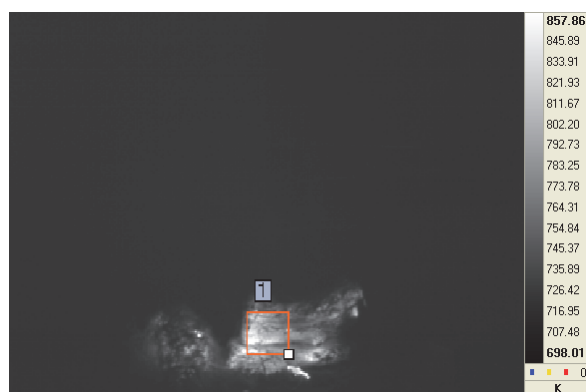


Рис. 4. Термограмма тлеющей поверхности торфа [1]

Fig. 4. Thermogram of the smoldering peat surface [1]

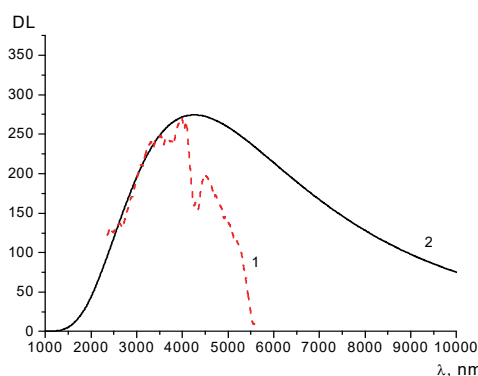


Рис. 5. Спектр излучения тлеющей поверхности торфа (кривая 1) и расчетный спектр излучения АЧТ (кривая 2) [1]

Fig. 5. Radiation spectrum of the smoldering surface of peat (curve 1) and the calculated radiation spectrum of the black body (curve 2) [1]

Учитывая сходство спектра излучения торфа со спектром АЧТ, для определения эффективного коэффициента излучения ϵ использовался следующий метод: для максимального значения температуры, полученного термопарой, подбиралась область на поверхности образца в непосредственной близости от термопары, затем по гистограмме выбиралась наиболее часто встречаемая температура в этой области и при помощи программного обеспечения, которым укомплектована ИК-камера, находили коэффициент излучения для наилучшего согласования значений температуры. В результате были получены значения ϵ [2,5–2,7 мкм] = $0,95 \pm 0,01$.

Опыт применения ИК-термографии при исследовании природных пожаров в полунатурных условиях

С 2009 по 2023 г. коллективом кафедры физической и вычислительной механики проводились исследования различных типов пожаров (степной, верховой, торфяной) в полигонных условиях на Базовом экспериментальном комплексе ИОА СО РАН (оборудование

ЦКП «Атмосфера»). На рис. 6 представлены типичные термограммы степного пожара и профили температуры в пламени, изображения и термограммы верхового пожара.

В результате проведенных экспериментов с помощью методов ИК-термографии определены поля температуры в пламени, скорость и динамика распространения фронта пожара, особенности его воздействия на постройки и ограждения, получены характеристики турбулентности в пламени (определены характерные масштабы турбулентности и частоты пульсации температуры).

Следует отметить, что в диапазоне 8–12 мкм наличие дыма или дымовой завесы слабо влияет на регистрацию и наблюдение нагретых объектов (рис. 7). Поэтому применение этого спектрального интервала в ИК-камерах, установленных на борту летательных аппаратов, позволяет пилотам Авиалесоохраны наблюдать кромку пожара сквозь густой дым и принимать правильное решение о высадке пожарного десанта за кромку для тушения пожара или локального применения средств тушения.

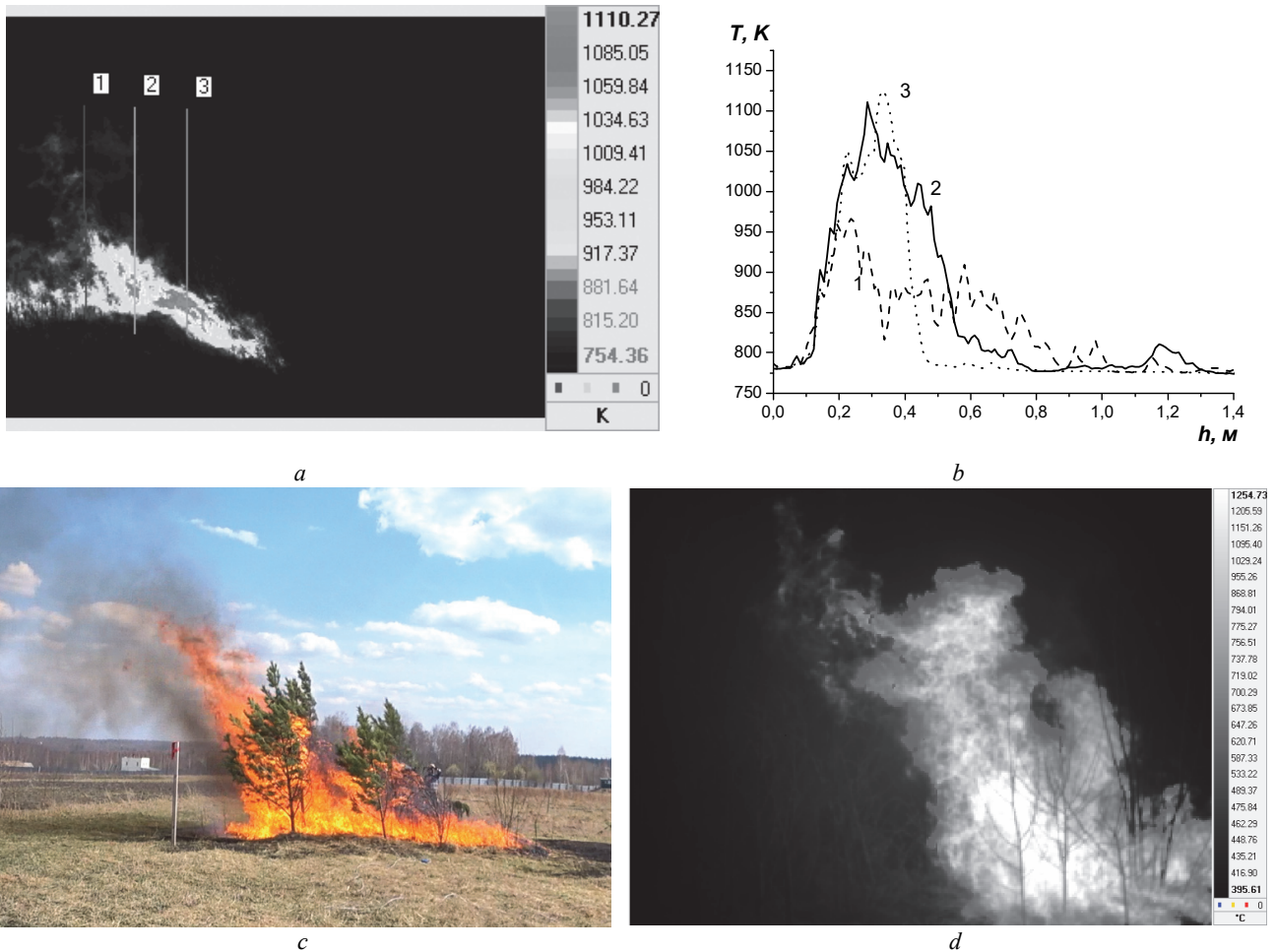


Рис. 6. Термограмма фронта степного пожара (а); профили температуры (b) во фронте степного пожара, образованного от точечного источника зажигания: 1, 2 и 3 – соответствуют сечению 1, 2 и 3 на рис. 6, а; фотография модельного верхового пожара (с); термограмма фронта верхового пожара (d)

Fig. 6. Thermogram of the front of a steppe fire (a); temperature profiles (b) in the front of a steppe fire formed from a point ignition source: 1, 2 and 3 – correspond to section 1, 2 and 3 in Fig. 6, a; photograph of a model crown fire (c); thermogram of the crown fire front (d)

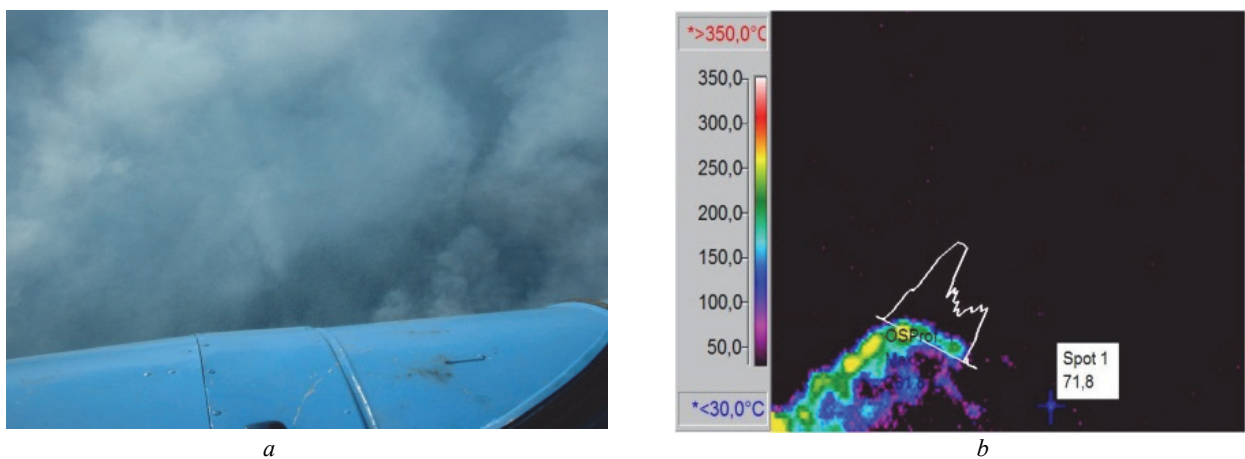


Рис. 7. Фотография в видимом диапазоне (а) и термограмма кромки пожара (b) с борта вертолета над очагом лесного пожара [1]

Fig. 7. Photography in the visible range (a) and a thermogram of the fire edge (b) from a helicopter above a forest fire [1]

Пространственное разрешение инфракрасного изображения пламени обеспечивается форматом фотоприёмной матрицы, например, размер матрицы 320×240 пикселей уже обеспечивает неплохое качество. При наблюдении очагов горения на больших дистанциях следует применять сменные объективы с узким полем зрения (телевики) и матрицы больших размеров, например 640×512. Хотя такого детального разрешения объектов, какое мы привыкли наблюдать в видимом диапазоне, в инфракрасном диапазоне невозможно получить в силу дифракционного ограничения, так как длина волны в ИК-диапазоне примерно в 10 раз больше, чем в видимой части спектра.

Заключение

Резюмируя вышесказанное, можно утверждать, что применение методов скоростной ИК-термографии для исследования природных пожаров и разнообразных процессов горения представляется перспективным, но сопряжено с рядом фундаментальных проблем. Исследование полей температуры во фронте к-фазного горения является наиболее простой задачей, которая может решаться как с помощью приборов средневолнового, так и длинноволнового диапазонов. При исследовании пламенного горения необходимо учитывать оптические характеристики пламени, которые могут существенно зависеть от типа горючих материалов, их влагосодержания, полноты сгорания, выбора спектрального интервала исследования и пр.

При исследовании полей температуры и структуры пламени при изучении природных пожаров следует учитывать следующие рекомендации:

1. Для исследования полей температуры и структуры пламени необходимо применять скоростные ИК-камеры «научного класса» средневолнового диапазона с возможностью применения набора узкополосных оптических фильтров, объективов и за счёт применения опции «Multi IT» («сшивки кадров») расширять диапазон измерения температур, выбирая оптимальную скорость записи.

2. Необходимо применять узкополосные оптические фильтры средневолнового ИК-диапазона с полосой пропускания, лежащей в интервале длин волн 2,5–3,3 мкм (2,5–2,7 мкм – рекомендуемый спектральный интервал), где присутствует мощное излучение паров воды и углекислого газа и отсутствует влияние газоконденсированной фазы.

3. Не рекомендуется использовать спектральный интервал от 4 до 5 мкм в силу того, что интенсивность излучения на этих длинах волн СО и СО₂ превышает интенсивность излучения АЧТ, по излучению которого калибруются приборы, что может привести к нефизичным значениям эффективного коэффициента излучения (больше 1).

Применение ИК-камер на борту летательного аппарата позволяет при сильном задымлении хорошо идентифицировать движение передней кромки пожара, что обеспечит безопасность и точность высадки десанта Авиалесоохраны и сброс воды для локализации пожара.

Список источников

1. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Применение термографии при исследовании процессов горения. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2016. 80 с.
2. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.
3. Acem Z., Parent G., Monod B. et al. Experimental study in the infrared of the radiative properties of pine needles // Experimental Thermal and Fluid Science. 2010. № 34. P. 893–899.
4. Agueda A., Pastor E., Perez Y. et al. Experimental study of the emissivity of flames resulting from the combustion of forest fuels // International Journal of Thermal Science. 2010. № 49. P. 543–554.
5. Boulet P., Parent G., Acem Z. et al. On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires // Fire Safety Journal. 2011. Vol. 46 (1–2). P. 21–26.
6. Ситнов С.А., Мохов И.И., Джола А.В. Влияние сибирских пожаров на содержание монооксида углерода в атмосфере над европейской частью России летом 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 146–152. doi: 10.15372/AOO20170207
7. Лобода Е.Л., Рейно В.В. Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК-методами при горении лесных и степных горючих материалов при различном влагосодержании. Частотный анализ изменения температуры // Оптика атмосферы и океана. 2011. № 11. С. 1002–1004.
8. Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V. Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // Infrared Phys. Technol. 2015. Vol. 72. P. 1–7. doi: 10.1016/j.infrared.2015.07.001
9. Loboda E.L., Anufriev I.S., Agafontsev M.V., Kop'ev E.P., Shadrin E.I., Rejno V.V., Vavilov V.P., Lucenko A.V. Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV // Infrared Physics and Technology. 2018. Vol. 92. P. 240–243. doi: 10.1016/j.infrared.2018.06.006
10. Loboda E.L., Matvienko O.V., Agafontsev M.V., Reyno V.V., Vavilov V.P. IR thermography study of flow structure and parameters in diffusion flames // Infrared Physics and Technology. 2021. Vol. 117. P. 1–11. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103851

References

1. Loboda, E.L., Reino, V.V. & Agafontsev, M.V. (2016) *Primenenie termografii pri issledovanii protsessov goreniia* [Application of thermography in the study of combustion processes]. Tomsk : Tomsk University Press.
2. Loboda, E.L., Reyno, V.V. & Agafontsev, M.V. (2015) Choice of a Spectral Range for Measuring Temperature Fields in a Flame and Recording High-temperature Objects Screened by the Flame Using IR Diagnostic Methods. *Russian Physics Journal*. 2. pp. 278–282. doi: 10.1007/s11182-015-0493-x
3. Acem, Z., Parent, G., Monod, B. & et al. (2010) Experimental study in the infrared of the radiative properties of pine needles. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 34. pp. 893–899.
4. Agueda, A., Pastor, E., Perez, Y. & et al. (2010) Experimental study of the emissivity of flames resulting from the combustion of forest fuels. *International Journal of Thermal Science*. 49. pp. 543–554.
5. Boulet, P., Parent, G., Acem, Z. & et al. (2011) On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires. *Fire Safety Journal*. 46 (1–2). pp. 21–26.
6. Sitnov, S.A., Mokhov, I.I. & Dzhola, A.V. (2016) Impact of Siberian wildfires on the content of carbon monoxide in the atmosphere over European Russia in summer 2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 30 (2). pp. 146–152. doi: 10.15372/AOO20170207
7. Loboda, E.L. & Reino, V.V. (2011) The influence of flame emissivity on the flame temperatures by IR-methods at the burning of forest and steppe fuels at various moistures. The frequency analysis of temperature change in a flame. *Optika Atmosfery i Okeana*. 24(11). pp. 1002–1004. (In Russian).
8. Loboda, E.L., Matvienko, O.V., Vavilov, V.P. & Reyno, V.V. (2015) Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale. *Infrared Physics & Technology*. 72. pp. 1–7. doi: 10.1016/j.infrared.2015.07.001
9. Loboda, E.L., Anufriev, I.S., Agafontsev, M.V., Kop'ev, E.P., Shadrin, E.I., Rejno, V.V., Vavilov, V.P. & Lucenko, A.V. (2018) Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV. *Infrared Physics and Technology*. 92. pp. 240–243. doi: 10.1016/j.infrared.2018.06.006
10. Loboda, E.L., Matvienko, O.V., Agafontsev, M.V., Reyno, V.V. & Vavilov, V.P. (2021) IR thermography study of flow structure and parameters in diffusion flames. *Infrared Physics and Technology*. 117. pp. 1–11. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103851

Информация об авторах:

Лобода Егор Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); главный научный сотрудник Лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы СО РАН (Томск, Россия). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Рейно Владимир Владимирович – старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск, Россия). E-mail: reyno@iao.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Loboda Egor L., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Chief Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Reyno Vladimir V., Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: reyno@iao.ru

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

Научная статья
УДК 614.842.611/616
doi: 10.17223/29491665/5/6

Авиационное средство пожаротушения АСП-500. Разработка, проблемы, перспективы

Сергей Васильевич Озеряков¹

¹ Акционерное общество «Научно-производственное объединение “Базальт”» ГК «Ростех»,
Москва, Россия, ozzylakov@yandex.ru

Аннотация. Решение проблем повышения эффективности тушения лесных и техногенных пожаров с помощью авиационной техники возможно путем внедрения в практику новых технических решений на основе взрывного способа. Распыление огнегасящего состава взрывом создает аэрозольное облако, которое подавляет очаги горения на большей площади. С целью расширения возможностей и повышения эффективности методов борьбы с пожарами АО «НПО “Базальт”» в рамках инициативной ОКР «Аэрозоль» разработало опытный образец авиационного средства пожаротушения калибра 500 кг – АСП-500. Изделие предназначено для тушения и локализации лесных пожаров и подавления зон огневого шторма при техногенных авариях и катастрофах. АСП-500 возможно применять с авиационных носителей самолетного, вертолетного и беспилотного типа. АСП-500 целесообразно использовать в комплексе со сливными авиационными системами, что обеспечит лучшие показатели производительности и экономической эффективности. Применение АСП-500 может стать качественным дополнением к действующей системе охраны и защиты лесов Российской Федерации, особенно на удаленных и труднодоступных территориях.

Ключевые слова: тушение лесных пожаров, авиационное средство пожаротушения, АСП-500, тушение взрывом

Для цитирования: Озеряков С.В. Авиационное средство пожаротушения АСП-500. Разработка, проблемы, перспективы // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 43–50. doi: 10.17223/29491665/5/6

Original article
doi: 10.17223/29491665/5/6

Aerial fire extinguishing equipment ASP-500. Development, problems, prospects

Sergey V. Ozeryakov¹

¹ JSC “Research and Production Association “Bazalt” of the State Corporation “Rostec”,
Moscow, Russian Federation, ozzylakov@yandex.ru

Abstract. The problem of boosting the efficiency of extinguishing forest and man-made fires with the use of aviation technology can be solved by implementing into practice of new technical solutions based on explosive dispersion method. Fire-extinguishing compound explosive dispersion generates an aerosol cloud which suppresses conflagration zones over vast areas. With the aim of expanding capabilities and enhancing fire-fighting efficiency, a 500kg aerial fire-fighting device ASP-500 was developed by JSC “RPA “Bazalt” as part of initiative development project “Aerosol”. The product is intended for extinguishing and localizing forest fires, as well as for suppressing fire zones during man-made accidents and disasters. ASP-500 is capable of being used from fixed-wing aircraft, helicopters, unmanned aerial vehicles (UAVs). It is expedient to use ASP-500 in conjunction with traditional fire-fighting water release systems, thus ensuring improved performance and economic efficiency indicators. ASP-500 application could be an efficient addition to the existing system of forests protection and conservation valid in the Russian Federation, especially in remote or hard-to-reach areas.

Keywords: forest fires extinguishing, aerial fire-fighting device ASP-500, explosive extinguishing

For citation: Ozeryakov, S.V. (2024) Aerial fire extinguishing equipment ASP-500. Development, problems, prospects. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedejatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 43–50. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/6

Земли лесного фонда Российской Федерации составляют 1,2 млрд га. Ежегодно возникает 20–30 тыс. лесных пожаров на площади 3–10 млн га. Природные и техногенные пожары очень скоротечны и масштабны, при этом 80–90% случаев пожаров происхо-

дит с возникновением угрозы жизни людей, уничтожением населенных пунктов и других объектов и сооружений.

Совокупный ущерб от пожаров достигает от 25 до 100 млрд руб.

Интенсивное хозяйственное освоение ранее не обжитых лесных районов Севера, Сибири и Дальнего Востока сопровождается постоянным увеличением источников огня в лесу.

Растет число районов лесной зоны с высокой степенью засушливости и интенсивных лесных пожаров большой площади. Природные и антропогенные факторы способствуют возникновению большого количества пожаров, развитие которых носит характер стихийных бедствий. Борьба с такими пожарами с помощью ручного инструмента и наземного оборудования крайне затруднена. В мировой практике в этих случаях тушение пожаров осуществляется с помощью самолетов и вертолетов, оборудованных специальными сливными устройствами. В одних случаях это первая атака самолетов и вертолетов-танкеров на возникшие пожары с целью их сдерживания до подхода основных сил наземного пожаротушения, в других – тушение с воздуха для оказания помощи наземным командам. Применение авиации для борьбы с пожарами имеет более чем 90-летнюю историю [1].

С учетом географических особенностей страны защита и охрана лесов без применения авиации невозможна. Годовая нормативная потребность авиационных работ составляет 80–100 тыс. летных часов с использованием до 400 воздушных судов. В текущих условиях фактический объем применения пилотируемой авиации составляет следующее соотношение: 40–45 тыс. летных часов на 300 воздушных судов в год. Ежегодно на авиауслуги расходуется 6–9 млрд руб., ежегодный рост 5–10%, что делает лесное хозяйство крупнейшим государственным потребителем авиауслуг в стране. При этом имеется острая проблема дефицита летного времени, что негативно влияет на эффективность национальной системы борьбы с лесными пожарами, учета лесов и оценки экологических последствий.

Проведение профилактических мероприятий и борьба с лесными пожарами регламентируется Лесным кодексом Российской Федерации от 04.12.2006 г. № 200-ФЗ и «Правилами тушения лесных пожаров», утвержденными приказом Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 01.04.2022 г. № 244 (далее – Правила) [2]. В соответствии со ст. 9 Правил организованы руководство по тушению лесного пожара на территории лесничества и сводный план тушения лесных пожаров на территории субъекта Российской Федерации [3]. При обнаружении незначительного по площади возгорания участка леса возможно тушение непосредственно очага горения. Ликвидация лесного пожара достигается его локализацией и последующим тушением. Так, согласно ст. 54 Правил, «...локализация лесного пожара достигается путем выполнения комплекса

действий, направленных на предотвращение возможности дальнейшего распространения горения путем создания минерализованных полос противопожарных барьеров и (или) полностью потушенных участков кромки по всему периметру пожара и создания условий для его ликвидации имеющимися силами и средствами пожаротушения» [3].

В настоящее время остановка и тушение сильных лесных пожаров проводится с широким привлечением лесопожарных самолетов и вертолетов с водосливными устройствами. Наиболее используемыми при тушении верховых пожаров являются противопожарные самолеты Ил-76ТП и Ан-26П (42 и 4 т огнетушащего вещества соответственно), хотя их применение не всегда сопровождается достижением должного эффекта. Так, при сливе воды с самолета Ил-76 ТП на высоте полёта 60–80 м при скорости 270–280 км/ч значительная часть жидкости теряется в воздухе из-за дробления, испарения и сноса, а на земле остается смоченная полоса с дозировкой воды в центральной части порядка 1–2 л/м², что может задержать продвижение кромки слабого низового пожара на 10–15 мин, но затем горение продолжается. Время возвращения на аэродром, заправка баков жидкостью и возвращение к пожару занимают у самолета 3–6 ч, в связи с чем эффект тушения пропадает [4].

Самолет-амфибия Бе-200 (до 12 т воды) может полностью потушить кромку пожара лишь в том случае, если интервал между сливами не будет превышать 10–15 мин. Поэтому применение самолетов-танкеров следует рассматривать не как способ тушения пожаров, а как средство сдерживания их распространения до подхода наземных пожарных команд. Эффективность тушения развившегося верхового пожара может быть достигнута при непрерывных сбросах воды, а это, в свою очередь, требует привлечения значительного количества воздушных судов, обеспечивающих необходимую расчетную интенсивность подачи огнетушащих веществ и организацию защитных барьеров перед фронтом распространения пожара. Применение вертолетов Ми-8 и Ми-26, оборудованных водосливными устройствами ВСУ-5 и ВСУ-15, показало более высокую эффективность тушения лесных пожаров на небольших площадях и в труднодоступной лесистой местности, где применение наземных сил и средств подразделений Государственной противопожарной службы не представляется возможным. Окончательная локализация и дотушивание крупных лесных пожаров проводится наземными силами и средствами.

Анализ практики применения для тушения лесных пожаров авиационных сливных систем пожаротушения, основанных на распылении огнегасящих составов или воды над очагом пожара, показывает,

что у них коэффициент полезного использования огнегасящего состава чрезмерно мал (от 3 до 5%). Низкая эффективность традиционных авиационных сливных средств пожаротушения обусловлена экранированием зоны пожара высокоскоростным восходящим конвективным потоком горячего воздуха с образованием вихревых структур над зоной максимального тепловыделения, что способствует выносу основной массы воды за пределы пожара и ее испарению. В результате в зону огня попадает незначительное количество сбрасываемой жидкости и не обеспечивается необходимая точность группирования центров падения водяных масс по отношению к местоположению очага пожара (рис. 1).



Рис. 1. Использование традиционных сливных систем

Fig. 1. The use of traditional discharging systems

Вместе с тем теоретические расчеты и экспериментальная отработка показали, что устранение указанных недостатков возможно путем применения взрывного способа диспергирования огнегасящих составов (ОС) в противопожарном комплексе стабилизированных неуправляемых авиационных средств пожаротушения, функционирующих по схеме авиабомб (рис. 2).

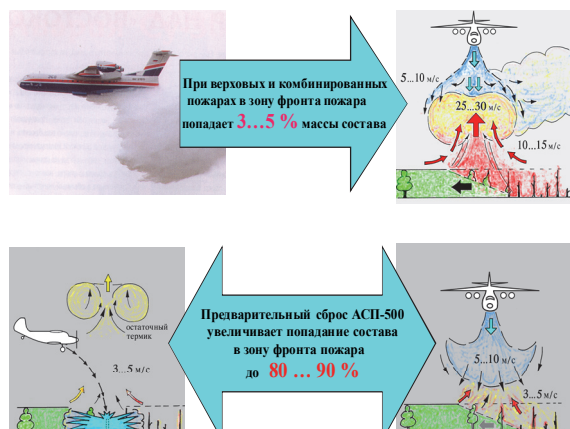
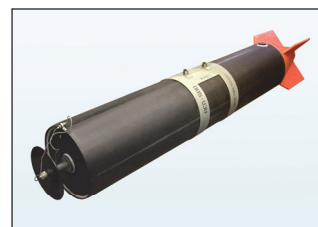


Рис. 2. Совместное применение АСП-500 и традиционных сливных систем

Fig. 2. Combined use of ASP-500 and traditional discharging systems

С целью расширения возможностей и повышения эффективности методов борьбы с пожарами АО «НПО «Базальт» в рамках инициативной ОКР «Аэрозоль» разработало опытный образец авиационного средства пожаротушения калибра 500 кг – АСП-500. Изделие предназначено для тушения и локализации лесных пожаров и подавления зон огневого шторма при техногенных авариях и катастрофах (рис. 3).



Длина, мм	3295
Диаметр, мм	500
Масса, кг	525
Объем под наполнение, л	400
Режимы применения :	
- высота, м	300 ... 1000
- скорость, км/час	до 500
Площадь пожаротушения, кв. м	до 1000

Рис. 3. Основные тактико-технические характеристики АСП-500

Fig. 3. Main tactical and technical characteristics of ASP-500

АСП-500 состоит из следующих основных узлов: корпуса с подвесной системой, огнегасящего состава, коммутирующего механизма, диспергирующего устройства, устройства запуска и устройства сброса подвесной системы. АСП-500 при сбросе его с авиационных носителей, оборудованных балочными держателями грузов 3 группы и электрической системой управления устройством запуска, работает в следующей последовательности (рис. 4):

- при отделении АСП-500 от балочного держателя через заданный промежуток времени срабатывает устройство сброса подвесной системы, которая отделяется от корпуса АСП-500 и продолжает движение за пределами корпуса;

- при встрече АСП-500 с преградой срабатывает устройство запуска, детонационный импульс которого напрямую или через передаточный заряд задействует диспергирующее устройство;

- при срабатывании диспергирующего устройства происходит разрушение корпуса АСП-500 и образование из огнегасящего состава аэрозольного облака, которое охлаждает и изолирует горящий материал, прекращая пиролиз и прогрев окружающей среды.

АСП-500 обеспечивает стопроцентную доставку массы огнегасящего состава (более 400 л) и его диспергирование непосредственно в очаге пожара с подавлением огня на площади порядка 1000 м², при этом образуется аэродисперсное облако радиусом до 18 м, высотой 4,5–6 м. Кроме того, взрывной способ диспергирования огнегасящего состава создает дополнительный фактор пожаротушения – воздушную ударную волну и скоростной напор потока смеси воздуха и частиц состава.



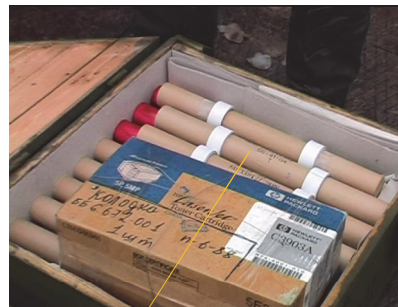
Корпус с огнетушащим составом



Коммутирующий механизм; устройство запуска



Подвесная система и устройство ее сброса



Диспергирующее устройство (шашки ВВ)

Рис. 4. Составные части АСП-500

Fig. 4. Components of ASP-500

Применение АСП-500 позволяет решить проблему пожаротушения без привлечения в зону огня дополнительного числа людей и спецтехники.

При применении АСП-500 проблема обеспечения безопасности решается как конструктивным путем за счет практического устранения опасного осколочного и фугасного воздействия, так и за счет системы организационных мероприятий, регламентирующих порядок применения сбрасываемых средств.

Особенностью АСП-500 является изготовление корпуса и стабилизатора из термопластичного полимерного материала и вывод металлического узла подвески из области взрывного метания огнетушащего состава (см. рис. 4, пояснения о конструкции).

Применение АСП-500 наиболее эффективно при использовании в труднодоступных местах, зонах с интенсивным выделением вредных продуктов горения, а также в зонах радиоактивного и химического заражения местности и позволяет исключить или существенно сократить прямой контакт пожарных с вредными продуктами горения техногенных зон и леса.

АСП-500 обеспечивает применение при температурах окружающего воздуха в районах взлета самолета (вертолета) и очага возгорания от -5° до $+50^{\circ}$ C в любых метеоусловиях.

Конструкция АСП-500 обеспечивает его снаряжение огнетушащим составом, передаточным и диспергирующими зарядами как в полевых, так и в заводских условиях.

При комбинированном использовании АСП-500 и систем непосредственного сброса жидкости с самолета (вертолета) может быть достигнута наибольшая эффективность системы авиационного пожаротушения.

Предприятием проведены следующие работы: эскизное проектирование, разработана рабочая конструкторская документация (РКД) на опытный образец АСП-500, осуществлена предварительная отработка с проведением наземных испытаний опытного образца АСП-500 на динамическую, статическую прочность и безопасность (рис. 5).

Проведена экспериментально-заводская отработка с проведением наземных испытаний полномасштабных макетов на функционирование и эффективность действия по тушению модельных очагов лесного пожара и фрагментов лесного массива (рис. 6, 7) [5].

Также проведена экспериментально-заводская отработка с проведением наземных испытаний полномасштабных макетов на функционирование и эффективность группового воздействия по тушению модельных очагов лесного пожара и фрагментов лесного массива (рис. 8, 9) [5].

Выполнено согласование размещения и режимов применения АСП-500 для вертолетов типа Ми-8МТ, Ми-24В (П, ВП), КА-32 и самолетов типа Су-25, а также проведены предварительные летные испытания опытного образца АСП-500 на безотказность действия на самолете Су-25 (рис. 10, 11).



Рис. 5. Испытания АСП-500 на функционирование и эффективность тушения низового пожара

Fig. 5. ASP-500 functioning and effectiveness of ground fire extinguishing test



Рис. 6. Модельный очаг сильного пожара

Fig. 6. Model source of a severe fire



Рис. 7. Испытания АСП-500 при тушении модельных очагов сильного пожара

Fig. 7. Testing ASP-500 during extinguishing of model sources of severe fire



Рис. 8. Тушение низового лесного пожара при групповом воздействии АСП-500

Fig. 8. Extinguishing of ground forest fire under group influence of ASP-500

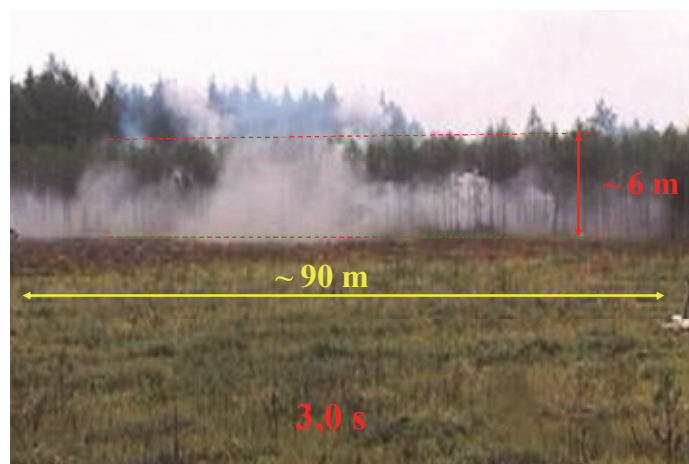


Рис. 9. Результат группового воздействия АСП-500 на фрагмент горящего леса

Fig. 9. The result of ASP-500 group exposure to an area of a burning forest



Рис. 10. АСП-500 под самолетом

Fig. 10. ASP-500 under the aircraft



Рис. 11. Сброс АСП-500 с самолета СУ-25

Fig. 11. Dropping ASP-500 from an SU-25 aircraft



Рис. 12. Испытания эффективности АСП-500 по программе, согласованной с ФГУП ВНИИПО МЧС России

Fig. 12. Testing the effectiveness of ASP-500 according to the program agreed by the All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters

Проведено патентование способа пожаротушения и конструкции АСП-500, получены патенты России, Австралии, США, Канады и Кореи.

Совместно с ФГУП ВНИИПО МЧС России были проведены стационарные испытания АСП-500 (рис. 12). Испытания проводились согласно «Программе испытаний авиационного средства пожаротушения АСП-500 с целью определения эффективности применения данного изделия в целях пожаротушения», разработанной ФГУП ВНИИПО МЧС России совместно с ФГУП «ГНПП «Базальт»».

По результатам проведенных испытаний ФГУП ВНИИПО МЧС России выдало Заключение № 0370/2.3-2011, в котором отмечено следующее:

«...авиационное средство пожаротушения АСП-500 может быть использовано в целях пожаротушения.

Наибольшая эффективность пожаротушения обширных зон пожара может быть достигнута при комбинированном использовании АСП-500 и систем непосредственного сброса жидкости с самолета (вертолета) – применение АСП-500 в качестве “первого удара” для подавления интенсивных зон горения позволит увеличить эффективность последующего применения традиционных сливных систем.

Для полной оценки эффективности целесообразно провести испытания с использованием авиационной техники на реальном лесном пожаре».

При взрывном способе диспергирования огнегасящих составов под воздействием взрывной волны возможен разлет горящих фрагментов, находящихся в зоне очага горения. Вместе с тем движение горящих материалов происходит в образовавшемся после взрыва аэрозольном облаке из огнегасящего состава, который подавляет горение. При проведении испытаний АСП-500 на функционирование и эффективность тушения модельных очагов лесного пожара и участков лесного массива горящих элементов горючих материалов, разлетевшихся после взрыва, и вызванных ими повторных возгораний не зафиксировано.

К проблемам можно отнести:

– отсутствие у потенциальных заказчиков (МЧС России, ФБУ «Авиалесоохрана») авиационных носителей, оборудованных балочными держателями грузов 3-й группы и электрической системой управления устройством запуска;

– у воинских частей, располагающих необходимыми летательными аппаратами, нет задач по тушению лесных пожаров;

– в настоящее время подразделениям ФБУ «Авиалесоохрана» разрешено при работе использовать взрывчатые вещества. Однако наличие в составе АСП-500 взрывчатых веществ создает для пожарных определенные трудности при организации его хранения, перевозки и применения;

– отсутствие опыта и практики применения АСП-500.

В перспективе при наличии заинтересованности возможна доработка (адаптация) изделия для носителей заказчика. Также возможна разработка номенклатурного ряда изделий различной массы и назначения.

Использование АСП-500 в комплексе со сливными авиационными системами обеспечит лучшие показатели производительности и экономической эффективности. Применение АСП-500 может стать качественным дополнением к действующей системе охраны и защиты лесов Российской Федерации, особенно на удаленных и труднодоступных территориях, а в борьбе с огнем на заминированных, зараженных вредными химическими веществами и других опасных территориях без привлечения людей.

Кроме того, проведенное изучение возможных зарубежных рынков показало, что АСП-500 имеет значительный экспортный потенциал. Так, до начала проведения специальной военной операции в приобретении и проведении совместных работ по модернизации АСП-500 выражали заинтересованность пожарные структуры Австралии, Болгарии, Греции, Китая, США, Турции, Южной Кореи и других стран. В настоящее время в соответствии с полученными рекомендациями проводятся мероприятия по подготовке проведения испытаний АСП-500 на реальном лесном пожаре.

Список источников

1. Коришунов Н.В., Савченкова В.А., Перминов А.В., Конюшенков М.Е. Перспективные направления применения беспилотных авиационных систем в лесном комплексе // Лесохозяйственная информация. 2022. № 2. С. 34–46. doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.03
2. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12. 2006 г. № 200-ФЗ.
3. Приказ Минприроды России от 01.04.2022 г. № 244 «Об утверждении Правил тушения лесных пожаров».
4. Родин С.А., Рябинков А.П. Пирологические исследования в лесах Российской Федерации. Пушкино : ВНИИЛМ, 2019. 205 с.
5. Предварительный отчет по отработке авиационного средства пожаротушения АСП-500 (шифр «Аэрозоль»). М. : ФГУП «ГНПП»Базальт», 2003. С. 155.

References

1. Korshunov, N.V., Savchenkova, V.A., Perminov, A.V. & Konyushenkov, M.E. (2022) Promising Areas of Application of Unmanned Aircraft Systems in the Forest Complex. *Forestry information*. 2. pp. 34–46. (In Russian). doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.03
2. *Lesnoi kodeks Rossiiskoi Federatsii* ot 04.12. 2006 g. № 200-FZ [Forest Code of the Russian Federation dated 04.12. 2006 No. 200-FZ].
3. *Priraz Minprirody Rossii* ot 01.04.2022 g. № 244 *Ob utverzhdenii Pravil tusheniia lesnykh pozharov* [Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated April 1, 2022 No. 244 On approval of the Rules for extinguishing forest fires].
4. Rodin, S.A. & Ryabinkov, A.P. (2019) *Pirologicheskie issledovaniia v lesakh Rossiiskoi Federatsii* [Pyrological studies in forests of the Russian Federation]. Pushkino : VNIILM.
5. *Predvaritel'nyi otchet po otrabotke aviatsionnogo sredstva pozharotusheniia ASP-500 (shifr "Aerosol")* [Preliminary report on testing of the ASP-500 aircraft fire extinguishing agent (code "Aerosol")]. Moscow : FSUE "GNPP "Basalt".

Информация об авторе:

Озеряков Сергей Васильевич – советник генерального директора Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Базальт»» ГК «Ростех» (Москва, Россия). E-mail: ozzyakov@yandex.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Ozeryakov Sergey V., General Director's Advisor, JSC "Research and Production Association "Bazalt" of the State Corporation "Rostec" (Moscow, Russian Federation). E-mail: ozzyakov@yandex.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

Научная статья
УДК 614.84
doi: 10.17223/29491665/5/7

Природные (лесные, степные, торфяные) пожары: прогноз, обнаружение, тушение

Егор Леонидович Лобода^{1, 2}

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

^{1, 2} loboda@mail.tsu.ru

Аннотация. В статье приведен обзор текущего состояния исследований в области природных пожаров. Дан обзор и анализ существующих и применяемых методик прогноза пожарной опасности, способов обнаружения удаленных природных пожаров и борьбы с ними. Приведено краткое описание ключевых результатов исследований природных пожаров в Томском государственном университете и перспективы их применения. Сформулированы основные требования к системам прогноза пожарной опасности, мониторинга природных пожаров и их тушения.

Ключевые слова: природные пожары, лесные пожары, степные пожары, прогноз пожарной опасности, обнаружение пожаров, тушение пожаров

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Для цитирования: Лобода Е.Л. Природные (лесные, степные, торфяные) пожары: прогноз, обнаружение, тушение // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 51–63. doi: 10.17223/29491665/5/7

Original article
doi: 10.17223/29491665/5/7

Wildland (forest, steppe, peat) fires: forecast, detection, extinguishing

Egor L. Loboda^{1, 2}

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

^{1, 2} loboda@mail.tsu.ru

Abstract. This article provides an overview of the current state of wildfire research. A review and analysis of existing and applied methods for predicting fire danger, methods for detecting remote wildfires and combating them are given. A brief description of the key results of wildland fire research at Tomsk State University and the prospects for their application are given. The basic requirements for systems for fire danger forecasting, monitoring of wildland fires and their extinguishing are formulated.

Keywords: wildland fires, forest fires, steppe fires, fire danger forecast, fire detection, fire extinguishing

Acknowledgments: The research was carried out with the support of the Development Program of Tomsk State University (Priority 2030) and within the framework of the state assignment of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

For citation: Loboda, E.L. (2024) Wildland (forest, steppe, peat) fires: forecast, detection, extinguishing. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 51–63. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/7

Введение

Природные пожары сопровождают человека на протяжении всей истории. Начиная с XX в. и по настоящее время с расширением хозяйственной деятельности человека природные пожары являются одной из самых крупных природных катастроф, кото-

рые влекут за собой большие неблагоприятные последствия (загрязнение воздуха, уничтожение экосистем и биоразнообразия, деградацию лесов и экономические потери).

В Томском государственном университете (ТГУ) с 1977 г. сформировалась научная школа в области лесных пожаров, основателем которой является

А.М. Гришин [1], получивший всемирную известность как создатель теории лесных пожаров [2].

В настоящее время последствия природных пожаров могут приводить к возникновению ЧС. Проблеме природных пожаров уделяется внимание государственной власти и Президента РФ В.В. Путина, что вылилось в ряд поручений соответствующим ведомствам. Следует отметить, что прогнозируемое рядом ученых и организаций глобальное изменение климата может привести к увеличению частоты лесных пожаров и повышению длительности пожароопасного сезона, следствием чего неизбежен рост числа крупных и катастрофических пожаров, расширению территорий, подверженных их распространению и долгосрочной деградации лесорастительных условий [3]. Это оказывает влияние на радиационный фон, облачность, качество воздуха и климат в региональном и глобальном масштабах [4–6].

Среди основных причин возникновения природных пожаров следует выделить две группы: природные (грозы, сухие грозы, самовоспламенение) и антропогенные (неосторожное обращение с огнем, хозяйственная деятельность человека, объекты повышенной опасности, новые антропогенные источники). Следует отметить, что с началом СВО зафиксировано появление «новых» антропогенных источников природных пожаров, к которым следует отнести диверсионные действия с целью поджога и нанесения ущерба или создания угрозы для работы особо важных объектов, а также падение БПЛА с боеприпасами в результате работы средств РЭБ и ПВО. В качестве основных последствий масштабных природных пожаров следует выделить: значительный материальный ущерб, уничтожение биогеоценозов, изменение ландшафта и климата, угрозу жизни и здоровью населения, угрозу уничтожения населенных пунктов, а также угрозу опасным, критически важным и особо охраняемым объектам.

Снижение риска пожарной опасности и минимизация последствий природных пожаров возможны только за счет комплексного подхода, а именно реализации совокупности мероприятий: предупреждение, прогноз, обнаружение и тушение.

В данной работе представлены краткий обзор существующих и применяемых методик прогноза пожарной опасности, обнаружения пожаров и способов борьбы с ними, а также основные научные результаты в областях прогноза, обнаружения и разработки новых способов тушения природных пожаров, полученные в ТГУ за период с 1977 г. по настоящее время.

Прогноз пожарной опасности

Среди зарубежных методик прогноза пожарной опасности наибольшую известность получили Канадская система прогноза пожарной опасности [7] и

Национальная система расчета пожарной опасности США [8]. Обе методики построены на основе анализа огромного количества статистических данных, по которым были составлены таблицы зависимости пожарной опасности от различных факторов [9], но в силу большего климатического и природного разнообразия в американской системе прогноза пожарной опасности все многообразие растительных горючих материалов (РГМ) разделено на 9 типичных моделей. В системе предполагается отдельно охраняемую территорию делить на однородные в физико-географическом отношении части, каждую из которых можно было бы приравнять к одной из 9 моделей. При этом для каждой отдельно взятой площади строится оценка пожарной опасности. При построении оценки пожарной опасности используется огромное количество таблиц и поправок, полученных на основе эмпирических данных. Согласно [10], система дает большую информацию и разносторонне характеризует явление на основе наиболее полного учета большинства важнейших факторов возникновения и распространения лесных пожаров. В частности, она учитывает состояние почвенных РГМ и их восприимчивость к источникам огня. Показатель частоты возникновения пожаров указывает на вероятность пожаров на охраняемой территории в прогнозируемый период с учетом воспламеняемости и появления источников огня. Характеристика распространения пожара вместе с показателем высвобождения энергии дает представление об условиях локализации отдельных пожаров. Наконец, показатель пожарной нагрузки сигнализирует об уровне объема работ по ликвидации пожаров на всей территории, на которой дается прогноз. Применение системы возможно и за пределами США в сходных по климату и растительности условиях. К числу недостатков системы, согласно [10], можно отнести слишком грубое расчленение растительности на 9 категорий. Выражение показателей пожарной опасности в безразмерных величинах воспринимается субъективно, что может повлечь за собой различные решения работников охраны лесов при сходных ситуациях. Использование безразмерных показателей излишне усложнено тем, что они построены на шкалах различной дробности (стобалльные, двенадцатибалльные, пятибалльные). Для некоторых моделей стобалльная шкала использована лишь частично, менее 80%. На рис. 1 представлена логическая схема Национальной системы расчета пожарной опасности США [10].

Следует отметить, что канадская и американская методики очень похожи друг на друга в своей структуре, в подходах и принципах построения индекса пожарной опасности.

Поэтому обе они обладают схожими как достоинствами, так и недостатками. Например, не решен вопрос утренних прогнозов для наступающего дня и вопрос распределения вероятностей возникновения пожаров по охраняемой территории. Кроме того, отсут-

ствие физически содержательного смысла ряда постоянных ограничивает диапазон варьирования значений входных параметров и применения промежуточных и конечных результатов этих методик при других начальных условиях.



Рис. 1. Логическая схема Национальной системы расчета пожарной опасности в лесах США [10]

Fig. 1. Logical diagram of the National Fire Danger Rating System in US forests [10]

В настоящее время в РФ для прогноза пожарной опасности МЧС РФ использует комплексный метеорологический показатель (КМП), или Индекс горимости В.Г. Нестерова:

$$\Gamma_j = \Gamma_{j-1} \xi_j + T_j(T_j - T_{pj}), \quad (1)$$

где Γ_j – комплексный метеорологический показатель пожарной опасности, размерность которого K^2 ; T_j , T_{pj} – температуры воздуха и точки росы в 13–15 ч местного времени для текущего дня в К; ξ – коэффициент учета осадков, который равен нулю, если сумма осадков за прошедшие сутки $f_j > 3$ мм, или 1, если $f_j < 3$ мм; индекс j соответствует текущему дню пожароопасного сезона [11, 12]. Как показали исследования [13], вероятность возникновения лесного пожара и его интенсивность возрастают с увеличением комплексного показателя Γ_j . Класс пожарной опасности (КПО) определяется по величине Γ_j :

- I КПО – пожарная опасность отсутствует ($0 < \Gamma_j < 300$);
- II КПО – малая пожарная опасность ($301 < \Gamma_j < 1000$);
- III КПО – средняя пожарная опасность ($1001 < \Gamma_j < 4000$);
- IV КПО – высокая пожарная опасность ($4001 < \Gamma_j < 10000$);
- V КПО – чрезвычайная пожарная опасность ($\Gamma_j > 10001$).

В методике прогноза лесной пожарной опасности, основанной на вычислении индекса горимости В.Г. Нестерова [11, 12], не учитываются реальные физические процессы, происходящие в слое лесных горючих материалов (ЛГМ), такие как действие ветра и солнечного излучения, тепломассоперенос в слое, процессы испарения и конденсации воды и пр. Единственная физическая величина, которая встречается в методике, это точка росы. Подробный анализ достоинств и недостатков индекса горимости Нестерова приводится в работе [14].

Определяющее влияние на возникновение лесных пожаров оказывают влагосодержание лесных горючих материалов (ЛГМ) и их гигроскопические и пирохимические свойства (горимость) [15, 16]. Если выполняется неравенство

$$w > w_1^*, w > w_2^*, \quad (2)$$

где w – влагосодержание ЛГМ, w_1^* – критическое влагосодержание ЛГМ при воспламенении, а w_2^* – критическое влагосодержание при распространении пожара, то лесной пожар не возникает и не распространяется вследствие повышенного влагосодержания. Известно [15, 16], что w_1^* для воспламенения ЛГМ и w_2^* для распространения фронта лесного пожара имеют разные значения. Кроме того, они для различных типов ЛГМ отличаются друг от друга. Неравенства (2) представляют собой необходимые условия горимости напочвенного слоя ЛГМ.

В качестве попыток создать альтернативную методику прогноза пожарной опасности следует отметить методику [17], разработанную в ЛенНИИЛХ, и методики, основанные на измерении яркостной температуры ЛГМ [18, 19], разработанные в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. В [17] используются уравнения для динамики влагосодержания в слое ЛГМ и вероятностный подход, но, к сожалению, она содержит большую часть из всех тех существенных недостатков, которыми обладает методика Нестерова, а именно, в ней совершенно не используются строгий математический аппарат и методы механики многофазных сред для описания физических процессов теплопереноса в слое ЛГМ и связанных с ними процессов испарения и конденсации влаги. К недостаткам подходов [18, 19] и их развитию [20–22] следует отнести то, что радиотепловое излучение экранируется кронами деревьев и степень экранирования зависит от многих факторов, таких как плотность сомкнутости крон деревьев, влагосодержания листочков или иголок в кронах деревьев, влагосодержания остальных слоев растительного покрова, облачности и пр. [9]. Следует отметить, что в работах [18, 19] прогноз лесной пожарной опасности строится на основе эмпирических формул и полученной информации при мониторинге лесов без использования физически содержательных моделей сушки ЛГМ. Очевидно, что объединение результатов теоретических исследований ЛГМ с данными аэрокосмического мониторинга лесов позволит в будущем получить прекрасный симбиоз хорошей методики оценки пожарной опасности, аэрокосмического мониторинга лесов в виде специализированных геоинформационных систем лесной пожарной опасности [23].

Отдельно следует выделить работы, посвященные математическому моделированию сушки ЛГМ [24, 25] и применению детерминированно-вероятностных подходов [26, 27], которые проводились под руководством А.М. Гришина в ТГУ и в дальнейшем представителями его научной школы. В данных работах предложены как двумерные математические модели

в сопряженной постановке [25], учитывающие внешнее течение (ветер), так и упрощенные одномерные математические модели [24, 25] учитывающие влияние ветра, наклон земной поверхности, метеопараметры и солнечное излучение. В результате численного моделирования и анализа полученных экспериментальных данных показано, что применение упрощенных математических постановок задачи дает хорошее согласование с результатами математического моделирования в двумерной сопряженной постановке и является приемлемым упрощением для дальнейшего использования в системе прогноза пожарной опасности. Применение детерминированно-вероятностных методик в работах [26, 27] дает оценки вероятности появления источников зажигания как природного характера (грозовая активность), так и антропогенного (учет объектов хозяйственной деятельности).

Исходя из анализа совокупности физических процессов, определяющих возникновение природного пожара, и описанных выше методик и подходов к прогнозу пожарной опасности, можно сделать вывод о том, что в силу сложности объекта исследования, разнообразия растительности, рельефа, метеоусловий, грозовой активности и видов антропогенной нагрузки решение задачи прогноза пожарной опасности возможно только за счет комплексного подхода, в основе которого должно лежать математическое моделирование процессов сушки РГМ, дополненное вероятностными подходами, которые бы учитывали разнообразные источники зажигания.

Следует отметить, что обоснованность такого вывода опирается на выполнение необходимых условий возникновения природного пожара (2), при невыполнении которых невозможно возникновение и/или дальнейшее распространение пожара. Очевидно, что моделирование процессов сушки РГМ необходимо осуществлять с учетом лесотаксационных данных, рельефа, локальных метеоданных, прогноза погоды и при наличии – данных спутникового мониторинга о влажности и состоянии земной поверхности. В этой связи необходимо использование математического моделирования в связке с геоинформационными системами, сетью метеорологических станций, системами прогноза погоды и данными спутникового мониторинга.

Решение такой комплексной и разноплановой задачи невозможно внутри одного научного коллектива и требует скоординированного взаимодействия нескольких групп специалистов в разных областях: математического моделирования сушки и зажигания, вероятностного подхода к оценке источников зажигания, метеорологии, геоинформационных систем и спутникового мониторинга.

Обнаружение пожаров

Исторически обнаружение очагов пожаров осуществлялось человеком оптически с помощью наблюдателя, располагавшегося на возвышенности или специальной вышке, или случайным образом. Несмотря на простоту этого способа, следует отметить, что он обладает рядом существенных недостатков: обязательное присутствие наблюдателя, ограниченность поля зрения линией горизонта, зависимость от состояния атмосферы и погодных условий. Современные применяемые способы обнаружения пожаров не лишены этих недостатков. Применение авиации для обнаружения очагов пожаров сопряжено с затратами сил и средств и не может быть непрерывным процессом. В настоящее время применяется авиационное патрулирование с контролем «термочек», полученных по данным спутникового мониторинга. К сожалению, данный способ нельзя считать достаточно эффективным, так как данные спутникового мониторинга ограничены в возможностях состоянием атмосферы, возможностями спутниковой группировки и несовершенством алгоритмов атмосферной коррекции. Подробнее об особенностях спутникового мониторинга будет изложено ниже. Следует отметить, что важным фактором, существенно снижающим эффективность обнаружения пожаров по «термочкам», является большое количество ложных данных, вызванных насыщением принимающей аппаратуры спутника. Например, нагретая солнцем пашня или отражение солнечного излучения от поверхности крыши «избушки лесника» может привести к насыщению приемника.

В последние годы предпринимается ряд попыток создания систем наземного мониторинга природных пожаров. Известные системы наземного обнаружения либо используют непосредственно человека и не способны работать в автоматическом режиме, либо имеют радиус действия, ограниченный линией горизонта, как, например, в системе «Лесной дозор» [28] и ей подобных [29, 30]. Применение систем визуального обнаружения может быть относительно эффективно только в густонаселенных регионах, а в Сибири и на Дальнем Востоке большие территории и низкая населенность делают систему неэффективной. Кроме того, применение способов мониторинга природных пожаров в видимом или ИК-диапазонах для автоматизации требует разработки эффективных алгоритмов «машинного зрения» или «искусственного интеллекта». Поэтому остается актуальным вопрос разработки фундаментальных основ и принципов раннего загоризонтного обнаружения относительно небольших очагов природных пожаров с помощью наземных и мобильных станций.

В ТГУ в результате многолетних исследований распространения природных пожаров сформулированы новые принципы построения системы раннего обнаружения пожаров, которые основаны на обнаружении характерных признаков природных пожаров: выброс конденсированных и газообразных продуктов горения и их перенос в атмосфере (рис. 2), а также формирование индуцированной атмосферной турбулентности над очагом пожара. Принципы построения наземной автоматической системы мониторинга природных пожаров представлены в [31]. Следует отметить, что модули регистрации могут размещаться как стационарно, так и на борту БПЛА.

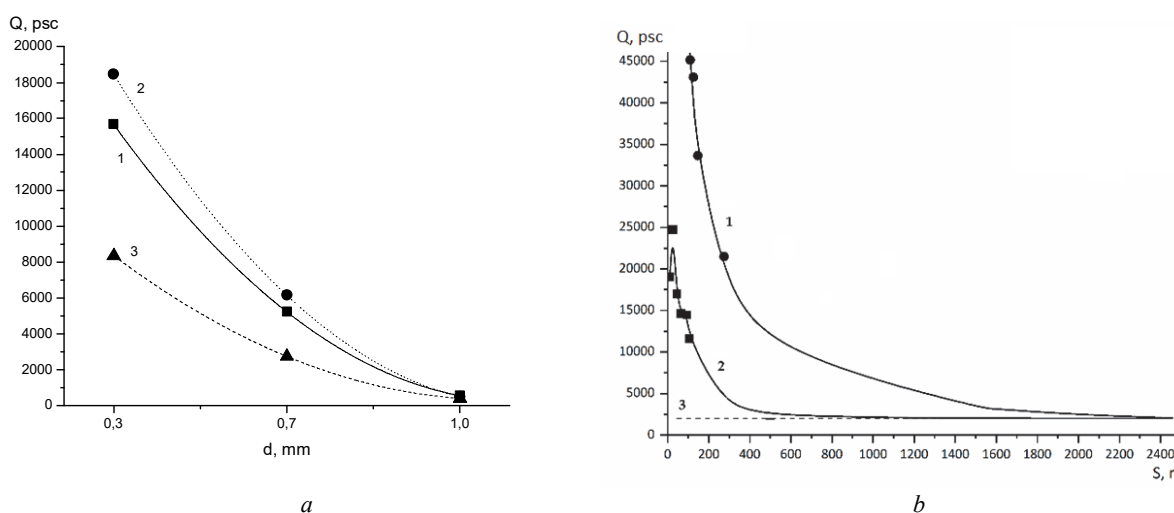


Рис. 2. Распределение конденсированных продуктов горения по размеру частиц (а) и изменение концентрации конденсированных продуктов горения на разном расстоянии от очага пожара (b) [32]

Fig. 2. Distribution of condensed combustion products by particle size (a) and changes in the concentration of condensed combustion products at different distances from the fire source (b) [32]

На рис. 2, *a* показано распределение по размеру частиц конденсированных продуктов горения, образующихся при природном пожаре на разной высоте (кривая 1 – высота 10 м, кривая 2 – высота 20 м, кривая 3 – высота 30). Очевидно, что наибольшая концентрация соответствует мелкой фракции с размером частиц меньше 0,3 мкм. На рис. 2, *b* показано снижение концентрации частиц с расстоянием от очага пожара на высотах 2 и 20 м. На рис. 2, *b* кривая 1 экстраполирует результаты измерений на высоте 20 м, кривая 2 соответствует измерениям на высоте 2 м, а кривая 3 показывает фоновые значения. На основании рис. 2, *b* можно сделать вывод, что значительное превышение концентрации конденсированных продуктов горения над фоновыми значениями обеспечит обнаружение наличия очага пожара на расстояниях до 2 км.

Данный способ мониторинга может применяться для защиты особо важных и особо охраняемых объ-

ектов. Следует отметить, что данный способ мониторинга позволяет обнаруживать не только степные, низовые и верховые лесные пожары, но и торфяные пожары, что упомянутые выше оптические способы обнаружения осуществить не смогут.

Индукцированная атмосферная турбулентность, возникающая в окрестностях очага пожара, приводит к существенному изменению структурной характеристики показателя преломления атмосферы [33] (рис. 3, *a*). Совместные исследования с коллегами из ИОА СО РАН показали, что при помощи турбулентного лидара возможно эффективно регистрировать очаги пожара. На примере модельного очага пожара на расстоянии 1,6 км была осуществлена регистрация изменения атмосферной турбулентности с применением турбулентного УФ-лидара [34] при горении модельного очага пожара. На рис. 3, *b* показано изменение эхосигнала при горении модельных очагов пожара размерами 1×1, 3×3, 5×5 м.

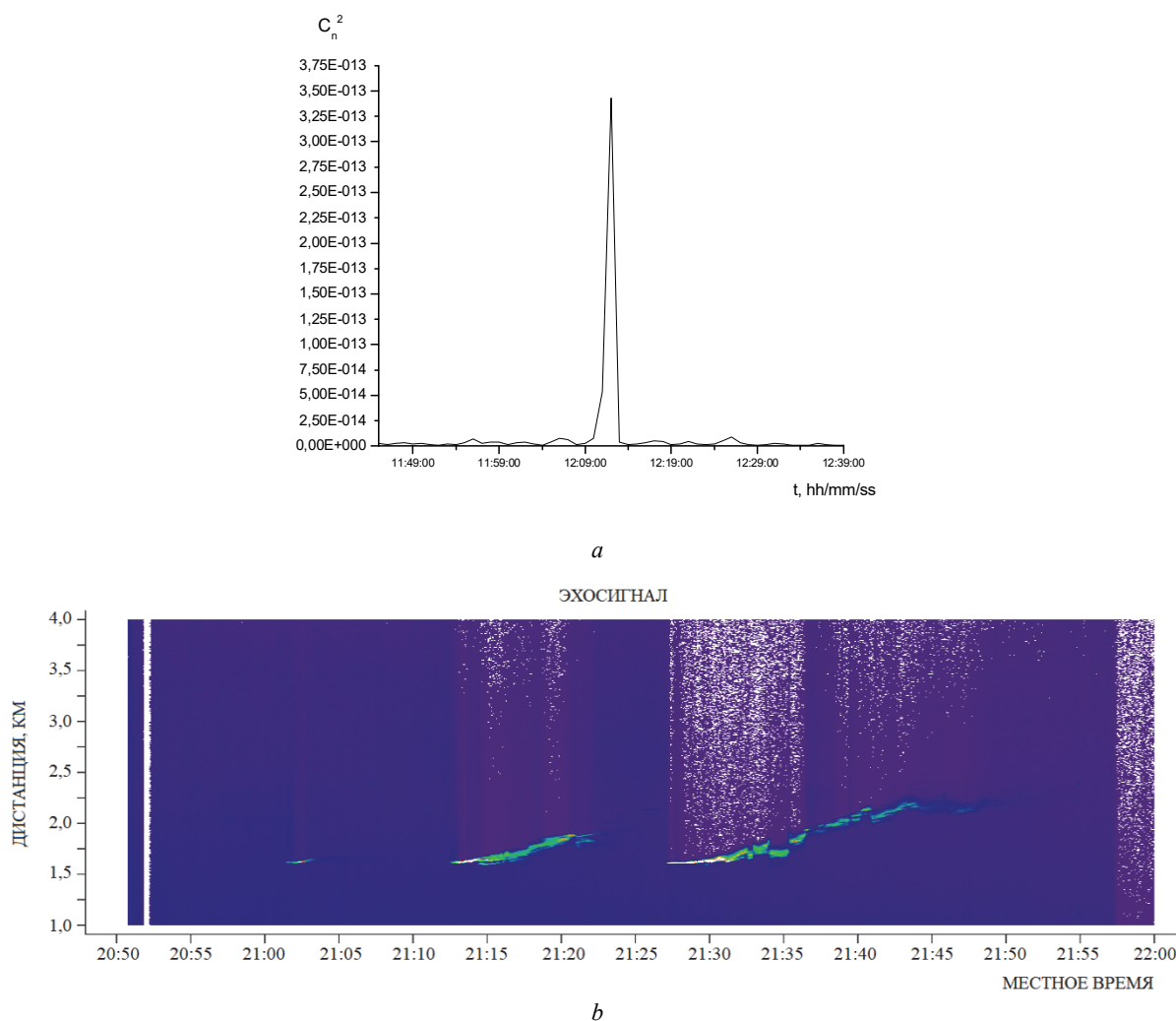


Рис. 3. Изменение структурной характеристики показателя преломления C_n^2 (*a*) [33] и изменение эхосигнала лидара при проведении трех модельных экспериментов с размерами очага пожара 1×1, 3×3, 5×5 м (*b*)

Fig. 3. Change in the structural characteristics of the refractive index of C_n^2 (*a*) [33] and change in the lidar echo signal

during three model experiments with fire source sizes of 1×1 , 3×3 , 5×5 m (b)

Из анализа рис. 3, б можно сделать вывод, что лидарный способ для обнаружения удаленных очагов пожаров можно рассматривать как перспективный способ обнаружения пожаров как со стационарных постов мониторинга, как и с помощью авиации, а исследования в этом направлении необходимо продолжить.

Отдельное внимание следует уделить вопросам спутникового мониторинга природных пожаров. Очевидно, что главным преимуществом данного способа обнаружения пожаров является наличие непрерывно действующей спутниковой группировки, которая может предоставлять данные о зондировании земной поверхности в автоматическом режиме. Следует отметить, что в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН имеются соответствующие наработки и алгоритмы, позволяющие осуществлять обнаружение очагов пожаров. Для эффективного обнаружения пожаров необходимо осуществлять обработку мультиспектральных спутниковых данных в диапазонах длин волн 3,5–4 и 8–13 мкм вне интенсивных линий

поглощения атмосферных газов, а для полноценного мониторинга требуется выполнение атмосферной коррекции, что, в свою очередь, требует развития методов спутникового мониторинга профилей температуры атмосферы, влажности, концентрации поглощающих газов, концентрации аэрозоля и построения массок облачности. В настоящий момент эффективность обнаружения очагов пожаров оставляет желать лучшего, так как вероятность обнаружения крупных очагов пожаров с площадью более 1 000 га едва превышает 70%, а вероятность обнаружения малых пожаров стремится к нулю. На рис. 4 приведена зависимость вероятности обнаружения лесного пожара от его площади [35]. В таблице на основе анализа данных о реальных пожарах в Томской области представлено сравнение эффективности алгоритмов ИОА СО РАН и информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). Следует отметить, что в ИСДМ-Рослесхоз используются спутниковые данные и алгоритмы NASA.

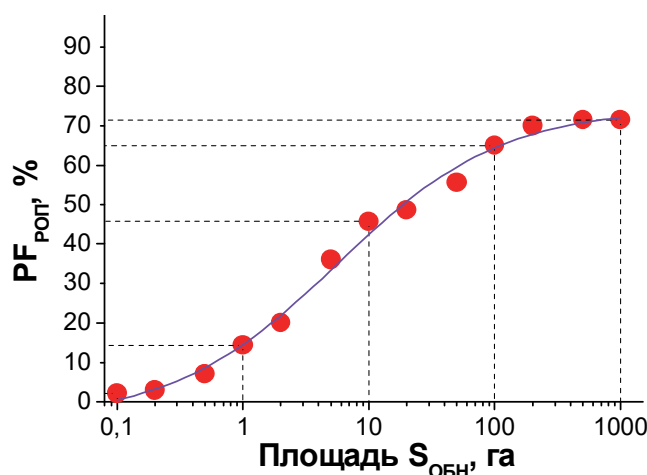


Рис. 4. Вероятность обнаружения очага лесного пожара в зависимости от его площади [35]

Fig. 4. The probability of detecting a forest fire depending on its area [35]

Сравнение результатов обнаружения пожаров с применением алгоритмов ИОА и ИСДМ-Рослесхоз [35]

Алгоритм	Количество пожаров (из них крупных пожаров – более 100 га)
Общее количество зарегистрированных очагов пожаров	455
Алгоритм ИОА	162 (86)
Алгоритм ИСДМ-Рослесхоз	120 (48)

Теория лесных пожаров и математическое моделирование лесных пожаров на кафедре физической и вычислительной механики ТГУ

Работы в области моделирования лесных пожаров были начаты в Томском государственном университете по государственному заданию под руководством А.М. Гришина в 1977 г.

В результате этих работ к началу 1990-х гг. А.М. Гришиным была сформулирована математическая теория лесных пожаров, которая была изложена в [2].

Работа [2] в 1997 г. по заказу Канадской лесной службы была переведена на английский язык и получила всемирную известность как теория лесных пожаров А.М. Гришина.

В настоящее время представителями научной школы А.М. Гришина в области математического моделирования лесных пожаров получены следующие основные результаты:

- на основе общей математической модели теории лесных пожаров [2] разработаны новые математические модели задач перехода низового лесного пожара в верховой в трехмерном (пространственном) случае, в двумерных постановках без учета (осесимметричный случай) и с учетом (плоский случай) внешнего поля ветра [36] и зажигания лесных массивов от светового излучения в результате техногенных и столкновительных катастроф с небесными телами типа Тунгусского метеорита, где учитывается турбулентность течения, двухтемпературность среды и основные физико-химические процессы (сушка и пиролиз лесных горючих материалов, химические реакции горения газообразных и догорания конденсированных продуктов пиролиза) [37, 38];

- сформулированы новые физико-математические постановки задач зажигания лесных массивов в результате техногенных и природных (столкновительных) катастроф, учитывающие воздействие светового излучения объекта на полог леса при его полете в атмосфере [37, 38];

- проведено математическое моделирование воздействий лесных пожаров на здания и сооружения с целью изучения влияния интенсивности огня и скорости ветра на возможность возгорания зданий для различных метеорологических условий и параметров строений [39];

- с помощью метода математического моделирования изучался процесс распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов и заслонов из лиственных пород деревьев различных размеров [40], установлены в динамике контуры распространения верховых лесных пожаров, которые зависят от запаса и вида лесных горючих материалов, влагосодержания, скорости и направления ветра и т.д., также определена зависимость размеров противопожарных разрывов и заслонов от вышеуказанных параметров, при которых верховой пожар прекращает распространение;

- получены результаты численного моделирования зажигания древесины в результате теплового воздействия совокупности горящих частиц.

Тушение лесных пожаров

Борьба с лесными пожарами, безусловно, требует отдельного рассмотрения. Традиционно тушение пожаров осуществляется водой силами пожарных на земле или с применением авиации. Также для локализации пожаров формируются минерализованные полосы, а для борьбы с высокоинтенсивными пожарами осуществляются встречные палы. Оба эти способа при определенных условиях (порывы ветра, наличие мелких проводников горения и др.) могут оказаться неэффективными по причине переноса горящих частиц. Благодаря этому механизму возможны перенос горящих частиц на значительные расстояния (преодоление минерализованных полос, естественных препятствий, дорог, рек, озер и пр.) и образование новых очагов пожаров, в том числе формирование пятнистых пожаров. Следует отметить, что в настоящее время ведутся активные исследования по переносу пожаров потоком горящих частиц разными научными группами в мире [41, 42] и в ТГУ [43, 44] с применением генератора горящих и тлеющих частиц [45].

Тушение удаленных пожаров часто осуществляется путем десантирования пожарных-парашютистов, что нередко сопряжено с риском для их жизни. Тушение за счет сброса воды с применением авиации часто является единственно возможным способом локализовать и потушить крупный пожар на удаленных и труднодоступных территориях. Тем не менее следует отметить, что в результате мощных конвективных потоков над очагом горения до поверхности горящих РГМ доходит лишь незначительная часть сбрасываемой воды, что существенно увеличивает затраты на тушение и снижает эффективность.

В 1980-х годах в коллективе А.М. Гришина был предложен способ тушения, заключающийся в воздействии ударных волн (УВ) на фронт лесного пожара. В работе [46] были проведены экспериментальные исследования воздействия УВ от шнурового заряда ПЖВ-20 на фронт верхового лесного пожара. Установлено [46], что в результате воздействия УВ происходит срыв проводников горения и эффективное прерывание распространения пламени (прекращение верхового лесного пожара). В результате анализа данных по изменению давления А.М. Гришиным была высказана гипотеза о детонации продуктов пиролиза в результате воздействия УВ, которую в то время с имевшимся в коллективе оборудованием доказать не представлялось возможным. В работе [47] показано с применением скоростной ИК-термографии, что в результате воздействия УВ-сжатия продуктов пиролиза происходит их воспламенение. Следует отметить, что на основе полученных результатов

в [46] было предложено несколько способов тушения пожара с применением УВ [48–50]. Параллельно разработке новых устройств для тушения пожаров проводились работы по математическому моделированию и оценке влияния УВ на срыв проводников горения в пологе леса.

Следует отметить, что применение шнуровых зарядов в 1980-х и начале 1990-х годов использовалось Авиалесоохраной для тушения крупных верховых пожаров и показывало обнадеживающие результаты. Тем не менее применение шнуровых зарядов сопряжено с необходимостью заблаговременно произвести работы по размещению заряда и своевременно обеспечить его подрыв. Кроме того, несмотря на эффективное прерывание верхового пожара, пламенный режим горения мог возобновиться в результате действия ветра, а увеличенный запас РГМ в результате срыва проводников горения способствовал возобновлению пожара.

Резюмируя написанное выше, можно сделать вывод, что все способы обладают недостаточной эффективностью. Наибольшую эффективность можно достичь только путем комбинирования различных воздействий. Например, для тушения крупных пожаров при возникновении ЧС или угрозе особо значимым и охраняемым объектам наиболее перспективным является подход в совместном применении воздействия УВ на фронт пожара с последующим охлаждением РГМ за счет сброса воды с борта летательного аппарата. В работе [51] показано, что применение УВ обеспечивает снижение расхода воды для гарантированного тушения очага горения более чем в 2 раза.

Заключение

В результате анализа существующего состояния исследований и практики по прогнозу возникновения и распространения, способам обнаружения и тушения природных пожаров в РФ можно сделать следующие выводы и предложения:

1. Необходимо разработать общероссийскую систему прогноза возникновения пожарной опасности, основанную на математическом моделировании реальных физико-химических процессов сушки и зажигания с применением детерминированно-вероятностных моделей, учитывающих грозовую активность и влияние антропогенных факторов. Данную систему необходимо интегрировать с геоинформационными системами, содержащими данные о рельефе, лесотаксационные данные и информацию о типе и запасе РГМ, а также подробные метеоданные, получаемые с сети метеостанций и данные спутникового мониторинга состояния земной поверхности.

2. На основе математического моделирования и теории лесных пожаров А.М. Гришина необходимо создать систему прогноза распространения природных пожаров с учетом реальных данных о видах растительности, их характеристиках, метеоданных, данных о рельефе, наличии объектов хозяйственной деятельности человека. Данную систему следует интегрировать с системой прогноза пожарной опасности.

3. Необходимо дальнейшее исследование процессов распространения пожаров и перехода природных пожаров на урбанизированные территории за счет механизма переноса горящих и тлеющих частиц с целью формализации и построения математических моделей, которые позволят уточнить математические модели распространения природных пожаров.

4. В ТГУ получены результаты математического моделирования возникновения лесных пожаров в результате столкновительных катастроф и входа тел в плотные слои атмосферы с гиперзвуковой скоростью. Данные математические модели необходимо использовать для прогноза пожарной опасности в результате входа космических тел в плотные слои атмосферы и различных техногенных высокоинтенсивных процессов.

5. Необходимо продолжение исследований и развитие способов раннего обнаружения очагов пожаров, основанных как на наземных средствах мониторинга, так и с применением авиации, в том числе беспилотной. Имеющиеся наработки в области раннего обнаружения природных пожаров в ТГУ следует рассматривать как способы мониторинга природных пожаров для охраны особо охраняемых объектов и территорий.

6. Современные возможности спутникового мониторинга показывают низкую эффективность для пожаров площадью менее 100 га. Для глобального мониторинга относительно крупных пожаров необходимо дальнейшее развитие спутникового мониторинга, основывающегося на развитии возможностей спутниковой группировки и развитии алгоритмов атмосферной коррекции, использующих мультиспектральные данные, и методов спутникового мониторинга профилей температуры атмосферы, влажности, концентрации поглощающих газов, концентрации аэрозоля и построения масок облачности.

7. Тушение пожаров с применением УВ для существенного повышения эффективности необходимо комбинировать с охлаждением РГМ путем сброса воды с борта летательного аппарата. Такой комбинированный подход позволяет более чем в 2 раза снизить расход воды и затраты на работу авиации для гарантированного тушения пожара. Данный подход целесообразно применять при возникновении ЧС или

защите особо важных и охраняемых объектов от крупных природных пожаров.

Список источников

1. Гришин А.М. Мой путь в науку и образовательную деятельность. Кемерово : Практика, 2009. 167 с.
2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука СО АН СССР, 1992. 407 с.
3. Kasischke E.S., Christensen N.L., Stocks B.J. Fire, Global Warming, and the Carbon Balance of Boreal Forests // *Ecological Applications*. 1995. Vol. 5 (2). P. 437–451. doi: 10.2307/1942034
4. Voulgarakis A., Field R.D. Fire Influences on Atmospheric Composition, Air Quality and Climate // *Current Pollution Reports*. 2015. Vol. 1. P. 70–81. doi: 10.1007/s40726-015-0007-z
5. Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A. Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. Vol. 28 (6). P. 566–574. doi: 10.1134/S1024856015060184
6. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Dzhola A.V. The confluence of Siberian fires on the content of carbon monoxide in the atmosphere over the European part of Russia in the summer of 2016 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. Vol. 30. P. 146–152.
7. Canadian Forest Fire Danger Rating System User's Guide.
8. Deeming I.E., Lancaster I.W., Fosberg M.A., Furman R.W., Schroeder M.H. The National Fire-Danger Rating System // *USDA Forest Service Research Paper RM-84*. February, 1972. 165 p.
9. Лобода Е.Л. Физическое и математическое моделирование природных пожаров и применение методов инфракрасной диагностики для исследования : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2012. 287 с.
10. Курбатский Н.П., Костырина Т.В. Национальная система расчета пожарной опасности США // *Обнаружение и анализ лесных пожаров*. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1977. С. 38–90.
11. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М. ; Л. : Гослесбумиздат, 1949. 76 с.
12. Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шатулина Т.А. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // *Метеорология и гидрология*. 1968. № 9. С. 102–104.
13. Вонский С.М., Жданко В.Н. Методические указания по оценке степени засушливости пожароопасных сезонов и расчету вероятности их наступления. Л. : ЛенНИИЛХ, 1967. 22 с.
14. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. Томск : Изд-во ТГУ, 1994. 218 с.
15. Курбатский Н.П. Сезонные изменения влажности хвои, листьев и веточек у основных древесных пород тайги // *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск, 1970. С. 155–185.
16. Жуковская В.И. Увлажнение и высыхание гигроскопических лесных горючих материалов // *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск, 1970. С. 105–153.
17. Телицын Г.П. Лесные пожары, их предупреждение и тушение в Хабаровском крае. Хабаровск : Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, 1988. 96 с.
18. Доррер Г.А. Модель суточной динамики влагосодержания проводников горения // *Лесные пожары и их последствия*. Красноярск : ИЛ и ДСОАН СССР, 1985. С. 110–124.
19. Валендик Э.Н., Кисляхов Е.К., Амбарников В.Н. Оценка пожарной опасности элементов лесного ландшафта по их СВЧ-излучению // *Аэрокосмические методы исследования лесов : тезисы докладов Всесоюзной конференции* (Красноярск, 7–9 июля 1984 г.). Красноярск : ИЛИД им. В.Н. Сукачева, 1984. С. 120–121.
20. Сухинин А.И., Кахун Д.Р., Стокс Б.Дж. Дистанционное зондирование лесных пожаров в Сибири с использованием информации NOAA // *Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия: материалы международной конференции*. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 123–126.
21. Сухинин А.И., Пономарев Е.И. Оценка влагосодержания лесных горючих материалов по радиационной температуре. Деп. в ВИНТИ 15.04.98 № 1144-B98.
22. Пономарев Е.И. Статистические модели динамики пожарной опасности в Красноярском крае // *Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия: материалы международной конференции*. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 121–122.
23. Курбатский Н.П. Терминология в лесной пирологии // *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1972. С. 171–231.
24. Гришин А.М., Голованов А.Н., Катаева Л.Ю., Лобода Е.Л. Постановка и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов // *Физика горения и взрыва*. 2001. Т. 37, № 1. С. 65–76.
25. Лобода Е.Л. Физико-математическое моделирование сушки и зажигания слоя лесных горючих материалов : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2002. 125 с.
26. Барановский Н.В. Оценка вероятности возникновения лесных пожаров с учетом метеоусловий, антропогенной нагрузки и грозовой активности // *Пожарная безопасность*. 2009. № 1. С. 93–99.
27. Фильков А.И. Детерминированно-вероятностная система прогноза лесной пожарной опасности : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2005. 162 с.
28. Лесной дозор. URL: <http://www.lesdozor.ru>
29. Патент № 2395319 Российская Федерация. Способ мониторинга пожарной обстановки / Резников В.М., Онищенко Ю.А., Щеголькова В.В. № 2008129952/12, заявл. 21.07.2008; опубл. 27.07.2010. Бюл. № 21. 3 с.
30. Патент 124512 Российская Федерация. Автоматизированная система мониторинга лесных и торфяных пожаров / Никитин О.Р., Породников А.В. № 2012111950/08, заявл. 27.03.2012; опубл. 27.01.2013. Бюл. № 3. 5 с.
31. Патент 2747667 Российская Федерация. Комплексная система мониторинга природных пожаров / Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Касымов Д.П., Рейно В.В. № 2020126921, заявл. 12.08.2020; опубл. 12.05.2021. Бюл. № 14. 7 с.

32. Loboda E.L., Kasymov D., Agafontsev M., Reyno V., Lutsenko A. et al. Crown Fire Modeling and Its Effect on Atmospheric Characteristics. // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. Art. no. 1982. P. 1–9. doi: 10.3390/atmos13121982
33. Лобода Е.Л., Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Рейно В.В., Гордеев Е.В., Тарканова В.А. и др. Влияние малых природных пожаров на характеристики атмосферы вблизи очага горения // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33, № 10. С. 818–823. doi: 10.15372/AOO20201011
34. Разенков И.А., Надеев А.И., Зайцев Н.Г., Гордеев Е.В. Ультрафиолетовый турбулентный лидар УОР-5 // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33, № 04. С. 289–297. doi: 10.15372/AOO20200407
35. Афонин С.В. Многофакторный физический подход к атмосферной коррекции спутниковых инфракрасных изображений земной поверхности : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2011. 285 с.
36. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания крон деревьев // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34, № 4. С. 13–22.
37. Гришин А.М., Ефимов К.Н., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов в результате космических и техногенных катастроф // *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32, № 2. С. 18–30.
38. Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32, № 5. С. 107–115.
39. Perminov V.A., Fraynova K.O., Lukianov A. Numerical Modeling of the Process of Thermal Impact of Wildfires on Buildings Located near Forests // *Materials Science Forum Scientific Journal*. 2019. Vol. 970: Modern Problems in Materials Processing, Manufacturing, Testing and Quality Assurance II. P. 82–87.
40. Perminov V.A., Marzaeva V.I. Mathematical Modeling of Crown Forest Fire Spread in the Presence of Fire Breaks and Barriers of Finite Size // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2020. Vol. 56 (3). P. 332–343. doi: 10.1134/S0010508220030107
41. Suzuki S., Manzello S.L. Ignition Vulnerabilities of Combustibles around Houses to Firebrand Showers: Further Comparison of Experiments // *Sustainability*. 2021. Vol. 13 (4). Art. No. 2136. P. 1–14. doi: 10.3390/su13042136
42. Manzello S.L., Suzuki S., Gollner M.J., Fernandez-Pello A.C. Role of Firebrand Combustion in Large Outdoor Fire Spread // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2020. Vol. 76. Art. No. 100801. P. 1–19. doi: 10.1016/j.peccs.2019.100801
43. Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Перминов В.В., Лобода Е.Л., Лобода Ю.А., Рейно В.В., Орлов К.Е. Исследование устойчивости к воспламенению строительных конструкций из древесины при тепловом воздействии потока горящих частиц // *Физика горения и взрыва*. 2023. Т. 59, № 2. С. 91–100. doi: 10.15372/FGV20230211
44. Perminov V.V., Kasymov D.P. Use of a firebrand generator in the study of wildland and anthropogenic fires // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2389. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2389/1/012014
45. Патент № 183063 Российская Федерация. Генератор горящих и тлеющих частиц / Касымов Д.П., Перминов В.В., Фильков А.И., Агафонцев А.М., Рейно В.В., Гордеев Е.В. № 2017145135, заявлено 21.12.2017; опубл. 07.09.2018. Бюл. № 25. 6 с.
46. Ковалев Ю.М. Математическое и физическое моделирование инициирования детонации в твердых взрывчатых веществах и распространение ударных волн в пологом лесу при лесных пожарах : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1987. 195 с.
47. Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Старосельцева А.А. Детонационные процессы во фронте горения растительных горючих материалов // *Пожарная безопасность*. 2023. № 1 (110). С. 27–34. doi: 10.37657/vniipro.pb.2023.110.1.002
48. Авторское свидетельство № 1147413 СССР МКИ А 62 С. Способ локализации лесных пожаров / Гришин А.М., Абалтусов В.Е., Бабаев В.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г. № 3359093/29, заявл. 01.12.1981. ВНИИГПЭ; опубл. 1985. Бюл. № 12. 3 с.
49. Авторское свидетельство № 1136811 СССР МКИ А 62 С. Способ тушения лесного пожара / Гришин А.М., Зверев В.Г., Плюхин В.В., Грузин А.Д., Бабаев В.М., Абалтусов В.Е. № 3516796/29-12, заявл. 01.12.1982; опубл. 1985. Бюл. № 4. 3 с.
50. Авторское свидетельство № 1657198 А1, А 62 С 3/02 от 22.02.1980 г. Устройство для тушения лесного пожара / Гришин А.М., Голованов А.Н., Андреев Н.А., Пряхин П.Н. № 4661158, заявл. 03.01.1989; опубл. 23.09.1991. Бюл. № 23. 2 с.
51. Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Старосельцева А.А., Рейно В.В., Хасанов И.Р., Колесников И.А., Лобода Ю.А., Базаров Д.Д. Комбинированные подходы в тушении очага горения растительных горючих материалов // *Известия вузов. Физика*. 2024. Т. 67, № 3. С. 53–60. doi: 10.17223/00213411/67/3/6

References

1. Grishin, A.M. (2009) *Moj put' v nauku i obrazovatel'nuju dejatel'nost'* [My path to science and educational activities]. Kemerovo : Praktika Publishing House.
2. Grishin, A.M. (1997). *Mathematical modeling forest fire and new methods fighting them*. Tomsk : Publishing House of Tomsk University.
3. Kasischke, E.S., Christensen, N.L. & Stocks, B.J. (1995) Fire, Global Warming, and the Carbon Balance of Boreal Forests. *Ecological Applications*. 5(2). pp. 437–451. doi: 10.2307/1942034
4. Voulgarakis, A. & Field, R.D. (2015) Fire Influences on Atmospheric Composition, Air Quality and Climate. *Current Pollution Reports*. 1. pp. 70–81. doi:10.1007/s40726-015-0007-z
5. Vinogradova, A.A., Smirnov, N.S., Korotkov, V.N. & Romanovskaya, A.A. (2015) Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 28. pp. 512–520. doi: 10.1134/S1024856015060184
6. Sitnov, S.A., Mokhov, I.I. & Dzholov, A.V. (2017) The confluence of Siberian fires on the content of carbon monoxide in the atmosphere over the European part of Russia in the summer of 2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 30. pp. 146–152.
7. Canadian Forest Fire Danger Rating System User's Guide.
8. Deeming, I.E., Lancaster, I.W., Fosberg, M.A., Furman, R.W. & Schroeder, M.H. (1972) The National Fire-Danger Rating System. USDA Forest Service Research Paper RM-84.
9. Loboda, E.L. (2012) *Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie prirodnih pozharov i primenenie metodov infrakrasnoj diagnostiki dlja issledovaniya* [Physical and mathematical modeling of natural fires and the use of infrared diagnostic methods for research]. Dr. Sc. Diss. Tomsk.

10. Kurbatsky, N.P. & Kostyrina, T.V. (1977) Natsional'naya sistema rascheta pozharnoi opasnosti SShA [US National Fire Hazard Calculation System]. In: *Obnaruzhenie i analiz lesnykh pozharov* [Detection and analysis of forest fires]. Krasnoyarsk : IliD SO AN USSR. pp. 38–90.
11. Nesterov, V.G. (1949) *Gorimost' lesa i metody ee opredeleniia* [Forest fire danger and methods for its determination]. Moscow ; Leningrad : Goslesbumizdat.
12. Nesterov, V.G., Gritsenko, M.V. & Shatulina, T.A. (1968) *Ispol'zovanie temperatury tochki rosy pri raschete pokazatel'ia gorimosti lesa* [Using dew point temperature in calculating the forest fire rate]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and Hydrology*. 9. pp. 102–104.
13. Vonsky, S.M. & Zhdanko, V.N. (1967) *Metodicheskie ukazaniia po otsenke stepeni zasushlivosti pozharoопасnykh sezonov i raschete veroiatnosti ikh nastupleniia* [Guidelines for assessing the degree of dryness of fire-dangerous seasons and calculating the probability of their occurrence]. Leningrad : LenNILH.
14. Grishin, A.M. (1994) *Fizika lesnykh pozharov* [Physics of forest fires]. Tomsk : Tomsk State University Press.
15. Kurbatsky, N.P. (1970) Sezonnye izmeneniia vlazhnosti khvoi, list'ev i vetohek u osnovnykh drevesnykh porod taigi [Seasonal changes in the humidity of needles, leaves and twigs of the main tree species of the taiga]. *Voprosy lesnoi pirologii – Questions of Forest Pyrology*. Krasnoyarsk. pp. 155–185.
16. Zhukovskaya, V.I. (1970) Uvlazhnenie i vysykhaniie gigroskopicheskikh lesnykh goriuchikh materialov [Humidification and drying of hygroscopic forest combustible materials]. *Voprosy lesnoi pirologii – Questions of Forest Pyrology*. Krasnoyarsk. pp. 105–153.
17. Telitsyn, G.P. (1988) *Lesnye pozhary, ikh preduprezhdenie i tushenie v Khabarovskom krae* [Forest fires, their prevention and extinguishing in the Khabarovsk Territory]. Khabarovsk : Far Eastern Research Institute of Forestry.
18. Dorner, G.A. (1985) *Model' sutochnoi dinamiki vlagosoderzhaniia provodnikov gorenii* [Model of daily dynamics of moisture content of combustion conductors]. In: *Lesnye pozhary i ikh posledstviia* [Forest fires and their consequences]. Krasnoyarsk : IL and DSOAN USSR. pp. 110–124.
19. Valendik, E.N., Kisilyakhov, E.K. & Ambarnikov, V.N. (1984) Otsenka pozharnoi opasnosti elementov lesnogo landshafta po ikh SVCh izlucheniui [Assessment of the fire danger of forest landscape elements based on their microwave radiation]. In: *Aerokosmicheskie metody issledovaniia lesov* [Aerospace methods for forest research] : abstracts of the All-Union Conference proceedings (Krasnoyarsk, July 7-9, 1984). Krasnoyarsk : ILiD im. V.N. Sukacheva. pp. 120–121.
20. Sukhinin, A.I., Kahun, D.R. & Stokes, B.J. (1999) Distantionnoe zondirovaniie lesnykh pozharov v Sibiri s ispol'zovaniem informatsii NOAA [Remote sensing of forest fires in Siberia using NOAA information]. In: *Pozhary v lesu i na ob'ektakh lesokhimicheskogo kompleksa: vozniknovenie, tushenie i ekologicheskie posledstviia* [Fires in the forest and at forest chemical complex facilities: occurrence, extinguishing and environmental consequences] : international conference proceedings. Tomsk : Tomsk University Press. pp. 123–126.
21. Sukhinin, A.I. & Ponomarev, E.I. (1998) *Otsenka vlagosoderzhaniia lesnykh goriuchikh materialov po radiatsionnoi temperatur* [Estimation of moisture content of forest combustible materials based on radiation temperature]. Depositing at VINITI, No. 1144-B98.
22. Ponomarev, E.I. (1999) Statisticheskie modeli dinamiki pozharnoi opasnosti v Krasnoyarskom krae [Statistical models of fire danger dynamics in the Krasnoyarsk Territory]. In: *Pozhary v lesu i na ob'ektakh lesokhimicheskogo kompleksa: vozniknovenie, tushenie i ekologicheskie posledstviia* [Fires in the forest and at forest chemical complex facilities: occurrence, extinguishing and environmental consequences] : international conference proceedings. Tomsk : Tomsk University Press. pp. 121–122.
23. Kurbatsky, N.P. (1972) Terminologiya v lesnoi pirologii [Terminology in forest pyrology]. In: *Voprosy lesnoi pirologii* [Issues of forest pyrology]. Krasnoyarsk : ILiD SO AN USSR. pp. 171–231.
24. Grishin, A.M., Golovanov, A.N., Kataeva, L.Yu. & Loboda, E.L. (2001) Postanovka i reshenie zadachi o sushke sloia lesnykh goriuchikh materialov [Statement and solution of the problem of drying a layer of forest combustible materials]. *Fizika gorenii i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 37 (1). pp. 65–76.
25. Loboda, E.L. (2002) *Fiziko-matematicheskoe modelirovaniie sushki i zazhiganiia sloia lesnykh goriuchikh materialov* [Physics and mathematical modeling of drying and ignition of a layer of forest combustible materials]. Cand. Sc. Diss. Tomsk.
26. Baranovsky, N.V. (2009) Otsenka veroiatnosti vozniknoveniia lesnykh pozharov s ucheto meteoroslovii, antropogennoi nagruzki i grozovoi aktivnosti [Assessing the probability of forest fires taking into account weather conditions, anthropogenic load and thunderstorm activity]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire Safety*. 1. pp. 93–99.
27. Filkov, A.I. (2005) *Determinirovanno-veroiatnostnaya sistema prognoza lesnoi pozharnoi opasnosti* [Deterministic-probabilistic system for forecasting forest fire danger]. Cand. Sc. Diss. Tomsk.
28. DSK, LLC. (n.a.) *Lesnoj Dozor* [Forest Watch] [Online]. Available from: <http://www.lesdozor.ru>
29. Reznikov, V.M., Onishchenko, Yu.A. & Shchegolkova, V.V. (2010) *Sposob monitoringa pozharnej obstanovki* [Method for monitoring fire conditions]. Patent No. 2395319 Russian Federation. № 2008129952/12, appl. 21.07.2008; publication date 27.07.2010, Bul. No. 21.
30. Nikitin, O.R. & Porodnikov, A.V. (2013) *Avtomatizirovannaya sistema monitoringa lesnykh i torfyanykh pozharov* [Automated system for monitoring forest and peat fires]. Patent No. 124512 Russian Federation. № 2012111950/08, appl. 27.03.2012; publication date 27.01.2013, Bul. No. 3.
31. Loboda, E.L., Agafontsev, M.V., Kasymov, D.P. & Reino, V.V. (2021) *Kompleksnaya sistema monitoringa prirodnnykh pozharov* [Integrated system for monitoring natural fires]. Patent No. 2747667 Russian Federation. № 2020126921, appl. 12.08.2020; publication date 12.05.2021, Bul. No. 14.
32. Loboda, E.L., Kasymov, D., Agafontsev, M., Reyno, V., Lutsenko, A. & et al. (2022) Crown Fire Modeling and Its Effect on Atmospheric Characteristics. *Atmosphere*. 13. Art. No. 1982. doi: 10.3390/atmos13121982
33. Loboda, E.L., Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Reinom V.V., Gordeev E.V., Tarkanov V.A. & et al. (2020) Impact of small-scale wild fires on the air parameters near burning centers. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the Atmosphere and Ocean*. 33 (10). pp. 818–823. (In Russian). doi: 10.15372/AOO20201011
34. Razenkov, I.A., Nadeev, A.I., Zaitsev, N.G. & Gordeev, E.V. (2020) Turbulent UV lidar BSE-5. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the atmosphere and ocean*. 33 (4). pp. 289–297. (In Russian). doi: 10.15372/AOO20200407

35. Afonin, S.V. (2011) *Mnogofaktorni fizicheski podkhod k atmosferno korrekcii sputnikovyykh infrakrasnykh izobrazhenii zemnoi poverkhnosti* [Multifactorial physical approach to atmospheric correction of satellite infrared images of the earth's surface]. Dr. Sc. Diss. Tomsk.
36. Grishin, A.M. & Perminov, V.A. (1998) Matematicheskoe modelirovanie zazhiganiia kron derev'ev [Mathematical modeling of tree crown ignition]. *Fizika goreniia i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 34 (4). pp. 13–22.
37. Grishin, A.M., Efimov, K.N. & Perminov, V.A. (1996) Zazhiganie lesnykh massivov v rezul'tate kosmicheskikh i tekhnogennykh katastrof [Ignition of forests as a result of space and man-made disasters]. *Fizika goreniia i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 32 (2). pp. 18–30.
38. Grishin, A.M. & Perminov, V.A. (1996) Zazhiganie lesnykh massivov pod deistviem vysotnogo istochnika luchistoi energii [Ignition of forests under the influence of a high-altitude source of radiant energy]. *Fizika goreniia i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 32 (5). pp. 107–115.
39. Perminov, V.A., Fraynova, K.O. & Lukianov, A. (2019) Numerical Modeling of the Process of Thermal Impact of Wildfires on Buildings Located near Forests. *Materials Science Forum Scientific Journal*. 970 : Modern Problems in Materials Processing, Manufacturing, Testing and Quality Assurance II. pp. 82–87.
40. Perminov, V.A. & Marzaeva, V.I. (2020) Mathematical Modeling of Crown Forest Fire Spread in the Presence of Fire Breaks and Barriers of Finite Size. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 56 (3). pp. 332–343. doi: 10.1134/S0010508220030107
41. Suzuki, S. & Manzello, S.L. (2021) Ignition Vulnerabilities of Combustibles around Houses to Firebrand Showers: Further Comparison of Experiments. *Sustainability*. 13(4). Art. No. 2136. pp. 1–14. doi: 10.3390/su13042136
42. Manzello, S.L., Suzuki, S., Gollner, M.J. & Fernandez-Pello, A.C. (2020) Role of Firebrand Combustion in Large Outdoor Fire Spread. *Progress in Energy and Combustion Science*. 76. Art. No. 100801. pp. 1–19. doi: 10.1016/j.pecs.2019.100801
43. Kasymov, D.P., Agafontsev, M.V., Perminov, V.V., Loboda, E.L., Loboda, Yu.A., Reino, V.V. & Orlov, K.E. (2023) Resistance to ignition of wood building structures under the thermal influence of flow of burning particles. *Fizika goreniia i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 59 (2). pp. 91–100. (In Russian). doi: 10.15372/FGV20230211
44. Perminov, V.V. & Kasymov, D.P. (2022) Use of a firebrand generator in the study of wildland and anthropogenic fires. *Journal of Physics: Conference Series*. 2389. pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2389/1/012014
45. Kasymov, D.P., Perminov, V.V., Filkov, A.I., Agafontsev, A.M., Reino, V.V. & Gordeev, E.V. (2018) *Generator goryashchih i tleyushchih chastic* [Generator of burning and smoldering particles]. Patent No. 183063 Russian Federation. № 2017145135, appl. 21.12.2017; publication date 07.09.2018, Bul. No. 25.
46. Kovalev, Yu.M. (1987) *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie initsirovaniia detonatsii v tverdykh vzryvchatykh veshchestvakh i rasprostranenie udarnykh voln v pologe lesa pri lesnykh pozharakh* [Mathematical and physical modeling of the initiation of detonation in solid explosives and the propagation of shock waves in the forest canopy during forest fires]. Cand. Sc. Diss. Tomsk.
47. Loboda, E.L., Agafontsev, M.V. & Staroseltseva, A.A. (2023) Detonation processes in the combustion front of plant combustible materials. *Fire Safety*. 1 (110). pp. 27–34. (In Russian). doi: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.002
48. Grishin, A.M., Abaltusov, V.E., Babaev, V.M., Gruzin, A.D. & Zverev, V.G. (1985) *Sposob lokalizatsii lesnykh pozharov* [Method of localizing forest fires]. Author's certificate No. 1147413 USSR MKI A 62 S. № 3359093/29, appl. 01.12.1981; publication date 1985, Bul. No. 12.
49. Grishin, A.M., Zverev, V.G., Plyukhin, V.V., Gruzin, A.D., Babaev, V.M. & Abaltusov, V.E. (1985) *Sposob tusheniya lesnogo pozhara* [Method of extinguishing a forest fire]. Author's certificate No. 1136811 USSR MKI A 62 S. № 3516796/29-12, appl. 01.12.1982; publication date 1985, Bul. No. 4.
50. Grishin, A.M., Golovanov, A.N., Andreev, N.A. & Pryakhin, P.N. (1991) *Ustrojstvo dlya tusheniya lesnogo pozhara* [Device for extinguishing a forest fire]. Author's certificate No. 1657198 A1, A 62 C. № 4661158, appl. 03.01.1989; publication date 23.09.1991, Bul. № 23.
51. Loboda, E.L., Agafontsev, M.V., Staroseltseva, A.A., Reyno, V.V., Khasanov I.R., Kolesnikov I.A., Loboda Yu.A. & Bazarov, D.D. (2024) A combined approach to extinguishing the source of combustion of vegetative combustible materials. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 67 (3). pp. 53–60. (In Russian). doi: 10.17223/00213411/67/3/6

Информация об авторе:

Лобода Егор Леонидович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); главный научный сотрудник Лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы СО РАН (Томск, Россия). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Loboda Egor L., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Chief Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024

The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024

Научный журнал

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

2024. № 5

Редактор К.Г. Шилько
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик Н.А. Глущенко
Дизайн обложки А.А. Аббасова

Подписано к печати 16.05.2024 г. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 8; усл. печ. л. 7,4.
Тираж 500 экз. Заказ № 5915. Цена свободная.

Дата выхода в свет 24.05.2024 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru