

УДК 614.844

<https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.002>

ДЕТОНАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ВО ФРОНТЕ ГОРЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Егор Леонидович Лобода¹, Михаил Владимирович Агафонцев¹, Ася Алексеевна Старосельцева²

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), Томск, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск, Россия

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования воздействия ударной волны на пламя при горении растительных горючих материалов. Ударная волна формировалась с помощью ударной трубы с различными насадками и источником энергии от порохового заряда. Для регистрации воздействия ударной волны на зону пиролиза применялись методы высокоскоростной ИК термографии в узкополосном диапазоне длины волны 2,5–2,7 мкм. Установлено, что при применении расширяющихся насадок в результате воздействия ударной волны на зону пиролиза происходит детонация продуктов пиролиза, которая приводит к прекращению пламенного горения.

Ключевые слова: природный пожар, ударная волна, детонация, пиролиз, ИК-термография

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.002>.

DETONATION PROCESSES IN THE COMBUSTION FRONT OF PLANT COMBUSTIBLE MATERIALS

Egor L. Loboda¹, Mikhail V. Agafontsev¹, Asya A. Staroseltseva²

¹Tomsk State University; V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAO SB RAS), Tomsk, Russia

²Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract. Much attention is currently being paid worldwide to improvement of existing and developing new effective ways to fight effectively natural fires, which occur annually in different countries and on a variety of landscapes. Given the annual increase in the number of wildfires and the often catastrophic consequences from them, it can be stated that the existing methods of firefighting are not effective enough. The methods used to extinguish large fires are usually based on the discharge of water by aircraft and the involvement of a large amount of manual labor of firefighters.

This work is devoted to the study of the issue of extinguishing a natural fire by the impact of a shock wave on the burning zone. At present, the question of the interaction of the compaction shockwave with the flame during the combustion of plant combustible materials remains practically unstudied. Existing works in the field of shock waves impact on the fire front are limited to estimates of disruption of combustion conductors and formation of mineralized band. Modern research tools and methods allow to record and visualize the rapid processes, including in the flame. In particular, modern methods of infrared thermography make it possible to study both the temperature field in the flame and the structure of flow in it.

Based on the original methods and approaches for application of high-speed infrared thermography developed at Tomsk State University, this work presents the results of an experimental study of the shock wave effect on the flame during combustion of plant flammable materials. A shock tube with different nozzles and an energy source from a gunpowder charge were used to form the shock wave. The impact of the shock wave on the pyrolysis zone was recorded in the narrow band infrared wavelength range of 2.5–2.7 μm. It has been established that the impact of the shock wave on the pyrolysis zone, when expanding nozzles are used, results in the detonation of pyrolysis products, which leads to the cessation of flame combustion and subsequent decrease in the surface temperature of plant combustibles below the autoignition temperature. This effect leads to a break in the chain of transformation and energy release during combustion. The obtained result should be considered as a fundamental basis for the development of new effective means of extinguishing large natural fires based on the impact of a shock wave.

© Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Старосельцева А.А., 2023

Keywords: wildland fire, shock waves, detonation, pyrolysis, IR thermography

For citation: Loboda E.L., Agafontsev M.V., Staroseltseva A.A. Detonation processes in the combustion front of plant combustible materials. *Pozharnaya Bezopasnost' – Fire Safety*, 2023, no. 1 (110), pp. 27–34. (In Russian). <https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.002>.

Введение

Природные пожары являются очень распространенным и чрезвычайно опасным явлением, происходящим в разных уголках земного шара практически круглогодично [1]. Часто масштабы этого явления достигают чрезвычайных размеров, а сами пожары представляют опасность для человека и населенных пунктов [2]. Борьба с крупными пожарами на лесных территориях чрезвычайно затруднена и требует значительных ресурсов, в том числе и применения специальной авиации [3, 4]. Сброс воды с применением авиации сопряжен с рядом трудностей, связанных с особенностями сброса и распыления воды в воздухе, что снижает эффективность тушения [5]. Вопрос тушения пожаров водяными аэрозолями, каплями воды и перегретым паром изучается разными научными группами [6, 7]. Тем не менее следует отметить, что в практической плоскости применение этих методов пока не дало значимых результатов.

Процесс горения при природном пожаре носит нестационарный характер и относится к классу диффузионного горения, при котором в пламени наблюдаются пульсации температуры с определенными частотами [8], связанные со структурой пламени и турбулентными процессами в нем [9]. Турбулентные процессы в пламени сопровождаются также пульсациями гидродинамических параметров (плотности и давления). В работе [10] зарегистрирован инфразвук, образующийся при горении штабелей древесины. Данный эффект позволяет предположить, что воздействия с колебаниями данной частоты в противофазе могут снижать интенсивность горения или даже полностью его подавить. Учитывая низкочастотность колебаний, устройства для такого способа борьбы с пожаром будут достаточно громоздки, и их применение в условиях реального пожара становится невозможным. Примером тушения пожара при помощи пульсаций давления может служить звуковой огнетушитель, представленный агентством перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA) и студентами университета Джорджа Мейсона [11–13]. Однако его применение в реальных условиях оказалось невозможным из-за массогабаритных характеристик устройства. Тем не менее работы по использованию звуковой энергии для борьбы с огнем проводились и в последующее время [14, 15].

Одним из направлений поиска эффективных способов борьбы с пожарами является воздействие ударных волн. Впервые такой способ был предложен проф. А.М. Гришиным. В работах его ученика Ю.М. Ковалева [16] рассматривалось воздействие ударной волны при взрыве шнурового заряда ПЖВ-20. В [16] представлены экспериментальные результаты измерения давления при распространении ударной волны в пологом леса и проводится анализ данных по срыву проводников горения и формированию минерализованной полосы. В дальнейшем эти исследования были продолжены проф. А.М. Гришиным с учениками (Н.А. Алексеев, В.И. Самойлов), что в итоге привело к разработке ряда патентов*. Дальнейшее развитие исследований в этой области в основном было направлено на моделирование воздействия ударной волны на полог леса, срыв проводников горения и формирование минерализованной полосы [17–19].

Следует отметить, что, несмотря на гипотезу профессора А.М. Гришина о детонации продуктов пиролиза при воздействии ударной волны на фронт лесного пожара и усилении воздействия ударной волны на полог леса, данный вопрос остался за пределами указанных выше работ, что связано с отсутствием соответствующего инструментария и сложностью регистрации детонации продуктов пиролиза. В данной работе экспериментально исследуется с применением методов ИК термографии воздействие ударной волны, формируемой при помощи ударной трубы небольших размеров, на очаг горения растительных горючих материалов (РГМ) и продукты пиролиза.

*А. с. 1136811 СССР, SU 1400619 А1, А 62 С 1/22. Способ тушения лесных пожаров / А.М. Гришин, Н.А. Алексеев, Н.А. Андреев (СССР). № 4160481/31-12; заявл. 08.12.86; опубл. 07.06.88, Бюл. № 21. 2 с.; А. с. 1400619 СССР, SU 1644976 А1, А 62 С 1/22. Способ тушения лесных пожаров / А.М. Гришин, Н.А. Алексеев, А.Н. Голованов (СССР). № 4644603/12; заявл. 26.12.88; опубл. 30.04.91, Бюл. № 16. С. 2; Пат. 2169596 Рос. Федерация, А 62 С 3/02. Способ тушения лесных пожаров / А.Я. Машович, А.М. Гришин, В.И. Самойлов, А.А. Ернько; заявитель и патентообладатель Восточно-Сибирский институт МВД России; опубл. 27.06.01, Бюл. № 12. С. 5.

Описание эксперимента

Для проведения экспериментов по исследованию воздействия ударных волн на фронт горения растительных горючих материалов применялась экспериментальная установка (рис. 1). В качестве горючих материалов использовалась смесь полевых растительных горючих материалов. Для формирования ударной волны применялась ударная труба. Процесс горения регистрировался видеокамерой в видимом диапазоне длин волн и ИК-камерой.

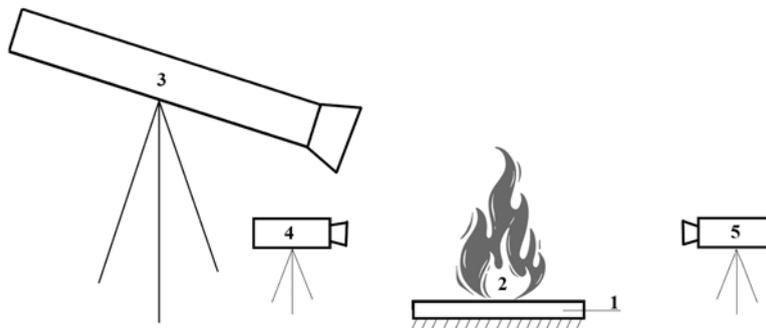


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – растительные горючие материалы; 2 – пламя; 3 – ударная труба; 4 – ИК-камера FLIRJADEJ530SB; 5 – видеокамера

Fig. 1. Scheme of the experimental installation:

1 – plant combustible materials; 2 – flame; 3 – shock tube; 4 – IR camera FLIRJADEJ530 SB; 5 – video camera

Применяемая ИК камера FLIRJADEJ530SB с узкополосным оптическим фильтром с полосой пропускания 2,5–2,7 мкм, выбор которого обусловлен спектром излучения пламени и рекомендациями [20]. Для увеличения скорости регистрации было уменьшено окно до размеров 160 x 120 пикселей. Скорость регистрации составила 690 кадров/с, время экспозиции составляло 64 мкс, оптическое расстояние от камеры до очага горения – 3 м, диапазон изменяемых температур 310...1500 °С.

Схема ударной трубы приведена на рис. 2, а. В составе ударной трубы применялся набор различных насадок с сужающимися (рис. 2, б) и расширяющимися (рис. 2, в) профилями. Угол наклона трубы относительно плоскости расположения РГМ составлял 45°.

а

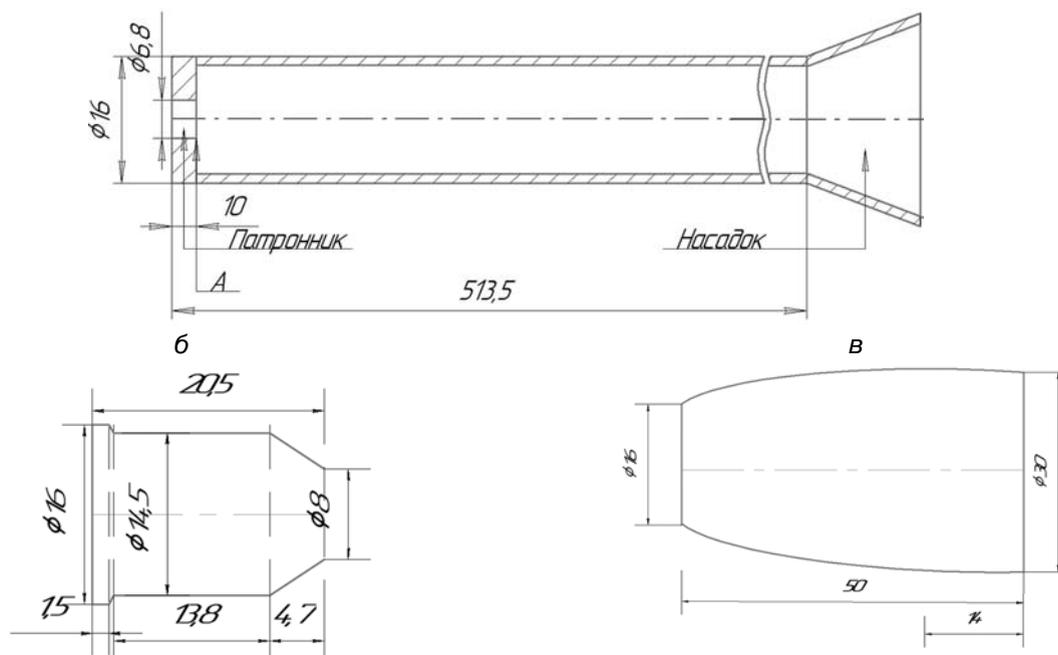


Рис. 2. Конструкция ударной трубы (а), примеры сужающегося (б) и расширяющегося (в) сопла

Fig. 2. Construction of the shock tube (a), examples of a converging (б) and expanding (в) nozzle

В качестве источника импульса в ударной трубе использовались стандартные строительномонтажные патроны типа Д3, Д4, Д5 [21] с кольцевым воспламенением заряда (см. таблицу).

Монтажные патроны

Калибр, мм	Индекс	Энергия порохового заряда, Дж	Масса пороха в патроне, г
6,8 x 10	Д3	457–574	0,31–0,32
	Д4	574–703	0,35
	Д5	703–846	0,36

На рис. 3 приведены графики изменения давления в ударной трубе в точке А (см. рис. 2) с расширяющимся насадком с выходным диаметром 40 мм для патронов типа Д3, Д4, Д5. Давление измерялось при помощи датчика ЛХ-415, сигнал которого регистрировался осциллографом АК ИП-74824А. Полоса измеряемого осциллографом напряжения составляла от -5В до +5В, параметры применяемого триггера – восходящий фронт $V_{\text{срабатывания}} = 40$ мВ. Общее время регистрации сигнала после срабатывания триггера – 500 мкс, шаг между измерениями сигнала – 0,0125 мкс, частота записи 40 кГц. На рис. 3 видно, что с ростом энергии порохового заряда наблюдается повышение давления в интервале времени 0–50 мкс, обусловленного сгоранием пороха, и в последующие моменты времени вследствие отражения первичного скачка давления от стенок трубы.

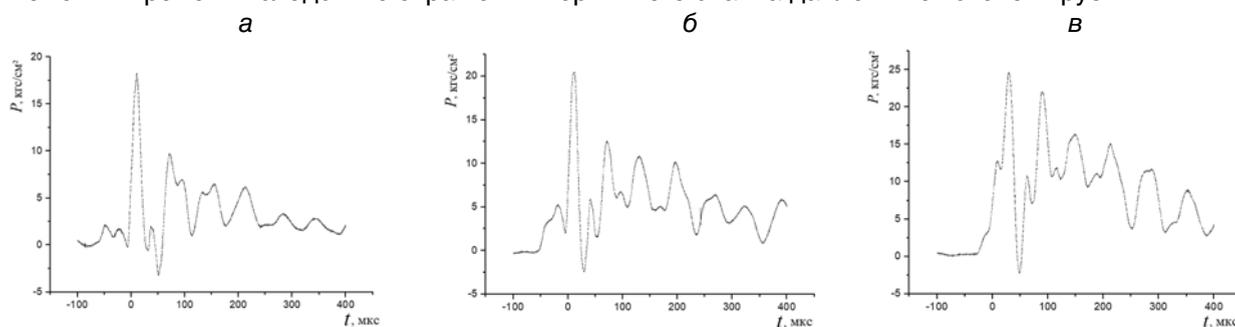


Рис. 3. Зависимость давления от времени для патронов типа Д3 (а), Д4 (б), Д5 (в)

Fig. 3. Pressure dependence on time for cartridges of type D3 (a), D4 (б), D5 (в)

На рис. 4 представлена типичная временная последовательность термограмм горения растительных горючих материалов при использовании расширяющегося сопла.

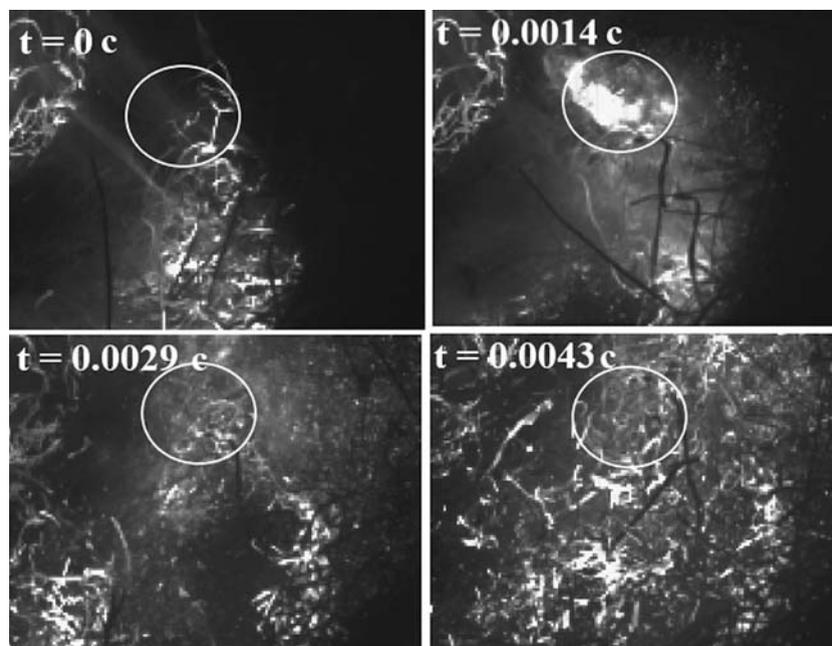


Рис. 4. Временная последовательность термограмм зоны пиролиза при горении РГМ

Fig. 4. Time sequence of thermograms of the pyrolysis zone during combustion of flammable plant materials (FVM)

На первой термограмме изображено горение растительных материалов до момента воздействия на них ударной волны. На термограмме выделена область, где в результате воздействия ударной волны происходит детонация продуктов пиролиза. В момент времени $t = 0$ в выделенной области термограммы наиболее яркие зоны – это горячие элементы горючих материалов, где происходит пиролиз и выделяются летучие горючие продукты пиролиза, которые на термограмме идентифицируются как слабоизлучающие квазиламинарные струи, они в дальнейшем вступают в окислительные реакции с воздухом, поступающим в зону горения в результате диффузионных и турбулентных процессов. На последующих термограммах видно, как РГМ воспламеняются в результате воздействия ударной волны. Следует отметить, что «время жизни» объема, где происходит горение продуктов пиролиза, составляет во всех опытах 1–3 кадра ($1,145 \cdot 10^{-3} - 4,35 \cdot 10^{-3}$ с), что на несколько порядков меньше, чем «время жизни» турбулентных структур в пламени, где происходит горение летучих материалов при обычном режиме диффузионного горения (пример таких структур и оценка их размеров в диффузионном пламени приведены в [22]). Учитывая этот факт, а также механизм воспламенения, обусловленный сжатием, можно утверждать, что на ИК изображении зафиксирован процесс детонации летучих продуктов пиролиза.

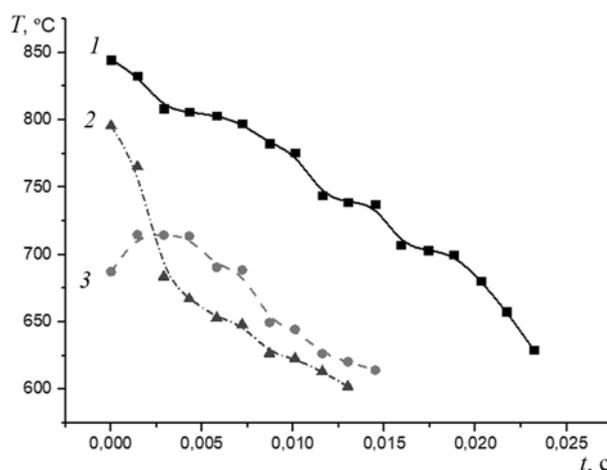
Следует отметить, что в результате детонации продуктов пиролиза наблюдалось прекращение пламенного горения, а на последующих за детонацией термограммах, несмотря на наличие горячих элементов РГМ, летучие продукты пиролиза не идентифицировались. На рис. 5 показано изменение температуры поверхности выбранных случайным образом трех элементов РГМ после воздействия ударной волны и последующего прекращения пламенного горения.

Рис. 5. Изменение температуры поверхности некоторых элементов РГМ после воздействия ударной волны:

1 – элемент РГМ № 1; 2 – элемент РГМ № 2;
3 – элемент РГМ № 3

Fig. 5. Change in the surface temperature of some FVM elements after exposure to a shock wave:

1 – FVM element № 1; 2 – FVM element № 2;
3 – FVM element № 3



Следует отметить, что температура поверхности элемента РГМ после прерывания пламенного горения ударной волной начинает снижаться и в конечном счете опускается ниже температуры самовоспламенения. Таким образом, можно утверждать, что в результате воздействия ударной волны на зону пиролиза при горении РГМ происходит детонация продуктов пиролиза, что приводит к прерыванию пламенного горения и последующему остыванию элементов РГМ ниже температуры самовоспламенения и, как следствие, происходит прекращение горения. Полученный результат был достигнут при всех рассмотренных в работе зарядах на расширяющихся соплах. В случае использования сужающихся сопел несмотря на большую полноту сгорания пороха [23] эффект детонации не достигался, а наблюдался лишь «раздув» (разброс) горящих элементов РГМ струей газов, что не приводило к прекращению пламенного горения, а вследствие разброса горящих элементов РГМ увеличивалась площадь горения.

Выводы

Из полученных экспериментальных данных следует, что в результате воздействия ударной волны на газообразные продукты пиролиза РГМ наблюдается их детонация, которая приводит к последующему прекращению пламенного горения. При этом детонация продуктов пиролиза достигается при использовании всех трех типов зарядов, т. е. даже заряда с наименьшей энергией 457–574 Дж достаточно для достижения указанного эффекта.

Необходимо отметить, что в работах [17, 24] и др. рассматривается воздействие ударной волны только как процесс, приводящий к срыву проводников горения и формированию подобия минерализованной полосы, препятствующей распространению природного пожара. Безусловно,

данное явление имеет место в случае воздействия ударной волны на природный пожар и полог леса, но ключевой эффект воздействия ударной волны, обеспечивающий эффективную борьбу с пожаром, предложенный проф. А.М. Гришиным [25], – это, в первую очередь, детонация продуктов пиролиза и прекращение пламенного горения, что в совокупности со срывом проводников горения является эффективным способом борьбы с природным пожаром. Необходимо также учитывать, что детонация продуктов пиролиза приводит к усилению воздействия ударной волны на проводники горения.

Полученные в данной работе результаты являются основанием для разработки эффективных устройств для борьбы с крупными природными пожарами, основанных на воздействии ударных волн на зону пиролиза.

Список литературы

1. *Chen Qiao, Lili Wu, Tao Chen*. Study on forest fire spreading model based on remote sensing and GIS. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/199/2/022017/pdf> (дата обращения: 20.09.2022).
2. *Peter de Jess Villa*. Place Identity and Traumatic Experiences in the Context of Wildfires / Peter de Jess Villa, Pablo Olivos, Oscar Navarro. Sustainability. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11332> (дата обращения: 09.09.2022).
3. Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров / Н.П. Копылов, И.Р. Хасанов, А. Е. Кузнецов, Д.В. Федоткин, Е.А. Москвиллин, П.А. Стрижак, В.Н. Карпов // Пожарная безопасность. 2015. № 2. С. 49–55.
4. Борьба с природными пожарами с применением авиации и перспективные способы прокладки заградительных полос / Н.П. Копылов, А.Е. Кузнецов, Д.В. Федоткин, Е.А. Москвиллин, П.А. Стрижак, Н.А. Коршунов, В.Н. Карпов // Хвойные бореальной зоны. 2016. Т. 34. № 5–6. С. 251–253.
5. Повышение эффективности тушения лесных пожаров с использованием добавок к воде / Н.П. Копылов, И.Р. Хасанов, А.Е. Кузнецов, Д.В. Федоткин, Е.А. Москвиллин, П.А. Стрижак, Н.А. Коршунов, В.Н. Карпов // Пожарная безопасность. 2015. № 4. С. 46–50.
6. *Жданова А.О., Кузнецов Г. В., Стрижак П.А.* Эффективность использования теплоты парообразования при воздействии «водяным снарядом» на пламя // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2013. № 6. С. 82–91.
7. *Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* Оценка эффективности использования теплоты испарения воды при тушении лесных пожаров // Пожаровзрывобезопасность. 2013. Т. 22. № 9. С. 57–63.
8. *Loboda E.L.* The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flames from burning vegetation. Infrared Physics & Technology, 2014, vol. 67, pp. 566–573.
9. *Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V.* Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale. Infrared Physics & Technology. 2015. vol. 72, pp. 1–7. DOI 10.1016/j.infrared.2015.07.001.
10. Экспериментальные исследования лесных пожаров, горения штабелей древесины и инфразвуковых колебаний давления / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, А.А. Долгов [и др.] // Математическое и физическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред и экологии: Избранные доклады международной конференции. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 102–124.
11. *Boffard R.* Burning issue. Engineering and Technology, 2015, vol. 10, no. 7, pp. 48–51.
12. *Lee J.I., Lee G.T.* Research of the fire to minimization damage plan on high-rise buildings, J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., 2009, vol. 23, no. 4, pp. 91–97.
13. *Yi E.-Y., Bae M.-J.* On a fire extinguisher using sound winds, Journal of Engineering and Applied Sciences, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 977–980.
14. *Yi E.-Y., Song U.-J., Bae M.-J.* A study on the performance of sound fire extinguisher by anti resonance, Journal of Engineering and Applied Sciences, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 910–913.
15. *Kim B.-Y., Song U.-K., Bae S.-G., Bae M.-J.* A Study on the Resonance Dispersion of Candlelight According to the Change of Sound Component, Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, vol. 14, no. 8, pp. 2450–2455.
16. *Ковалев Ю.М.* Математическое и физическое моделирование инициирования детонации в твердых взрывчатых веществах и распространение ударных волн в пологе леса при лесных пожарах: дис.... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05; Том. гос. ун-т им. В.В. Куйбышева; НИИ прикладной математики и механики. Томск, 1987. 195 с.
17. *Гришин, А.М. Ковалев Ю.М.* Экспериментальное исследование воздействия взрыва конденсированных ВВ на фронт верхового лесного пожара // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 308. № 5. С. 1074–1078.
18. *Лоцилов А.А., Ильичева М.Н.* Изменение массы лесных горючих материалов в результате мгновенного выделения энергии от химической реакции с нулевым кислородным балансом // Информационные системы и технологии-2019: сб. мат. XXV Междунар. науч.-техн. конф., Нижний Новгород, 19 апреля 2019 года. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 975–977.

19. Орлов О.К., Кустов Ю.В. Эластичные шнуровые заряды для борьбы с лесными пожарами // Лесные пожары и способы борьбы с ними. Л.: ЛенНИИЛХ, 1986. С. 102–108.
20. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Применение термографии при исследовании процессов горения. Томск, 2016. 80 с.
21. Патрон монтажный D-2 (Желтый) // SB URL: <https://stroy-beton.com/stroitel'naya-i-dorozhnaya-tekhnika/pistolety-patrony-i-dyubelya/patron-d2/> (дата обращения: 10.04.2022).
22. Loboda E.L., Anufriev I.S., Agafontsev M.V., Kopyev E.P., Shadrin E.Y., Reyno V.V., Vavilov V.P., Lutsenko A.V. Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV. *Infrared Physics and Technology*, 2018, vol. 92, pp. 240–43.
23. Фатеев В.Н. Физическое и математическое моделирование усиления ударных волн в ударных трубах: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05; Нац. исслед. Том. гос. ун-т. Томск, 2012. 102 с.
24. Математическое моделирование тушения лесного пожара при помощи направленного взрыва / А.А. Лошилов, М.Н. Ильичева, В.В. Иконников [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2018. № 4(123). С. 33–40. DOI 10.46960/1816-210X_2018_4_33. – EDN SNGYRV.
25. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. 408 с.

Информация об авторах

Е.Л. Лобода – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий кафедрой физической и вычислительной механики, loboda@mail.tsu.ru;

М.В. Агафонцев – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры физической и вычислительной механики, amv@mail.tsu.ru;

А.А. Старосельцева – студент, 222-pro@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 27.10.2022; одобрена после рецензирования 01.11.2022; принята к публикации 10.01.2023.

References

- Chen Qiao, Lili Wu, Tao Chen. Study on forest fire spreading model based on remote sensing and GIS. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/199/2/022017/pdf> (accessed 20.09. 2022).
- Peter de Jess Villa. Place Identity and Traumatic Experiences in the Context of Wildfires / Peter de Jess Villa, Pablo Olivos, Oscar Navarro. Sustainability. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11332> (accessed 09.09.2022).
- Kopylov N.P., Khasanov I.R., Kuznetsov A.Ye., Fedotkin D.V., Moskvilin Ye.A., Strizhak P.A., Karpov V.N. Parameters of water discharge by aircraft during forest fire extinguishing. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2015, no. 2, pp. 49-55. (In Russian).
- Kopylov N.P., Kuznetsov A.Ye., Fedotkin D.V., Moskvilin Ye.A., Strizhak P.A., Korshunov N.A., Karpov V.N. Fighting natural fires with the use of aviation and promising methods for laying barrier strips. *Khvoynyye borealnoy zony – Conifers of the boreal area*, 2016, no. 5–6, pp. 251–253. (In Russian).
- Kopylov N.P., Khasanov I.R., Kuznetsov A.Ye., Fedotkin D.V., Moskvilin Ye.A., Strizhak P.A., Karpov V.N. Increasing the effectiveness of forest fire extinguishing using water additives. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2015, no. 4, pp. 46–50. (In Russian).
- Zhdanova A.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Use of the heat of vaporization efficiency when exposed to a “water projectile” on a flame. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy – Problems of safety and emergencies*, 2013, no. 6, pp. 82–91. (In Russian).
- Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Evaluation using the efficiency the water evaporation heat in extinguishing forest fires. *Pozharovzryvbezopasnost' – Fire and Explosion Safety*, 2013, no. 9, pp. 57–63. (In Russian).
- Loboda E.L. The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flames from burning vegetation. *Infrared Physics & Technology*, 2014, vol. 67, pp. 566–573.
- Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V. Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale. *Infrared Physics & Technology*. 2015. vol. 72, pp. 1–7. DOI 10.1016/j.infrared.2015.07.001.
- Grishin A.M., Golovanov A.N., Dolgov A.A. Experimental studies of forest fires, burning of wood stacks and infrasonic pressure fluctuations. *Matematicheskoye i fizicheskoye modelirovaniye sopryazhennykh zadach mekhaniki reagiryuyushchikh sredi ekologii: Izbrannyye doklady mezhdunarodnoy konferentsii* [Mathematical and physical modeling of conjugated problems reactive media mechanics and ecology: Selected reports of the international conference]. Tomsk, 2000, pp. 102–124 (In Russian).
- Boffard R. Burning issue. *Engineering and Technology*, 2015, vol. 10, no. 7, pp. 48–51.
- Lee J.I., Lee G.T. Research of the fire to minimization damage plan on high-rise buildings, J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., 2009, vol. 23, no. 4, pp. 91–97.

13. Yi E.-Y., Bae M.-J. On a fire extinguisher using sound winds, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 977–980.
14. Yi, E.-Y., Song, U.-J., Bae, M.-J. A study on the performance of sound fire extinguisher by anti resonance, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol.13, no.4, pp. 910–913.
15. Kim B.-Y., Song U.-K., Bae S.-G., Bae M.-J. A Study on the Resonance Dispersion of Candlelight According to the Change of Sound Component, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, vol. 14, no. 8, pp. 2450–2455.
16. Kovalev Yu.M. *Matematicheskoye i fizicheskoye modelirovaniye initsirovaniya detonatsii v tverdykh vzryvchatykh veshchestvakh i rasprostraneniye udarnykh voln v pologe lesa i pri lesnykh pozharakh. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* [Mathematical and physical detonation initiation modeling in solid explosives and propagation of shock waves in the forest canopy during forest fires Dr. phys. and math. sci. diss.]. Tomsk, 1987. 195 p. (In Russian).
17. Grishin A.M., Kovalev Yu.M. Experimental study of the explosion impact explosives condensed on the front of a crown forest fire. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1989, no. 5, pp. 1074–1078. (In Russian).
18. Loshchilov A.A., Ilicheva M.N. Change in the mass materials combustible forest as a result of the instantaneous energy release from a chemical reaction with zero oxygen balance. *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii – 2019: Sbornik materialov XXV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Nizhny Novgorod, 19 aprelya 2019 goda* [Information systems and technologies – 2019: Proceedings of the XXV International Scientific and Technical Conference, Nizhny Novgorod, April 19, 2019]. Nizhny Novgorod, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2019, pp. 975–977. (In Russian).
19. Orlov O.K., Kustov Yu.V. Elastic cord charges for fighting forest fires. *Lesnyye pozhary i sposoby borby s nimi – Forest fires and methods of fighting them*. Leningrad, LenNIIKh Publ., 1986, pp. 102–108. (In Russian).
20. Loboda E.L., Reyno V.V., Agafontsev M.V. *Primeneniye termografii pri issledovanii protsessov goreniya* [The use of thermography in the study processes combustion]. Tomsk, 2016, 80 p. (In Russian).
21. Patron montazhnyy D-2 (Zheltyy) [Mounting chuck D-2 (Yellow)]. Available at: <https://stroy-beton.com/stroitel'naya-i-dorozhnaya-tekhnika/pistolety-patrony-i-dyubelya/patron-d2/> (accessed 7 April 2022).
22. Loboda E.L., Anufriev I.S., Agafontsev M.V., Kopyev E.P., Shadrin E.Y., Reyno V.V., Vavilov V.P., Lutsenko A.V. Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV. *Infrared Physics and Technology*, 2018, vol. 92, pp. 240–43.
23. Fateyev V.N. *Fizicheskoye i matematicheskoye modelirovaniye usileniya udarnykh voln v udarnykh trubakh. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* [Physical and mathematical modeling shock waves amplification in shock tubes. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Tomsk, 2012, 102 p. (In Russian).
24. Loshchilov A.A., Ilicheva M.N., Ikonnikov V.V., Shaulov D.A., Orlov Yu.F., Zenkovich A.V. Mathematical modeling of extinguishing a forest fire using a directed explosion. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseyeva – Proceedings of R.E. Alekseev NSTU*, 2018, no. 4(123), pp. 33–40. (In Russian). DOI 10.46960/1816-210X_2018_4_33.
25. Grishin A.M. *Matematicheskoye modelirovaniye lesnykh pozharov i novyye sposoby borby s nimi* [Mathematical modeling of forest fires and new ways to fight them]. Novosibirsk, “Nauka” Publ., 1992, 408 p. (In Russian).

Information about the authors

E.L. Loboda – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Docent, Head of Department of Physical and Computational Mechanics, loboda@mail.tsu.ru;

M.V. Agafontsev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Docent of Physical and computing mechanics department, amv@mail.tsu.ru;

A.A. Staroseltseva – Student, 222-pro@mail.ru.

The article was submitted 27.10.2022; approved after reviewing 01.11.2022; accepted for publication 10.01.2023.