

---

# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

---

УДК 517.927.4: 614.841.1

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_4\_7

## ОБ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТУШЕНИЕМ ЛЕСНОГО ПОЖАРА РАСТВОРОМ ИНГИБИТОРА

А.А. Лошилов

ORCID: 0000-0002-9943-075 e-mail: aloschil2021@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Исследованы вопросы оптимизации управления тушением лесного пожара с учетом физических закономерностей. В качестве основной проблемы рассматривается ограниченная эффективность использования авиационного тушения ввиду того, что одна часть воды уносится конвективной колонкой, а другая попадает на подстилающую поверхность, также не способствуя ликвидации пожара. В условиях дефицита средств тушения на большой площади необходима высокая эффективность управления доставки тушащего состава в зону активного горения. В ранее принятых математических моделях тушения лесного пожара предполагается, что вода мгновенно доставляется в нужную область без учета ее последующего движения.

В данной работе рассматривается динамика дисперсных фаз воды и ингибитора с учетом бесконечно малого размера частиц. При моделировании процесса тушения предполагается, что для распыления тушащего состава используется энергия окисления взрывчатого вещества. На основе численного моделирования получено, что ингибитор способствует обрыву реакций пиролиза и горения летучих продуктов пиролиза в зависимости от его парциальной плотности в среде. Показано, что при подаче тушащего состава на верхней границе слоя лесной растительности пожар в нижней части слоя продолжается, и конвективная колонка вытесняет воду и ингибитор. При распылении воды на поверхности земли такого эффекта не происходит, так как дисперсная вода и ингибитор движутся вверх вместе с конвективной колонкой, что способствует тушению.

**Ключевые слова:** численное моделирование, дисперсная вода, тушение лесного пожара, ингибитор.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лошилов, А.А. Об оптимизации управления тушением лесного пожара раствором ингибитора // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 4. С. 7-15. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_4\_7

## ON OPTIMIZING THE MANAGEMENT OF FOREST FIRE EXTINGUISHING WITH AN INHIBITOR SOLUTION

A.A. Loschilov

ORCID: 0000-0002-9943-075 e-mail: aloschil2021@gmail.com

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** In this paper we investigate the issues of optimization of forest fire extinguishing management taking into account physical patterns are investigated. The main problem is the limited efficiency of the use of aviation extinguishing due to the fact that one part of the water is carried away by the convective column, and the other falls on the underlying surface, also not contributing to the elimination of the fire. In conditions of a shortage of extinguishing agents over a large area, high efficiency of control of the extinguishing composition delivery to the active combustion zone is required. In previously accepted mathematical models of forest fire extinguishing, it is assumed that water is instantly delivered to the desired area without taking into account its subsequent movement.

In this paper, the dynamics of the dispersed phases of water and an inhibitor is considered, taking into account the infinitesimal particle size. When simulating the extinguishing process, it is assumed that the oxidation energy of the an explosive is used to spray the extinguishing agent. On the basis of numerical modeling, it was found that the inhibi-

tor promotes the termination of pyrolysis reactions and combustion of volatile pyrolysis products, depending on its partial density in the medium. It is shown that when the extinguishing agent is applied at the upper boundary of the forest vegetation layer, the fire in the lower part of the layer continues, and the convective column displaces water and the inhibitor. When spraying water on the surface of the earth, this effect does not occur, since the dispersed water and the inhibitor move upwards together with the convective column, which contributes to extinguishing.

**Key words:** numerical modeling, dispersed water, forest fire extinguishing, inhibitor.

**FOR CITATION:** A.A. Loschilov. On optimizing the management of forest fire extinguishing with an inhibitor solution. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 4. Pp. 7-15. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_4\_7

## Введение

Многообещающей методикой тушения масштабных лесных пожаров является применение водяных снарядов. В работе [1] проведено экспериментальное исследование трансформации водяного снаряда при свободном падении. При падении с высоты 3 м различных объемов воды от 50 до 1000 мл в нагретой до 1100 К газовой среде выделены четыре стадии разрушения водяного снаряда: от сплющивания и формирования пузырей до формирования водяных цепочек и облака мелких капель. На границе раздела сред «вода – газ» показаны уменьшение и сжатие размера водяного снаряда при прохождении через зоны высоких температур, а также формирование слоя пара. Под действием аэродинамических сил процесс деформации и разрушения замедляется. При использовании раствора хлорида натрия замедляется не только трансформация, но и диспергирование. Падение водяного снаряда объема, уменьшенного от 0,1 до 0,5 л, с высоты 5 м экспериментально изучено в работе [2]. В работе [3] проведены исследования падения объемов до 1 л с высоты 15 м. Сформулирована модель ограниченного роста поперечного размера формируемого облака капель и выявлены закономерности формирования роста поперечного размера при прохождении нескольких первых метров от начала падения. Эффект сжатия обозначен как определяющий при увеличении объема облака капель. Формирование парового слоя при взаимодействии с горячей газовой средой показано в работе [4]. Приток паров ведет к росту давления со стороны газов, что имеет следствием замедление трансформации и увеличение размеров слоя при разрушении. Для одиночных капель уменьшается теплопередача и скорость поверхностного испарения. Именно этот эффект дает объяснение неэффективности тушения при сбросе воды средствами авиации. Многочисленные результаты исследований тушения пожаров при помощи распыленной воды показали, что для тушения лесных пожаров будет эффективным применение упакованных пакетов водных объемов. Исследования продолжительности трансформации объемов воды при свободном падении с использованием раствора NaCl и воды с частицами углерода описаны в работе [5].

Способ и точность подачи воды в зону горения существенно влияет на эффективность тушения. При сбрасывании большой массы воды с высоты часть ее не попадает в зону горения и оседает на земле, охлаждая подстилающую поверхность, некоторое количество уносится конвективным потоком, и только часть оказывает охлаждающий эффект на зону активного горения. Вопросам повышения эффективности тушения лесных пожаров посвящен ряд работ. В [6-10] проведено исследование влияния водного барьера на динамику тушения различных органических материалов. Введено упрощающее предположение о кипении воды при критическом значении температуры. На основе полученных результатов, связанных с тушением лесного пожара сбрасываемой водой, в работе [8] выполнено исследование влияния интенсивности сброса воды на динамику протекающих процессов. Проблемы, возникающие при моделировании тушения ландшафтных лесных пожаров, изучены в работе [9]. Условия тушения пористого слоя органических горючих материалов определены в работе [10], где также проведен анализ влияния координат подачи воды на эффективность процесса тушения от движущегося источника.

Наиболее перспективным методом тушения крупных лесных пожаров является применение АСП-500 и аналогов. Создание новых методов требует учета протекающих процессов на основе механики реагирующих сред. Особенно важно выявление закономерностей, обуславливающих устойчивость и успешность тушения пожара. Знание координат активации тушащего состава, его расхода и влияние на динамику тушения являются ключевыми параметрами эффективности. Более того, процесс ликвидации лесного пожара должен быть успешен даже при некоторой погрешности сбрасывания снаряда. Для эффективного тушения лесного пожара нужно обеспечить доставку тушащего состава в очаг пожара, что требует моделирования характеристик протекающих процессов. Тем не менее, в вышеописанных работах динамика движения тушащего состава после его подачи не рассматривается, не анализируется также полный комплекс сопутствующих процессов. Работы, посвященные исследованию динамики ингибитора, не учитывают физические закономерности, обуславливающие его действие при тушении лесного пожара.

В данной работе впервые рассматривается сопряженная задача тепло- и массообмена раствора ингибитора при тушении лесного пожара, подаваемого в очаг при помощи снаряда.

### Физико-математическая модель

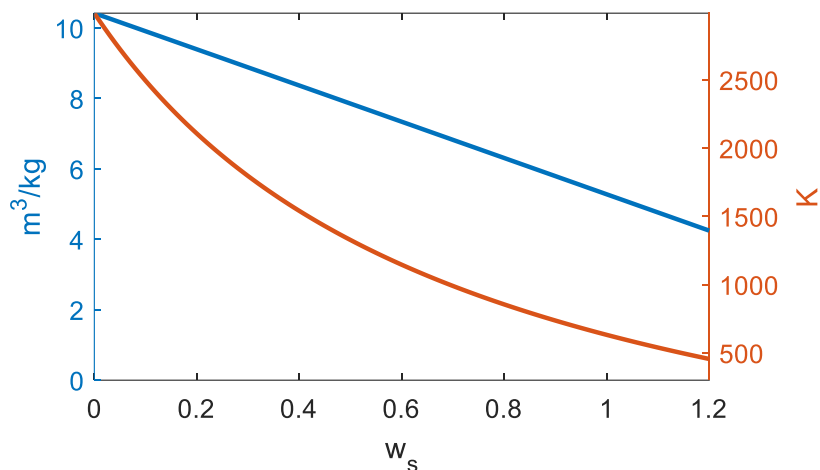
Постановка задачи основана на [10, 11]. Существенным отличием от [12] является способ подачи воды. Вместо капсул с термоактивной оболочкой в данной работе, так же, как и в [11], выполняется моделирование активации снаряда с раствором ингибитора, мгновенно распыляющимся в результате окисления взрывчатого вещества, масса которого составляет 8 % от массы тушащего состава. После распыления вода, ингибитор и продукты взрыва распыляются на основе двумерного нормального распределения и предположения об идеальном смешивании. В момент активации заряда вытеснения среды не происходит, вместо этого продукты взрыва и тушащий состав перемешиваются со средой. Для моделирования ингибитора в постановку добавляются две компоненты: ингибитор в форме дисперсной жидкости и продукты его горения. Вода, подаваемая вместе с ингибитором, также имеет дисперсную форму. Аналогично подходу, предложенному в [11, 12], объемная доля жидкого ингибитора считается пренебрежимо малой. В работах [13, 14] описаны экспериментальные исследования ингибиторов и выявлены их свойства. Динамика его нагрева угля и его смачиваемость ингибитором рассматривается в [13]. Работа [14] посвящена лабораторным исследованиям тушения очага пожара ингибитором. Авторы выявили, что раствор  $K_3[Fe(CN)_6]$  в форме аэрозоля позволяет сократить массу тушащего состава на 47 % по сравнению с водяным аэрозолем.

Для использования такого метода тушения в полевых условиях требуется предварительное моделирование процессов, имеющих место при тушении лесного пожара с использованием снаряда с раствором ингибитора. В силу способности ингибитора прерывать цепочку экзотермических процессов, можно использовать модель подавления активных центров реакций. В данной работе предполагается, что ингибитор прерывает цепочку реакции с вероятностью, которая зависит от его концентрации, что может приводить к окислению ингибитора или его возвращению в исходное состояние.

### Результаты

Добавление к взрывному заряду воды позволяет поглотить часть тепла в результате нагрева, парообразования и перераспределения тепловой энергии на массу тушащего состава. При расчете теплового эффекта данной реакции пренебрегаем отличием теплоемкости ингибитора от теплоемкости воды, которая, в свою очередь, зависит только от агрегатного состояния. Предполагается, что парообразование происходит при 373 К, а увеличение теплоемкости воды за счет жидкого состояния учитывается как поправка к удельной энергии

парообразования. Предполагается, что после взрыва его продукты идеально смешиваются с тушащим составом, и происходит выравнивание температуры. Тепловое взаимодействие с окружающей средой сводится к работе сил расширения. Для измерения влияния соотношения массы взрывчатого вещества на взрывную волну вычисляется объем смеси продуктов взрыва и испарившегося тушащего состава. На рис. 1 показаны влияние добавления воды к заряду на объем и температуру продуктов взрыва, влияние соотношения массы воды и массы взрывчатого вещества  $w_s$  на объем смеси 1 кг продуктов взрыва с водяным паром и температуру смеси.



**Рис. 1.** Влияние добавления воды к заряду на температуру и удельный объем продуктов взрыва

**Fig. 1.** The effect of adding water to the charge on the temperature and specific volume of explosion products

Результаты моделирования показывают, что наибольший вклад в уменьшение объема смеси продуктов взрыва и тушащего состава дает поглощение тепла при парообразовании. Уменьшение температуры вследствие выделения пара уравнивается увеличением плотности, не оказывая влияния на итоговый объем. Кривая объема близка к прямой линии, а температуры – выпукла вниз, что очевидно из рис. 2, т.е. при увеличении доли воды в снаряде, с одной стороны, ослабляется взрывная волна, а с другой – снижается температура окружающей среды. Это уменьшает возможность взрывной волны отрывать элементы растительности, отбрасывая волну горения

При массе взрывчатого вещества 0,08 от массы тушащего состава энергия его окисления достаточна для нагрева состава до температуры, близкой к точке кипения воды и недостаточной для его испарения. Это уменьшает радиус поражения, способствуя повышению безопасности личного состава и техники при тушении лесного пожара. При перемешивании продуктов взрыва и тушащего состава температура среды не может способствовать усилению горения, что также повышает безопасность тушения пожара.

На рис. 2 отображены температура и скорость среды при подавлении лесного пожара при помощи раствора ингибитора. Скорость газовой фазы показана стрелками. Цветовая гамма отражает температуру среды. Концентрация ингибитора показана фиолетовыми линиями, воды – синими. Тонкая сплошная, тонкая точечная синяя, сплошная жирная, тонкая пунктирная соответствуют концентрациям  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>. Момент активации противопожарного снаряда – 10.0005 с. Испарение воды и ингибирование начинается после данного момента, применительно к которому учитывается разбавление среды продуктами взрыва и тушащим составом, перераспределение импульса и тепловой энергии.

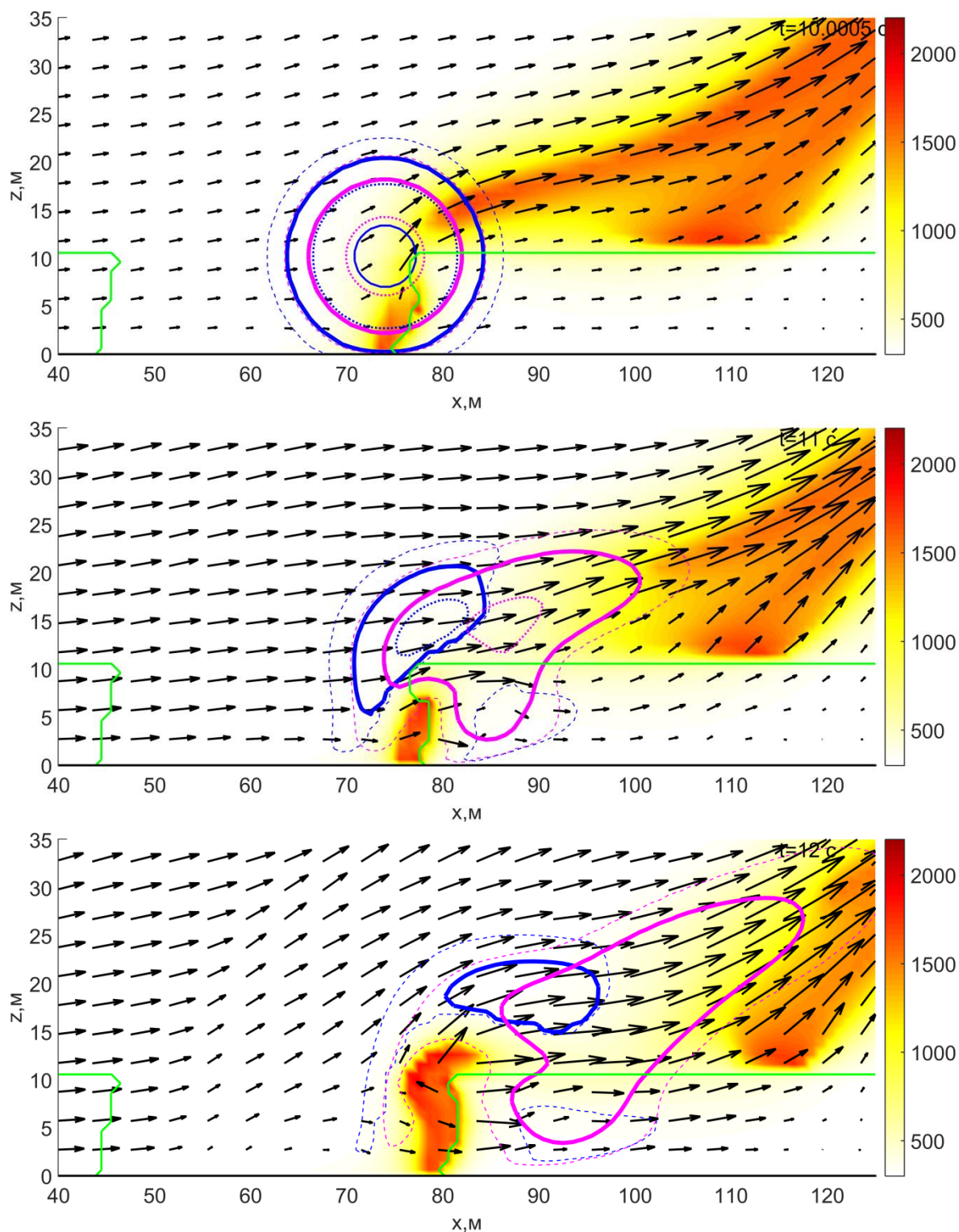
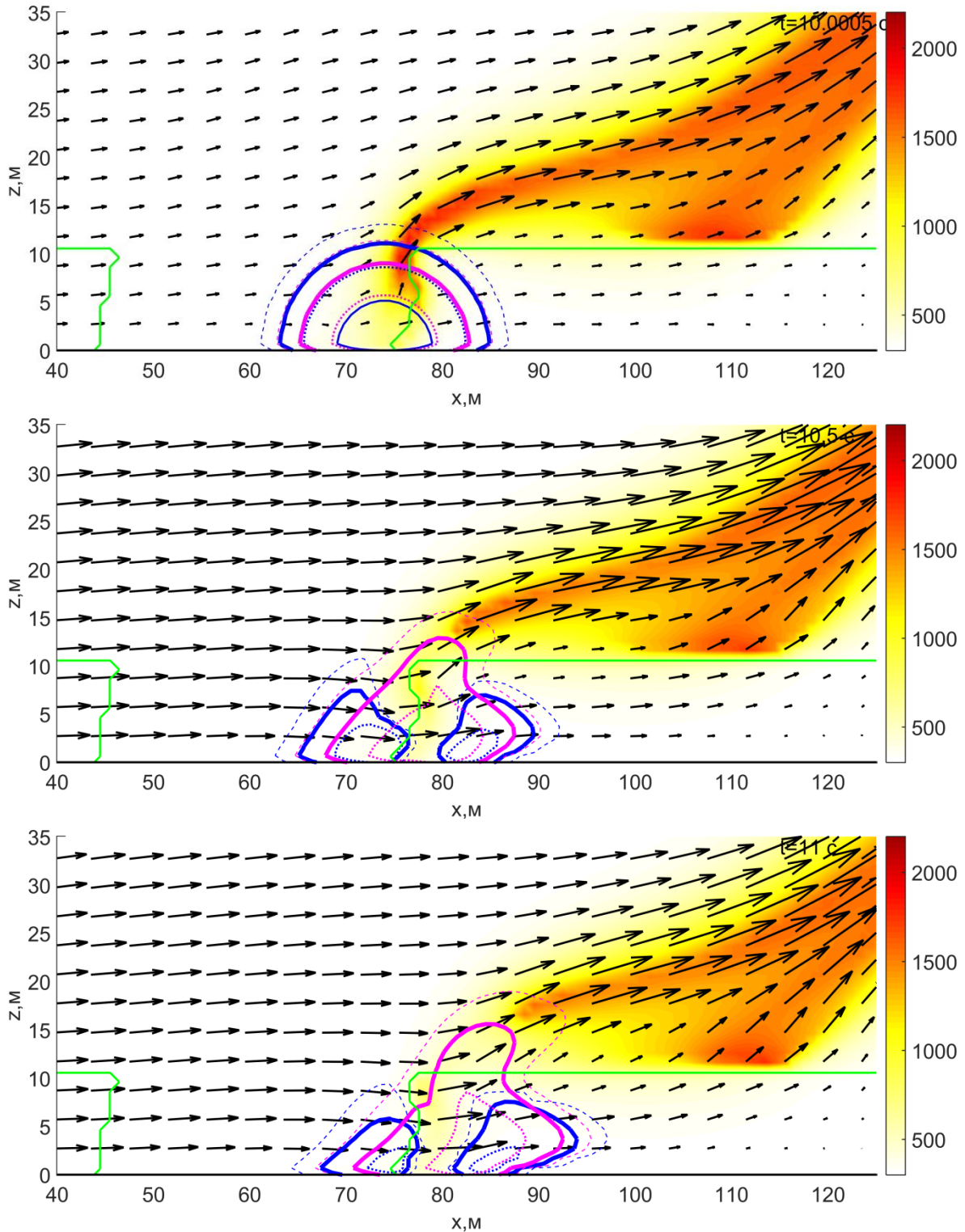


Рис. 2. Динамика тушения лесного пожара путем взрыва противопожарного снаряда по координатам  $x_{expl}=74$  м,  $z_{expl}=10$  м, масса тушащего состава 12 кг/м, массовая доля ингибитора 12 %

Fig. 2. Dynamics of extinguishing a forest fire by exploding a fire-fighting projectile at coordinates  $x_{expl}=74$  м,  $z_{expl}=10$  м, mass of extinguishing agent 12 kg/m, mass fraction of inhibitor 12 %



**Рис. 3.** Динамика тушения лесного пожара путем взрыва противопожарного снаряда по координатам  $x_{expl}=74$  м,  $z_{expl}=0$  м, масса тушащего состава 12 кг/м, массовая доля ингибитора 12 %

**Fig. 3.** Dynamics of extinguishing a forest fire by exploding a fire-fighting projectile at coordinates  $x_{expl}=74$  m,  $z_{expl}=0$  m, mass of extinguishing agent 12 kg/m, mass fraction of inhibitor 12 %

На первом этапе моделирования в течение 10 с выполняется расчет горения лесного массива до квазистационарного режима. На втором этапе выполняется расчет сброса противопожарного снаряда с учетом влияния высвободившейся из снаряда дисперсной воды и ингибитора на динамику пожара. Координаты взрыва:  $x_{expl}=74$  м,  $z_{expl}=10$  м, масса тушащего состава в снаряде  $m_{wat}=12$  кг/м. На момент взрыва 10.0005 с концентрация воды и ингибитора остается высокой только в верхней части слоя растительности. К моменту 11 с в нижней части фронта пожара вода полностью испаряется, ингибитор выгорает, а температура повышается до 1500 К. Дисперсная вода имеет малую концентрацию, и сила тяжести не способствует ее оседанию на фронт пожара. Процесс горения в верхней части слоя лесной растительности временно прекращается, что способствует накоплению в этой области кислорода. В результате испарения воды, окисления и вытеснения оттуда ингибитора, а также действия конвективной колонки происходит возобновление горения на момент 12 с в средней и верхней части слоя растительности. В результате тушения пожара не происходит.

На рис. 3 рассматривается случай взрыва противопожарного снаряда в результате его удара о поверхность земли. Координаты взрыва:  $x_{expl}=74$  м,  $z_{expl}=0$  м, масса тушащего состава в снаряде  $m_{wat}=12$  кг/м. На момент времени взрыва 10.0005 с видно, что в верхней части слоя растительности концентрация воды и ингибитора мала. Конвективная колонка способствует движению частиц воды и ингибитора в вертикальном направлении, подавляя горение в верхней части слоя растительности. На момент 10.5 с видно смещение частиц ингибитора вверх в области  $x=80$ ,  $z=10$  м. Дисперсные частицы воды также смещаются в вертикальном направлении и испаряются вследствие воздействия высокой температуры. Действие ингибитора препятствует возобновлению пожара, в то время как остатки воды продолжают понижать температуру в лесном массиве, что видно на 11 с.

Как показали результаты работы, при подаче тушащего состава на верхней границе слоя лесной растительности пожар в нижней части слоя продолжается, и конвективная колонка вытесняет воду и ингибитор. При распылении воды на поверхности земли такого эффекта не происходит, так как дисперсная вода и ингибитор движутся вверх вместе с конвективной колонкой, что способствует тушению. На основе серии расчетов с параметрами  $x_{expl} = 70, 72, 74, 76, 78$ ;  $z_{expl} = 0, 2.5, 5, 7.5, 10$ ;  $m_{wat} = 8, 10, 12, 14, 16$ ;  $F_I = 0, 1.5, 5, 12, 25, 45$  были получены обобщенные результаты (табл. 1).

Таблица 1.

Зависимость доли случаев успешного тушения пожара взрывом  
в зависимости от координат его центра

Table 1.

Dependence of the proportion of cases of successful extinguishing of a fire by explosion  
depending on the coordinates of its center

$x_{expl}$ , м	$z_{expl}$ , м				
	0	2.5	5	7.5	10
70	17/30	22/30	23/30	16/30	2/30
72	17/30	21/30	23/30	16/30	2/30
74	19/30	23/30	<b>24/30</b>	16/30	1/30
76	19/30	<b>24/30</b>	22/30	12/30	0
78	17/30	22/30	18/30	5/30	0

Как видно из табл. 1, небольшой сдвиг вниз и вперед влияет на эффективность тушения несущественно. В случае взрыва на поверхности земли имеет место некоторое снижение эффективности, так как тушащий состав в меньшей степени достигает крон деревьев.

## Выводы

Достоинством предложенного способа подачи тушащего состава является преимущественное испарение непосредственно в области очага пожара. При сбросе воды без снаряда происходит частичное испарение и унос капель в конвективной колонке. Эти негативные эффекты аналогичны случаю взрыва снаряда на верхней границе слоя лесной растительности. В случае использования снаряда, несмотря на некоторые потери тушащего состава, большая его часть дробится на мелкие капли. Еще одним преимуществом является более эффективное использование раствора ингибитора, к недостаткам можно отнести повышение расходов на изготовление снаряда. В отличие от [15], снаряд содержит взрывчатое вещество, которое распределяет раствор ингибитора на весь очаг пожара, позволяя уменьшить число снарядов, необходимых для тушения. Эффективность предложенного метода зависит от высоты взрыва противопожарного снаряда и точности его попадания в очаг пожара. В рамках данного метода целесообразно применять алгоритмы сегментации, которые позволят использовать беспилотные летательные аппараты в автоматическом режиме [16, 17].

## Библиографический список

1. **Волков, Р.С.** Особенности трансформации водяных снарядов при движении через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, М.В. Забелин, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Письма в ЖТФ. 2016. Том 42. Вып. 5. С. 65-72.
2. **Мешков Е.Е.** Образование облака капель при разрушении водяного ядра в процессе свободного падения / Е.Е. Мешков, В.О. Орешков, Г.М. Янбаев // Письма в ЖТФ. 2011. Т.37. Вып.6. С.79-86.
3. **Накоряков, В.Е.** О предельных поперечных размерах капельного облака при разрушении водяного массива в процессе падения с большой высоты / В.Е. Накоряков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Доклады академии наук. 2017. том 475. № 2. С. 145–149. DOI: 10.7868/S0869565217020062.
4. **Волков, Р.С.** Особенности трансформации водяных снарядов при движении через высокотемпературные продукты сгорания / Р.С. Волков, М.В. Забелин, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Письма в ЖТФ. 2016. Том 42. Вып. 5. С.65-72.
5. **Волков, Р.С.** Трансформация массивов растворов и суспензий при свободном падении в воздухе / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Теоретические основы химической технологии. 2017. Том 51. № 6. С. 712-719. DOI: 10.7868/S0040357117040133.
6. **Kataeva, L.Y.** Influence of the water barrier on the dynamics of a forest fire considering the inhomogeneous terrain and two-tier structure of the forest / L.Y. Kataeva, D.A. Maslennikov, A.A. Loschilov, I.V. Belyaev // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Т. 11. № 5. С. 2972-2980.
7. **Катаева, Л.Ю.** О влиянии водного барьера на динамику развития лесного пожара в зависимости от рельефа местности / Л.Ю. Катаева, А.Д. Постнов, С.А. Лоцилов, Д.А. Масленников // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 1. С. 30-37.
8. **Лоцилов, С.А.** Исследование влияния интенсивности сброса воды на динамику лесного пожара / С.А. Лоцилов, Д.А. Масленников, А.Д. Постнов, Л.Ю. Катаева // Естественные и технические науки. 2013. № 6 (68). С. 37-40.
9. **Белоцерковская, И.Е.** Влияние водного барьера на динамику ландшафтных лесных пожаров / И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников, С.А. Лоцилов // Естественные и технические науки. 2013. № 3 (65). С. 15-19.
10. **Kataeva, L.Y.** On the laws of combustion wave suppression by free water in a homogeneous porous layer of organic combustible materials / L.Y. Kataeva, D.A. Maslennikov, N.A. Loshchilova // Fluid Dynamics. 2016. Т. 51. № 3. С. 389-399.
11. **Лоцилов, А.А.** Упрощенная математическая модель ингибирования экзотермических процессов при моделировании тушения лесного пожара / А. А. Лоцилов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22. № 3. С. 1-9. – DOI 10.33257/PhChGD.22.3.936.
12. **Катаева, Л.Ю.** Математическое моделирование тушения лесного пожара путем доставки воды в его очаг с помощью капсул с термически активной оболочкой / Л.Ю. Катаева, М.Н. Ильичева, А.А. Лоцилов // Математическое моделирование и численные методы. 2020. № 2. С. 59-80.
13. **Wenzhou, Du** Experimental study on optimizing the inhibition effect of pre-injection inhibitor on coal spontaneous combustion / Du Wenzhou, Zhang Jie, Xie Qingxin, Zhang Yansong, Niu Kuo, Wang



- Houwang // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental. Effects, 2020. DOI: 10.1080/15567036.2020.1780350.
14. **Коробейничев, О.П.** Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей / О.П. Коробейничев, А.Г. Шмаков, А.А. Чернов, Т.А. Большова, В.М. Шварцберг, К.П. Куценогий, В.И. Макаров // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 1. С. 20-25.
15. **Ильичева, М.Н.** Математическое моделирование тушения лесного пожара капсулами с водой в разрушающейся оболочке / М.Н. Ильичева, Л.Ю. Катаева // XXXII научно-практическая конференция Актуальные проблемы пожарной безопасности, ВНИИПО МЧС России. Москва, 2020. С. 380-387.
16. **Bochkov, V.** WUUNET: Advanced fully convolutional neural network for multiclass fire segmentation / V. Bochkov, L. Kataeva // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1727(1). 012003.
17. **Bochkov, V.S.** Prototype of forest fire suppression robotics system based on exclusion of flame configuration from monocular video sequence / V.S. Bochkov, L. Yu. Kataeva, I.E. Belotserkovskaya, M.N. Illicheva // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. 14(9). Pp. 1719-1730.

*Дата поступления  
в редакцию: 09.03.2021*