

Simplified Mathematical Model of Inhibition of Exothermic Processes in Modeling Forest Fire Extinguishing

A. A. Loschilov

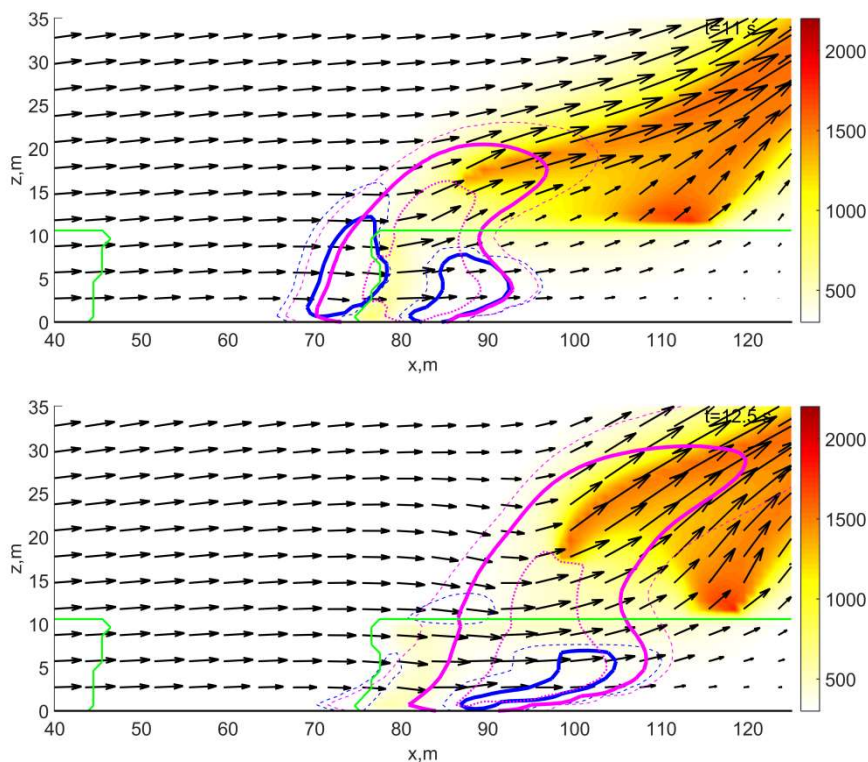
*R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU),
Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

poman99@mail.ru

Abstract

A new physical and mathematical formulation of extinguishing a forest fire with an inhibitor solution distributed using an explosive charge is proposed in this paper. It is assumed that the water and the inhibitor are in the liquid dispersion state and move together with the medium. The inhibitor allows the disruption of exothermic reactions, while being partially consumed. The results of numerical simulations have shown that the presence of an inhibitor makes it possible to reduce the required mass of extinguishing composition for successful suppression of a forest fire. It is shown that these results are in good agreement with the known experimental data on the efficiency of replacing pure water with an inhibitor solution.

Keywords: simulation of extinguishing a forest fire, the mechanics of reacting media, numerical modeling, inhibition of the combustion, dispersed water.



Dynamics of extinguishing a forest fire by the explosion of a fire-fighting projectile with 14.5 kg of extinguishing composition per meter of fire front with inhibitor concentration 30 % at time 11 s and 12.5 s

УДК 517.927.4: 614.841.1

Упрощенная математическая модель ингибирования экзотермических процессов при моделировании тушения лесного пожара

А. А. Лощилов

*Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Россия, Нижний Новгород, 603950, ул. Минина, 24*

poman99@mail.ru

Аннотация

В данной работе предложена новая физико-математическая постановка тушения лесного пожара при помощи раствора ингибитора, распределяемого с помощью взрывного заряда. Предполагается, что вода и ингибитор находятся в жидкодисперсном состоянии и движутся вместе со средой. Ингибитор позволяет обрывать экзотермические реакции, частично расходуясь. Результаты численного моделирования показали, что наличие ингибитора позволяет уменьшить требуемую массу раствора для успешного тушения лесного пожара. Показано, что данные результаты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными по эффективности замены чистой воды раствором ингибитора.

Ключевые слова: моделирование тушения, лесной пожар, механика реагирующих сред, численное моделирование, ингибирование горения, дисперсная вода

1. Введение

Проблема лесных пожаров была и остается актуальной как в России, так и за рубежом. Принимаемые меры для борьбы с ними недостаточны. Как известно [1], в реальных условиях тушение лесного пожара требует в несколько раз больше воды, чем было бы достаточно для охлаждения среды ниже температуры горения. Большая площадь пожара на открытом пространстве при свободном доступе кислорода обуславливает необходимость использования большой массы тушащего состава, и поэтому вопросы его эффективного использования и применения ингибиторов являются актуальными. Одним из наиболее применимых методов тушения в удалённых и труднодоступных районах является применение авиационных технологий. Моделирование процесса сброса воды с самолета показало, что при увеличении высоты приводит к большему рассеиванию воды и уносу её конвективной колонкой [2], что снижает эффективность тушения лесного пожара.

В [3] показаны результаты экспериментального исследования тушения пожара в результате сочетания взрывной волны и водного тумана. Взрыв разрушает структуру пламени, разбивая воду на дисперсные частицы, и доставляя её в зону активного горения. Особенно эффективно попадание воды в основание пламени, что предотвращает продолжение горения. Авторы показали, что взрывная волна увеличивает скорость частиц, что позволяет им преодолеть задымлённую зону. Взаимодействие дисперсного облака воды с взрывом на различных стадиях смоделировано в работе [4].

К недостаткам сочетания взрывной волны и тонкораспыленной воды следует отнести необходимость предварительного снаряжения боеприпаса, тогда как при традиционном авиационном тушении запас воды можно пополнить из ближайшего водоема. Тем не менее, при тушении лесных пожаров на удалении от подходящих водоемов использование предварительно снаряженных снарядов может быть эффективным. Использование вместо воды растворов ингибиторов позволит обеспечить ещё большую эффективность тушения лесного пожара.

Вопросам использования ингибиторов для предотвращения и тушения пожаров посвящено множество работ. В [5] рассматривается простая модель замедления реакции путем расщепления катализатора за счёт действия ингибитора. Данный подход подходит для случая малого количества химических реакций. Исследованию характеристик ингибитора на основе детального исследования 1510 элементарных реакций в рамках модели компьютерной гидродинамики посвящена работа [6]. Использование таких громоздких моделей для исследования физико-химических процессов, протекающих при распространении и тушении лесного пожара весьма затруднительно ввиду необходимости выполнения множественных расчётов, поэтому предлагается заменить весь комплекс процессов набором эффективных реакций [7, 8].

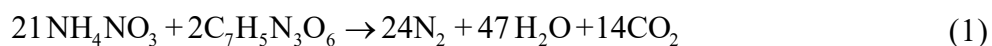
Экспериментальным исследованиям свойств ингибиторов посвящены работы [9, 10]. В [9] приведены результаты экспериментального исследования смачиваемости угля ингибитором и динамики нагрева угля после пропитки ингибитором. В [10] приводятся результаты эксперимента по тушению модельных очагов пожара. В работе отмечено, что использование аэрозоли раствора красной кровяной соли $K_3[Fe(CN)_6]$ с $\lambda_{l1} = \lambda_{l5} = 150 \text{ (кг}\cdot\text{м}^3)^{-1}$ позволяет уменьшить расход тушащего состава в 1.9 раза по сравнению с аналогичным методом подачи чистой воды.

Для практического использования растворов ингибитора в реальных условиях необходимо выполнить моделирование процессов, протекающих при тушении лесного пожара с помощью снаряда с раствором ингибитора и водой.

Как было показано в работе [11], наиболее эффективное тушение осуществляется при подаче воды в основание пламени, так как в таком случае после охлаждения этой области, тепловая энергия не может восполниться за счёт конвективного потока. Согласно математической модели, предложенной в работе [11], способ доставки воды в выбранную точку не рассматривается. На практике осуществление такого способа подачи воды затруднительно. Большие капли меньше подвержены аэродинамическому сопротивлению за счёт скорости относительно среды, но за счёт меньшей удельной поверхности пролетают через нагретые области, и с большей вероятностью сталкиваются с элементами растительности. Более мелкие капли быстрее приобретают скорость среды, поэтому переносятся вместе с конвективной колонкой, испаряясь в ней.

2. Математическая постановка задачи, принятые допущения

Физико-математическая модель основана на постановке, приведенной в [12]. В отличие от [12], в данной работе не рассматривается динамика капсул с термоактивной оболочкой. Вместо воды рассматривается дисперсный раствор ингибитора, который подается в область пожара в снаряде с взрывчатым веществом. Массовая доля ингибитора в тушащем составе F_I , а общая масса тушащей смеси m_{wat} . Масса взрывчатого вещества составляет $m_{expl} = 0.08m_{wat}$. Формула его преобразования в продукты взрыва определяется формулой реакции (1).



Реакция (1) протекает с выделением тепла в количестве $4.249 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$. Массовое соотношение продуктов реакции: азот 31.49 %, водяной пар 39.64 %; углекислый газ 28.87 %. Их эффективная молярная масса 0.0251 кг/моль. Распределение массы тушащего состава и продуктов в пространстве взрыва осуществлялось на основе двумерного распределения Гаусса с дисперсией 10 м^2 .

Постановка дополняется следующими компонентами: ингибитор (дисперсная фаза), продукты окисления ингибитора (газ). Также, как и в [12], предполагается, что объемная доля жидкого ингибитора пренебрежимо мала.

Для моделирования динамики ингибирования вводится ряд соотношений. Массовые скорости обрыва процессов пиролиза и горения его летучих продуктов в результате его ингибирования, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^3)$

$$F_{I1} = \tilde{R}_1 [1 - \exp(-\lambda_{I1} \rho_5 C_7)], \quad (2)$$

$$F_{I5} = \tilde{R}_5 [1 - \exp(-\lambda_{I5} \rho_5 C_7)] \quad (3)$$

Скорости реакций горения летучих продуктов пиролиза с учетом ингибирования

$$R_1 = \tilde{R}_1 - F_{I1}, \quad R_5 = \tilde{R}_5 - F_{I5} \quad (4)$$

Скорость реакции окисления ингибитора, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$

$$R_7 = k_I F_{I5} \quad (5)$$

Массовые скорости изменения ингибитора и продуктов его окисления соответственно

$$R_{57} = -R_7, \quad R_{58} = R_7 (1 + X_I) \quad (6)$$

В формулах (2)–(6) используются обозначения: ρ_5 – истинная плотность газодисперсной фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\tilde{R}_1, \tilde{R}_5$ – скорости реакций пиролиза сухого органического вещества и горения летучих продуктов пиролиза без учета действия ингибитора аналогичны соотношениям (8)–(9) из работы [12], $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$; C_7 – массовая концентрация ингибитора. Свойства ингибитора определяются следующими параметрами: λ_{I1} – эффективность обрыва реакции пиролиза ингибитором, $(\text{кг} \cdot \text{м}^3)^{-1}$; λ_{I5} – эффективность обрыва реакции горения летучих продуктов ингибитором, $(\text{кг} \cdot \text{м}^3)^{-1}$; k_I – коэффициент расхода ингибитора; X_I – отношение расхода кислорода к расходу ингибитора; F_I – массовая доля ингибитора в тушащем составе.

3. Алгоритм численного решения поставленной задачи

Данная задача является сопряженной задачей механики реагирующих сред и включает в себя систему обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных. Для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений использовался метод Эйлера с модификацией для обеспечения устойчивости и выполнения законов сохранения [13]. Данный алгоритм подходит также для моделирования химической кинетики действия ингибитора. Для решения уравнений в частных производных используется метод крупных частиц [14], который требует расщепления, как по физическим процессам, так и по координатам.

Для решения уравнения распространения лучистого теплового потока используется метод спектрального разложения по одной координате и трехдиагональной прогонки по другой [15]. При моделировании взрыва не учитывается стадия детонации, а вместо этого используется упрощенная модель распределения продуктов взрыва на основе двумерного пространственного распределения Гаусса. Это позволяет избежать резких перепадов давления и сопутствующих сложностей при выполнении численного решения.

4. Результаты моделирования

На рис. 1 показано поле скоростей и температуры при квазистационарном распространении лесного пожара на момент взрыва противопожарного снаряда. Векторное поле показывает скорость движения газовой фазы. Температура соответствует цветовой шкале. Линии уровня синего цвета обозначают парциальную плотность дисперсной фазы воды. Линии уровня фиолетового цвета обозначают парциальную плотность ингибитора. Тонкая сплошная синяя линия соответствует уровням парциальной плотности $0.1 \text{ кг}/\text{м}^3$. Тонкая точечная синяя линия соответствует уровням парциальной плотности $0.01 \text{ кг}/\text{м}^3$. Сплошная жирная синяя линия соответствует уровням парциальной плотности $0.001 \text{ кг}/\text{м}^3$. Тонкая пунктирная синяя линия соответствует уровням парциальной плотности $0.0001 \text{ кг}/\text{м}^3$. Момент времени 10.0005 с на рисунках соответствует начальному распределению после взрыва противопожарного снаряда. Процессы, связанные с испарением воды и ингибированием, начинаются после 10.0005 с .

Поле скоростей и температур учитывает разбавление среды продуктами взрыва и смесью ингибитора с водой, а также перераспределение энергии между газовой и конденсированной фазами.

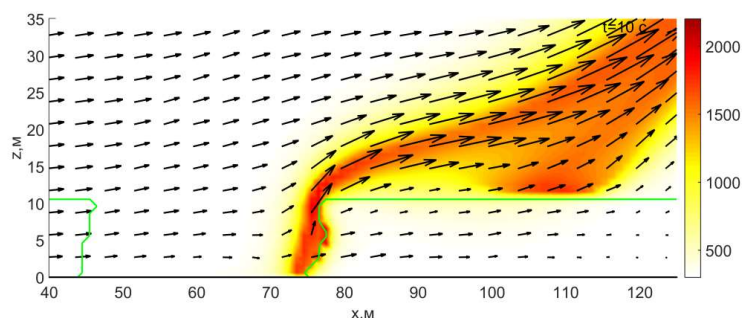


Рис. 1. Поле температур и скоростей лесного пожара до взрыва противопожарного снаряда

На рис. 2–3 показана динамика тушения лесного пожара путем взрыва противопожарного снаряда без ингибитора в случае минимального расхода воды. В отличие от подачи авиационным способом, вода не тратится на преодоление конвективной колонки и попадает в очаг пожара. Это позволяет существенно снизить температуру во фронте горения. Дисперсная вода, находящаяся за фронтом горения, способствует дополнительному снижению температуры до уровня, при котором экзотермические реакции затухают. Это в результате приводит к тушению пожара.

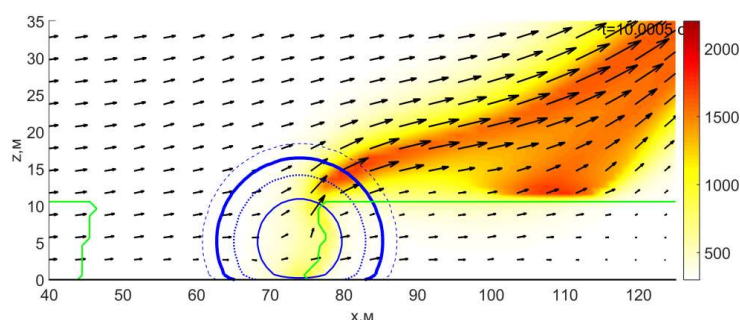


Рис. 2. Динамика тушения лесного пожара путем взрыва противопожарного снаряда при $m_{wat} = 30.5$ кг/м, $F_I = 0\%$ на момент времени 10.0005 с

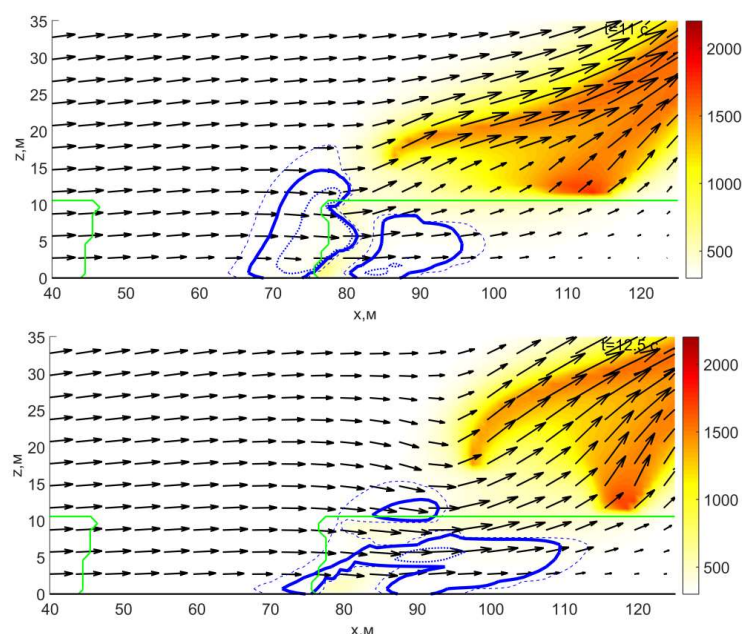


Рис. 3. Динамика тушения лесного пожара путем взрыва противопожарного снаряда при $m_{wat} = 30.5$ кг/м, $F_I = 0\%$ на моменты времени: 11 с и 12.5 с

Расход воды в данном случае несколько выше с поправкой на высоту леса, чем в работе [11]. Это связано с моделированием воды в данной работе, как дисперсной фазы, движущейся вместе с непрерывной средой, в то время как в работе [11] рассматривается идеализированный случай.

На рис. 4–5 показана динамика тушения лесного пожара путем взрыва противопожарного снаряда с 30% раствором ингибитора в случае его минимального расхода. Наличие ингибитора позволяет подавить экзотермические реакции даже при меньшем количестве воды.

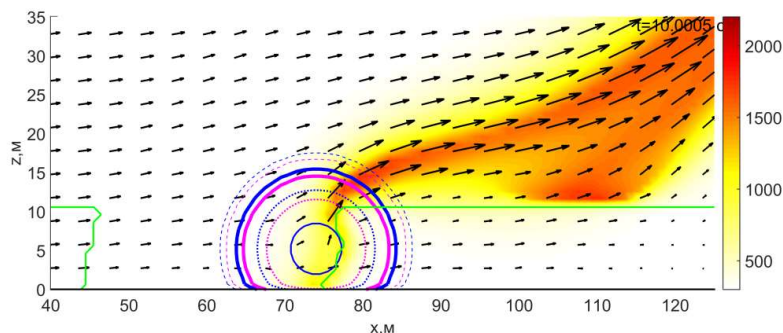


Рис. 4. Динамика тушения лесного пожара путем взрыва противопожарного снаряда при $m_{wat} = 14.5$ кг/м, $F_I = 30\%$ на момент времени 10.0005 с

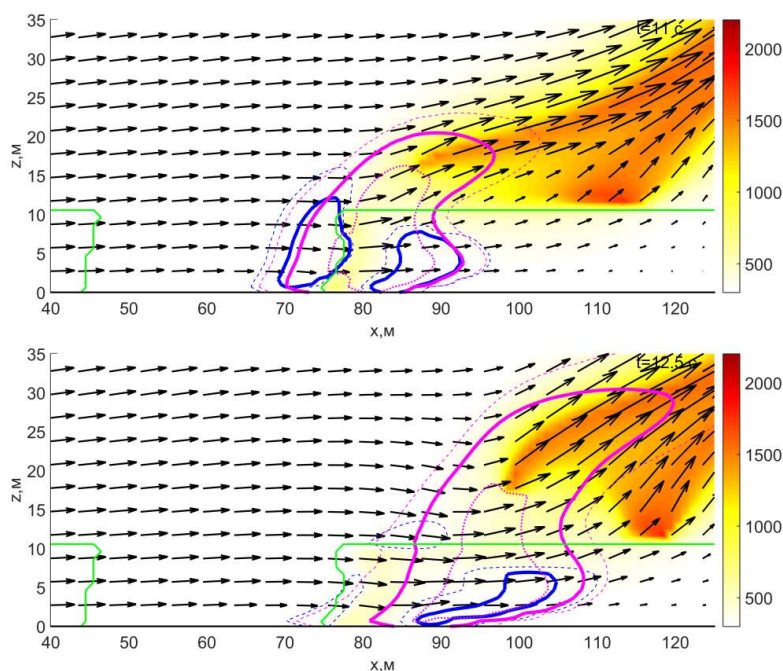


Рис. 5. Динамика тушения лесного пожара путем взрыва противопожарного снаряда при $m_{wat} = 14.5$ кг/м, $F_I = 30\%$ на моменты времени: 11 с и 12.5 с

Результаты моделирования показали, что использование ингибитора позволяет уменьшить массу тушащего состава в 2.1 раза, что хорошо согласуется с результатами эксперимента, приведенными в работе [10], где достигнуто соотношение эффективности раствора по отношению к чистой воде 1.9. Предложенная модель показала возможность исследования динамики комплекса процессов, сопутствующих тушению лесного пожара раствором различных ингибиторов, что является важным для их практического использования.

Литература

1. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров // М.: ВПНТШ МВД СССР, 1980. С. 195–198.

2. Satoh K., Maeda I., Kuwahara K., Yang K. A Numerical Study Of Water Dump in Aerial Fire Fighting // *Fire Safety Science* 8. 2005. Pp. 777–787. doi:10.3801/IAFSS.FSS.8-777
3. LI Zheng, WANG Quan Experimental Study of Explosive Water Mist Extinguishing Fire // *Procedia Engineering* Volume 11, 2011, pp. 258–267.
4. Elin Kristin Dale Simulation and modelling of water spray in the 3D explosion simulation program FLACS URL: <http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/1326/Masteroppgave-dale.pdf?sequence=1&is-Allowed=y> (дата обращения: 04.04.2020).
5. Dakshinamoorthy, D., Khopkar, A. R., Louvar, J. F., Ranade, V. V. CFD simulations to study shortstop-ping runaway reactions in a stirred vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 11, no. 5. 2004. Pp. 355–364. ISSN 0950-4230
6. Viswanath R. Katta, Fumiaki Takahashi, Gregory T. Linteris. Fire-suppression characteristics of CF₃H in a cup burner // *Combustion and Flame*, vol. 144. 2005. Pp. 645–661
7. Vamshi M. Korivi, Bradley A. Williams, Steven J. McCormick, Kshitij Deshmukh. Fire Suppression Modeling using Computational Fluid Dynamics // *Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium*, 2014.
8. Korobeinichev O. P., Bolshova T. A., Shmakov A. G., Shvartsberg V. M. Skeletal Mechanism of Inhibition and Suppression of a Methane–Air Flame by Addition of Trimethyl Phosphate // Translated from *Fizika Goreniya i Vzryva*, Vol. 50, No. 2, 2014. P. 9–13. DOI: 10.1134/S0010508214020026
9. Wenzhou Du, Jie Zhang, Qingxin Xie, Yansong Zhang, Kuo Niu, Houwang Wang. Experimental study on optimizing the inhibition effect of pre-injection inhibitor on coal spontaneous combustion // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental. Effects*, 2020. DOI:10.1080/15567036.2020.1780350
10. Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А., Большова Т. А., Шварцберг В. М., Куценогий К. П., Макаров В. И. Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей // *Физика горения и взрыва*. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 20-25.
11. Kataeva L.Y., Maslennikov D.A., Loshchilova N.A. On the laws of combustion wave suppression by free water in a homogeneous porous layer of organic combustible materials // *Fluid Dynamics*. 2016. Т. 51. № 3. С. 389–399.
12. Катаева, Л. Ю., Ильичева, М. Н., Лощилов, А. А. Математическое моделирование тушения лесного пожара капсулами с водой в термоактивной оболочке // *Вычислительная механика сплошных сред*, Т. 13, № 3. 2020, С. 320-336. <https://doi.org/https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.3.26>
13. Масленников Д.А., Белоцерковская И.Е., Лощилов С.А. Особенности численного моделирования распространения суммарного теплового потока при лесных пожарах / под ред. Л.Ю. Катаева. — Н. Новгород: ООО «Стимул-СТ», 2013. — 109 с.
14. Бабкин А.В. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: учебник для втузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 520 с.
15. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989.— 432 с.

Reference

1. Abduragimov, I. M., Govorov, V. Yu., Makarov, V. E. *Fiziko-himicheskie osnovy` razvitiya i tusheniya pozharov*, M.: VIPTSh MVD SSSR, 1980, pp. 195–198.
2. Satoh, K., Maeda, I., Kuwahara, K., Yang, K., “A Numerical Study of Water Dump in Aerial Fire Fighting,” *Fire Safety Science* 8, 2005, pp. 777–787. doi:10.3801/IAFSS.FSS.8-777
3. Li Zheng, Wang Quan, “Experimental Study of Explosive Water Mist Extinguishing Fire,” *Procedia Engineering*, Vol. 11, 2011, pp. 258–267.
4. Elin Kristin Dale, *Simulation and modelling of water spray in the 3D explosion simulation program FLACS* URL: <http://bora.uib.no/bitstream/handle/1956/1326/Masteroppgave-dale.pdf?sequence=1&is-Allowed=y> (data obrashheniya: 04.04.2020)

5. Dakshinamoorthy, D., Khopkar, A. R., Louvar, J. F., Ranade, V. V., “CFD simulations to study short-stopping runaway reactions in a stirred vessel,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 11, No. 5, 2004, pp. 355–364. ISSN 0950-4230
6. Viswanath, R. Katta, Fumiaki, Takahashi, Gregory, T. Linteris., “Fire-suppression characteristics of CF₃H in a cup burner,” *Combustion and Flame*, Vol. 144, 2005, pp. 645–661.
7. Vamshi, M. Korivi, Bradley, A. Williams, Steven, J. McCormick, Kshitij, Deshmukh, “Fire Suppression Modeling using Computational Fluid Dynamics,” *Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium*, 2014.
8. Korobeinichev, O. P., Bolshova, T. A., Shmakov, A. G., Shvartsberg, V. M., “Skeletal Mechanism of Inhibition and Suppression of a Methane–Air Flame by Addition of Trimethyl Phosphate,” *Translated from Fizika Goreniya i Vzryva*, Vol. 50, No. 2, 2014, pp. 9–13. DOI: 10.1134/S0010508214020026
9. Wenzhou, Du, Jie, Zhang, Qingxin, Xie, Yansong, Zhang, Kuo, Niu, Houwang, Wang, “Experimental study on optimizing the inhibition effect of pre-injection inhibitor on coal spontaneous combustion,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020. DOI:10.1080/15567036.2020.1780350
10. Korobejnichev, O. P., Shmakov, A. G., Chernov, A. A., Bol'shova, T. A., Shvarczberg, V. M., Kucenogij, K. P., Makarov, V. I., “Tushenie pozharov s pomoshh'yu ae'rozolej rastvorov solej,” *Fizika goreniya i vzryva*, Vol. 46, No. 1, 2010, pp. 20–25.
11. Kataeva, L. Y., Maslennikov, D. A., Loshchilova, N. A., “On the laws of combustion wave suppression by free water in a homogeneous porous layer of organic combustible materials,” *Fluid Dynamics*, Vol. 51, No. 3, 2016, pp. 389–399.
12. Kataeva, L. Yu., Il'icheva, M. N., Loshhilov, A. A., “Matematicheskoe modelirovanie tusheniya lesnogo pozhara kapsulami s vodoj v termoaktivnoj obolochke,” *Vy`chislitel'naya mexanika sploshny`x sred*, Vol. 13, No. 3, 2020, pp. 320–336. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.3.26>
13. Maslennikov, D. A., Belocerkovskaya, I. E., Loshhilov, C. A., *Osobennosti chislennogo modelirovaniya rasprostraneniya summarnogo teplovogo potoka pri lesny`x pozharax* (Features of numerical modeling of the spread of the total heat flow during forest fires) pod red. L.Yu. Kataeva. – N. Novgorod: OOO «Stimul-ST», 2013, 109 p.
14. Babkin, A. V., *Chislenny`e metody` v zadachax fiziki by`stroprotekayushhix processov: uchebnik dlya vtuzov* (Numerical methods in problems of physics of fast processes: a textbook for technical colleges), M.: Izd-vo MGTU im. N.E`. Bauman, 2006, 520 p.
15. Samarskij, A. A., Gulin, A. V., *Chislenny`e metody`: Ucheb, posobie dlya vuzov* (Numerical Methods: Textbook for Universities). M.: Nauka. Gl. red. fiz-mat. lit., 1989, 432 p.

Статья поступила в редакцию 29 января 2021 г.