

УДК 614.841.42

О ЗАВИСИМОСТИ МАССОВОГО РАСХОДА ВОДЫ ДЛЯ УСПЕШНОГО ТУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ ПРИЦЕЛА**Романова Н.А., Лоцилов А.А., Беляев И.В., Катаева Л.Ю.***ГОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, e-mail: kataeval2010@mail.ru*

В данной работе предложена математическая модель тушения лесного пожара, на основе которой можно осуществлять анализ возможных сценариев развития ситуации в зависимости от выбора параметров задачи. В качестве точки прицела используется ближайшая к водной пушке по горизонтальной оси точка в слое леса, температура которой больше критического значения. При наличии нескольких точек, удовлетворяющих условию, в качестве прицела выбирается одна с наибольшей высотой. В статье приведена таблица зависимости критической интенсивности подачи воды в точку обстрела от критической температуры. В работе приведены результаты численного моделирования, показывающие, что оптимальной является зона, соответствующая 800 К. Изменение критического значения температуры в большую или меньшую сторону приводит к увеличению интенсивности подачи воды, необходимой для тушения.

Ключевые слова: математическое моделирование, пожар, свободная вода, лес**DEPENDENCE OF MASS FLOW RATE OF TEMPERATURE DOT SIGHT****Romanova N.A., Loschilov A.A., Belyaev I.V., Kataeva L.Y.***Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, e-mail: kataeval2010@mail.ru*

In this paper we propose a mathematical model of forest fire suppression. This model makes possible to carry out the analysis of possible scenarios of development of a situation depending on a choice of parameters of a task. As the point of sight uses closest point to the water cannon on the horizontal axis in the layer of wood, the temperature of which is more than the critical value. If there are several points that meet the requirement, as the sight selected one with maximum height. The article demonstrates the table of dependence of critical intensity of water supply is provided to an attack point from critical temperature. The results of numerical simulations showing that the optimum zone is the area with the temperature of 800 K. Changing the critical temperature up or down increases the flow rate of water needed to extinguish the fire.

Keywords: mathematical modeling, fire, free water, forest

Проблема природных катаклизмов крайне важна, так как последствия данных явлений очень тяжелы во многих сферах жизни общества, как с точки зрения биологических жертв, так и с точки зрения экономического ущерба. В частности, к таким проблемам относят и проблему лесных пожаров. При возгорании леса, где убытки становятся колоссальными, в целых краях и областях объявляется режим чрезвычайного положения. Вследствие этого перед наукой стоит проблема моделирования пожаров и способов его тушения.

Лесной массив будем моделировать многофазной однотемпературной однородной пористой реагирующей средой [5]. Положим лес продуваемым массивом, по сравнению с объемной долей газовой фазы будем считать объемную долю конденсированной фазы лесных горючих материалов пренебрежимо малой [2, 4]. Будем считать, что пожар начинается в условиях уже сформировавшегося поля скоростей. Температуру очага в течение заданного времени примем постоянной величиной, его форму будем считать прямоугольной, давление в начальный момент времени полагаем равным атмосферному [3]. Процесс считаем независимым

от координаты y . Расчеты проводились для характерных типов растительности Высокоборского лесхоза Нижегородской области [6]. Лес считается однородным по всей высоте. Предполагаем, что вода подается в точку прицела с заданной интенсивностью, а размер капель таков, что они долетают до цели и полностью испаряются.

Высокоборское лесничество находится в заволжской части Нижегородской области. Его географические координаты $56^{\circ}30'$ с. ш. и $44^{\circ}50'$ в. д. По ботанико-географическому районированию оно располагается в пределах подзоны хвойно-широколиственных (подтаежных) лесов. Преобладающими почвообразующими породами являются флювиогляциальные пески. Ландшафтная структура территории лесничества такова. В центральной его части распространены сосновые молодняки и болота на флювиогляциальных песках. Это зандровая равнина, сформированная во время таяния московского ледника. В северной части заповедника распространены леса со значительным участием неморальных видов, что обуславливается произрастанием их на двучленных отложениях, состоящих из моренного суглинка или супеси, перекрытых

сверху истонченным плащом флювиогляциального песка [7]. Рельеф лесничества в основном равнинный, но встречаются нерезкие холмы и овраги. По климатическим условиям территория лесничества может быть отнесена к атлантико-континентальной климатической области [1]. Средняя температура января -10°C , июля $-18,1^{\circ}\text{C}$, средняя годовая $-3,6^{\circ}\text{C}$. Осадки выпадают преимущественно в теплый период года. Среднегодовое количество осадков составляет 628 мм.

$$f(x, z, t) = \frac{W_{int}}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0(t))^2 + (z-z_0(t))^2}{4\sigma^2}\right),$$

где $x_0(t)$, $z_0(t)$ – координаты точки прицела водной пушки; W_{int} – массовый расход воды на метр фронта, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$; σ , м – среднеквадратическое отклонение, обуславливающее дальность разлёта частиц воды от точки прицела.

В качестве точки прицела используется ближайшая к водной пушке по оси x точка в слое леса, температура которой больше критической величины T_{cr} . В случае, когда несколько точек удовлетворяют данному условию, в качестве прицела выбирается точка с наибольшей высотой. Данная двумерная постановка своим главным достоинством имеет возможность выбора критического значения температуры и анализа алгоритмов подачи воды в область пожара, а также позволяет выбирать высоту подачи воды. Если вода подается недостаточно интенсивно, чтобы потушить пожар, пламя продвигается, но много медленней.

Рассмотрим динамику огня при $T_{cr} = 450\text{ K}$ и $W_{int} = 1,25\text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$. Результаты показали, что в данном случае при подаче такого количества воды тушения не происходит.

По мере распространения пламени существенно меняются области высоких температур. В очаге пожара и потоке продуктов горения значительно возрастает скорость газовой фазы.

Расчеты показали, что для эффективного тушения при $T_{cr} = 450\text{ K}$ необходимо $W_{int} = 2,38\text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$. При таком раскладе точка разрыва фронта пожара появляется в момент времени 6 с. Потери энергии во фронте пожара на испарение попавшей воды приводят к замедлению скорости его распространения. Часть фронта огня в середине полога леса тушит вода при 6,8 с, причем оставшиеся части очага не могут выделить достаточной энергии для продолжения пожара и компенсации энергии, затраченной на испарение поступающей воды. Вследствие этого лесной пожар довольно быстро затухает.

Для моделирования тушения фронта пожара будем использовать характеристики водных пушек. Будем считать, что в наличии имеется достаточное количество пушек, расположенных вдоль всей линии фронта пожара с заданным интервалом так, чтобы вода подавалась с максимально эффективной интенсивностью. Считаем, что подача заданного количества воды водной пушкой осуществляется в точку прицела с разбросом по нормальному закону:

Как показали расчеты, тушение пожара при $T_{cr} = 800\text{ K}$ требует меньше воды ($W_{int} = 1,73\text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$) и более эффективно. Динамика тушения при вышеописанных параметрах представлена на рис. 1.

Верхняя часть фронта пожара срезается на первоначальном этапе, но из-за того, что конвекция быстро разогревает верхнюю часть слоя лесных горючих материалов, это не ведет к тушению огня. В момент времени 1,2 с фронт пожара становится устойчивым. Однако уже при 1,6 с температура уменьшается, вследствие чего скорость распространения огня и способность противостоять поступающей воде уменьшаются. Как видно из рисунка, на момент времени 2,8 с, в нижней части фронта пожара имеет место вспышка, но так как там сконцентрирован обстрел водной пушкой, пламя затухает.

При $T_{cr} = 1500\text{ K}$ динамика распространения пожара описана ниже, при этом $W_{int} = 2,68\text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$. Разрыв фронта пожара происходит на начальном этапе подачи воды при 0,8 с, температура в верхней части полога леса значительно падает. В приземную зону перемещается прицел подачи воды при 1,6 с.

При температуре ниже 1500 K вода прекращает подаваться. Однако во фронте пожара температура достаточно высокая для возобновления горения, а в момент времени 2,4 с повышается по всей высоте огня. Прицел водной пушки перемещается в приземный слой, и температура в нём существенно снижается при 3,2–4,8 с, после чего распространение пламени прекращается, так как температура огня недостаточна для его продолжения.

Случай, когда интенсивность подачи воды выше и ниже критической, показан на рис. 2. До 0,3 с на графиках отсутствуют линии, так как на момент готовности водной пушки пожар вне зоны досягаемости струи воды.

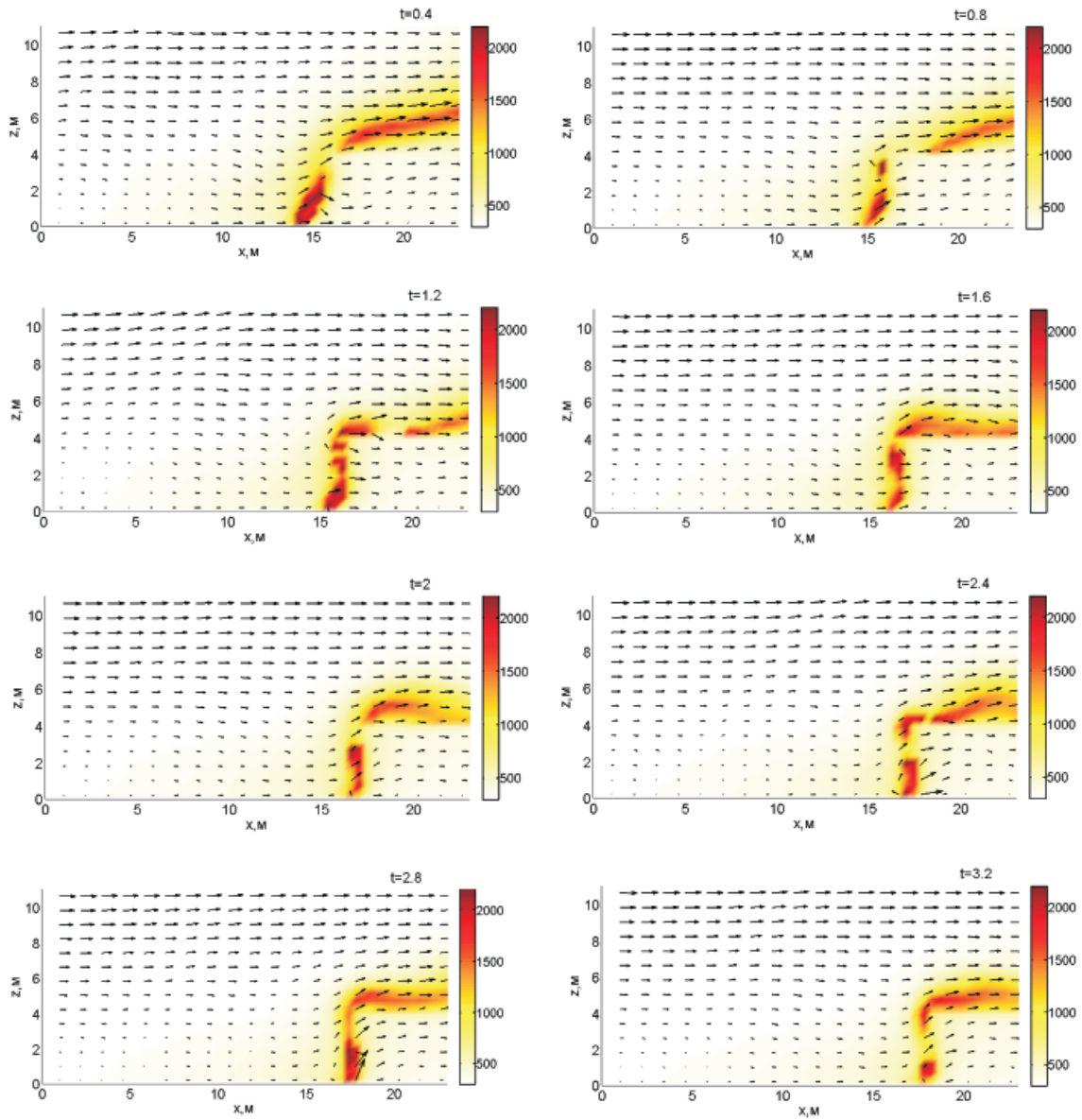


Рис. 1. Динамика распространения пожара при $T_{cr} = 800 K$, $W_{int} = 1,73 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$

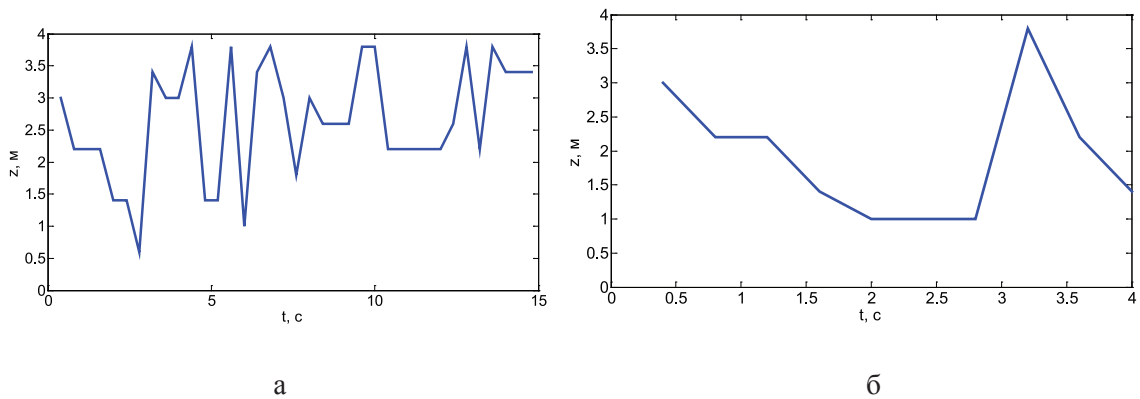


Рис. 2. Динамика движения точки прицела подачи воды при $T_{cr} = 800 K$:
 а – $W_{int} = 1,72 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$; б – $W_{int} = 1,73 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$

Рис. 2, а показывает, что при малой интенсивности подачи воды, точка прицела носит хаотичный характер. В таком случае классически точкой прицела выбираются точки из верхней части полога лесного массива. На рис. 2, б на начальном этапе подачи воды динамика точки прицела аналогична рис. 2, а, однако можно наблюдать достаточно долгий промежуток времени подачи воды в нижнюю часть фронта пожара (2–2,8 с) рис. 2, б. Малые температуры сосредоточены в нижней части полога лесного массива к моменту 2 с. Энергия в меньшей степени распространяется вверх из-за подачи воды, что тормозит распространение пожара.

Таблица демонстрирует результаты численных экспериментов по моделированию тушения пожара при помощи заданного потока воды в данной постановке.

Зависимость эффективности подачи воды в зависимости от значения критической температуры

Критическая температура, К	Критическая интенсивность подачи воды, кг/(м·с)
500	2,111
600	1,885
800	1,726
900	1,759
1500	2,677

Итак, полученные результаты показали, что тушение пожара максимально эффективно при температуре 800 К, а использование в качестве прицела точек с температурой ниже или выше 800 К приводит к увеличению интенсивности подачи воды. Это связано с тем, что вода расходуется на охлаждение растительности в кромке пожара.

Если в данную область не подавать воду, то часть энергии теряется за счет внешнего поля скоростей. Выбор зоны низких температур в качестве точки прицела не ведет к сильному росту необходимой интенсивности подачи воды. Если точкой обстрела принять область высоких температур, то есть ядро очага, тогда энергия, затрачиваемая на излучение, приводит к уменьшению рассеивания.

Важно отметить, что интенсивность излучения, в соответствии с законом Стефана – Больцмана, пропорциональна четвёртой степени температуры, что предполагает увеличение интенсивности подачи воды. Распространение лучистой энергии происходит менее интенсивно, это ведет к уменьшению её потерь и некоторому торможению распространения пожара. Увеличение количества воды позволяет остановить распространение пожара.

Список литературы

1. Алисов Б.П. Климатические области и районы СССР. – М., 1947.
2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – 405 с.
3. Катаева Л.Ю. Применение понятий и методов механики жидкости и газа для решения некоторых актуальных задач экологии: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск: Томский гос. ун-т, 2000. – 180 с.
4. Катаева Л.Ю. Анализ динамических процессов аварийных ситуаций природного и техногенного характера: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Нижний Новгород, 2009. – 180 с.
5. Катаева Л.Ю. Постановка и проведение вычислительного эксперимента по исследованию аэро- и гидродинамических процессов в аварийных ситуациях природного и техногенного характера: монография. – М.: РГОТУПС, 2007. – 218 с.
6. Романова Н.А., Лоцилов А.А. Математическое моделирование динамической подачи воды в зону лесного пожара равномерно по всему фронту // Перспективы развития науки: сборник статей Международной научно-практической конференции. 20 марта 2014 г. / отв. ред. А.А. Сукиасян. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. – С. 10–13.
7. Фридман Б.И., Кулинич Г.С. Геоморфология Шахунских Увалов // Геоморфология, 1981. – № 3. – С. 85–91; Геологические путешествия по горьковской земле – Горький: Волго-Вят. кн. изд-во 1990. – 192 с.

References

1. Alisov BP Climatic regions and districts of the USSR. Moscow, 1947.
2. Grishin, A.M. Matematicheskoe modelirovanie lesnykh požarov i novye sposoby bor'by s nimi / A.M. Grishin Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otdelenie, 1992. 405 p.
3. Kataeva L.Ju. Primenenie ponjatij i metodov mehaniki zhidkosti i gaza dlja reshenija nekotorykh aktual'nykh zadach jekologii // Dis. na soisk. uch. stepeni kand. f.-m.n. Tomsk: Tomskij gos. un-t, 2000, 180 p.
4. Kataeva, L.Ju. Analiz dinamicheskikh processov avarijnykh situacij prirodnogo i tehnogennogo haraktera: dis. dokt. fiz.-mat. nauk. Nizhnij Novgorod, 2009. 180 p.
5. Kataeva, L.Ju. Postanovka i provedenie vychislitel'nogo jeksperimenta po issledovaniju ajero- i gidrodinamicheskikh processov v avarijnykh situacijah prirodnogo i tehnogennogo haraktera: monografija Moskva, RGOTUPS, 2007. 218p.
6. Romanova N.A., Loshhilov A.A. Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskoi podachi vody v zonu lesnogo požara ravnomerno po vsemu frontu // Perspektivy razvitiya nauki: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 20 marta 2014 g./ отв. red. А.А. Sukiasjan. Ufa: RIC BashGU, 2014, pp. 10–13.
7. Freedman B.I., Kylinich G.S. Geomorphology Shahunskih uvalami // Geomorphology, 1981, no. 3, pp. 85–91; Geologic travel Gorky ground Bitter: Volga-Vyatka. book. ed of 1990, 192.

Рецензенты:

Петрухин Н.С., д.ф.-м.н., ординарный профессор Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Нижний Новгород;

Карпухин В.Б., д.ф.-м.н., доцент, профессор Московского государственного университета путей сообщения, Российская открытая академия транспорта, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 07.05.2014.