

УДК 519.63, 536.46

Н.А. Лощилова, А.А. Куркин

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МЕХАНИКИ РЕАГИРУЮЩИХ СРЕД
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ
СТАЦИОНАРНЫМ И ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ПОДАЧИ ВОДЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе излагаются результаты численного моделирования и оптимизации процесса тушения лесного пожара стационарным и движущимся источником подачи воды. Проведен анализ различных сценариев тушения в предположении, что капли воды, попадающие в зону обстрела, полностью испаряются. Анализ результатов показал, что местоположение точки прицела при заданной критической температуре оказывает существенное влияние на необходимое для тушения значение интенсивности воды от стационарного и движущегося источников подачи воды. Для стационарного источника оптимальной точкой обстрела является ближайшая точка, температура которой выше критической. Чем больший объем воды подается водяной пушкой, тем выше критическая скорость её движения. Вода поступает сверху и расходует на охлаждение конвективной колонки, поэтому при уменьшении интенсивности подачи только малая часть воды поступает в очаг пожара, что приводит к увеличению необходимого количества воды.

Ключевые слова: математическое моделирование, вода, лес, пожар, сплошная реагирующая среда, тушение.

Введение

Природные катастрофы являются одной из ключевых проблем, их последствия негативно сказываются на всех сферах жизни общества. Природные пожары зачастую становятся настоящим бедствием, принося немалый ущерб. Анализ динамики крупных лесных пожаров за последние годы как в России, так и за рубежом показал недостатки существующих способов борьбы с ними. Каждый год на подавление огня тратится огромное количество ресурсов, вследствие чего возникает вопрос об их минимизации. Успешная борьба с крупными лесными пожарами требует продуманной стратегии, основанной на анализе как распространения пожара с учётом возможных сценариев его развития, так и его взаимодействия со свободной водой, подаваемой в очаг. Как известно, при использовании воды для тушения пожара основными факторами является поглощение тепловой энергии на испарение и уменьшения доступа кислорода в зону горения за счёт образующегося водяного пара. Эффективность влияния воды на динамику лесного пожара в таком случае существенно зависит от режима и зоны подачи воды. Теоретическое исследование процесса тушения лесного пожара является одной из актуальнейших проблем современности и позволяет определить оптимальные параметры его тушения, определять наиболее уязвимые зоны пожара, что в свою очередь позволяет совершенствовать средства и способы борьбы с ними.

В современной научной литературе существует огромное количество моделей разного уровня, позволяющих описывать динамику самого лесного пожара и модели, позволяющие реконструировать струю воды.

Все современные исследования в этой области имеет смысл разделить на следующие группы: работы, посвящённые моделированию динамики пожара [1–3], работы, посвящённые динамике струи воды и капли под воздействием различных внешних факторов [4, 5] и работы, посвящённые моделированию частиц воды, водяных завес, сплинкерных систем [6–8], работы, связанные с моделированием тушения пожаров водяными завесами [9] и сбросом воды сверху [10]. Однако ранее не ставился вопрос определения эффективного количества воды при заданной точке прицела и выборе сценария тушения, необходимого для подавления пламени. Важно отметить, что для тушения лесного пожара необходимо знать его динамику [11], учитывать различные режимы и способы подачи воды [12, 15].

Постановка задачи

Для удобства моделирования лес считаем ажурным и представим его многофазной однородной пористой реагирующей средой с постоянной температурой и высотой [13]. Лес, температуру очага принимаем постоянной в течение заданного времени, давление считаем равным атмосферному, форма очага в виде прямоугольника. Учет влияния воды на динамику пожара осуществляется за счет учета изменения энергии в области подачи воды и учета процесса кипения. Пусть свободная вода, подаваемая в зону горения, может как расходоваться за счет кипения, так и пополняться, например, в результате подачи в заданную область.

$$\rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = -R_4 + f(x, z, t), \quad R_4 = \begin{cases} \frac{1}{q_4} \frac{\partial T}{\partial t} \left(\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} + \rho_5 c_{p5} \right), T = T_b \text{ и } \varphi_4(x, z, t) \neq 0, \\ f(x, z, t) \cdot T > T_b, \\ 0, T < T_b \text{ и } \varphi_4(x, z, t) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где R_4 – массовая скорость процесса кипения свободной воды, кг/(с·м³); ρ_4 – истинная плотность, кг/м³; φ_4 – объемная доля свободной воды; $f(x, z, t)$ – массовая скорость подачи свободной воды, кг/(с·м³); $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ – удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля, Дж/(кг·К), кг/м³ ($i = 1$ – сухое органическое вещество, $i = 2$ – связанная вода, $i = 3$ – конденсированные продукты пиролиза, $i = 5$ – газовая фаза); T – температура среды, К; T_b – температура точки кипения воды, К.

В отличие от известных постановок, в которых вещество может только переходить между различными фазами, в данном случае имеет место источник подачи воды. Как следствие, необходимо учесть внутреннюю энергию подаваемой воды, соответствующую температуре окружающей среды.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left(\left(\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} + \rho_5 c_{p5} \right) T \right)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_5 c_{p5} U T)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_5 c_{p5} W T)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_1 R_1 - q_2 R_2 + q_3 R_3 - q_4 R_4 + q_5 R_5 + \\ & + k_s (c U_R - 4 \sigma T^4) + f(x, z, t) T_e c_{p4}, \end{aligned} \quad (2)$$

где c_{p4} – удельная теплоемкость свободной воды, Дж/(кг·К); R_1, R_2, R_3, R_5 – массовые скорости реакции пиролиза сухого органического вещества, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза соответственно, кг/(с·м³); q_2, q_3, q_5 – тепловые эффекты реакций испарения, горения кокса и окисления летучих продуктов пиролиза, Дж/кг; σ – постоянная Стефана-Больцмана, кг·с⁻³·К⁻⁴; U_R – плотность потока излучения, Дж/м⁴; k_Σ – коэффициент ослабления, с⁻²; k_s – спектральный коэффициент поглощения; c – скорость света, м/с; μ_t, λ_t, D_t – коэффициенты динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии соответственно, Па·с, Вт/(м·К), м²/с; U, W – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости газовой фазы, м/с.

Численное моделирование тушения лесного пожара стационарным источником подачи и его анализ

Рассмотрим случай равномерного распределения воды по всему фронту пожара вдоль координаты y . Такая ситуация возможна при наличии необходимого количества техники и ограниченной протяженности сформировавшегося фронта пожара. Тушение лесного пожара будем моделировать разными вариантами выбора точки обстрела из водяной пушки. Капли

воды, долетая до цели, полностью испаряются. Вода подается по нормальному закону, обеспечивая подачу заданного количества воды:

$$f(x, z, t) = \frac{w_{int}}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0(t))^2 + (z-z_0(t))^2}{4\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где $x_0(t)$, $z_0(t)$ – координаты точки прицела водяной пушки; w_{int} – массовый расход воды на метр фронта, кг/(м·с); σ , м – среднеквадратическое отклонение, определяет дальность разлёта от точки прицела водных частиц.

Основным достоинством двумерной постановки, описанной ранее, является возможность анализа различных алгоритмов подачи воды в область пожара и выбора критического значения температуры T_{cr} и высоты её подачи. Если интенсивности подачи воды недостаточно для тушения пожара, он продолжает распространяться более медленно, чем в случае отсутствия каких-либо мер по его предотвращению.

Табл. 1 демонстрирует результаты проведенных численных экспериментов по моделированию пожара при заданной критической температуре.

Таблица 1

Зависимость интенсивности подачи воды от выбора точки прицела

Точка об-стрела	Дисперсия распределения Гаусса, м	Минимальная высота (начальная ячейка)	Критическая интенсивность подачи воды, кг/(м·с)	Время тушения, с	Общий объем воды, кг/м
Ближняя	0.5	1	0.712	7.2	5.1264
Ближняя	0.5	5	0.982	8	7.856
Ближняя	1	1	0.978	7.2	7.0416
Ближняя	1	5	1.287	7.8	10.038
Дальняя	0.5	1	1.133	12	13.596
Дальняя	0.5	5	0.718	7.6	5.4568
Дальняя	1	1	0.771	7.2	5.5512
Дальняя	1	5	1.091	10	10.91

Влияние выбора точки прицела на процесс тушения представлено на рис. 1. В качестве точки прицела выбираются точки с температурой выше критической, и требуется определить минимальную интенсивность воды w_{int} , достаточную для тушения лесного пожара. Результаты численного моделирования представлены на рис. 1, а. Видно, что для случая выбора максимально удаленной точки по оси x от источника, вода должна подаваться с минимально необходимой интенсивностью $w_{int} = 1.133$ кг/(м·с). Разрыв фронта пожара в этом случае имеет место в момент 7.2 с, причем скорость газовой фазы направлена преимущественно в нижней части леса по пути распространения пожара. Далее пожар плавно затухает. С каждым шагом высота фронта пожара плавно переходит в нижнюю часть леса. Пожар полностью сходит на нет в момент времени 18.8 с.

Рассмотрим случай, когда в качестве точки прицела выбирается ближайшая точка, температура которой больше T_{cr} . Для успешного тушения в данном случае минимально необходимое значение интенсивности воды составляет $w_{int} = 0.712$ кг/(м·с). Динамика пожара показана на рис. 1, б. Важно отметить, что в этом случае не имеет места разрыв фронта пожара. При 7.6 с в нижней части леса уже отсутствуют высокие температуры. С определенного момента времени динамика пожара противоположна случаю, где для тушения выбирается максимально удаленная точка. К моменту времени 10 с линия фронта пожара постепенно переходит в верхнюю часть лесополосы, а затем и полностью вверх. Пожар полностью потушен к 14 с.

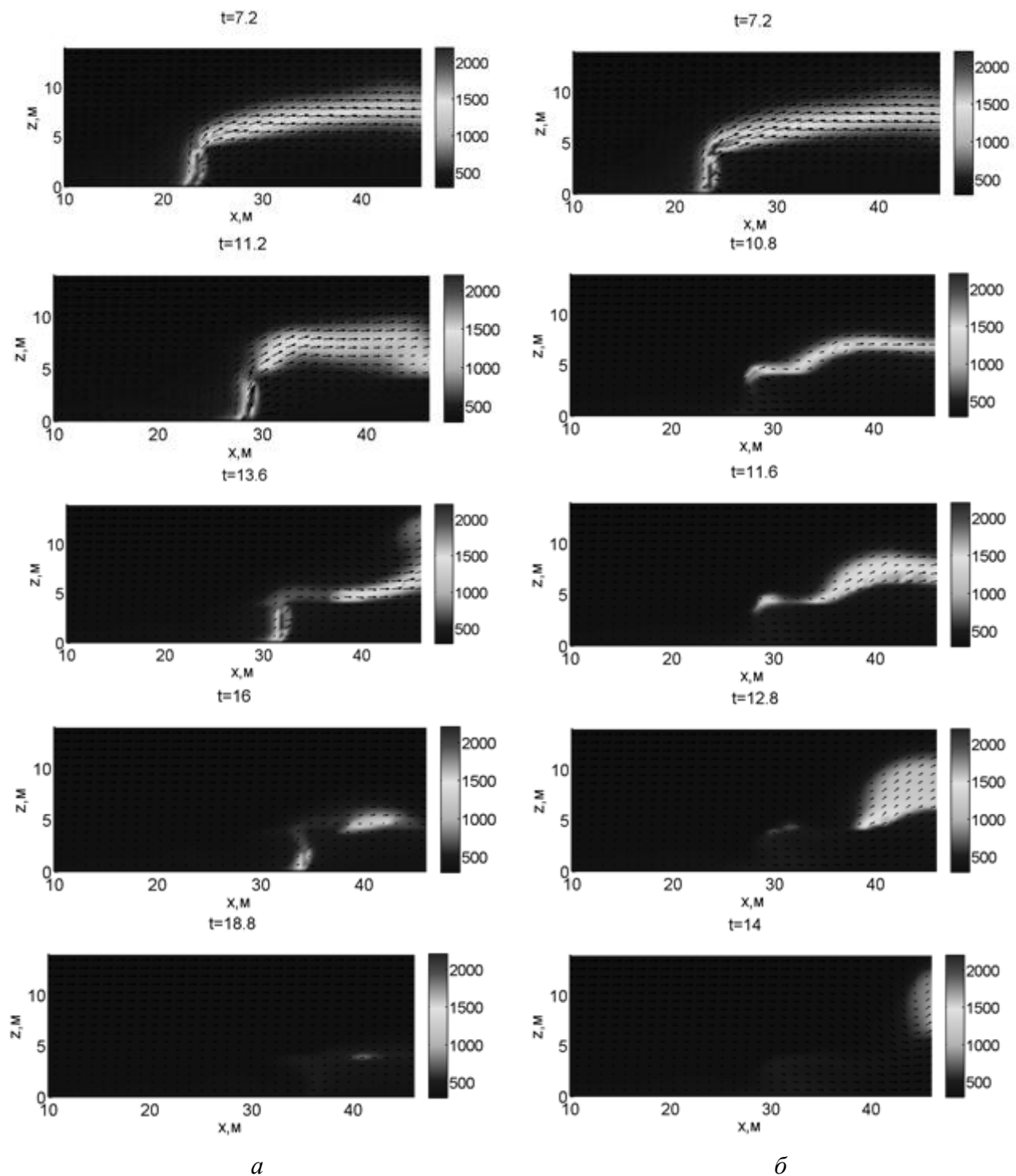
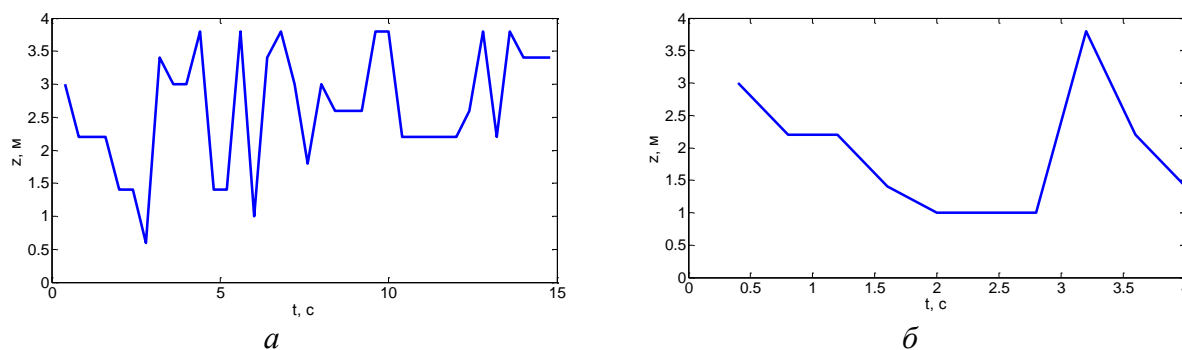


Рис. 1. Динамика распространения пожара при обстреле в выбранную точку относительно стационарно расположенного источника подачи воды:
а – максимально удаленной точки; *б* – ближайшей точки

На рис. 2 показана динамика движения точки прицела подачи воды для случая интенсивности выше и ниже критической. К моменту готовности источника подачи воды пожар находится вне досягаемости струи воды, поэтому на графиках до 0.3 с нет линий. Как видно из рис. 2, *а*, в случае недостаточной интенсивности подачи воды, движение точки прицела носит хаотичный характер, более часто выбираются точки в верхней части полога леса. На рис. 2, *б* на начальном этапе динамика точки прицела аналогична, однако можно

наблюдать достаточно долгий промежуток времени подачи воды в нижнюю часть фронта пожара (2 – 2.8 с).



**Рис. 2. Динамика движения точки прицела подачи воды при $T_{cr} = 800 \text{ K}$:
а – $w_{int} = 1.72 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$; б – $w_{int} = 1.73 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$**

Результаты численного моделирования процесса тушения лесного пожара при выборе ближайшей точки к источнику показали, что для успешного подавления процесса распространения волны горения при $T_{cr} = 450 \text{ K}$, необходимо $w_{int} = 2.38 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$, а наиболее эффективным становится тушение пожара при выборе значения изотермы $T_{cr} = 800 \text{ K}$ и при этом требуется существенно меньше воды $w_{int} = 1.73 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$. На рис. 3 приведены результаты численных экспериментов по моделированию тушения пожара при помощи заданного потока воды в двумерной постановке при выборе ближайшей точки к источнику подачи воды.

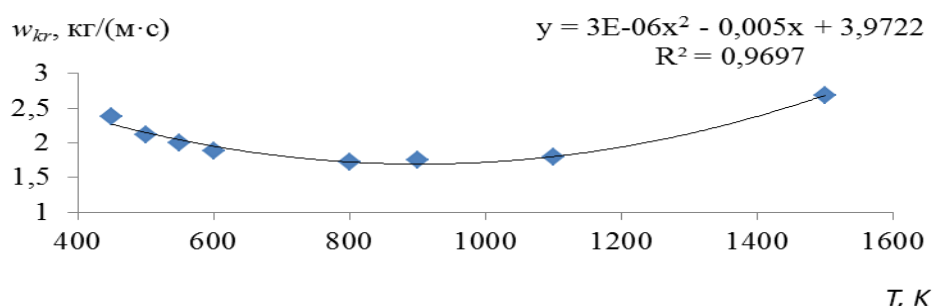


Рис. 3. Зависимость эффективности подачи воды в зависимости от значения критической температуры

Из рис. 3 видно, что для данного типа растительности зависимость расхода воды от значения критической температуры имеет форму параболы и именно точка минимума, соответствующая $T_{cr} = 833 \text{ K}$ для этой зависимости, определяет оптимальные условия тушения пожара.

В случае, если подача воды производится в область более низких температур, требуемая интенсивность увеличивается в связи с тем, что вода тратится на охлаждение растительности, находящейся впереди кромки пожара. В отсутствии подачи воды в эту область часть этой энергии рассеялась бы за счёт внешнего поля скоростей. Использование в качестве точки прицела области низких температур не приводит к катастрофическому росту требуемой интенсивности подачи воды. Выбор точки обстрела в области с высокими температурами, свойственными ядру очага приводит к уменьшению рассеивания энергии на излучение, интенсивность которого, согласно закону Стефана-Больцмана, пропорциональна четвёртой степени температуры, а это в свою очередь требует увеличения интенсивности подачи воды. Уменьшение интенсивности распространения лучистой энергии приводит не только к уменьшению её потерь, но и к некоторому замедлению распространения пожара, что позволяет остановить его распространение, хотя и с несколько большими затратами воды.

Ограничение подачи воды не ниже заданной высоты приводит к тому, что процесс тушения перемещается в верхний ярус и не затрагивает нижний слой, а это в свою очередь при повальном пожаре приводит к тому, что пожар будет распространяться несмотря на все предпринимаемые усилия. Отсутствие такого ограничения по высоте позволяет потушить пожар при минимальной интенсивности подачи воды. Этот результат отражен на рис. 4.

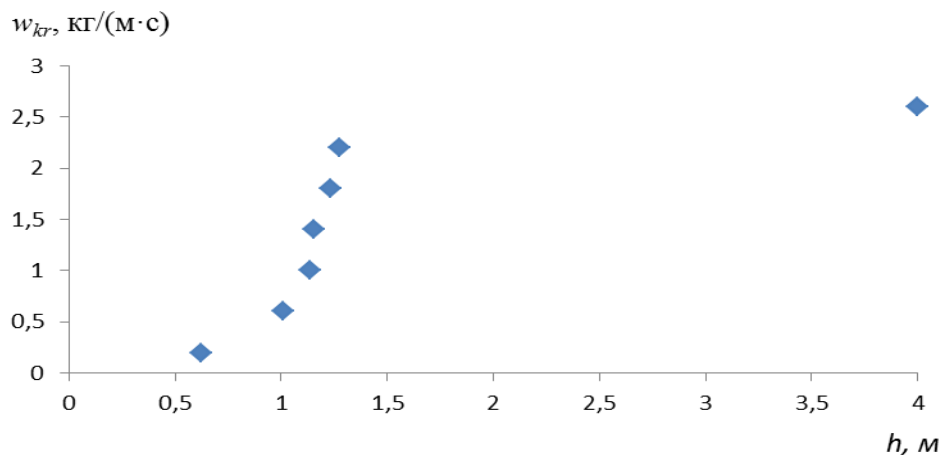


Рис. 4. Зависимость эффективности подачи воды в зависимости от ограничения на минимально возможную высоту подачи воды

На рис. 5 показана динамика движения точки прицела для случаев подачи воды с интенсивностью выше критической на высоту не ниже 0.2 м и 1.8 м. В случае отсутствия существенных ограничений на высоту подачи воды подача воды вначале производится в верхнюю часть слоя леса, так как именно там пламя раньше попадает в область досягаемости источника подачи воды. В течении 1 – 1.6 с производится подача воды в нижний слой, после чего пожар вытесняется вверх. В случае наличия ограничения на высоту подачи воды не менее 1.8 м, на начальном этапе подавляется верхняя часть очага пожара, после чего вода поступает только в случае, если пламя выходит за заданную границу.

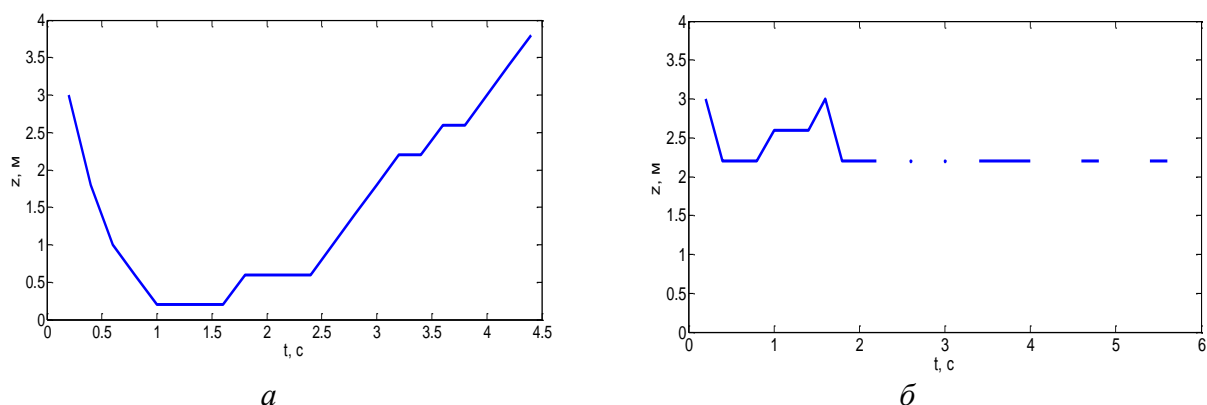


Рис. 5. Динамика движения точки прицела подачи воды при $T_{cr} = 800$ К:
 $a - w_{int} = 0.626$ кг/(м·с), $h_{cr} = 1.8$ м, $b - w_{int} = 1.274$ кг/(м·с), $h_{cr} = 1.8$ м

Также следует отметить, что подача воды в области с наименьшей высотой, где температура достаточно велика, позволяет более эффективно прекращать распространение лесных пожаров. Тем не менее, практическая реализация такого метода подачи воды сопряжена с серьезными трудностями.

Численное моделирование тушения лесного пожара движущимся вдоль фронта пожара источником подачи и его анализ

Ранее были описаны случаи равномерного распределения воды по всему фронту, но данный способ подачи воды технически достаточно трудно реализуем. Рассмотрим ситуацию, когда водяная пушка движется параллельно фронту пожара, причем её составляющая скорости вдоль фронта пожара не может превышать 20 м/с, это связано с техническими сложностями подачи необходимого количества воды. Минимальная скорость составляет 0.5 м/с. Передвижение водяной пушки такой низкой скоростью нецелесообразно, так как многократно возрастает расход воды на тушение фронта заданной длины. Чем выше скорость пушки, тем меньше воды требуется на тушение одной единицы фронта. Необходимо найти максимальную скорость, при которой пожар будет потушен. Вода, попадающая в плоскость моделирования, учитывается с помощью двумерного изотропного распределения Гаусса. Для моделирования взаимодействия падающей сверху воды используется алгоритм, описанный в работе [14].

Во всех расчётах, представленных в данном параграфе, в качестве времени пресечения точки прицела водяной пушки с плоскостью моделирования пожара принималось $t_1 = 4\sigma/U_n$, где $\sigma = 2$ м, а U_n – постоянная величина в рамках каждого отдельного расчёта.

Динамика взаимодействия пожара с водой при обстреле по центру ядра пожара с интенсивностью 60 кг/с и скоростью движения водяной пушки 3.13 м/с показана на рис. 6 и рис. 7.

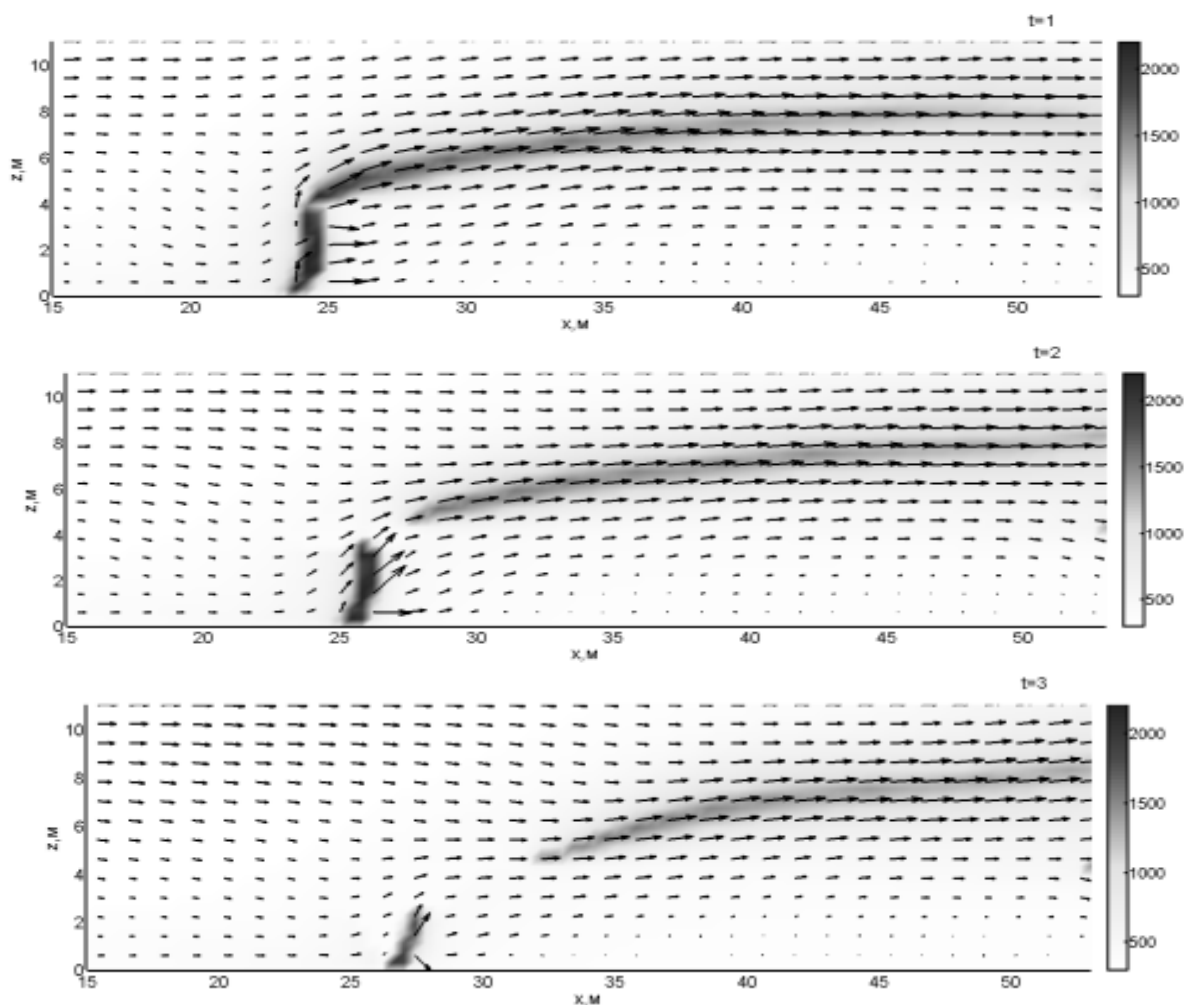


Рис. 6. Динамика взаимодействия пожара с водой при обстреле по центру ядра пожара с интенсивностью 60 кг/с и скоростью движения водяной пушки 3.13 м/с (1–3 с)

Рис. 6 демонстрирует, что в момент времени 1 с температура несколько снижается из-за малого количества воды, попадающей в плоскость моделирования пожара. Интенсивность верхней части пожара уменьшается по мере увеличения количества поступающей воды. Происходит разрыв конвективной колонки, очаг сужается и к моменту 3 с становится ниже.

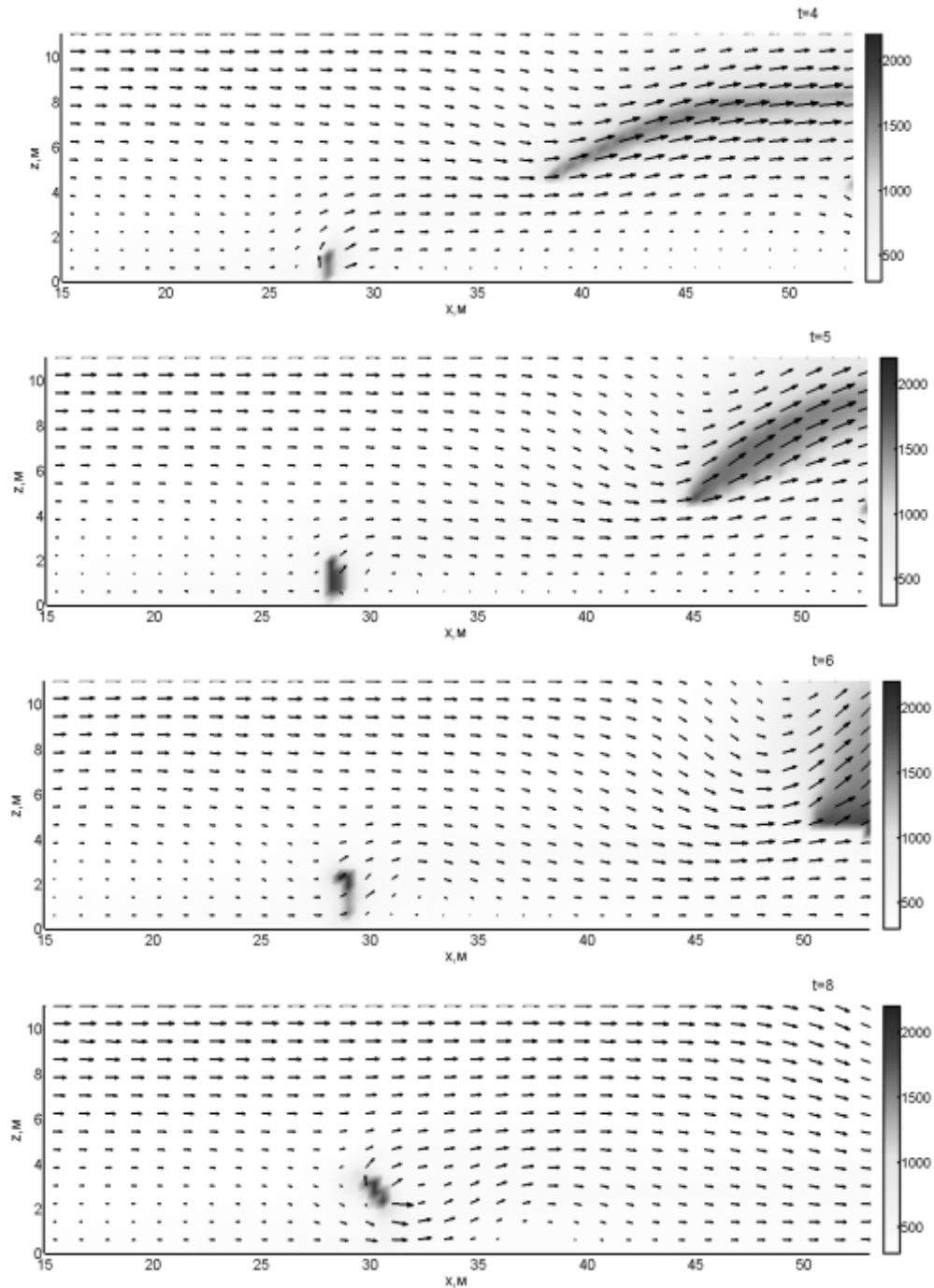


Рис. 7. Динамика взаимодействия пожара с водой при обстреле по центру ядра пожара с интенсивностью 60 кг/с и скоростью движения водяной пушки 3.13 м/с (4–8 с)

На рис. 7 видно, что даже при небольшом удалении водяной пушки от плоскости моделирования брызги, долетающие до очага горения, препятствуют разгоранию пламени. На момент времени 4 с очаг сжимается. Но затем уже к пятой секунде расширяется, происходит его развитие.

Необходимо отметить, что интенсивность потока воды, а также время его действия существенно влияют на динамику развития пожара.

Результаты моделирования тушения пожара стационарным источником подачи воды показывают, что оптимальной точкой обстрела является ближайшая точка, температура которой выше критической. Расход воды значительно уменьшается при повышении минимальной высоты обстрела дальней точки. Изменение дисперсии распределения Гаусса меняет расход воды для точки примерно так же, как и изменение высоты.

При численном моделировании различных способов тушения пожара движущимся источником подачи воды получено, что чем больший объем воды подается водяной пушкой, тем выше критическая скорость её движения. Вода поступает сверху и расходуется на охлаждение конвективной колонки, поэтому при уменьшении интенсивности подачи только малая часть воды поступает в очаг пожара, что приводит к уменьшению необходимого количества воды.

Как можно видеть, динамика пожара при различных значениях интенсивности подачи свободной воды имеет много общего. По мере приближения точки прицела к плоскости моделирования происходит тушение верхней части слоя лесных горючих материалов, основная часть очага пожара тушится, когда прицел близок к плоскости моделирования, а оставшаяся часть пожара тушится, когда прицел вновь отдаляется от плоскости. В случае, если скорость водяной пушки существенно ниже критической, то прекращение пожара в рассматриваемой плоскости происходит намного раньше, однако это не увеличивает скорость тушения пожара, а напротив, уменьшает.

Согласно данным, приведённым в работе [16], расход воды на площадь кромки пожара лесного пожара составляет около 5 л/м^2 кромки пожара.

Согласно расчётам, приведённым в работе [17], на прекращение пламенного горения килограмма топлива с теплотой сгорания $40\text{-}50 \text{ МДж/кг}$ за счёт охлаждения пламени требуется 2 литра воды, при этом отмечается, что на практике это значение в 5-10 раз выше. В проведённых расчётах плотность лесных горючих материалов составляет 8 кг/м^2 , а их теплотворная способность 11 МДж/кг . Таким образом, принимая во внимание плотность и учитывая поправку на его теплотворную способность, можно получить расчётное значение требуемого количества воды на уровне 4 кг/м^2 . С учетом ширины кромки пожара 1-1,5 м расход воды составит 4-6 кг/м. Представленные расчёты учитывают не все факторы, приводящие к недостаточному эффективному использованию воды. Так, учитывается расход воды на преодоление области нагретой газовой фазы в верхней части полога леса, и используется упрощённая модель рассеивания воды на основе изотропного двумерного распределения Гаусса, то есть с одинаковой дисперсией по каждой из координат. В модели не рассматривается динамика капель различных размеров, вместо этого предполагается, что капли долетают до цели и там полностью испаряются.

При тушении пожара при помощи обстрела водяной пушкой или авиацией вода, поступающая сверху, перед попаданием в зону активного горения в пологе леса испаряется за счёт энергии горения продуктов пиролиза. Если вода поступает недостаточно быстро, то она не попадает в полог леса и не тушит пожар. В случае, если интенсивность подачи воды достаточно большая, происходит охлаждение лесных горючих материалов в области кромки пожара, что препятствует их горению. На основании полученных в результате расчётов данных о концентрации кислорода в зоне горения можно считать, что весь кислород, поступающий в кромку пожара, расходуется на реакции горения. Преобладающим является процесс горения летучих продуктов пиролиза. В проведённых расчётах скорость ветра в пологе леса составляла в среднем 2 м/с . Учитывая массовую концентрацию кислорода в воздухе $C_{1e} = 0.2314$ и высоту полога леса 4 м , а также температуру, плотность, давление невозмущённой среды $T_e = 300 \text{ К}$, $P = P_e = 101325 \text{ Па}$, $\rho_{5e} = 1.179 \text{ кг/м}^3$, можно вычислить

поток кислорода на единицу длины фронта пожара $I_{51} = \bar{U} C_{1e} h_f \rho_{5e} = 2.182$ кг/(с·м). Смесь летучих продуктов пиролиза предполагается считать как эффективный газ (СО). При его горении отношение расхода топлива к окислителю составляет $M_1/(2M_2) = 1.75$. Тепловой эффект горения летучих продуктов пиролиза составляет $Q_5 = 10^7$ Дж/кг. Скорость распространения пожара в условиях отсутствия тушения по данным численных расчётов составила $\omega = 1.5$ м/с. Плотность элемента лесных горючих материалов в абсолютно сухом состоянии составляет $\rho_c = 2$ кг/м³, влагосодержание лесных горючих материалов $w = 0.13$. На основании этих данных можно вычислить энергию, выделяемую при сгорании летучих продуктов пиролиза в расчёте на единицу длины фронта пожара и секунду его распространения $I_{Q5} = I_{51} Q_5 M_1 / (2M_2) = 3.82 \cdot 10^7$ Дж/(м·с). Тепловой эффект пиролиза не зависит от наличия кислорода, поэтому приток энергии от пиролиза составляет $I_{Q1} = \omega h_f Q_1 R_c = 1.2 \cdot 10^7$ Дж/(м·с). Затраты энергии на сушку составляют $I_{Q2} = \omega h_f Q_2 R_c w = 2.43 \cdot 10^6$ Дж/(м·с).

Библиографический список

1. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – 405 с.
2. **Albini, F.A., Chase, C.H.** Fire containment equations for pocket calculators. Research Note INT-268. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1980.
3. **Coen, J.L.** Simulation of the Big Elk fire using coupled atmosphere–fire modeling // Int. J. Wildland Fire. 2005. № 14. P. 49–59.
4. **Стоцкий, А.Н.** Математическая модель движения импульсной струи жидкости в воздухе с учетом переходных процессов в формирующем устройстве. // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 246–250.
5. **Букреев, В.И.** Влияние аномальной зависимости плотности от температуры на поверхностное гравитационное течение // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 4. № 1. С. 63–69.
6. **Yanga, W., Parkera, T., Ladouceurb, H.D., Keea, R.J.** The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression // Fire Safety Journal. 2004. V. 39. Iss. 1. P. 41–66.
7. **Tsoi, A., Snegirev, A., Tanklevskiy, L., Sheinman, I.** Flame Suppression by Water Sprays: Exploring Capabilities and Failures of FDS / Proc. of the Seventh Int. Seminar on Fire and Explosion Hazards ISFEH7 (5-10 May 2013, Providence RI, USA), Research Publ., 2013, pp. 482-491.
8. **Bullen, M.L.** The Effect of a Sprinkler on the Stability of a Smoke Layer Beneath a Ceiling // In: Fire Research Note 1016, Fire Research Station, Borehamwood. UK. 1974. P. 1 – 11.
9. **Романова, Н.А.** Влияние водного барьера на эффективность тушения лесного пожара / Н.А. Романова, Д.А. Маслеников, И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева // Инновации в науке. 2013. № 27. С. 26 – 34.
10. **Романова, Н.А.** Влияние интенсивности сброса воды на эффективность тушения лесного пожара / Н.А. Романова, Д.А. Маслеников, И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева // Инновации в науке. 2013. № 27. С. 35 – 40.
11. **Катаева, Л.Ю.** Анализ динамических процессов аварийных ситуаций природного и техногенного характера: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2009. – 180 с.
12. **Романова, Н.А.** Математическое моделирование динамической подачи воды в зону лесного пожара равномерно по всему фронту / Н.А. Романова, А.А. Лоцилов // Перспективы развития науки: сборник статей Международной научно-практической конференции. 20 марта 2014 г./ отв. ред. А.А. Сукиасян. - Уфа: РИИЦ БашГУ. 2014. С. 10–13.
13. **Катаева, Л.Ю.** Постановка и проведение вычислительного эксперимента по исследованию аэро- и гидродинамических процессов в аварийных ситуациях природного и техногенного характера: монография / Л.Ю. Катаева. – М.: РГОТУПС, 2007. – 218 с.

14. **Масленников, Д.А.** Особенности математического моделирования распространения суммарного теплового потока при лесных пожарах / Д.А. Масленников, И.Е. Белоцерковская, С.А. Лошилов, Л.Ю. Катаева. – Нижний Новгород: ООО «Стимул-СТ», 2012. – 110 с.
15. **Катаева, Л.Ю.** О влиянии водного барьера на динамику лесного пожара в зависимости от рельефа местности / Л.Ю. Катаева, А.Д. Постнов, С.А. Лошилов, Д.А. Масленников // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 1. С. 30–37.
16. **Гундар, С.В.** Приемлемый пожарный риск / С.В. Гундар, А.Н. Денисов, Н.Я. Трифонов // Пожаровзрывобезопасность. 2009. №3. С. 57–66.
17. **Абдурагимов, И.М.** Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. С. 195–198.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

N.A. Loshilova, A.A. Kurkin

USING THE METHODS OF MECHANICS OF REACTING MEDIA FOR MODELING THE SUPPRESSION OF FOREST FIRES WITH STATIONARY AND WITH MOVING SOURCE OF WATER SUPPLY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The paper presents the results of numerical simulation and optimization process of forest fire extinguishing with stationary and moving source of water supply. The analysis of different scenarios of extinguishing under the assumption that water droplets falling into the zone of fire, completely evaporate.

Method: The study is based on physico-mathematical and numerical models of process of forest fire extinguishing.

Results: Analysis of the results showed that the location of the point of aim at a given critical temperature has a significant impact on the value of water intensity required for extinguishing forest fire. It works for both stationary and moving water source. For the stationary source the optimum aim point is the closest point with a temperature above the critical point. The larger the volume of water supplied with water gun, the higher the critical speed of its movement. Water is supplied from above and expended on convective column cooling, so the flow rate decreases; only a small portion of water flows into the seat of fire, which increases the required amount of water.

Application domain: Presented results can be used to develop improved models of process of forest fire extinguishing.

Key words: mathematical modeling, water, forest, fire, continuous reacting media, extinguishing.