

УДК 533.6.011.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ РАЗРЫВОВ И ЗАСЛОНОВ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

В. А. Перминов, В. И. Марзаева

Томский политехнический университет, 634050 Томск, marzaeva1993@gmail.com

Методом математического моделирования изучается процесс распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов и заслонов конечных размеров. Математически данная задача сводится к решению уравнений Рейнольдса для турбулентного течения с учетом химических реакций. Для получения дискретного аналога использован метод контрольного объема. Рассчитаны поля температуры, концентраций кислорода и летучих продуктов пиролиза и горения, объемных долей конденсированной фазы. Модель позволила в динамике установить контуры распространения верховых лесных пожаров, которые зависят от запаса и вида лесных горючих материалов, влажосодержания, скорости и направления ветра и т. д. Также определена зависимость размеров противопожарных разрывов и заслонов от вышеуказанных параметров, при которых верховой пожар прекращает распространение.

Ключевые слова: математическое моделирование, верховой пожар, противопожарный разрыв, противопожарный заслон, метод контрольного объема.

DOI 10.15372/FGV20200310

ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары мощнейшим образом влияют на происходящие на планете глобальные изменения окружающей среды. Следы этого катастрофического явления можно найти на каждом континенте. Из недавних событий: пожары в центральной и северной частях Португалии, Испании (октябрь 2017); в Восточной Аттике (Греция), где сгорели целые поселки, много человеческих жертв (июль, 2018); лесной пожар на севере штата Калифорния (США), самый разрушительный и смертоносный в истории штата (ноябрь, 2018); в России природные пожары происходят ежегодно, нанося огромный экономический и социальный ущерб [1].

Такие сложные явления, как лесные пожары, изучаются с помощью физического и математического моделирования. Математическое моделирование обладает рядом преимуществ по сравнению с физическим экспериментом, например экологической безопасностью и большей экономической эффективностью. Исследования верховых лесных пожаров методом математического моделирования проведены в работах [2–6]. В [2] предложена математическая модель, учитывающая основные физико-химические процессы, присущие лесному пожа-

ру. В этой работе, кроме рассмотрения общей динамики поведения пожара, было проанализировано влияние противопожарных барьеров на распространение лесного пожара. Модель позволила провести оценку геометрии фронта пожара и скорости распространения верхового лесного пожара.

Противопожарные барьеры (разрывы и заслоны) служат для обеспечения оптимального режима пожарной безопасности в лесах, предупреждения возгораний и пожаров, препятствования продвижению пожаров на отдельных участках. Система противопожарных барьеров требует немалых затрат на создание и поддержание в хорошем рабочем состоянии. Исходя из этого она должна быть научно обоснованной и эффективной. Несмотря на то, что созданию противопожарных барьеров посвящено немало работ, эта проблема остается недостаточно изученной. В работе [7] на основе результатов экспериментов и математического моделирования предложены параметры противопожарных барьеров в сосновом лесу, но этого недостаточно ввиду большого разнообразия лесной растительности. В работе [8] рассмотрены принципы создания противопожарных лесных полос с барьером из лиственных видов для защиты от верховых пожаров. На основе результатов натурного исследования последствий

катастрофических верховых пожаров 2004 г. в островных лесостепных борах Курганской области, прошедших через полосу 50–70-летнего березового древостоя средней полноты, предложено создавать противопожарные листовые барьеры шириной не менее 150 м. Недостатком работ [7, 8] является ограниченное описание в них процесса, что характерно для многих полумпирических и экспериментальных исследований. Отсутствует четкая физическая модель лесного пожара, не рассматриваются физико-химические процессы внутри зоны лесного пожара. Следует отметить работу [9], где выполнено численное моделирование распространения низового лесного пожара с учетом противопожарного разрыва. Однако, ввиду того что интенсивность низовых пожаров меньше, чем верховых, полученные в [9] параметры не могут быть распространены для оценки параметров последнего.

Целью данной работы является изучение фундаментальных физических механизмов возникновения и развития горения при верховых лесных пожарах. Рассмотрена также проблема повышения эффективности противопожарных барьеров и контроля их защитного действия.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть очаг зажигания имеет конечные размеры, причем начало системы координат связано с центром очага. Ось OZ направлена вертикально вверх, а оси OX и OY — параллельно земной поверхности. Ось OX совпадает с направлением ветра. Под действием ветра очаг верхового пожара начинает распространяться по лесному массиву. На рис. 1 схематично изображена область, включающая в себя лесной массив и противопожарный барьер конечного размера (разрыв, заслон).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

При выводе системы уравнений, граничных и начальных условий приняты следующие допущения: 1) лес представляет собой многофазную, многокомпонентную пористодисперсную среду, 2) рассматривается двухтемпературная (различаются температуры газовой и конденсированной фаз), односкоростная реагирующая среда; 3) полог леса предполагается недеформируемым, сила сопротивления

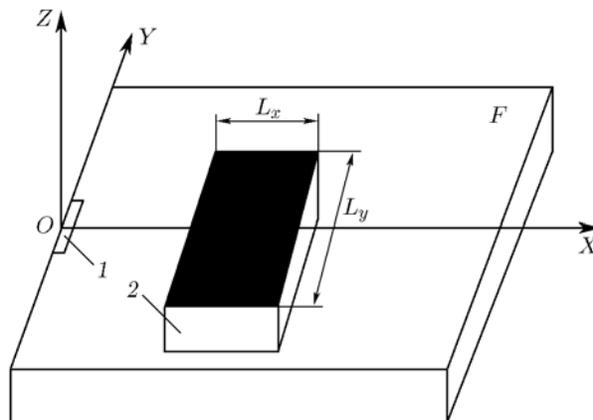


Рис. 1. Схема зоны пожара:

1 — очаг зажигания, 2 — противопожарный барьер конечного размера (разрыв или заслон), F — хвойный лесной массив, L_x , L_y — размеры барьеров по осям OX и OY соответственно

полога леса представлена в уравнении сохранения импульса в газовой фазе, т. е. среда считается квазитвердой (почти не деформируемой во время порывов ветра); 4) рассматривается так называемый «вентилируемый» лесной массив, в котором объемной долей конденсированной фазы, состоящей из сухого органического вещества, воды в жидкокапельном состоянии, твердых продуктов пиролиза и золы, можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы (компоненты воздуха и газообразных продуктов пиролиза и горения); 5) течение в исследуемой области имеет развитый турбулентный характер; 6) плотность газообразной фазы не зависит от давления из-за низкой скорости потока по сравнению со скоростью звука.

Исходя из того, что вертикальные размеры лесного массива несопоставимо меньше его горизонтальных размеров, общая система дифференциальных уравнений процесса тепло- и массопереноса в трехмерном массиве может быть проинтегрирована по высоте полога леса h . Для этого исходная система уравнений приводится к дивергентному виду, затем интегрируется по высоте полога леса: $\int_0^h \phi dz = \bar{\phi}h$, где $\bar{\phi}$ — среднее значение величины ϕ [3].

Для определения источников членов, характеризующих приток (отток массы) в единицу объема газовой дисперсной фазы, были использованы формулы для скорости образования газодисперсной фазы \dot{m} , расхода кислорода R_{51} и изменения концентрации оксида углерода

R_{52} . В результате математически задача сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = \dot{m} - \frac{\dot{c}^- - \dot{c}^+}{h}; \quad (1)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{u'v'}) - \rho s c_d u |\vec{u}| - \dot{m}u + \frac{\tau_x^- - \tau_x^+}{h}; \quad (2)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'^2}) - \rho s c_d v |\vec{v}| - \dot{m}v + \frac{\tau_y^- - \tau_y^+}{h}; \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}(-\rho c_p u' \overline{T'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho c_p v' \overline{T'}) + q_5 R_5 - \alpha_v(T - T_s) + \frac{q_T^- - q_T^+}{h} + k_g(cU_R - 4\sigma T^4); \quad (4)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'c'_\alpha}) + R_{5\alpha} - \dot{m}c_\alpha + \frac{J_\alpha^- - J_\alpha^+}{h}, \quad \alpha = \overline{1, 2}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} \right) - kcU_R + 4k_g \sigma T^4 + 4k_s \sigma T_s^4 = 0, \quad k = k_g + k_s; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s(cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v(T - T_s); \quad (7)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \quad (8)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_C}{M_1} R_3, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0;$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, \quad p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha},$$

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c)R_1 + R_2 + \frac{M_C}{M_1}R_3, \quad (9)$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2}R_5; \quad R_{52} = v_g(1 - \alpha_c)R_1 - R_5.$$

Для описания процессов пиролиза, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза используются соотношения:

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right),$$

$$R_2 = k_2 T^{-0.5} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right), \quad (10)$$

$$R_3 = k_3 \rho s_\sigma \varphi_3 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right),$$

$$R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right).$$

Решение вышеизложенной системы уравнений проводится при следующих начальных и граничных условиях:

$$t = 0: \quad u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_e, \quad c_\alpha = c_{\alpha e},$$

$$T_s = T_e, \quad \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (11)$$

$$x = 0: \quad u = V_e, \quad v = 0, \quad T = T_e, \quad c_\alpha = c_{\alpha e},$$

$$-\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (12)$$

$$x = x_e: \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (13)$$

$$y = 0: \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{cU_R}{2} = 0; \quad (14)$$

$$y = y_e: \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{cU_R}{2} = 0. \quad (15)$$

Координаты очага зажигания $|x| \leq \delta_x$, $|y| \leq \delta_y$, где δ_x и δ_y — размеры очага по осям OX и OY соответственно. Температура в очаге зажигания изменяется в зависимости от времени:

$$T = T_s = \begin{cases} T_e + \frac{t}{t_0}(T_0 + T_e), & t \leq t_0, \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp \left[-k \left(\frac{t}{t_0} - 1 \right) \right], & t > t_0. \end{cases}$$

Считая, что тепло- и массообмен во фронте пожара с приземным слоем атмосферы и нижним ярусом леса происходит по закону Ньютона, соответствующие члены уравнений можно записать в виде [3]

$$\frac{J_\alpha^- - J_\alpha^+}{h} = -\frac{\alpha}{c_p s h} (c_\alpha - c_{\alpha e}), \quad (16)$$

$$\frac{q_T^- - q_T^+}{h} = -\frac{\alpha}{h} (T - T_e). \quad (17)$$

Влагосодержание лесных горючих материалов (ЛГМ) является безразмерной величиной и определяется по формуле $W = (m - m_0)/m_0$, где m — масса ЛГМ в естественном состоянии, m_0 — масса ЛГМ в абсолютно сухом состоянии.

В уравнениях используются следующие обозначения: $R_1 \div R_3$, $R_{5\alpha}$ — массовые скорости пиролиза ЛГМ, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи и пепла и образования компонентов α газодисперсной фазы; t_0 — время формирования очага горения; c_{pi} , ρ_i , ϕ_i — удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля i -й фазы ($i = 1$ — сухое органическое вещество, 2 — вода в жидкокапельном состоянии, 3 — конденсированные продукты пиролиза, 4 — минеральная часть); τ_i , q_T , J_α — характеристики обмена импульсом, энергией и массой компонента α как с приземным слоем атмосферы, так и с нижним ярусом леса; T , T_s — температура газовой и конденсированной фаз; c_α — массовая концентрация ($\alpha = 1$ — кислород, 2 — горючие продукты пиролиза, 3 — инертные компоненты воздуха); p — давление; U_R — плотность энергии излучения; σ — постоянная Стефана — Больцмана; k — коэффициент ослабления излучения; k_g , k_s — коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; α_v — коэффициент обмена фаз; q_i , E_i , k_i — тепловой эффект, энергия

активации и предэкспонент реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; s_σ — удельная поверхность элемента ЛГМ; M_α , M_C , M — молекулярные массы индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; s , c_d — удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полого леса; c — скорость света; u , v — проекции скорости на оси X , Y соответственно; α_c , ν_c — коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; \dot{m} — массовая скорость образования газодисперсной фазы; g — ускорение свободного падения. Индекс 0 относится к параметрам в очаге горения, e — к параметрам на большом расстоянии от зоны пожара [3]. Символом $\frac{d}{dt}$ обозначена полная производная:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y}.$$

Коэффициент теплообмена фаз выбирался на основе данных по теплообмену между элементом ЛГМ (хвоинка, тонкая веточка) и окружающей средой α по формуле

$$\alpha_y = \alpha S - \gamma c_p \dot{m}, \quad S = 2\varphi_s / r_s,$$

где γ — отношение молекулярных масс газа в окружающей среде и выдуваемого в процессе теплообмена; $\varphi_s = \sum_{i=1}^4 \varphi_i$; r_s — радиус цилиндра (типичный элемент ЛГМ) [3].

Турбулентные потоки импульса, тепла и массы записываются через градиенты среднего течения согласно [6]:

$$\begin{aligned} \overline{\rho u'^2} &= 2\mu_t \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} K, \\ \overline{\rho v'^2} &= 2\mu_t \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} K, \\ -\overline{\rho u'v'} &= \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad \mu_t = \frac{c_\mu \rho K^2}{\varepsilon}, \\ -\overline{\rho u'c_p T'} &= \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x}, \quad \lambda_t = \frac{\mu_t c_p}{\text{Pr}_t}, \quad (18) \\ -\overline{\rho v'c_p T'} &= \lambda_t \frac{\partial T}{\partial y}, \\ -\overline{\rho u'c'_\alpha} &= D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x}, \quad \rho D_t = \frac{\mu_t}{\text{Sc}_t}, \end{aligned}$$

$$-\overline{\rho v' c'_\alpha} = D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial y}.$$

Здесь u' , v' — компоненты пульсационной составляющей скорости в проекциях на оси X , Y соответственно; μ_t — коэффициент турбулентной динамической вязкости, определяемый на основе локально-равновесной модели турбулентности [6]:

$$\mu_t = \rho l^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\}^{1/2}; \quad (19)$$

λ_t , D_t — коэффициенты теплопроводности и турбулентной диффузии; c_μ — константа; ε — скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; K — кинетическая энергия турбулентности; Pr_t , Sc_t — турбулентные числа Прандтля и Шмидта; l — путь смещения [10].

Характеристикам лесного массива соответствуют характеристики ЛГМ соснового леса: $E_1/R = 9400$ К, $k_{01} = 3.63 \cdot 10^4$ с⁻¹, $E_2/R = 6000$ К, $k_{02} = 6 \cdot 10^5$ с⁻¹, $q_2 = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг, $E_3/R = 10000$ К, $k_{03} = 10^3$ с⁻¹, $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$ Дж/кг, $E_5/R = 11500$ К, $k_5 = 3 \cdot 10^{13}$ с⁻¹, $q_5 = 10^7$ Дж/кг, $c_p = 1000$ Дж/(кг·К), $\alpha_c = 0.06$, $\nu_c = 0.7$, $\rho_e = 1.2$ кг/м³, $c_{2e} = 0$, $p_e = 10$ Н/м², $T_e = 300$ К, $c_{1e} = 0.23$ [6].

Система уравнений с начальными и граничными условиями приведена к дискретной форме с помощью метода контрольного объема [11]. Возникающие при дискретизации сеточные уравнения решались методом SIP [11]. Применялся метод расщепления по физическим процессам, т. е. вначале рассчитывалась структура течения и распределения скалярных функций без учета химических реакций, а затем решались уравнения химической кинетики с учетом источников членов в уравнениях для определения температуры и концентраций компонентов [6]. Вся вычислительная область разбивается на 801×801 непересекающихся контрольных объемов по осям X и Y соответственно. В каждом контрольном объеме задается узловая точка. Размеры контрольных объемов на границах брали равными 0, а внутри расчетной области — равными 0.5 м по X и Y . Практическая проверка устойчивости

и сходимости проводилась путем уменьшения размеров контрольных объемов в два раза. В результате численных расчетов получены критические размеры разрывов и заслонов. Их отличие составляет менее 1 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На основании вышеизложенной модели были проведены расчеты параметров горения при верховом лесном пожаре в хвойном массиве с учетом противопожарных разрывов и заслонов. Изучено влияние противопожарных барьеров на дальнейшее передвижение фронта пожара. Изменяемыми параметрами являлись скорость ветра в невозмущенной среде, размеры и положение противопожарного разрыва и заслона.

Для получения достоверных результатов расчетов важно, чтобы фронт пожара, подходя к заслону или разрыву, имел устойчивую скорость распространения. Поэтому начальная граница областей разрывов и заслонов установлена на расстоянии 40 м от очага зажигания. Размер всей области составляет 400×400 м по осям X и Y соответственно.

Вначале рассматривался случай распространения фронта верхового лесного пожара при наличии противопожарного разрыва в лесном массиве. Анализировалось влияние размеров разрыва на распространение фронта пожара при скорости ветра $v_e = 5, 8, 10$ и 15 м/с, влагосодержании ЛГМ лесного массива $W = 0.4$. Получены распределения изолиний температуры, концентраций кислорода и продуктов пиролиза до и после противопожарного разрыва. Температура газовой фазы определялась как $\bar{T} = T/T_e$, где $T_e = 300$ К, концентрации кислорода и горючих продуктов пиролиза во фронте пожара — как $\bar{c}_1 = c_1/c_{1e}$ и $\bar{c}_2 = c_2/c_{1e}$ соответственно. Распределения изотерм газовой фазы ($1 - \bar{T} = 5, 2 - \bar{T} = 4, 3 - \bar{T} = 3, 4 - \bar{T} = 2.5, 5 - \bar{T} = 2, 6 - \bar{T} = 1.5, 7 - \bar{T} = 1.3$), изолиний концентраций кислорода ($1 - \bar{c}_1 = 0.1, 2 - \bar{c}_1 = 0.5, 3 - \bar{c}_1 = 0.6, 4 - \bar{c}_1 = 0.7, 5 - \bar{c}_1 = 0.8, 6 - \bar{c}_1 = 0.9$), изолиний концентраций летучих продуктов пиролиза ($1 - \bar{c}_2 = 1.0, 2 - \bar{c}_2 = 0.1, 3 - \bar{c}_2 = 0.05, 4 - \bar{c}_2 = 0.01, 5 - \bar{c}_2 = 0.005, 6 - \bar{c}_2 = 0.001$) при рассматриваемых скоростях показаны на рис. 2–5.

Результаты расчетов влияния размеров противопожарного разрыва на распространение фронта пожара при скорости ветра $v_e = 5$ м/с показаны на рис. 2. Анализ расположения изотерм, изолиний концентраций кислоро-

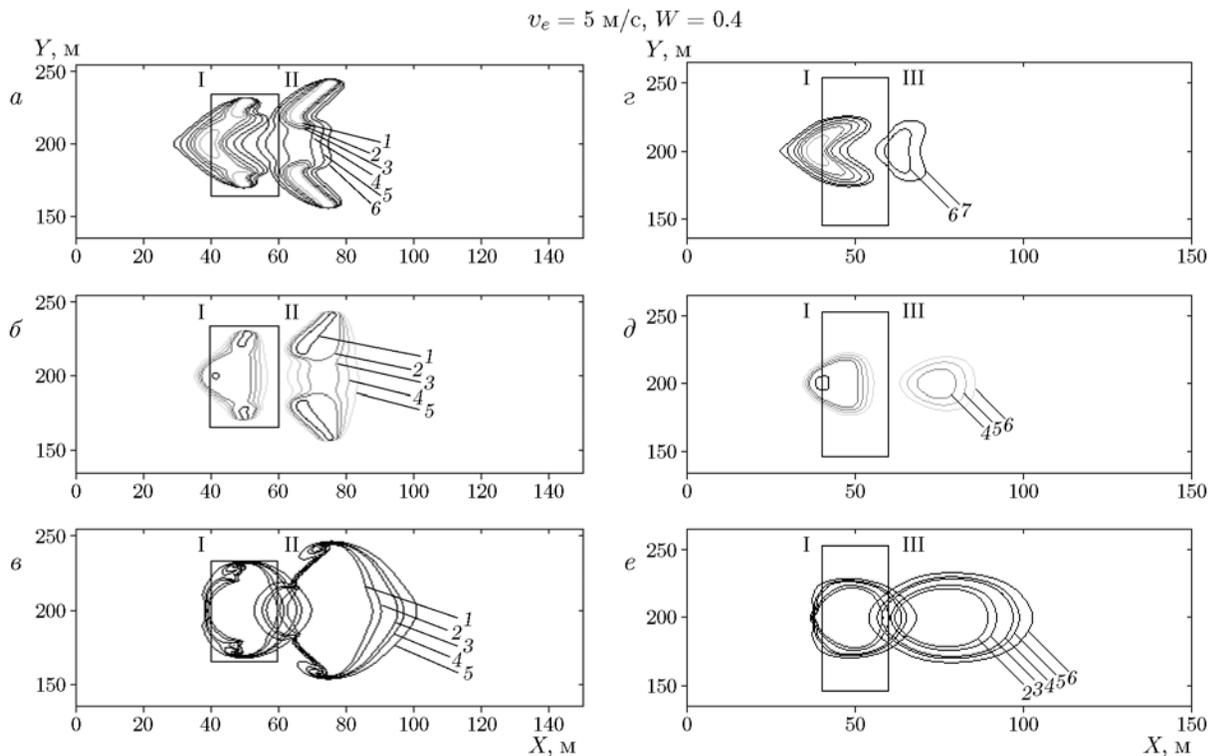


Рис. 2. Распределения температуры газовой фазы (*а, г*), концентраций кислорода (*б, д*) и летучих продуктов пиролиза (*в, е*) при размерах противопожарного разрыва $20 \times 30 \text{ м}$ (*а-в*) и $20 \times 50 \text{ м}$ (*г-е*) в моменты времени $t = 12.3 \text{ с}$ (I), 22 с (II), 25.1 с (III)

да и летучих продуктов пиролиза до и после противопожарного разрыва показал, что фронт пожара преодолевает разрыв размером $20 \times 30 \text{ м}$ и распространяется на не тронутые огнем участки леса (рис. 2, *а-в*). При увеличении разрыва до размеров $20 \times 50 \text{ м}$ из распределения изотерм видно, что температура понизилась и пожар не имеет достаточной энергии для дальнейшего распространения по лесному массиву (рис. 2, *г-е*).

При скорости ветра $v_e = 8 \text{ м/с}$ из распределения изолиний на рис. 3, *а-в* можно заключить, что фронт пожара преодолевает разрыв размером $20 \times 20 \text{ м}$ и распространяется дальше. При увеличении размеров до $20 \times 30 \text{ м}$ изотермы после разрыва соответствуют низким температурам (рис. 3, *г-е*), т. е. распространение пожара прекратилось.

При скорости ветра $v_e = 10 \text{ м/с}$ из приведенных на рис. 4, *а-в* изолиний можно заключить, что фронт пожара преодолевает разрыв размером $20 \times 20 \text{ м}$ и распространяется дальше по лесу, а при размерах $20 \times 30 \text{ м}$ температура после разрыва снижается (рис. 4, *г-е*), следовательно, пожар не имеет достаточной энер-

гии, чтобы распространяться дальше по лесному массиву.

При скорости ветра $v_e = 15 \text{ м/с}$ из представленных на рис. 5, *а-в* изотерм можно заключить, что фронт пожара преодолевает разрыв размером $20 \times 10 \text{ м}$ и распространяется дальше по лесу, а при увеличении разрыва до $20 \times 20 \text{ м}$ температура после разрыва понижается (рис. 5, *г-е*) и пожар не распространяется дальше по лесному массиву. При высоких скоростях ветра преобладает направление фронта пожара по ветру (по оси OX), поэтому он мало расширяется и не может преодолеть небольшие разрывы.

Таким образом, в результате расчетов получены критические размеры разрывов, при которых пожар преодолевает разрыв и распространяется дальше по лесному массиву. Как показал анализ результатов, наилучший способ повышения эффективности разрыва — это увеличение его размера вдоль оси OY (поперек направления распространения фронта пожара). На рис. 6 изображен график зависимости размера разрыва L_y от скорости ветра v_e при постоянном значении $L_x = 20 \text{ м}$.

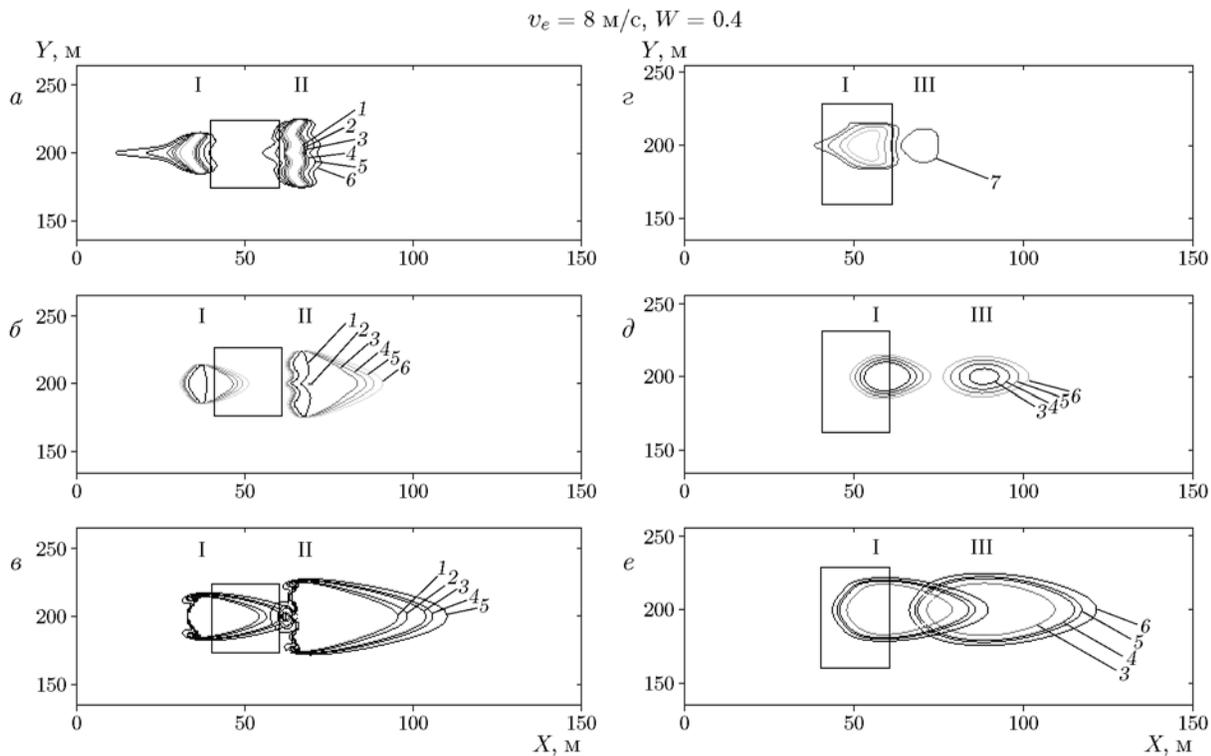


Рис. 3. Распределения температуры газовой фазы (*a, г*), концентраций кислорода (*б, д*) и летучих продуктов пиролиза (*в, е*) при размерах противопожарного разрыва $20 \times 20 \text{ м}$ (*a-в*) и $20 \times 30 \text{ м}$ (*г-е*) в моменты времени $t = 7 \text{ с}$ (I), 12 с (II), 17 с (III)

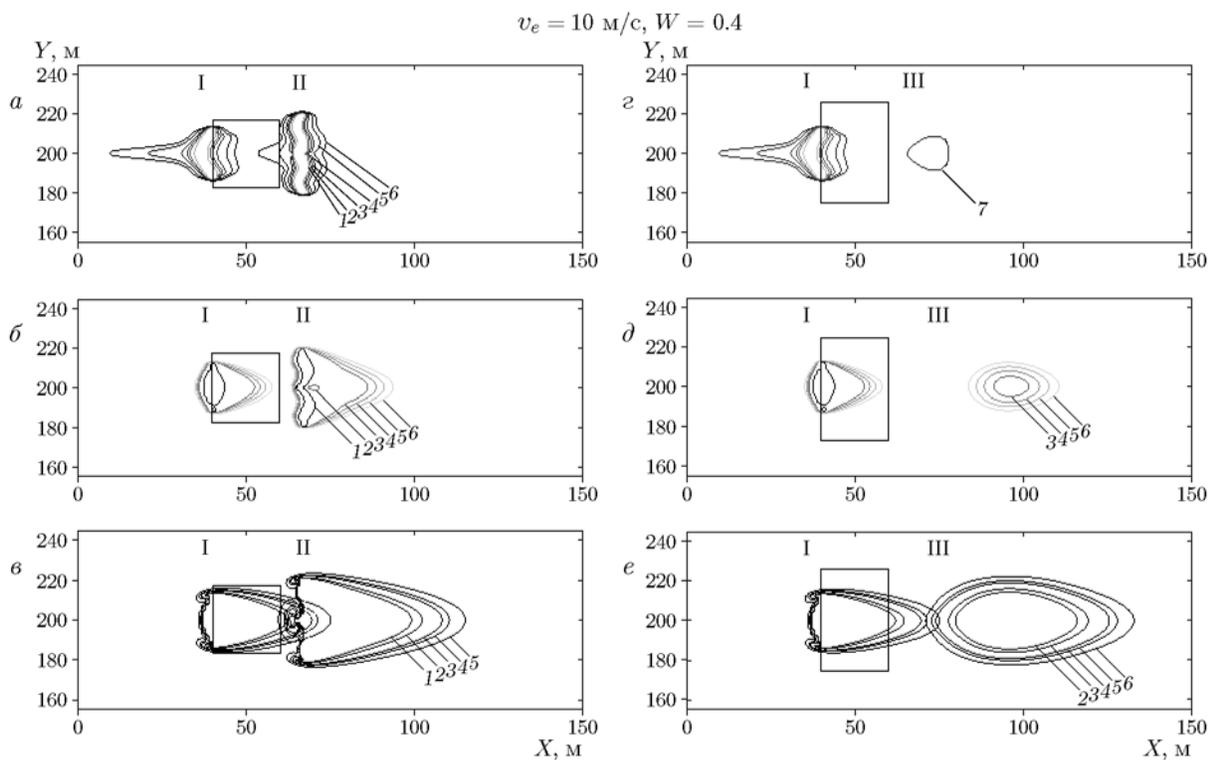


Рис. 4. Распределения температуры газовой фазы (*a, г*), концентраций кислорода (*б, д*) и летучих продуктов пиролиза (*в, е*) при размерах противопожарного разрыва $20 \times 20 \text{ м}$ (*a-в*) и $20 \times 30 \text{ м}$ (*г-е*) в моменты времени $t = 7.5 \text{ с}$ (I), 12 с (II), 14 с (III)

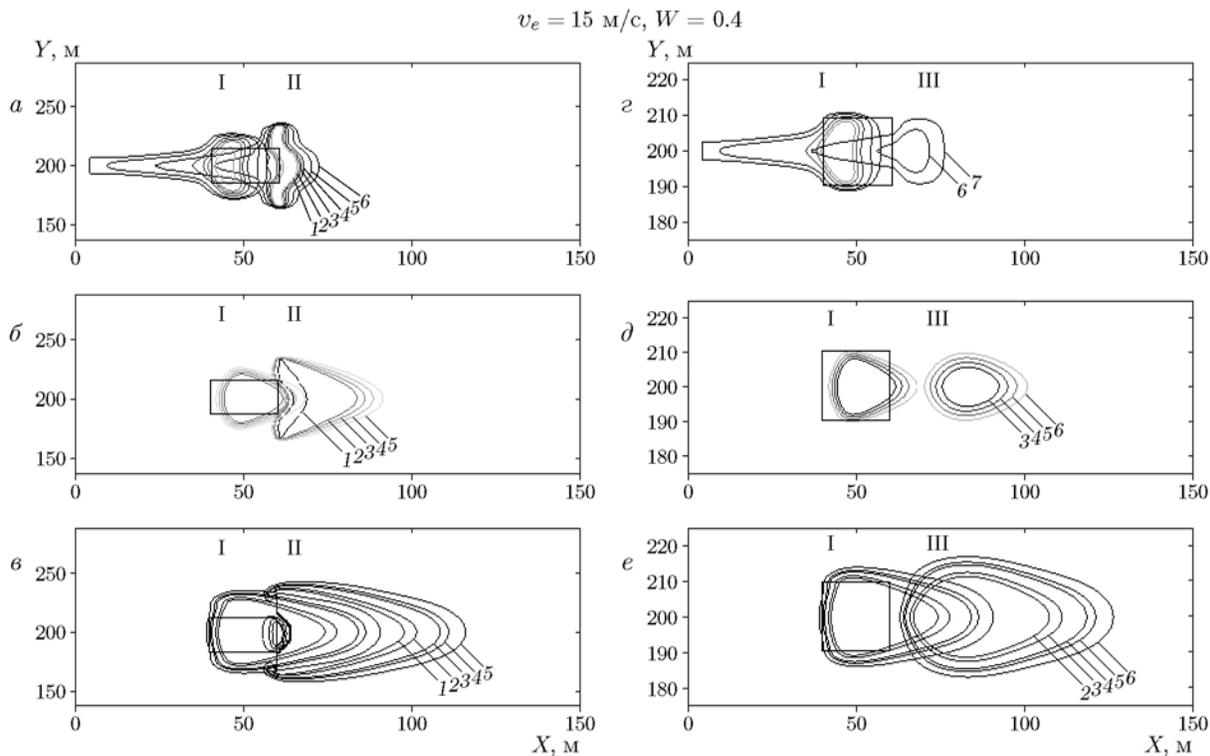


Рис. 5. Распределения температуры газовой фазы (*a, г*), концентраций кислорода (*б, д*) и летучих продуктов пиролиза (*в, е*) при размерах противопожарного разрыва $20 \times 10 \text{ м}$ (*a-в*) и $20 \times 20 \text{ м}$ (*г-е*) в моменты времени $t = 6 \text{ с}$ (I), 10 с (II), 12 с (III)

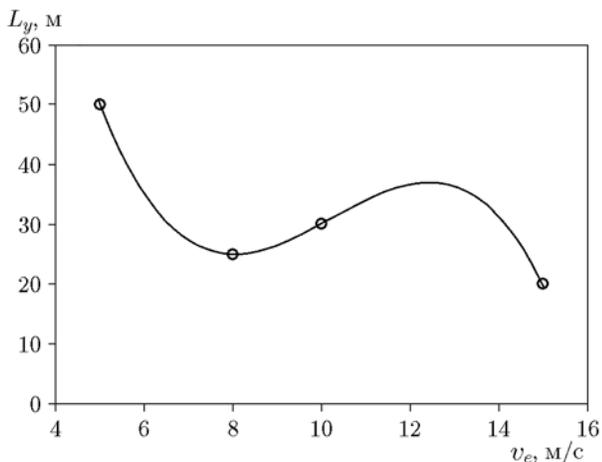


Рис. 6. Зависимость размера разрыва L_y от скорости ветра v_e

В работе рассматривался еще один объект противопожарного обустройства леса — противопожарный заслон конечного размера. Исследовано его влияние на продвижение фронта пожара. Заслоны состоят преимущественно из лиственных пород деревьев, которым соответ-

ствует влагосодержание $W > 1.0$. Были проведены расчеты при скоростях ветра $v_e = 5, 8, 10$ и 15 м/с и влагосодержании ЛГМ $W = 0.4$. Распределения изотерм газовой фазы (1 — $\bar{T} = 5$, 2 — $\bar{T} = 4$, 3 — $\bar{T} = 3$, 4 — $\bar{T} = 2.5$, 5 — $\bar{T} = 2$, 6 — $\bar{T} = 1.5$, 7 — $\bar{T} = 1.3$), изолиний концентраций кислорода (1 — $\bar{c}_1 = 0.1$, 2 — $\bar{c}_1 = 0.5$, 3 — $\bar{c}_1 = 0.6$, 4 — $\bar{c}_1 = 0.7$, 5 — $\bar{c}_1 = 0.8$, 6 — $\bar{c}_1 = 0.9$) и концентраций летучих продуктов пиролиза (1 — $\bar{c}_2 = 1.0$, 2 — $\bar{c}_2 = 0.1$, 3 — $\bar{c}_2 = 0.05$, 4 — $\bar{c}_2 = 0.01$, 5 — $\bar{c}_2 = 0.005$, 6 — $\bar{c}_2 = 0.001$) при рассматриваемых скоростях ветра показаны на рис. 7–10.

При $v_e = 5 \text{ м/с}$, как видно из рис. 7, *a-в*, огонь проходит противопожарный заслон размером $40 \times 40 \text{ м}$ и распространяется на новые участки лесного массива. Увеличение его размеров до $40 \times 50 \text{ м}$ привело к остановке распространения пожара (рис. 7, *г-е*).

При $v_e = 8 \text{ м/с}$, судя по распределению изолиний на рис. 8, *a-в*, фронт пожара преодолевает заслон размером $20 \times 20 \text{ м}$ и распространяется дальше по лесному массиву. Увеличение размера заслона до $40 \times 20 \text{ м}$ привело

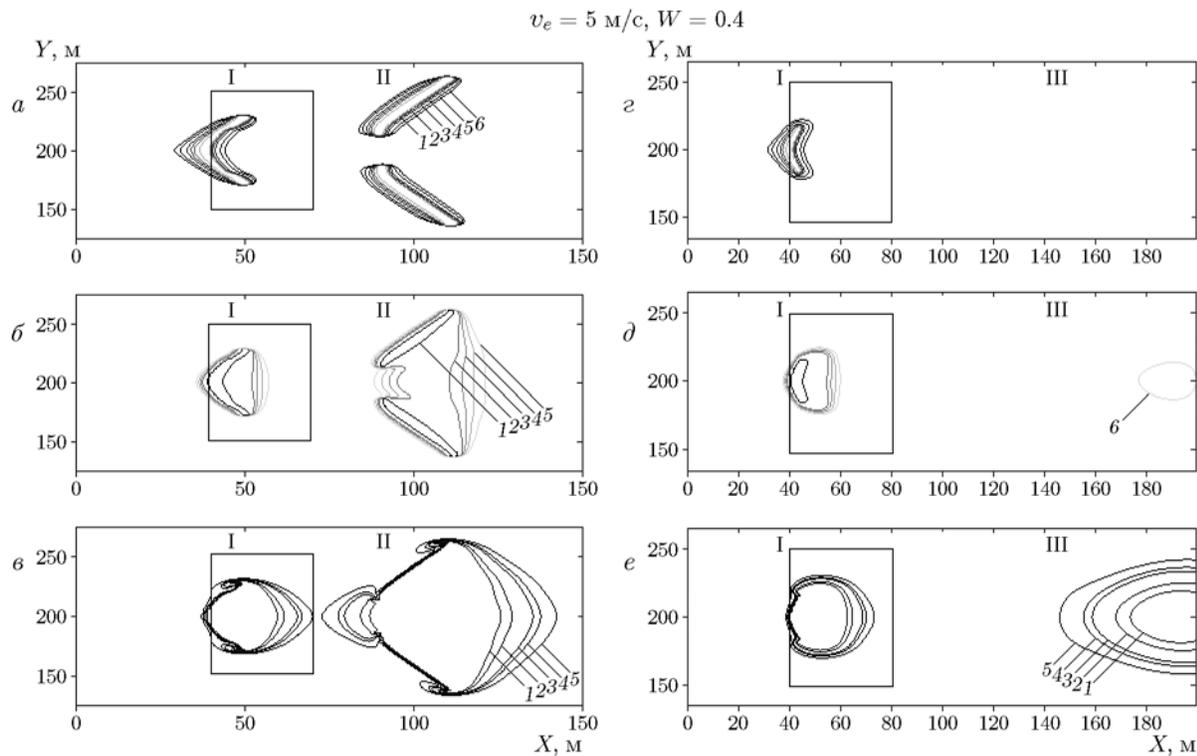


Рис. 7. Распределения температуры газовой фазы ($a, г$), концентраций кислорода ($б, д$) и летучих продуктов пиролиза ($в, е$) при размерах противопожарного разрыва $40 \times 40 \text{ м}$ ($a-в$) и $40 \times 50 \text{ м}$ ($г-е$) в моменты времени $t = 12 \text{ с}$ (I), 26 с (II), 29 с (III)

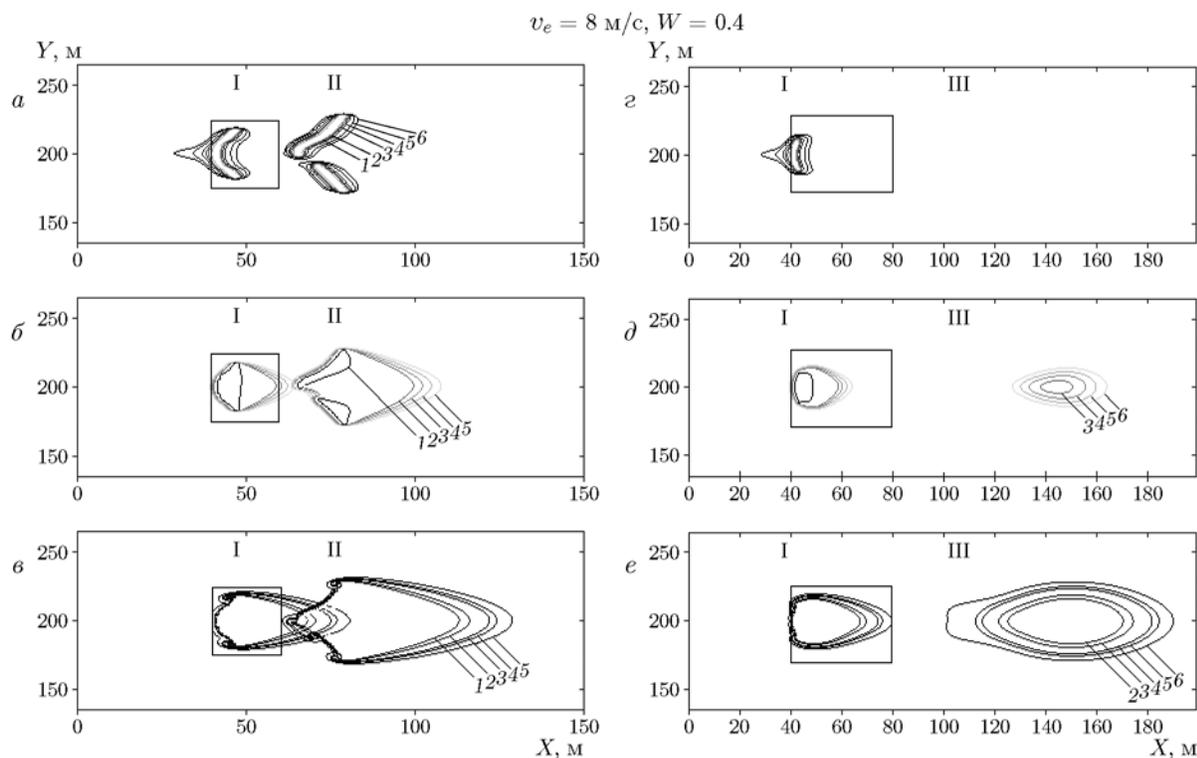


Рис. 8. Распределения температуры газовой фазы ($a, г$), концентраций кислорода ($б, д$) и летучих продуктов пиролиза ($в, е$) при размерах противопожарного разрыва $20 \times 20 \text{ м}$ ($a-в$) и $40 \times 20 \text{ м}$ ($г-е$) в моменты времени $t = 7.5 \text{ с}$ (I), 19 с (II), 28 с (III)

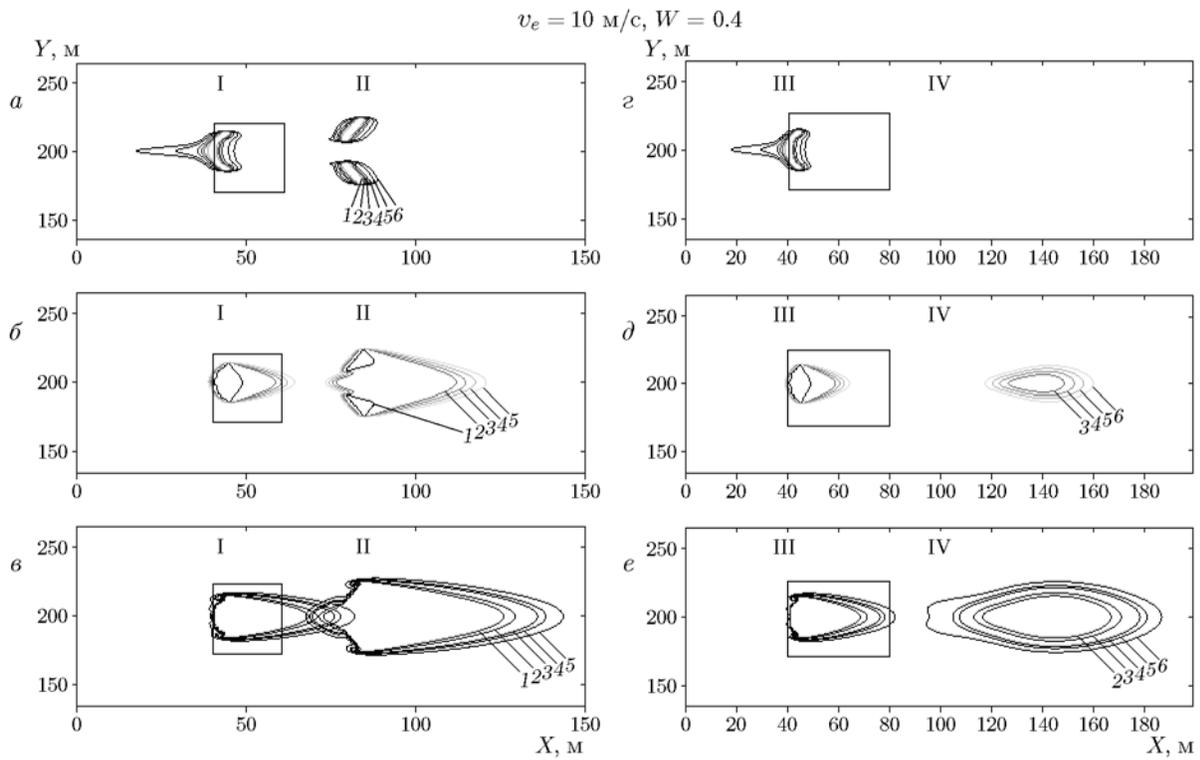


Рис. 9. Распределения температуры газовой фазы (*а, г*), концентраций кислорода (*б, д*) и летучих продуктов пиролиза (*в, е*) при размерах противопожарного заслона $20 \times 20 \text{ м}$ (*а-в*) и $40 \times 20 \text{ м}$ (*г-е*) в моменты времени $t = 8 \text{ с}$ (I), 15 с (II), 8.2 с (III), 16.5 с (IV)

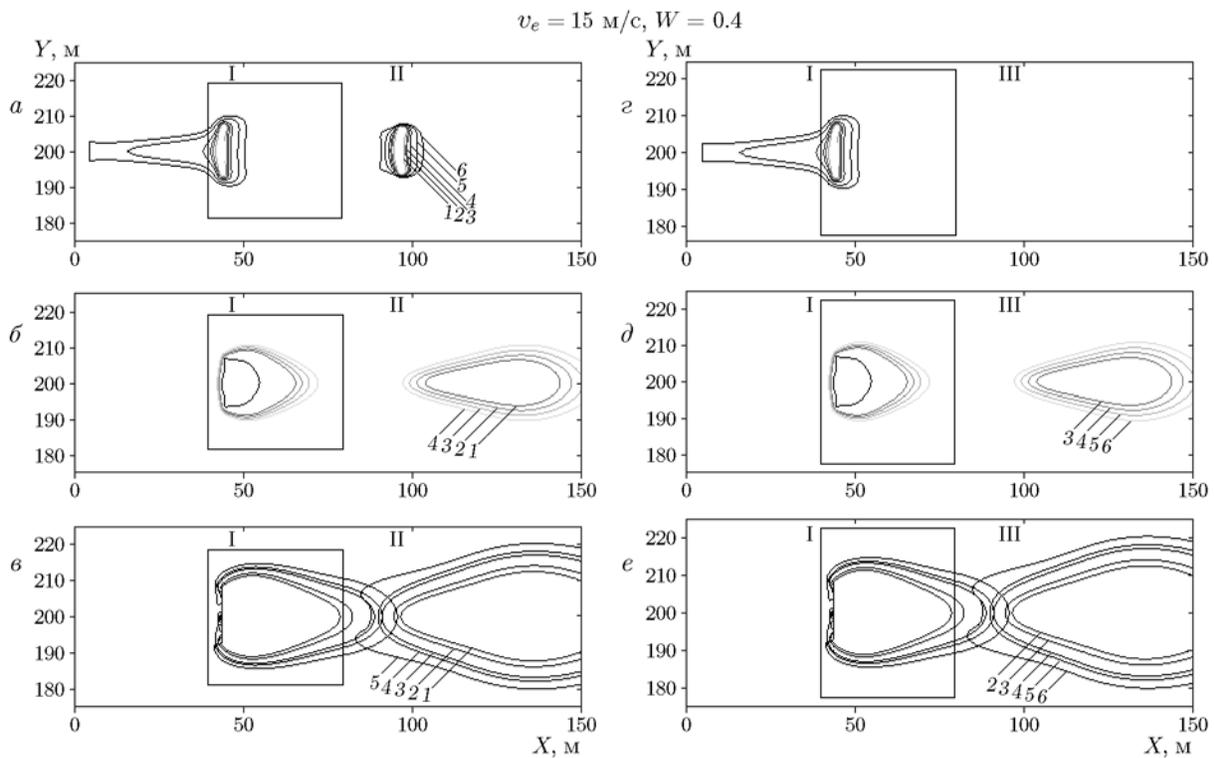


Рис. 10. Распределения температуры газовой фазы (*а, г*), концентраций кислорода (*б, д*) и летучих продуктов пиролиза (*в, е*) при размерах противопожарного разрыва $40 \times 40 \text{ м}$ (*а-в*) и $40 \times 60 \text{ м}$ (*г-е*) в моменты времени $t = 7 \text{ с}$ (I), 13.1 с (II), 15 с (III)

к тому, что распространение пожара остановилось (рис. 8, *z-e*).

При $v_e = 10$ м/с фронт пожара также преодолевает заслон размером 20×20 м и продолжает распространяться (рис. 9, *a-b*), а при увеличении его размера до 40×20 м фронт пожара не переходит на новые участки лесного массива (рис. 9, *z-e*).

При $v_e = 15$ м/с фронт пожара преодолевает заслон размером 40×40 м и продолжает распространяться (рис. 10, *a-b*). При увеличении его размеров до 40×60 м температура фронта пожара после разрыва уменьшается (рис. 10, *z-e*), т. е. распространение пожара прекращается.

Таким образом, получены критические размеры противопожарных заслонов, при которых пожар преодолевает заслон и распространяется дальше по лесному массиву. Из результатов следует, что увеличению эффективности заслонов способствует увеличение его размера как вдоль оси OX , так и по оси OY . На рис. 11 изображен график зависимости размера L_y от скорости ветра v_e при постоянном значении $L_x = 40$ м.

Установлено, что наиболее сильно на скорость распространения лесного пожара влияют скорость ветра, запас и влагосодержание ЛГМ. При некоторых критических значениях размеров противопожарных разрывов и заслонов горение во фронте пожара прекращается из-за больших затрат тепловой энергии на прогрев и сушку ЛГМ, которые не компенсируются тепловыделением во фронте пожара. По из-

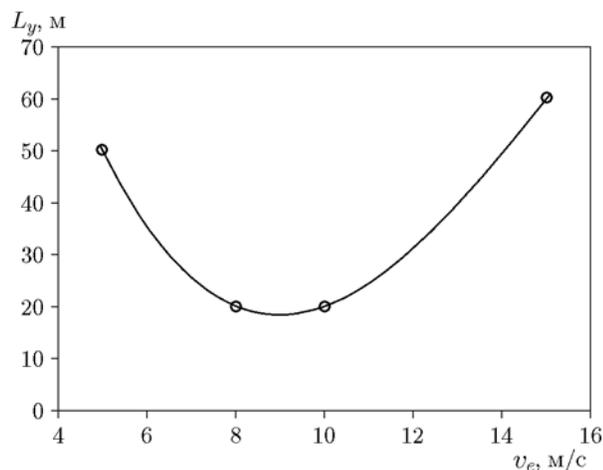


Рис. 11. Зависимость размера заслона L_y от скорости ветра v_e

менению расположения изотерм для температуры горения можно отслеживать перемещение фронта лесного пожара во времени. Анализ результатов показал, что при противопожарном обустройстве леса наиболее эффективно создание противопожарных разрывов, а для предотвращения распространения верховых лесных пожаров эффективно чередование противопожарных заслонов и разрывов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе физико-математическая постановка задачи позволяет теоретически описать различные условия распространения лесных пожаров с учетом метеорологических условий, состояния лесных горючих материалов и наличия противопожарных разрывов и заслонов. Рассчитанные распределения температуры, концентраций кислорода и продуктов пиролиза во времени позволяют оценить динамику продвижения фронта верхового пожара. По результатам расчетов в зависимости от запаса, вида и влагосодержания ЛГМ, скорости и направления ветра получены минимальные размеры противопожарных разрывов и заслонов, при которых передвижение фронта пожара прекращается. Таким образом, модель может быть использована для разработки методик проведения мероприятий по тушению лесных пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. NASA/ Goddard Space Flight Center California's Mendocino complex of fires now largest in state's history: [электронный ресурс]. — URL: <http://www.sciencedaily.com>.
2. Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г. Математическая теория верховых лесных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. — Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. — С. 38–75.
3. Перминов В. А. Математическое моделирование возникновения и распространения верховых лесных пожаров в осредненной постановке // ЖТФ. — 2015. — Т. 85, вып. 2. — С. 24–30.
4. Perminov V. A., Loboda E. L., Reino V. V. Mathematical modeling of surface forest fires transition into crown forest fires // Proc. of SPIE — The Int. Soc. Opt. Eng. — 2014. — V. 9292.
5. Perminov V. A. Mathematical modelling of wildland fires initiation and spread using a coupled atmosphere-forest fire setting // Chem. Eng. Trans. — 2018. — V. 70. — P. 1747–1752.

6. **Гришин А. М.** Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложения // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32, № 5. — С. 35–54.
7. **Гусев В. Г.** Физико-математические модели распространения пожаров и противопожарные барьеры в сосновых лесах. — СПб.: ФГУ «СПбНИИЛХ», 2005.
8. **Санников С. Н., Санникова Н. С., Терехов Г. Г.** Принципы создания противопожарных лесных полос с барьером из лиственных видов для защиты от верховых пожаров // Сиб. лесн. журн. — 2017. — № 5. — С. 76–83.
9. **Morvan D.** Numerical study of the behaviour of a surface fire propagating through a firebreak built in a Mediterranean shrub layer // Fire Safety J. — 2015. — V. 71. — P. 34–48.
10. **Дубов А. С., Быков Л. П., Морунч С. В.** Турбулентность в растительном покрове. — Л.: Гидрометеоздат, 1978.
11. **Патанкар С. В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

Поступила в редакцию 24.06.2019.

После доработки 20.08.2019.

Принята к публикации 06.11.2019.
