

01

Математическое моделирование распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов и заслонов

© В.И. Марзаева

Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: marzaeva1993@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 10 ноября 2018 г.

Принято к публикации 11 марта 2019 г.

С помощью метода математического моделирования изучен процесс распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов и заслонов, состоящих из лиственных пород деревьев. Математически данная задача сведена к решению уравнений Рейнольдса для турбулентного течения с учетом химических реакций. Для получения дискретного аналога использован метод контрольного объема. С помощью численных расчетов получены распределения полей скорости, температуры, концентраций кислорода, летучих продуктов пиролиза, горения и объемных долей конденсированной фазы. Модель позволила в динамике получить контуры распространения верховых лесных пожаров, которые зависят от запаса и вида лесных горючих материалов, влагосодержания, скорости и направления ветра и т.д. Также удалось определить зависимость размеров противопожарных разрывов и заслонов от вышеуказанных параметров, при которых верховой пожар прекращает распространение.

Ключевые слова: верховой лесной пожар, противопожарные барьеры, математическое моделирование, метод контрольного объема.

DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47883.392-18

Введение

Увеличение количества и площадей природных пожаров в различных регионах мира становится глобальной проблемой для человечества. Возрастающая антропогенная нагрузка, а также изменение климата, характеризующееся длительными засухами, способствует их возникновению и распространению. В свою очередь, выбросы в атмосферу продуктов горения и, в частности, оксидов углерода при природных пожарах способствуют ускорению процесса глобального потепления. Лес играет важнейшую экологическую, социальную и экономическую роль в жизни человека. Он выполняет водоохранную функцию, создает благоприятный микроклимат для здоровья людей, сохраняет уникальные природные комплексы, ценные виды флоры и фауны, а также является источником древесины и других видов лесного сырья и продукции [1].

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 [2]. Обеспечение оптимального режима пожарной безопасности в лесах, предупреждение возникновения загораний и пожаров, препятствование продвижению пожаров на отдельных участках с целью снижения возможного ущерба возможно с помощью создания противопожарных разрывов и заслонов. Задачами исследований настоящей работы является улучшение знаний

о фундаментальных физических механизмах, которые описывают возникновение и развитие процесса горения при лесных пожарах, а также повышение эффективности противопожарных барьеров и контроля их защитного действия.

В настоящей работе рассматриваются объекты противопожарного обустройства леса, такие как противопожарные разрывы и заслон. Целью создания системы противопожарных разрывов является разделение пожароопасных лесных массивов на изолированные друг от друга блоки разного размера. Противопожарные заслоны создаются с целью сохранения от рубки значительных площадей участка леса и снижения пожароопасности лесов, минимизации угрозы верхового пожара лесным массивам, населенным пунктам и другим объектам инфраструктуры. Уменьшение негативного влияния лесных пожаров на окружающую среду достигается с помощью грамотного управления, которое включает всю необходимую деятельность по охране лесов.

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 об-

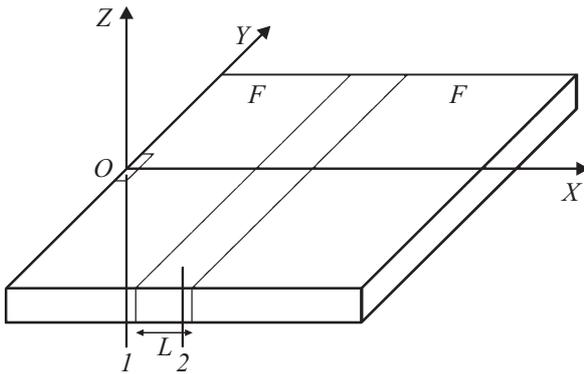


Рис. 1. Схема зоны пожара, где 1 — очаг зажигания, 2 — противопожарный разрыв (или противопожарный барьер из лиственных деревьев), область F — хвойный лесной массив.

ласть, включающая лесной массив и противопожарный объект (разрыв, заслон).

В процессе расчетов было рассмотрено распространение верхового лесного пожара при наличии противопожарных разрывов и заслонов.

Математическая постановка задачи и метод решения

Основные допущения, принятые при выводе системы уравнений, граничных и начальных условий:

- 1) лес представляет многофазную, многокомпонентную пористо-дисперсную среду;
- 2) рассматривается двухтемпературная (различаются температуры газовой и конденсированной фаз), односкользящая, реагирующая среда;
- 3) полог леса предполагается недеформируемой средой (стволы, крупные и мелкие веточки и т.д.), сила сопротивления 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 жидко-капельном состоянии, твердых продуктов пиролиза и золы, можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы (компонент воздуха и газообразных продуктов пиролиза и горения);
- 5) течение в рассматриваемой 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 тепломассопереноса в трехмерном массиве может быть проинтегрирована по высоте полога леса h .

Для этого исходная система уравнений была приведена к дивергентному виду, затем проинтегрирована по высоте полога леса [3]:

$$\int_0^h \phi dz = \bar{\phi}h, \tag{1}$$

где $\bar{\phi}$ — среднее значение величины ϕ .

В результате математически задача сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = \dot{m} - \frac{\dot{c}^- - \dot{c}^+}{h}, \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} = & -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{u'v'}) - \rho s c_{du} |\mathbf{u}| \\ & - \dot{m}u + \frac{(\tau_x^- - \tau_x^+)}{h}, \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{dv}{dt} = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'^2}) \\ & - \rho s c_{dv} |\mathbf{u}| - \dot{m}v + \frac{(\tau_y^- - \tau_y^+)}{h}, \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{dT}{dt} = & \frac{\partial}{\partial x}(-\rho c_p u' \overline{T'}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho c_p v' \overline{T'}) + q_5 R_5 \\ & - \alpha_v (T - T_s) + \frac{(q_T^- - q_T^+)}{h} + k_g (c U_R - 4\sigma T^4), \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{dc_\alpha}{dt} = & \frac{\partial}{\partial x}(-\rho \overline{u'c'_\alpha}) + \frac{\partial}{\partial y}(-\rho \overline{v'c'_\alpha}) - R_{5\alpha} \\ & - \dot{m}c_\alpha + \frac{(J_\alpha^- - J_\alpha^+)}{h}, \quad \alpha = \overline{1, 2}, \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} \right) - kc U_R \\ + 4k_g \sigma T^4 + 4k_s \sigma T_s^4 = 0, \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \rho_i \phi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = & q_3 R_3 - q_2 R_2 \\ & + k_s (c U_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s), \end{aligned} \tag{8}$$

$$\rho_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = -R_1; \quad \rho_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = -R_2$$

$$\rho_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial t} \alpha_c R_1 - \frac{M_C}{M_1} R_3; \quad \rho_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial t} = 0, \tag{9}$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 = 1, \quad p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}. \tag{10}$$

Чтобы определить источники члены, которые характеризуют приток (отток массы) в единицу объема газовой дисперсионной фазы, были использованы следующие формулы: для скорости образования газодисперсионной

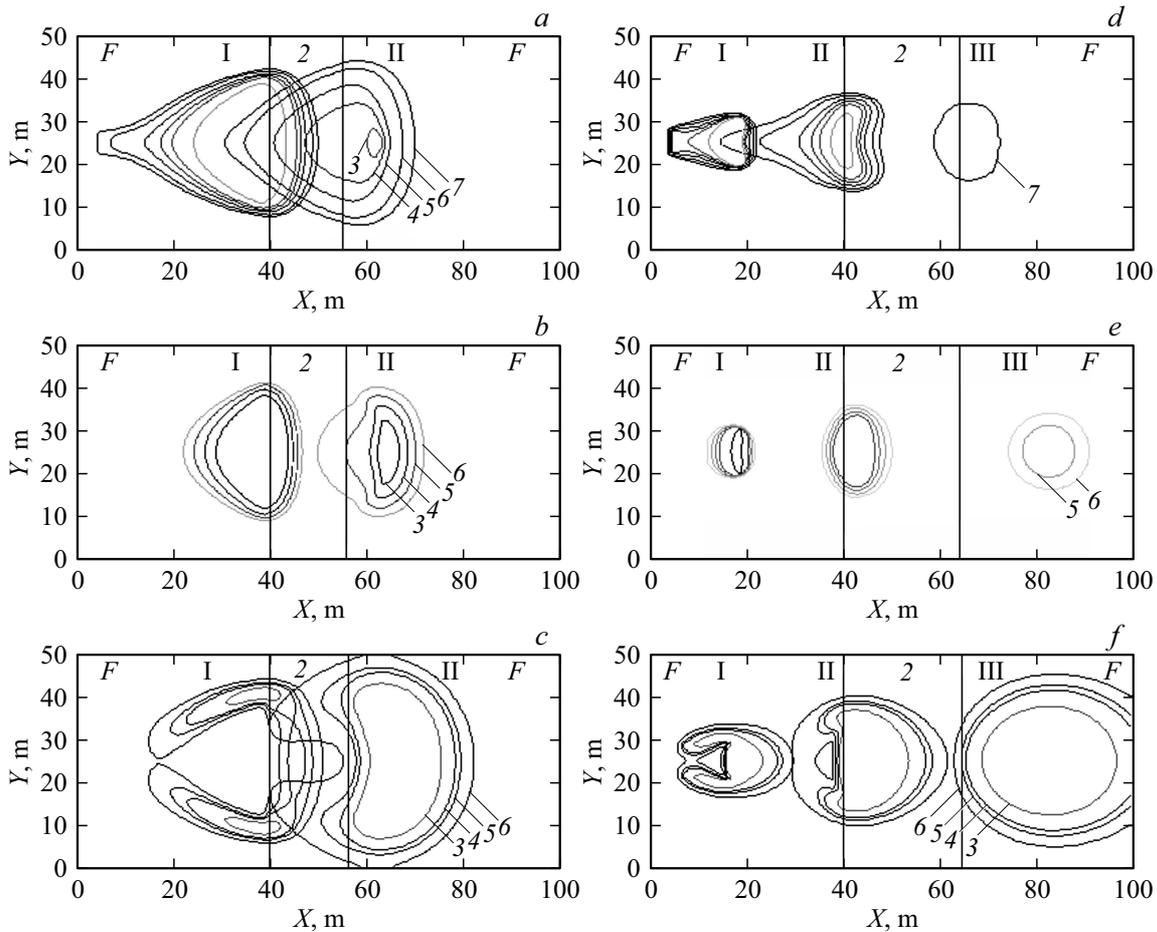


Рис. 2. Распределения температуры газовой фазы (a), концентрации кислорода (b) и летучих продуктов пиролиза (c) ($L = 15$ m, в моменты времени t : I — 6, II — 12 c); распределения температуры газовой фазы (d), концентрации кислорода (e) и летучих продуктов пиролиза (f) ($L = 25$ m, в моменты времени t : I — 3, II — 6, III — 17 c).

фазы \dot{m} , расхода кислорода R_{51} и изменения концентрации оксида углерода R_{52} :

$$\dot{m}(1 - \alpha_c)R_1 + R_2 + \frac{M_C}{M_1} R_3, \quad (11)$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5; \quad R_{52} = v_g(1 - \alpha_c)R_1 - R_5. \quad (12)$$

Уравнения (13)–(16) описывают скорости пиролиза, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза:

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_S}\right), \quad (13)$$

$$R_2 = k_2 T^{-0.5} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT_S}\right), \quad (14)$$

$$R_3 = k_3 \rho_{s\sigma} \varphi_3 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_S}\right), \quad (15)$$

$$R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right). \quad (16)$$

При решении вышеизложенной системы уравнений следует учитывать следующие начальные и граничные условия:

$$t = 0 : u = 0; v = 0; T = T_e; c_\alpha = c_{\alpha e}; T_S = T_e; \varphi_i = \varphi_{ie}; \quad (17)$$

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

$$-\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{c U_R}{2} = 0; \quad (18)$$

$$x = x_e : \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \frac{\partial v}{\partial x} = 0; \frac{\partial c_\alpha}{\partial x} = 0; \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (19)$$

$$\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x} + \frac{c U_R}{2} = 0;$$

$$y = 0 : \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad (20)$$

$$-\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{c U_R}{2} = 0;$$

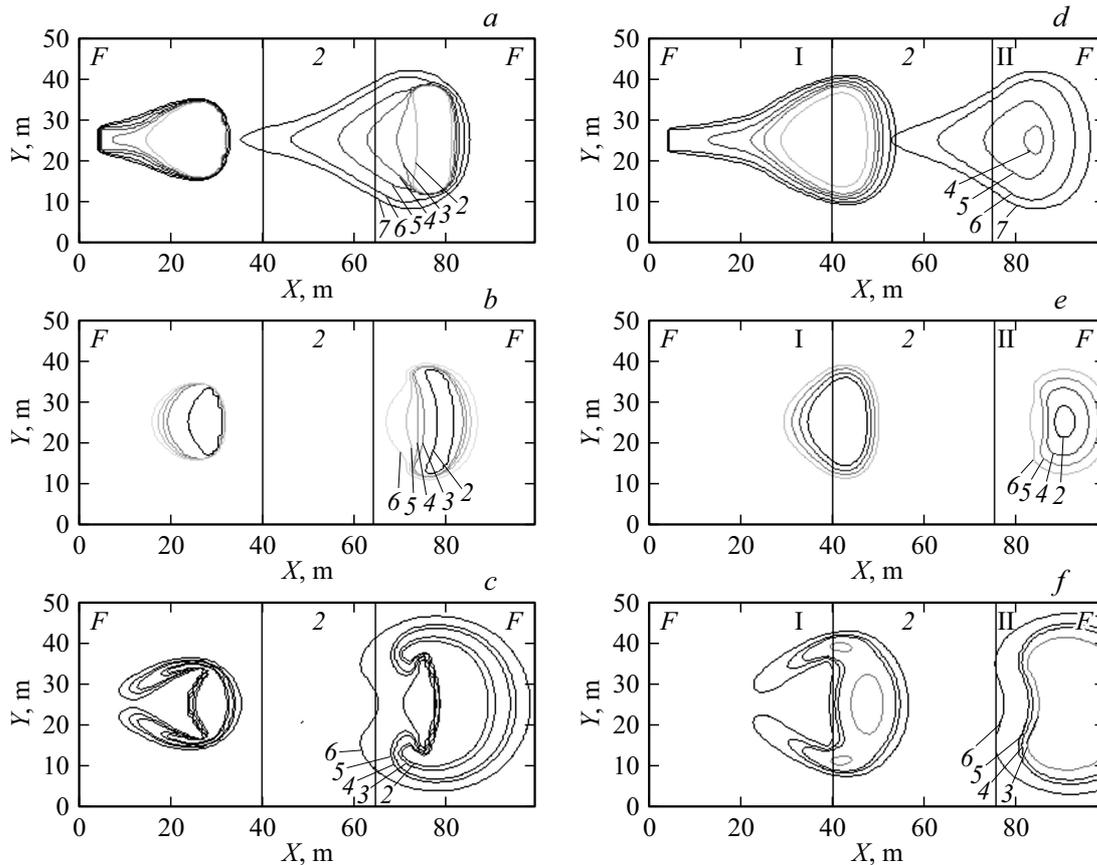


Рис. 3. Распределения температуры газовой фазы (а), концентрации кислорода (b) и летучих продуктов пиролиза (с) ($L = 25$ м, в моменты времени t : I — 3, II — 10 с); распределения температуры газовой фазы (d), концентрации кислорода (e) и летучих продуктов пиролиза (f) ($L = 35$ м, в моменты времени t : I — 6, II — 12 с).

$$y = y_e : \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \frac{\partial c_\alpha}{\partial y} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial y} + \frac{c U_R}{2} = 0; \tag{21}$$

Координаты очага зажигания: $0 < x < \delta_x$; $|y| \leq \delta_y$, где δ_x и δ_y — размеры очага по оси OX и OY соответственно. Величина температуры в очаге зажигания изменяется в зависимости от времени

$$T = T_s = \begin{cases} T_e + \frac{t}{t_0}(T_0 + T_e), & t \leq t_0 \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp\left[-k\left(\frac{t}{t_0} - 1\right)\right], & t > t_0 \end{cases} \tag{22}$$

Считая, что теплообмен в фронте пожара с приземным слоем атмосферы и нижним ярусом леса происходит по закону Ньютона, то соответствующие члены уравнений можно записать в следующем виде [3]:

$$\frac{J_\alpha^- - J_\alpha^+}{h} = -\frac{\alpha}{c_{ps}h}(c_\alpha - c_{ae}), \tag{23}$$

$$\frac{q_T^- - q_T^+}{h} = -\frac{\alpha}{h}(T - T_e), \tag{24}$$

В уравнениях используются следующие обозначения: $R_1 - R_3, R_{5\alpha}$ — массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи и пепла и образования α -компонентов газодисперсной фазы; t_0 — время формирования очага горения, $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ — удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i -ой фазы (1 — сухое органическое вещество, 2 — вода в жидко-капельном состоянии, 3 — конденсированные продукты пиролиза, 4 — минеральная часть); τ_i — характеризует обмен массой α -компонента и энергией как с приземным слоем атмосферы, так и с нижним ярусом леса; T, T_s — температура газовой и конденсированной фаз; c_α — массовые концентрации ($\alpha = 1$ — 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 — тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; s_σ — удельная поверхность элемента лесных

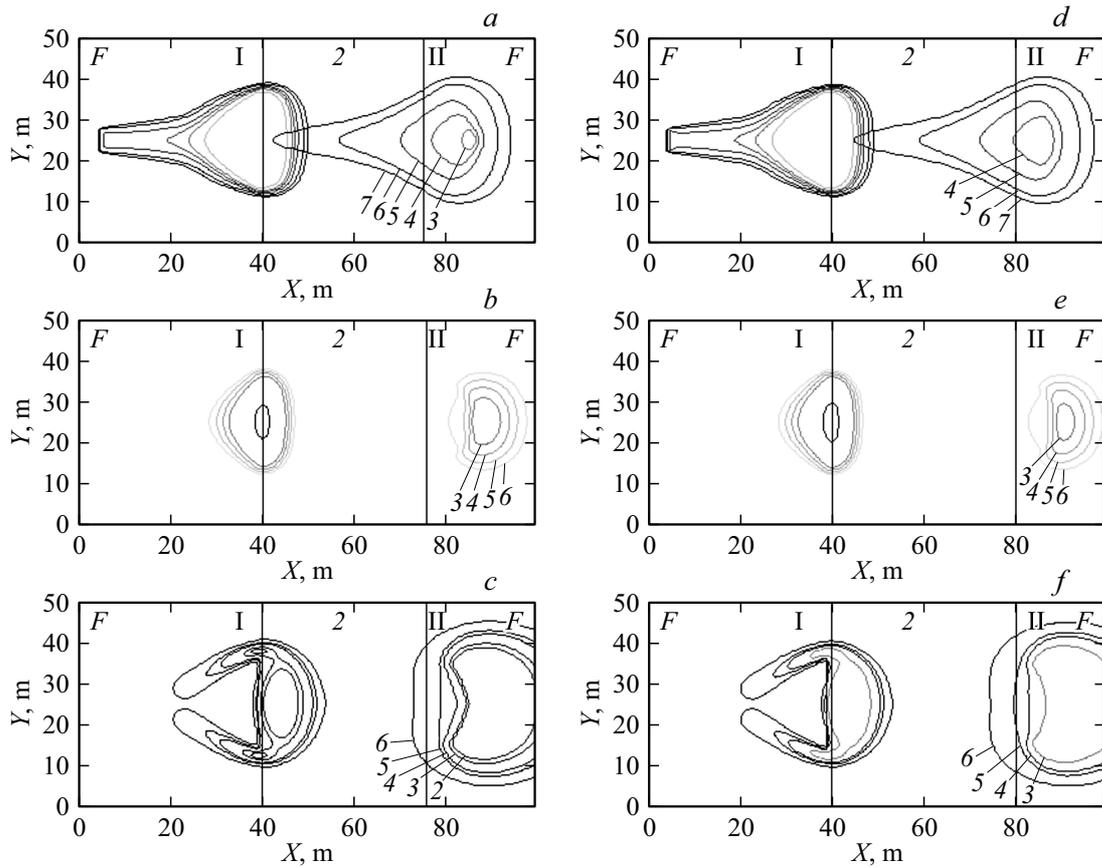


Рис. 4. Распределения температуры газовой фазы (a), концентрации кислорода (b) и летучих продуктов пиролиза (c) ($L = 35$ m, в моменты времени t : I — 5, II — 12 c); распределения температуры газовой фазы (d), концентрации кислорода (e) и летучих продуктов пиролиза (f) ($L = 40$ m, в моменты времени t : I — 5, II — 15 c).

горючих материалов; M_a, M_c, M — молекулярные веса 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, v_c — коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; \dot{m} — массовая скорость образования газодисперсной фазы; g — ускорение свободного падения. Индексы „0“ и „e“ относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно [4]. Символом $\frac{d}{dt}$ обозначена полная производная:

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

Характеристикам лесного массива соответствуют характеристики ЛГМ соснового леса: $E_1/R = 9400$ K, $k_{01} = 3.63 \cdot 10^4$ s⁻¹, $E_2/R = 6000$ K, $k_{02} = 6 \cdot 10^5$ s⁻¹, $q_2 = 3 \cdot 10^6$ J/kg, $E_3/R = 10000$ K, $k_{03} = 10^3$ s⁻¹, $q_3 = 1.2 \cdot 10^7$ J/kg, $E_5/R = 11500$ K, $k_5 = 3 \cdot 10^{13}$ s⁻¹, $q_5 = 10^7$ J/kg, $c_p = 1000$ J/(kg · K), $\alpha_c = 0.06$, $v_c = 0.7$, $\rho_e = 1.2$ kg/m³, $c_{2e} = 0$, $p_e = 10$ N/m², $T_e = 300$ K, $c_{1e} = 0.23$ [3].

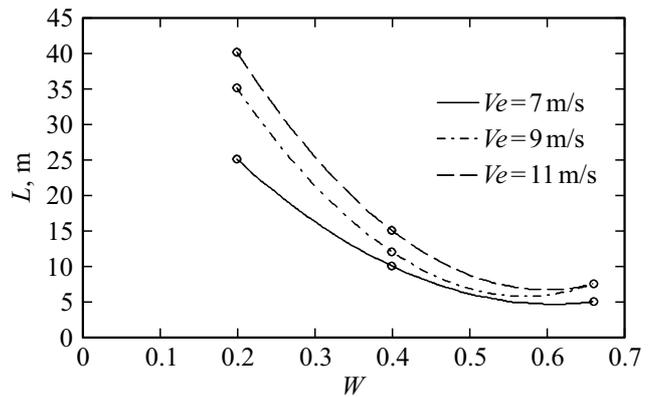


Рис. 5. Зависимость ширины противопожарного разрыва от влагосодержания ЛГМ.

Система уравнений с начальными и граничными условиями приведена к дискретной форме с помощью метода контрольного объема [5]. Возникающие при дискретизации сеточные уравнения решались с помощью метода SIP [5]. Применялся метод расщепления по физическим процессам, т.е. вначале рассчитывалась структура течения и распределения скалярных функций без учета

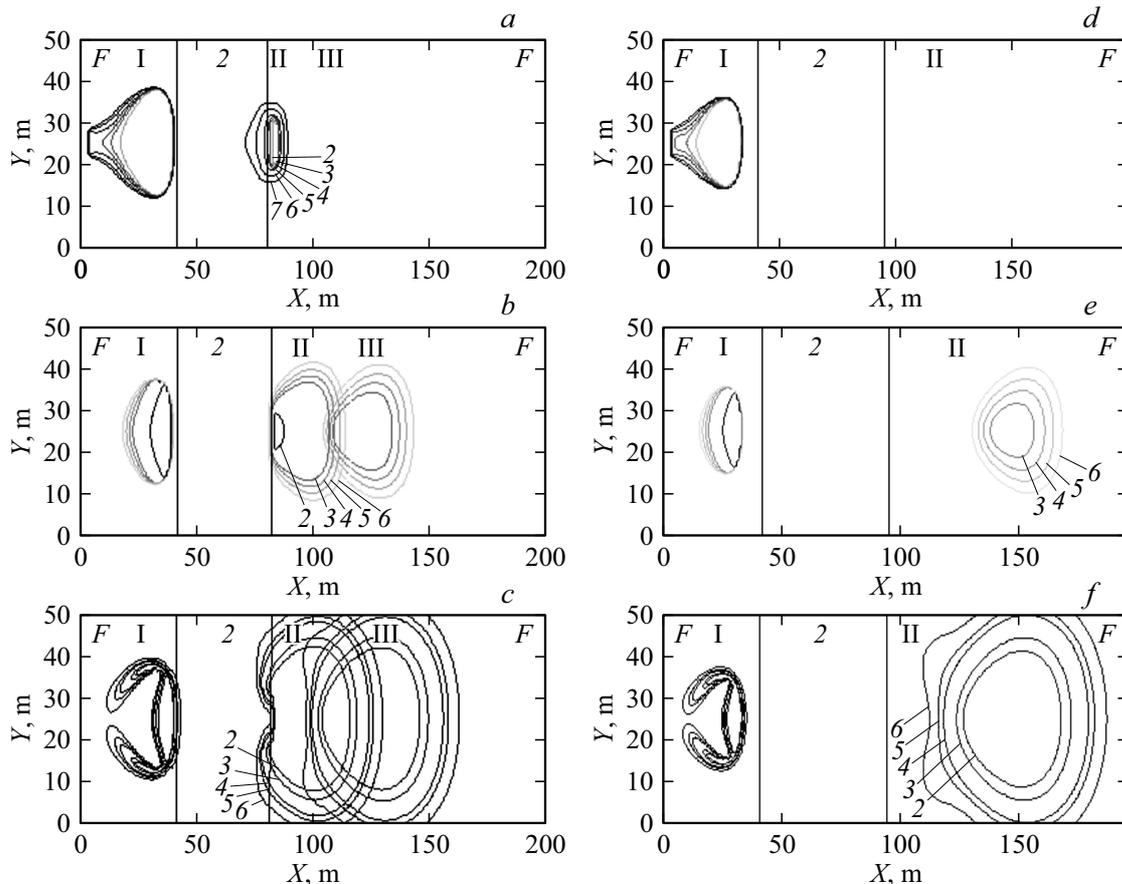


Рис. 6. Распределения температуры газовой фазы (а), концентрации кислорода (b) и летучих продуктов пиролиза (с) ($L = 44$ m, в моменты времени t : I — 4, II — 17, III — 22 s); распределения температуры газовой фазы (d), концентрации кислорода (e) и летучих продуктов пиролиза (f) ($L = 55$ m, в моменты времени t : I — 4, II — 22 s).

химических реакций, а затем решались уравнения химической кинетики с учетом источников членов в уравнениях для определения температуры и концентраций компонент [3]. Методика решения реализована в виде комплекса программ для персональных компьютеров.

Результаты и их анализ

На основании вышеизложенной модели были проведены расчеты параметров горения при верховом лесном пожаре в хвойном массиве с учетом противопожарных барьеров (разрывов и заслонов). Проведен анализ влияния противопожарных барьеров на дальнейшее передвижение фронта пожара. Изменяемыми параметрами являлись: влагосодержание ЛГМ в хвойном массиве; скорость ветра в невозмущенной среде; влагосодержание в массиве лиственных пород, выступающих как противопожарный заслон; размеры и положение противопожарного разрыва и заслона. Влагосодержание в лесных горючих материалах является безразмерной величиной

и определяется по формуле

$$W = \frac{(m - m_0)}{m_0}, \quad (25)$$

где m — масса ЛГМ в естественном состоянии; m_0 — масса ЛГМ в абсолютно сухом состоянии.

Для получения достоверных 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 m от очага зажигания.

Первым рассматривался случай распространения фронта верхового лесного пожара при наличии противопожарного разрыва в лесном массиве. Размер расчетной области составляет 100×50 m. Был проведен анализ влияния противопожарного разрыва на динамику распространения фронта пожара при скорости ветра $V_e = 7$ m/s и влагосодержании лесного массива $W = 0.2$. В результате расчетов были получены распределения изотерм температуры, концентраций кислорода и концентраций продуктов пиролиза в моменты времени, соответствующие до и после противопожарного разрыва. На рис. 2, а представлено распределение изотерм газо-

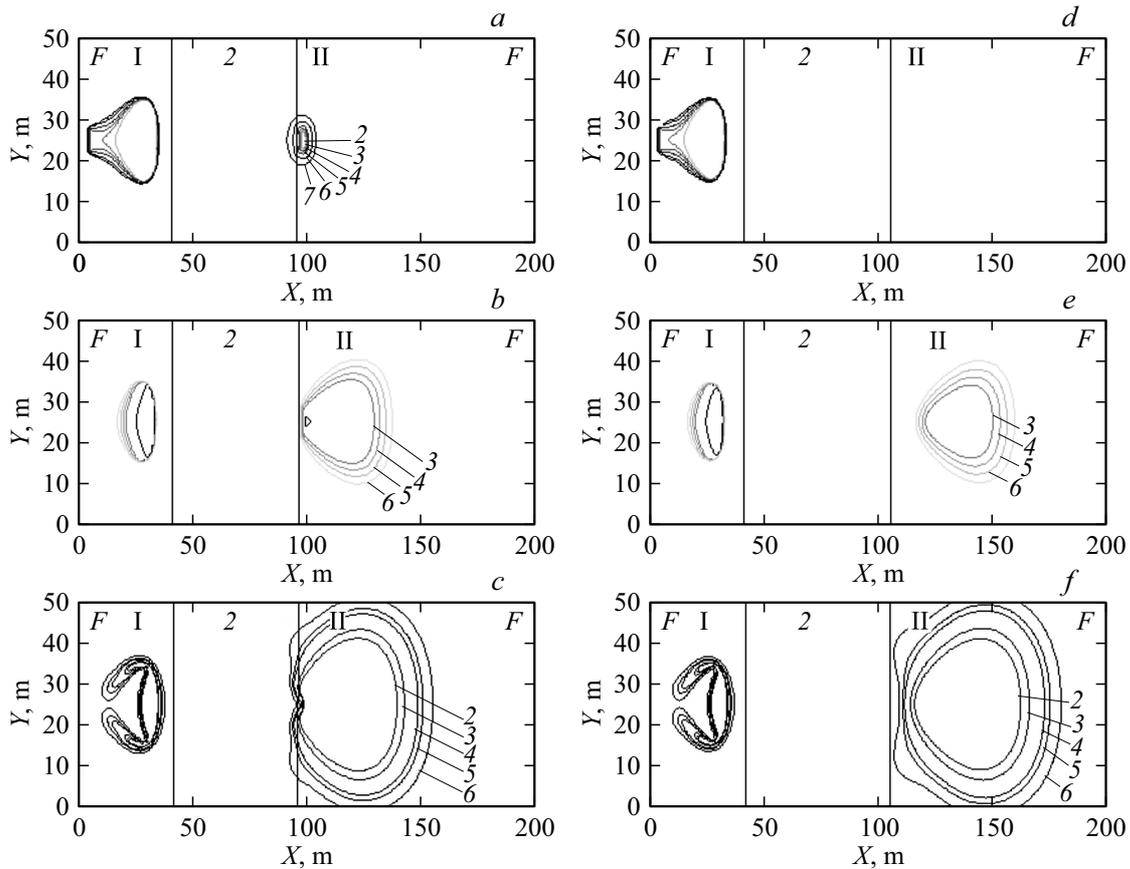


Рис. 7. Распределения температуры газовой фазы (a), концентрации кислорода (b) и летучих продуктов пиролиза (c) ($L = 57$ m, в моменты времени t : I — 3, II — 17 с); распределения температуры газовой фазы (d), концентрации кислорода (e) и летучих продуктов пиролиза (f) ($L = 66$ m, в моменты времени t : I — 3, II — 19 с).

вой фазы (\bar{T} : I — 5, 2 — 4, 3 — 3, 4 — 2.5, 5 — 2, 6 — 1.5, 7 — 1.3). Температура газовой фазы определяется как $\bar{T} = T/T_e$, где $T_e = 300$ К. Числами 1–6 на рис. 2, b обозначены безразмерные изолинии для концентраций кислорода 0.1, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9. На рис. 2, c числами 1–6 обозначены безразмерные изолинии для концентраций летучих продуктов пиролиза 1.0, 0.1, 0.05, 0.01, 0.005, 0.001. Концентрации кислорода и горючих продуктов пиролиза во фронте пожара определяются как \bar{c}_1 ($\bar{c}_1 = c_1/c_{1e}$), \bar{c}_2 ($\bar{c}_2 = c_2/c_{1e}$) соответственно. Судя по расположению изотерм (на рис. 2, a–c) перед и после противопожарного разрыва, можно сделать вывод, что фронт пожара преодолевает разрыв шириной $L = 15$ m и распространяется на нетронутые огнем участки леса.

Далее был проведен расчет при $L = 25$ m. На рис. 2, d–f показаны изолинии распределения температур, концентраций кислорода и концентраций продуктов пиролиза во фронте пожара. Из распределения изолиний после разрыва видно, что фронт пожара не преодолевает противопожарный разрыв шириной $L = 25$ m и не распространяется по лесному массиву.

Следующий расчет был произведен при скорости ветра $V_e = 9$ m/s, влагосодержании лесного массива

$W = 0.2$ и $L = 25$ m. Результаты распределений изолиний температур (\bar{T} : I — 5, 2 — 4, 3 — 3, 4 — 2.5, 5 — 2, 6 — 1.5, 7 — 1.3), концентраций кислорода (\bar{c}_1 : I — 0.1, 2 — 0.5, 3 — 0.6, 4 — 0.7, 5 — 0.8, 6 — 0.9) и концентраций продуктов пиролиза (\bar{c}_2 : I — 1.0, 2 — 0.1, 3 — 0.05, 4 — 0.01, 5 — 0.005, 6 — 0.001) показаны на рис. 3. Из распределения изолиний (на рис. 3, a–c) перед и после разрыва можно заключить, что фронт пожара преодолевает его и распространяется дальше. Картина процесса при увеличении разрыва до 35 m показана на рис. 3, d–f. Видно, что фронт пожара не имеет достаточной температуры, чтобы воспламенить полог леса на нетронутых участках, т.е. распространение прекращается.

Также был произведен расчет при скорости ветра до $V_e = 11$ m/s. Из распределений изолиний температур, концентраций кислорода и концентраций продуктов пиролиза (на рис. 4, a–c) перед и после разрыва можно заключить, что фронт пожара преодолевает разрыв шириной $L = 35$ m и распространяется дальше по лесу. Для разрыва шириной $L = 40$ m также были получены изолинии температур, концентраций кислорода и продуктов пиролиза (рис. 4, d–e). Видно, что фронт пожара не имеет достаточной температуры, чтобы воспламенить

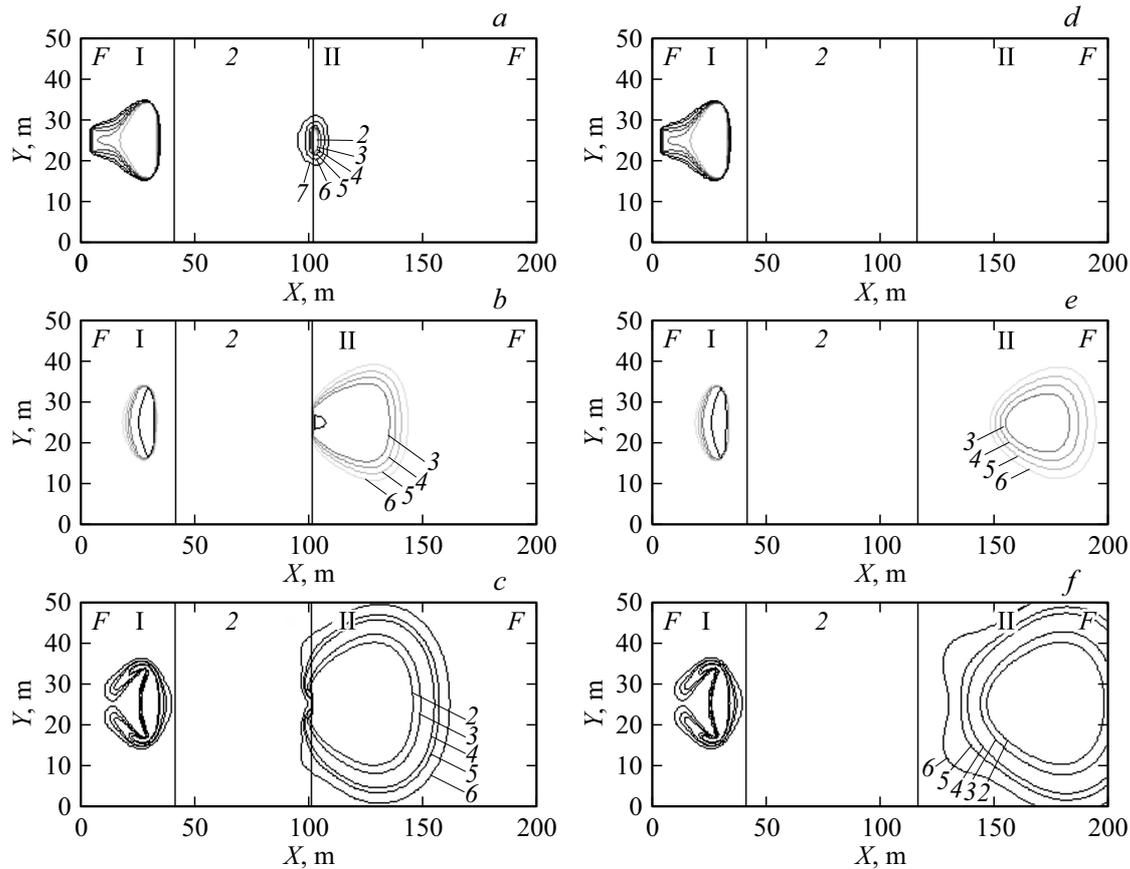


Рис. 8. Распределения температуры газовой фазы (а), концентрации кислорода (b) и летучих продуктов пиролиза (с) ($L = 61$ м, в моменты времени t : I — 3, II — 15 с); распределения температуры газовой фазы (d), концентрации кислорода (e) и летучих продуктов пиролиза (f) ($L = 76$ м, в моменты времени t : I — 3, II — 16 с).

полог леса на участках после разрыва, в результате распространение лесного пожара прекращается.

Таким образом, в результате расчетов были получены минимальные размеры противопожарных разрывов, при которых фронт пожара не переходит на новые участки лесного массива. На рис. 5 представлена зависимость ширины разрыва от влагосодержания лесного массива для различных скоростей ветра. Из графика видно, что с уменьшением влагосодержания ширина противопожарного разрыва увеличивается. Увеличение размеров разрывов закономерно вытекает из того факта, что более сухие ЛГМ лучше загораются, и для того чтобы огонь не перешел разрыв, необходимо увеличивать его размеры.

В настоящей работе рассматривался еще один объект противопожарного обустройства леса — противопожарный заслон. Было исследовано влияние противопожарного заслона на динамику продвижения фронта пожара. Заслоны состоят преимущественно из лиственных пород деревьев, которым соответствует значение влагосодержания большее 1.0. Размер расчетной области составляет 200×50 м. Были проведены расчеты при скоростях ветра $V_e = 7, 9, 11$ м/с, которые соответствуют умеренному, свежему и сильному ветрам. Влагосодержа-

ние лесного массива рассматривалось равным $W = 0.2, 0.4, 0.66$.

В результате расчетов при скорости ветра $V_e = 7$ м/с и влагосодержании лесного массива $W = 0.2$ были получены распределения изолиний температур, концентраций кислорода и концентраций продуктов пиролиза в моменты времени, соответствующие до и после противопожарного заслона. На рис. 6, а представлено распределение изотерм газовой фазы (\bar{T} : 1 — 5, 2 — 4, 3 — 3, 4 — 2.5, 5 — 2, 6 — 1.5, 7 — 1.3), на рис. 6, b — концентраций кислорода (\bar{c}_1 : 1 — 0.1, 2 — 0.5, 3 — 0.6, 4 — 0.7, 5 — 0.8, 6 — 0.9), на рис. 6, c — концентраций летучих продуктов пиролиза (\bar{c}_2 : 1 — 1.0, 2 — 0.1, 3 — 0.05, 4 — 0.01, 5 — 0.005, 6 — 0.001). Как видно из рисунка, при заданных характеристиках огонь проходит противопожарный заслон при его ширине $L = 44$ м и распространяется на новые участки лесного массива. Увеличение ширины заслона до 55 м привело к тому, что фронт пожара не смог его преодолеть, т.е. его продвижение остановилось. Это видно из распределения изолиний на рис. 6, d-f.

Следующий расчет был произведен при скорости ветра $V_e = 9$ м/с, влагосодержании лесного массива $W = 0.2$. Результаты распределений изолиний темпера-

тур (\bar{T} : 1 — 5, 2 — 4, 3 — 3, 4 — 2.5, 5 — 2, 6 — 1.5), концентраций кислорода (\bar{c}_1 : 1 — 0.5, 2 — 0.6, 3 — 0.7, 4 — 0.8, 5 — 0.9) и концентраций продуктов пиролиза (\bar{c}_2 : 1 — 1.0, 2 — 0.1, 3 — 0.05, 4 — 0.01, 5 — 0.005) показаны на рис. 7. Судя по распределению изолиний (на рис. 7, *a-c*) перед и после противопожарного заслона, можно сделать вывод, что фронт пожара преодолевает заслон шириной $L = 57$ м и распространяется дальше по лесному массиву. Увеличение ширины заслона до $L = 66$ м привело к тому, что фронт пожара останавливается. Этот вывод исходит из распределения изолиний на рис. 7, *d-f*.

Для скорости ветра $V_e = 11$ м/с также были проведены расчеты, которые показали, что фронт пожара преодолевает заслон шириной $L = 61$ м и его распространение продолжается. Результаты распределений изолиний температур, концентраций кислорода и концентраций продуктов пиролиза показаны на рис. 8, *a-c*. Распределения изолиний при увеличении ширины заслона до 76 м показаны на рис. 8, *d-f*. Видно, что при такой ширине заслона, фронт пожара не переходит на новые участки лесного массива.

Таким образом, в результате исследований были получены минимальные размеры противопожарных заслонов, при которых фронт пожара не переходит на новые участки лесного массива. Анализ расчетов показал, что с уменьшением влагосодержания лесного массива ширина заслона увеличивается. Увеличение его размеров объясняется той же причиной, что и увеличение размеров противопожарного разрыва, а именно тем, что более сухие ЛГМ лучше загораются, и для того чтобы огонь не перешел заслон, необходимо увеличивать его размеры.

Из анализа результатов исследований было установлено, что наиболее сильно на скорость распространения лесного пожара влияют скорость ветра, запас и влагосодержание ЛГМ. При некоторых критических значениях влагосодержания, процесс горения во фронте пожара прекращается из-за больших затрат тепловой энергии на прогрев и сушку ЛГМ, которые не компенсируются тепловыделением во фронте пожара. По изменению расположения изотерм для температуры горения можно отслеживать перемещение фронта лесного пожара с течением времени. Анализ расчетов показал, что создание противопожарных разрывов наиболее эффективно при противопожарном обустройстве леса. При профилактике можно чередовать противопожарные заслоны и разрывы. Данный подход является более эффективным для предотвращения распространения верховых лесных пожаров.

Применение данной математической модели позволяет оценить динамику распространения фронта верховых лесных пожаров в зависимости от характеристик лесного массива, метеорологических условий и наличия противопожарных барьеров (разрывы, заслоны). Кроме того, с помощью представленной модели можно определять размеры противопожарных разрывов и противопо-

жарных заслонов для профилактических мероприятий по предотвращению распространения лесного пожара.

Заключение

Данная в работе физико-математическая постановка задачи дает возможность теоретически описать различные условия распространения лесных пожаров с учетом метеорологических условий, состояния лесных горючих материалов и наличия противопожарных разрывов и заслонов. В результате численных расчетов получены распределения температуры, концентраций кислорода и концентраций продуктов пиролиза с течением времени. С помощью полученных изотерм оценивается динамика продвижения фронта верхового пожара. По этим расчетам получены минимальные размеры противопожарных разрывов и заслонов, при которых передвижение фронта пожара прекращается. Таким образом, описанная модель позволяет применять ее для профилактических мероприятий по борьбе с лесными пожарами.

Список литературы

- [1] *Ходаков В.Е., Жарикова М.В.* Лесные пожары: методы исследования. Херсон: Гринь Д.С., 2011. 470 с.
- [2] *Перминов В.А.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 2. С. 24–30.
- [3] *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
- [4] *Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г.* Математическая теория верховых лесных пожаров. Новосибирск: Теплофизика лесных пожаров. 1984. С. 38–75.
- [5] *Патанкар С.В.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.