

ПЕРЕХОД НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА В ВЕРХОВОЙ

При определенных условиях низовой лесной пожар, распространяющийся по напочвенному покрову, переходит в верховой, который двигается по кронам деревьев со значительно большей скоростью, чем низовой, и поэтому экологически более опасен [1]. В связи с этим представляет интерес исследование условий перехода низового лесного пожара в верховой. Результаты некоторых экспериментов приведены в работе [2], где, в частности, получено минимальное значение поджигающего импульса (излучением и конвекцией) при переходе пламени в крону. В [3] экспериментально определены температуры и суммарные тепловые потоки от очага низового лесного пожара на нижней границе полога леса. Получено, что при заданных в экспериментах параметрах очага максимальное расстояние до крон деревьев, где происходило зажигание, не превышало 0,5 м [3].

Попытки математического моделирования перехода предприняты в [4, 5]. В [4] для описания перехода использованы уравнения теории струй и на этой основе рассчитаны время и условия зажигания крон деревьев. Недостаток этой работы состоит в предположении о мгновенном формировании струи над очагом низового пожара. В [5] это допущение устранено, но в то же время использовалось предположение об изобаричности процесса.

В данной работе приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования перехода на основе численного решения полной системы уравнений Рейнольдса. Оценена степень достоверности допущений, принятых в [4, 5]. Получены два режима перехода низового лесного пожара в верховой. Проведено сравнение численных и экспериментальных результатов по условиям и характеристикам зажигания крон деревьев от очага низового пожара. Установлено, что наличие ветра не оказывает существенного влияния на переход низового лесного пожара в верховой в сосновых молодняках. Из анализа расчетов и экспериментальных данных получено, что для рассмотренных случаев минимальный суммарный поджигающий импульс составляет 4000 кДж/м^2 , а критическое расстояние — 0,5 м.

**Экспериментальное исследование перехода
низового лесного пожара в верховой
и физическая модель процесса**

Под переходом низового лесного пожара в верховой понимается зажигание крон деревьев от факела пламени низового лесного пожара. Для практиков основной интерес представляет определение минимального расстояния от подстилающей поверхности до полога леса, на котором возможно воспламенение, и предельная энергия, необходимая для зажигания лесных горючих материалов (ЛГМ) в кронах деревьев. К ЛГМ относятся хвоинки и тонкие веточки до $7 \cdot 10^{-3}$ м в диаметре. Для проведения экспериментов выбиралась ровная площадка, на поверхности которой выставлялись четыре молодые сосенки высотой до 3 м. Расстояние между деревьями $l_d = 0,5$ м. На поверхности площадки в форме квадрата со стороной $h = 1,2$ м выкладывался слой лишайника *Cladonia* толщиной 0,06—0,07 м.

Все основные размеры объектов эксперимента приводятся в таблице. Внутри крон деревьев на высоте h_2 устанавливались хромель-алюмелевая термопара и датчик для измерения суммарного теплового потока, конструкция которого описана в [3]. Чувствительные элементы дат-

Результаты экспериментальных исследований

Номер опыта	$h_d, \text{ м}$	$h_0, \text{ м}$	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$Q_{\Sigma} \cdot 10^{-3}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2}$	$q_{\Sigma}, \frac{\text{кВТ}}{\text{м}^2}$	$t_{cr}, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$
1	2,1	0,06	0,3	0,3	—	—	80	—
2	2,1	0,06	0,4	0,4	6	144	137	—
3	2,1	0,06	0,5	0,5	7,6	91	122	—
4	2,1	0,06	0,5	0,5	3,6	87,5	220	—
5	2,6	0,07	0,3	0,22	11	122	120	—
6	2,6	0,07	0,4	0,22	6	66	270	—
7	2,5	0,06	0,2	0,27	13,5	121,8	124	—
8	2,4	0,07	0,3	0,27	—	—	63	—
9	2,5	0,06	0,3	0,27	13	140	151	5,6
10	2,5	0,06	0,3	0,27	—	—	115	5,0
11	2,5	0,07	0,4	0,3	—	—	80	9,0
12	3,0	0,07	0,5	0,5	—	—	120	—
13	3,0	0,07	0,6	0,6	—	—	—	—

чиков направлены в сторону подстилающей поверхности. Перед экспериментом влагосодержание лишайника и хвои сосны составляло 47,6 и 66 % соответственно. Затем кромка слоя лишайника поджигалась одновременно по периметру. Показания датчика суммарного теплового потока q_{Σ} фиксировались осциллографом К-12-22. Типичная осциллограмма представлена на рис. 1. Измеряли также ρ_0 — плотность слоя лишайника, которая во всех экспериментах составляла 2 кг/м^2 , высоту деревьев h_d , высоту слоя лишайника на подстилающей поверхности h_0 , расстояние от подстилающей поверхности до нижней границы крон деревьев h_1 , расстояние от подстилающей поверхности до датчика h_2 , влагосодержание ЛГМ W_0 , максимальный суммарный тепловой поток в данной точке полога леса q_{Σ} , время сгорания ЛГМ подстилающей поверхности t_{cr} и время зажигания полога леса от момента начала действия низового пожара t_3 . Погрешность измерения температуры не превосходит $\pm 5 \%$, суммарного теплового потока — $\pm 8 \%$, влагосодержания — $\pm 10 \%$, различных расстояний — $\pm 5 \%$.

Более подробно методика проведения экспериментов описана в работе [3]. Эксперименты проводились при отсутствии ветра.

В каждом опыте фиксировали на осциллографе величину q_{Σ} . Затем интегрированием определялся поджигающий тепловой импульс

$$Q_{\Sigma} = \int_0^{t_{cr}} q_{\Sigma} dt$$

— суммарное количество энергии, поступившее в полог леса к моменту зажигания и за все время горения экспериментальной площадки.

После возникновения очага низового пожара формируется конвективная колонка и начинается прогрев, сушка и пиролиз ЛГМ в кронах деревьев. Энергия от очага низового пожара переносится в результате свободной конвекции и излучения от факела пламени низового пожара. После завершения стадий прогрева, сушки и пиролиза ЛГМ происходит вспышка газообразных горючих продуктов пиролиза, т. е. механизм зажигания крон деревьев носит газофазный характер. Зажигание происходит на нижней границе крон деревьев, и затем пламя распространяется вверх по кроне дерева.

Уровень максимальных температур на нижней границе полога леса достигал 600—800 К. Высота факела пламени не превышала 0,4 м. В таблице приведены данные экспериментальных исследований. В опытах

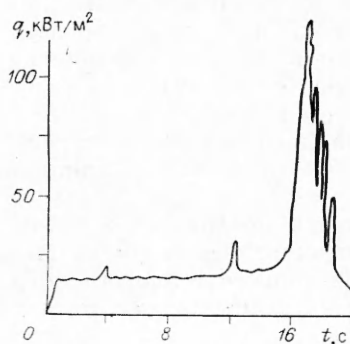


Рис. 1.

4 и 13 зажигания ЛГМ не наблюдалось, а в остальных случаях оно было. Установлено, что при указанных условиях кроны деревьев поджигаются, если расстояние до них от подстилающей поверхности составляло 0,2—0,5 м. В опытах 2—6 общее количество энергии, поступившее в полог леса, не превысило 6000 кДж/м² (см. таблицу). Эта величина согласуется с данными [2], где получено, что минимальное значение поджигающего импульса равно 4500 кДж/м².

Математическая постановка задачи

Рассмотрим плоскую задачу радиационно-конвективного тепло- и массообмена лесных горючих материалов во всех ярусах леса с газообразными продуктами горения и излучением факела пламени низового лесного пожара. Очаг низового пожара моделируется поверхностным источником массы нагретых продуктов сгорания, излучающих как черное тело с эффективным показателем черноты. Предполагается, что лес при лесном пожаре можно моделировать двухтемпературной многофазной пористой реагирующей средой [1]. Пусть имеем так называемый продуваемый лесной массив [1], когда объемной долей конденсированной фазы ЛГМ, состоящей из сухого органического вещества, воды в жидкокапельном состоянии, конденсированных продуктов пиролиза и золы, можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы (компоненты воздуха и газообразных продуктов пиролиза). Для описания переноса энергии излучением используется диффузионное приближение [1], а для описания конвективного переноса, обусловленного действием силы тяжести,— уравнения Рейнольдса.

Пусть начало координат $x_1, x_2 = 0$ расположено в центре очага низового лесного пожара на высоте уровня шероховатости, ось ox_2 направлена вверх, ось ox_1 — параллельно земной поверхности вправо. Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений [5]:

$$\frac{\partial \rho_5}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_5 v_j) = \dot{m}, \quad j = 1, 2, \quad i = 1, 2; \quad (1)$$

$$\rho_5 \frac{Dv_i}{Dt} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_5 \overline{v_i v_j'}) - \rho_5 S C_d v_i |v| - \rho_5 g_i - \dot{m} v_i; \quad (2)$$

$$\rho_5 c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_5 C_p \overline{v_j T'}) + q_5 R_5 - A_s (T - T_s); \quad (3)$$

$$\rho_5 \frac{DC_\alpha}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho_5 \overline{v_j C_\alpha'}) + R_{5\alpha} - \dot{m} C_\alpha, \quad \alpha = 1, 2; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{c}{3\kappa} \frac{\partial U_R}{\partial x_j} \right) - \kappa (cU_R - 4\sigma T_s^4) = 0; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i C_{pi} \varphi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + \kappa (cU_R - 4\sigma T_s^4) + A_s (T - T_s); \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \quad \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (7)$$

$$R_1 = k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp(-E/RT_s), \quad R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-1/2} \exp(-E_2/RT_s); \quad (8)$$

$$R_3 = k_3 \rho_3 \varphi_3 C_1 S_\sigma \exp(-E_3/RT_s), \quad (9)$$

$$R_5 = M_2 k_5 \left(\frac{C_1 M}{M_1} \right)^{1/4} \left(\frac{C_2 M}{M_2} \right) T^{-2,25} \exp(-E_5/RT);$$

$$R_{51} = R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, \quad R_{52} = v_r (1 - \alpha_c) R_1 - R_5, \quad (10)$$

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

$$\sum_{\alpha=1}^3 C_\alpha = 1, \quad P_e = \rho_5 RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{C_\alpha}{M_\alpha}, \quad v = (v_1, v_2), \quad g = (0, g); \quad (11)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_j \frac{\partial}{\partial x_j}. \quad (12)$$

Начальные и граничные условия:

$$t = 0: v_1 = 0, v_2 = 0, T = T_e, C_\alpha = C_{\alpha e}, T_s = T_e, \varphi_i = \varphi_{ie}, \quad (13)$$

$$x_1 = 0: v_1 = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial x_1} = 0, \quad (14)$$

$$x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_1} = 0, \frac{c}{3\kappa} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{c}{2} U_R = 0, \quad (15)$$

$$x_2 = 0: v_1 = 0, v_2 = v_{2r}, T = T_r, C_\alpha = C_{\alpha r}, U_R = \varepsilon \sigma T_r^4, x_1 \leq x_{1r}, \quad (16)$$

$$v = 0, v_r = 0, T = T_e, C_\alpha = C_{\alpha e}, U_R = \varepsilon \sigma T_e^4, x_1 > x_{1r};$$

$$x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{c}{3\kappa} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{c}{2} U_R = 0. \quad (17)$$

Здесь и выше $R_1 - R_5$, $R_{5\alpha}$ — массовые скорости пиролиза ЛГМ, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза и образования α -компонентов газовой фазы; C_{pi} , ρ_i , φ_i — удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i -й фазы (1 — сухое органическое вещество, 2 — вода, 3 — конденсированные продукты пиролиза, 4 — минеральная часть, 5 — газовая фаза); T , T_s — температура газовой и конденсированной фаз; C_α — массовая концентрация ($\alpha = 1$ — кислород, 2 — CO, 3 — инертные компоненты воздуха); P_e — давление в невозмущенной среде; U_R — плотность энергии излучения; σ — постоянная Стефана — Больцмана; κ — коэффициент ослабления излучения; ε — степень черноты; A_s — коэффициент обмена фаз; q_i , E_i , k_i ($i = 1-4$) — тепловые эффекты, энергии активации, предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза соответственно; S_σ — удельная поверхность элемента ЛГМ; M_α , M_C , M — молекулярная масса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; S , C_d — удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полого леса; t — время; x_i , v_i ($i = 1, 2$) — декартовы координаты и компоненты скорости; C — скорость света; R — универсальная газовая постоянная; v_r — массовая доля горячего газа в летучих продуктах пиролиза; α_c — коксовое число.

Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют ЛГМ полого соснового леса [1, 6, 7]: $E_1/\bar{h} = 9400$ К, $k_1 = 3,36 \cdot 10^4$ с⁻¹, $q_1 = 0$, $E_2/R = 6000$ К, $k_2 = 3 \cdot 10^6$ К^{1/2} · с⁻¹, $q_2 = 6 \cdot 10^7$ Дж/кг, $E_3/R = 10^4$ К, $k_3 = 10^3$ с⁻¹, $q_3 = 1,2 \cdot 10^7$ Дж/кг, $E_5/R = 11500$ К, $k_5 = 3 \cdot 10^{13}$, $q_5 = 10^7$ Дж/кг, $C_{p1} = 2000$, $C_{p2} = 4180$, $C_{p3} = 900$, $C_{p4} = 10^3$, $C_{p5} = 10^3$ Дж/(кг · К), $S_\sigma = 10^3$ м⁻¹, $SC_d = 0,1$ м⁻¹, $\alpha_c = 0,06$, $\rho_4 \varphi_4 = 0,08$ кг/м³, $\rho_1 = 500$, $\rho_2 = 10^3$, $\rho_3 = 200$, $\rho_5 = 1,16$ кг/м³, $P_e = 10^5$ Н/м², $T_e = 300$ К, $C_{1e} = 0,23$, $C_{2e} = 0$, $\varphi_{3e} = 0$, $\kappa = 0,8$ м⁻¹, $\varepsilon = 0,9$, $A_s = 100$ Вт/(м³ · К).

Коэффициент объемного теплообмена рассчитывался по формуле

$$A_s = \alpha S,$$

где α — коэффициент теплообмена элемента ЛГМ, имеющего форму цилиндра, для определения которого использовались данные работы [6]. Начальные значения φ_1 и φ_2 рассчитывались по формулам

$$\varphi_{1e} = \frac{(1 - \nu_3)}{f_1} \rho_{10}, \quad \varphi_{2e} = \frac{\rho_{10} W_0}{\rho_2}$$

(W_0 — влагосодержание ЛГМ, ρ_{10} , ν_3 — запас и зольность ЛГМ). Принималось, что $W_0 = 0,666$, $\rho_{10} = 0,5$ кг/м³, $\nu_3 = 0,04$. Для замыкания системы (1)–(12) компоненты тензора турбулентных напряжений, турбулентные потоки тепла и массы определяются при помощи локально-равновесной модели турбулентности [7].

Метод расчета и тестовые проверки программы

Численно краевая задача (1)–(7) решалась методом расщепления по физическим процессам [8]. На первом этапе рассчитывалась гидродинамическая картина течения и распределения скалярных функций. Затем интегрировалась полученная в результате расщепления система обыкновенных дифференциальных уравнений химической кинетики. Дискретный аналог для (1)–(7) получен методом контрольного объема с использованием алгоритма SIMPLE [9].

Правильность работы программы проверялась методом предварительно задаваемых аналитических решений. В (1)–(7) подставлялись аналитические выражения искомых функций и вычислялась невязка уравнений, которая затем рассматривалась как источник в каждом уравнении. Далее с помощью описанного выше алгоритма восстанавливались значения использованных функций с точностью не менее 1%. Исследовалось влияние размеров контрольных объемов на решение путем их уменьшения. Шаг по времени выбирался автоматически.

Результаты расчетов и их анализ

Численно получены поля температур, скоростей, концентраций компонентов и объемных долей фаз. На рис. 2 представлены векторные поля скоростей и изотермы в окрестности очага низового пожара ($T_r = 1300$ К, $U_{2r} = 0,1$ м/с) при отсутствии (см. рис. 2, а: $1 - \bar{T}$, $\bar{T}_s = 2, 6$, $2 - \bar{T}$, $\bar{T}_s = 1, 5$, $3 - \bar{T}$, $\bar{T}_s = 1, 2$; $\bar{T} = T/T_e$, $\bar{T}_s = T_s/T_e$) и наличии ветра (см. рис. 2, б: $1 - \bar{T} = 1,1$, $2 - \bar{T}$, $\bar{T}_s = 1, 5$, $3 - \bar{T}$, $\bar{T}_s = 2$, $4 - \bar{T}$, $\bar{T}_s = 2,6$) в пологе леса в момент времени $t = 4,8$ с. В последнем случае скорость ветра на открытой местности $v_0 = 8$ м/с задается на фиксированной высоте над пологом леса (6 м). При наличии ветра картина процесса не симметрична относительно оси ox_2 , и поэтому рассматривается, область от $-x_{1e}$ до x_{1e} . Вместо (14) задается граничное условие

$$x_1 = -x_{1e}: v_1 = v_e(x_2), \quad \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial C_\alpha}{\partial x_1} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{c}{3\lambda} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + \frac{c}{2} U_R = 0.$$

В окрестности очага тепло- и массовыделения всплывают нагретые массы воздуха, продукты пиролиза и горения. При $v_e(x_2) = 0$ картины течения и распределения всех скалярных функций симметричны относительно оси ox_2 .

В результате притока масс воздуха с периферии по обе стороны очага образуются области рециркуляционного течения (см. рис. 2, а). Изотермы для газовой (сплошные) и твердой фаз (штриховые линии) приведены при $T_r = 1300$ К, $v_{2r} = 0,1$ м/с, $x_{1r} = 1,5$ м на рис. 2, а. В случае $v_e(x_2) \neq 0$ поля ветра в пологе леса взаимодействуют с газоструйным препятствием, образовавшимся от очага низового лесного пожара и заго-

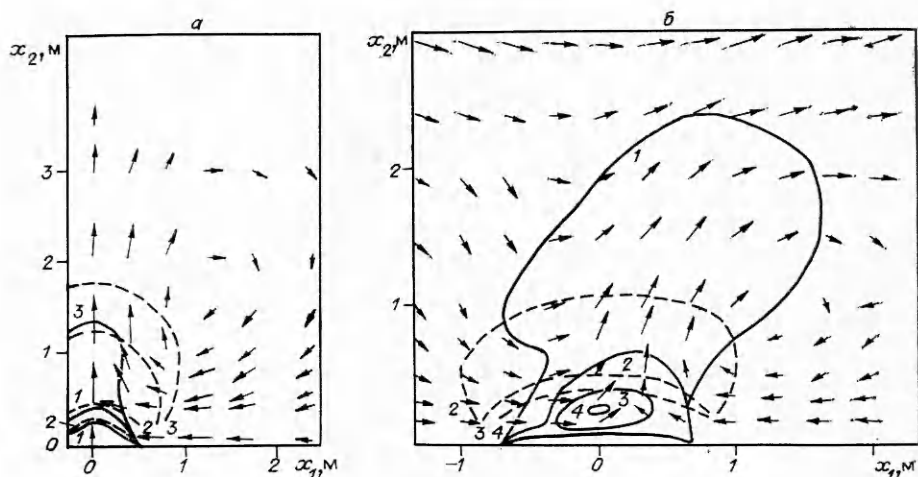


Рис. 2.

решейся нижней границы полога леса. За зоной тепло- и массовыделения образуется рециркуляционное течение, а с наветренной стороны происходит ускорение движения воздуха, обтекающего область зажигания (см. рис. 2, б). При этом изотермы газовой фазы деформируются по направлению ветра. Ветер прижимает нагретый поток к кронам деревьев (см. изотермы на рис. 2, б). Картина данного течения качественно согласуется с результатами [7], где рассматривается вопрос трансформации ветра в окрестности фронта низового лесного пожара, который моделируется поверхностным источником массы и энергии.

Анализ зажигания полога леса от очага низового лесного пожара показывает, что наличие внешнего поля ветра не оказывает существенного влияния на данный процесс. Поскольку он происходит на нижней границе, определяющим фактором является влияние очага низового пожара. Внешний поток обтекает область наиболее существенных химических превращений, влияя в основном на внешнюю границу. При проведении расчетов значения v_0 варьировались от 0 до 10 м/с. При $v_0 = 0, 5, 6, 8, 10$ м/с значения $t_3 = 4,0, 4,6, 4,7, 4,8, 4,85$ с ($h_1 = 0,19$ м). С ростом v_0 время t_3 увеличивается. Это объясняется тем, что большее количество тепловой энергии и летучих продуктов пиролиза выносятся во время пиролиза ЛГМ из полога леса над очагом горения.

При расчете t_3 в качестве критерия зажигания использовалось условие

$$\frac{\partial^2 T}{\partial t_{t=t_3, x_1=0, x_2=h_1}^2} = 0.$$

Распределение основных функций при наличии и отсутствии ветра в этой области при $x_1 = 0$ показывает, что в обоих случаях процесс проходит одни и те же стадии (рис. 3). В результате прогрева элементов ЛГМ испаряется влага, идет пиролиз с выделением газообразных продуктов, которые затем воспламеняются. На рис. 3, а (сплошные линии — температура газовой фазы, штриховые — твердой фазы) изображен процесс прогрева и воспламенения ЛГМ при $x_1 = 0$ в пологе леса для различных моментов времени (t , с: 1 — 2,2, 2 — 3,2, 3 — 4,8). На рис. 3, б (сплошные линии — концентрация кислорода, штриховые — окиси углерода) изображено распределение на оси $x_1 = 0$ компонентов газовой фазы. В момент зажигания наблюдается выгорание СО и быстрое уменьшение концентрации кислорода. Температуры обеих фаз также принимают максимальное значение в точке зажигания. Подобным образом протекает процесс воспламенения и для случая, когда скорость ветра отлична от нуля.

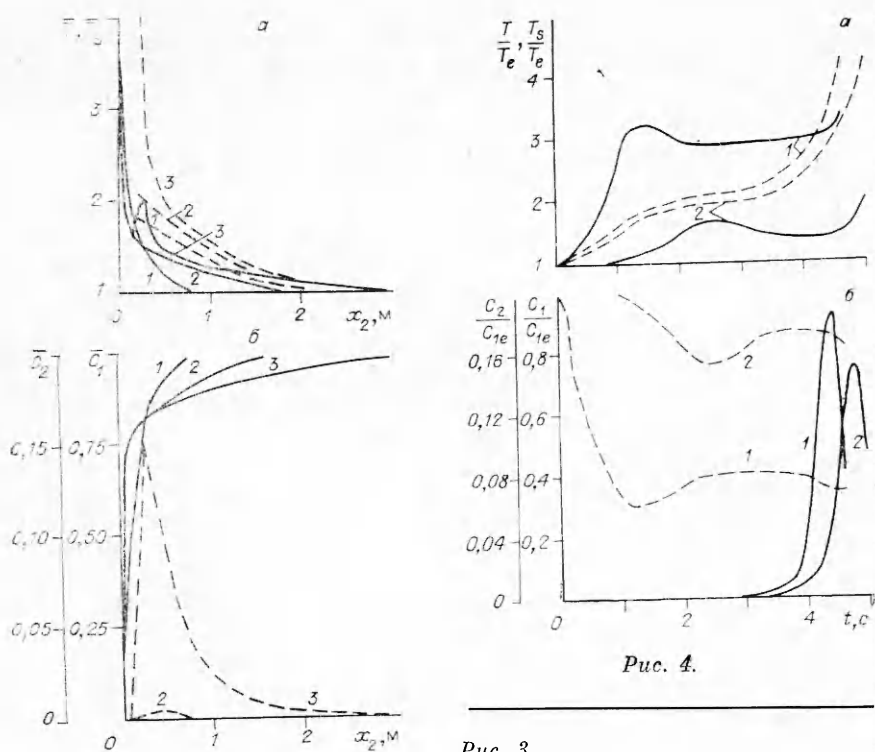


Рис. 4.

Рис. 3.

Представляет интерес зажигание полого леса от очага низового пожара для различных скоростей выдува v_{2r} , зависящих от скорости распространения низового лесного пожара, запаса ЛГМ и других параметров. Так, при $v_{2r} = 0,1$ м/с в течение всего времени прогрева температура твердой фазы на нижней границе полого выше температуры газа (рис. 4, а, кривые 2). В этом случае перенос энергии излучением преобладает над конвективным. При $v_{2r} = 1$ м/с (см. рис. 4, б, кривые 1) температура газовой фазы выше твердой практически до момента зажигания. На рис. 4, б также даны изменения концентраций кислорода C_1 и летучих продуктов пиролиза C_2 при $x_1 = 0$ на нижней границе полого леса с ростом времени. Из графиков видно, что в момент зажигания происходит выгорание летучих продуктов пиролиза. При этом расходуется и кислород.

Из анализа кривых рис. 4, а следует, что имеют место три стадии процесса перехода низового лесного пожара в верховой: радиационно-конвективного прогрева и сушки ЛГМ, периода индукции и зажигания и горения газофазных горючих продуктов пиролиза. Первая стадия длится от 0 до $t = t_{max}$, где t_{max} — время достижения максимума температуры газовой фазы. Вторая имеет место при $t_{max} < t < t_3$ и третья — при $t > t_3$.

Для полного представления об особенностях тепло- и массообмена полого леса с газообразными продуктами горения низового лесного пожара были получены при различных скоростях вдува v_{2r} изотермы, линии равных концентраций окиси углерода и кислорода, а также векторные поля скоростей в различные моменты времени. После анализа полученных данных можно утверждать, что стадия прогрева характеризуется тем, что включает в себя образование термика — объема нагретых газообразных продуктов горения низового пожара, всплывающих в атмосфере. Эта стадия завершается достижением максимума температуры газовой фазы на нижней границе полого (см. рис. 4). Затем значительную роль в тепло- и массопереносе начинает играть подсос воздуха из окружающей среды (см. рис. 2), благодаря чему на нижней границе температура газовой фазы сначала убывает, а затем остается почти постоян-

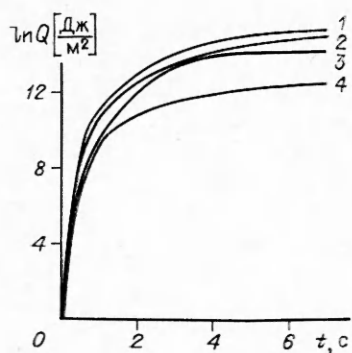


Рис. 5.

В обоих случаях перенос энергии излучением доминирует для малых моментов времени, так как для возникновения термика, вертикальный размер которого превышает расстояние между подстилающей поверхностью и нижней границей крон деревьев, требуется определенное время.

На рис. 5 представлен тепловой импульс ($v_{2r} = 0,1$ м/с), доставляемый к единице площади поверхности в окрестности точки зажигания для различных моментов времени за счет всех процессов переноса (кривая 1), конвекции (кривая 2), излучения (3) и турбулентной индукции (4). Видно, что преобладает конвективный перенос. Цифрами 2—4 при $x_1 = 0$ и $x_2 = h_1$ обозначены соответственно

$$Q_2 = \int_0^{t_3} \rho_5 v_2 c_{p5} T dt, \quad Q_3 = \frac{c}{2\pi} \int_0^{t_3} \frac{\partial U_R}{\partial r_2} dt, \quad Q_4 = \int_0^{t_3} (-\rho_5 c_{p5} \overline{v_2' T'}) dt.$$

В работе [2] указывается, что тепловой импульс, необходимый для зажигания кроны сосновых деревьев, должен быть не менее 4500 кДж/м². В приведенных выше численных расчетах эта величина доходила до 3800 кДж/м², что согласуется с экспериментальными данными.

Выводы

Экспериментально найдено значение минимального расстояния от подстилающей поверхности до крон деревьев, на котором происходит зажигание, и минимальный поджигающий импульс. При помощи численного моделирования получены распределения температуры, концентраций компонентов и скорости в зоне перехода низового лесного пожара в верховой. Расчеты показали, что с ростом скорости выдува от очага горения и времени возрастает роль конвективного механизма передачи энергии по сравнению с радиационным. При росте скорости ветра на внешней границе полога леса в основном сохраняется картина процесса, но незначительно увеличивается время зажигания. Величина критического теплового импульса составляет для условий расчета 3800 кДж/м², а критическая высота нижней границы крон деревьев — 0,5 м. Численные и экспериментальные результаты могут иметь практическое применение для противопожарного устройства лесов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров.— Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
2. Исаков Р. В. // Лесные пожары и их последствия.— Красноярск, 1985.
3. Гришин А. М., Алексеев Н. А., Нутерман Б. М. и др. Экспериментальное исследование механизма распространения лесных пожаров и новых способов борьбы с ними.— Деп. в ВИНТИ 9.01.87, № 226—В87.
4. Брабандер О. П., Вдовина О. А., Гришин А. М. и др. ФГВ, 1988, 24, 4, 58.

5. Гришин А. М., Перминов В. А. // Теплообмен-ММФ. Междунар. форум: Тез. докл., секц. 2.— Минск, 1988.
6. Конев Э. В. Основы горения растительных материалов.— Новосибирск: Наука, 1977.
7. Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г. Теплофизика лесных пожаров.— Новосибирск, 1984.
8. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов для решения уравнений математической физики.— Новосибирск: Наука, 1967.
9. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.— М.: Энергоатомиздат, 1984.

Поступила в редакцию 25/VII 1989

УДК 536.244 + 536.468

А. М. ГРИШИН, С. П. СИНИЦЫН

ВОЗДЕЙСТВИЕ ФРОНТА ВЕРХОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА СТЕКЛОПЛАСТИК

Стеклопластиковые материалы получили широкое распространение в промышленности и в быту, в том числе и для изготовления различных узлов транспортных средств. Эксплуатация этих транспортных средств при тушении лесных пожаров должна проводиться с учетом возможного воздействия фронта лесного пожара на элементы конструкций.

В данной работе дается постановка и численное решение сопряженной задачи о взаимодействии стеклопластикового диска, расположенного перпендикулярно скорости ветра и скорости распространения наиболее опасного верхового лесного пожара [1]. Установлено, что в результате воздействия фронта верхового пожара могут иметь место режимы невоспламенения, самовоспламенения, зажигания от лучистого и конвективного потоков, режимы непотухания и потухания. Показано, что наиболее пожароопасны устойчивые верховые лесные пожары, для которых тепловой импульс максимален.

Постановка задачи

Учитывая сложность физической модели взаимодействия фронта пожара со стеклопластиковым материалом, ограничимся, с одной стороны, наиболее простой геометрией тела и картиной обтекания транспортного средства, наиболее полно, с другой стороны, описывающей процессы внутри стеклопластика и вблизи него. Для этого рассмотрим сопряженную задачу тепло- и массообмена, включающую в себя течение реагирующего газа в окрестности лобовой критической точки (приближение пограничного слоя) и термическое разложение стеклопластика в одномерной постановке.

На внешней границе пограничного слоя на основе математической теории верхового лесного пожара и данных экспериментов [4—5] приемлемо распределение средних температур, скоростей и концентрации окислителя в виде

$$\begin{aligned}
 T_e &= T_\infty + (T_\Gamma - T_\infty) \exp \left[-\frac{4z^2}{\Delta^2} \ln \left(\frac{T_\Gamma - T_\infty}{T_* - T_\infty} \right) \right], \\
 u_e &= u_\infty + (u_\Gamma - u_\infty) \exp \left[-\frac{4z^2}{\Delta^2} \ln \left(\frac{T_\Gamma - T_\infty}{T_* - T_\infty} \right) \right], \\
 c_{1e} &= c_{1\infty} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{4z^2}{\Delta^2} \ln \left(\frac{T_\Gamma - T_\infty}{T_* - T_\infty} \right) \right] \right\},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где z — координата, нормальная к фронту пожара; T_* соответствует условным границам фронта; T_e — температура воздуха вне пожара; T_Γ —