

## ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ И ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ НА КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОЧАГА НИЗОВОГО ПОЖАРА

УДК 536.24:533.6

А. И. Звягильская, А. Н. Субботин

Томский государственный университет, 634050 Томск

*Рассматривается зажигание слоя лесного горючего материала (ЛГМ) цилиндрическим источником. На основе численных расчетов определены критические значения радиуса головешки, при котором она способна стать причиной низового пожара. Зависимости критического размера определены как функции влагосодержания и условий тепло- и массообмена слоя ЛГМ с внешней средой. Сделана оценка того, как влияет игнорирование внутренней структуры головешки и процессов, происходящих в ней, на критический размер. Установлено, что вначале осуществляется гетерогенное зажигание головешки, а затем — слоя опада.*

**Постановка задачи.** При сильных верховых или повальных пожарах возникает мощная конвективная колонка, которая способна поднимать на большую высоту и переносить на достаточно большие расстояния горящие веточки. Такая головешка, упавшая в лесу на некотором расстоянии от очага пожара, при определенных условиях может стать причиной возникновения очага низового пожара. Этим можно объяснить тот факт, что верховой или повальный лесной пожар может перебрасываться через широкие противопожарные полосы.

Предположим, что горящая головешка из зоны лесного пожара конвективным потоком переносится на некоторое расстояние и падая втыкается вертикально в слой опада хвои. В результате теплообмена головешки со слоем ЛГМ вокруг источника тепла образуется прогретая область, и при некоторых условиях может произойти зажигание. Учитывается, что слой опада — пористая среда, состоящая из сухого органического вещества, воды, находящейся в связанном состоянии, конденсированного продукта пиролиза — коксика, конденсированного продукта горения — золы и газообразных продуктов пиролиза и горения. В отличие от [1], где горящая веточка моделировалась сплошным нагретым цилиндром, распределением температуры в котором пренебрегали, в данной работе головешка моделируется пористым цилиндрическим телом, прогретым в начальный момент времени до температуры горения и состоящим из газообразных и конденсированных продуктов пиролиза материала веточки. Кроме того, учитывается фильтрация газообразных продуктов по порам источника зажигания, гомогенная и гетерогенная реакции. При исследовании теплообмена между источником тепла и слоем опада в последнем учитываются пиролиз ЛГМ, испарение влаги, реакции горения оксида углерода и коксика. Задача зажигания решается в сопряженной постановке.

Описанная выше физическая задача сводится к решению системы уравнений сохра-

нения массы исходного конденсированного вещества (ЛГМ), воды, конденсированных и газообразных продуктов пиролиза слоя опада и обугленной веточки, а также уравнений сохранения массы  $\alpha$ -компонента и всей газовой фазы и уравнений сохранения энергии как в слое опада, так и в источнике зажигания. Для вычисления скорости фильтрации газообразных продуктов в порах головешки и порах слоя опада используются уравнения движения в форме квадратичного закона Дарси. Данная математическая постановка задачи получена на основе математической модели теплообмена при низовых пожарах, приведенной в [2], и после осреднения по вертикальной переменной имеет следующий вид.

Уравнения сохранения для слоя ЛГМ:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -k_n \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_n}{RT}\right) = -R_n, \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -k_u \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_u}{RT}\right) = -R_{2s}, \quad (1)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c \rho_1 R_n - s R_{3s}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_s \rho_1 R_n, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_5 \varphi_5 u) = \bar{n}_5 - \frac{R_{5w}}{H}, \quad \sum_{i=1}^5 \varphi_i = 1, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_5 \varphi_5 c_\alpha) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_5 \varphi_5 c_\alpha u) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \right) + R_{5\alpha} + s R_{5\alpha s} - \frac{R_{5\alpha w}}{H}, \quad (4)$$

$$\alpha = 1, 2, 3, \quad \sum_{\alpha=1}^4 c_\alpha = 1,$$

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_{CO} R_{CO} + q_s s R_{3s} - q_u \rho_2 R_{2s} - \frac{\alpha_1}{H} (T - T_e) - \frac{\alpha_2}{H} (T - T_s). \quad (5)$$

$$u = -\frac{k}{\mu + k\beta\rho_5|u|} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad p = \frac{\rho_5 RT}{M}, \quad M = 1 / \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}. \quad (6)$$

Уравнения сохранения для головешки:

$$\rho_{30} \frac{\partial \varphi_{30}}{\partial t} = -s_0 R_{3s}^0, \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{50} \varphi_{50}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_{50} \varphi_{50} u_0) = s_0 R_{3s}^0; \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{50} \varphi_{50} c_{\alpha 0}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_{50} \varphi_{50} c_{\alpha 0} u_0) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho_{50} \varphi_{50} D_{\alpha 0} \frac{\partial c_{\alpha 0}}{\partial r} \right) + \bar{R}_{5\alpha}^0 + s_0 R_{5\alpha s}^0, \quad (8)$$

$$\sum_{i=3}^5 \varphi_{i0} = 1, \quad \sum_{\alpha=1}^4 c_{\alpha 0} = 1;$$

$$\rho_{s0} c_{ps0} \frac{\partial T_0}{\partial t} + \rho_{50} \varphi_{50} c_{p50} \left( \frac{\partial T_0}{\partial t} + u_0 \frac{\partial T_0}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial r} \right) + q_{CO} R_{CO}^0 + q_s s_0 R_{3s}^0; \quad (9)$$

$$u_0 = -\frac{k_0}{\mu + k_0 \beta \rho_{50} |u_0|} \frac{\partial p_0}{\partial r}, \quad p_0 = \frac{\rho_{50} RT_0}{M_0}, \quad M_0 = 1 / \sum_{\alpha=1}^4 \frac{c_{\alpha 0}}{M_\alpha}. \quad (10)$$

Здесь индекс 0 приписывается величинам, характеризующим источник зажигания;  $\varphi_i$  и  $\rho_i$ ,  $i = 1, \dots, 5$ , — объемные доли и истинные плотности опада, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно;  $s R_{3s} = (M_C/M_{O_2}) s \rho_5 \varphi_5 c_1 k_s \varphi_3 \exp(-E_s/RT)$  — массовая скорость горения коксика;  $E_s, k_s, E_u, k_u, E_n, k_n$  — энергии активации и предэкспоненциальные мно-

жители гетерогенной реакции горения коксика, реакции испарения воды и пиролиза ЛГМ соответственно;  $H$  — толщина слоя;  $\tilde{n}_5 = \alpha_{\Gamma} \rho_1 R_n + \rho_2 R_{2s} + s R_{3s}$  — массовая скорость образования газовой фазы вследствие химических реакций, протекающих внутри слоя;  $\rho_1 R_n$ ,  $\rho_2 R_{2s}$  — массовая скорость пиролиза ЛГМ и испарения влаги;  $R_{5\alpha w} = (\alpha_1 \varphi_5 / c_{p5})(c_{\alpha} - c_{\alpha e})$ ,  $R_{5w} = \rho_5 \varphi_5 v_w$  — члены, задающие массообмен  $\alpha$ -компонента и всей газовой фазы с окружающей средой;  $u$ ,  $u_0$  — скорость фильтрации газообразных продуктов в слое опада и головешке;  $T_s$ ,  $T_e$  — температура подстилающей поверхности и окружающей среды;  $k$ ,  $k_0$  — проницаемость слоя ЛГМ и головешки;  $q_u$ ,  $q_s$ ,  $q_{CO}$  — тепловые эффекты реакций испарения влаги, горения коксика и оксида углерода;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен слоя ЛГМ с внешней средой и нижней подстилающей поверхностью;  $D_{\alpha}$  — коэффициент молекулярной диффузии  $\alpha$ -компонента;  $\rho_s c_{ps} = \sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi}$ ;  $c_{pi}$  — удельная теплоемкость  $i$ -й фазы;  $t$  — время;  $r$  — цилиндрическая координата;  $p$ ,  $p_0$  — давление газообразных продуктов в порах слоя и головешки;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  — массовые концентрации кислорода, оксида углерода и паров воды соответственно;  $\alpha_c = \nu'_3 M_3 / \nu_1 M_1$ ,  $\alpha_s = \nu'_4 M_4 / \nu_1 M_1$ ,  $\alpha_{\Gamma} = \sum \nu'_{5\alpha} M_{5\alpha} / \nu_1 M_1$  — доли коксика, золы и газообразных продуктов образующихся при пиролизе ЛГМ;  $\lambda = \lambda_s + \lambda_R$ ;  $\lambda_s = \sum_{i=1}^5 \lambda_i \varphi_i$  — коэффициент теплопроводности многофазной среды;  $\lambda_R = 16\sigma T^3 / s$  — коэффициент лучистой теплопроводности;  $\lambda_0 = \lambda_{s0} + \lambda_{R0}$ ;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости. Скорость выдува газообразных продуктов из слоя опада  $v_w$  вычислялась по эмпирической формуле [3], которая в данном случае записывалась так:

$$v_w = -1,1 \sqrt{\frac{gA(\rho_e - \rho_5)z}{\rho_e}} \exp \left[ -\frac{11,5(r - r_{\max})^2}{z^2} \right],$$

где  $z$  — высота, на которой определяется скорость;  $r_{\max}$  — координата максимума температуры;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\rho_e$  — плотность воздуха в окружающей среде;  $A$  — эмпирическая константа. Эта константа была найдена в работе [4] ( $A = 0,4$ ) при согласовании расчетной скорости горения опада хвои с экспериментальными данными [5]. Кроме того, в уравнениях (4), (5), (8), (9) использованы обозначения:

$$R_{51} = -\frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} T^{-2,25} k_{O_2} \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0,25} \frac{c_2 M}{M_2} \exp \left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right) = -\frac{M_{O_2}}{2M_{CO}} R_{CO};$$

$$sR_{51s} = -\frac{M_{C_2}}{M_C} sR_{3s}, \quad R_{52} = \alpha_{CO} \rho_1 R_n - R_{CO}, \quad R_{52s} = 0;$$

$$R_{53} = 0; \quad sR_{53s} = \rho_2 R_{2s}, \quad s_0 R_{3s}^0 = \frac{M_C}{M_{O_2}} s_0 \rho_{50} \varphi_{50} c_{10} k_s \varphi_{30} \exp \left(-\frac{E_s}{RT}\right);$$

$$R_{51s}^0 = -\frac{M_{C_2}}{M_C} R_{3s}^0, \quad R_{52}^0 = -R_{CO}, \quad R_{51}^0 = R_{51}; \quad R_{52s}^0 = 0, \quad R_{53}^0 = 0, \quad R_{53s}^0 = 0,$$

где  $s$ ,  $\varphi_5$ ,  $s_0$ ,  $\varphi_{50}$  — удельная поверхность пор и пористость слоя ЛГМ и обугленной головешки соответственно;  $\alpha_{CO}$  — доля оксида углерода, образующегося при пиролизе ЛГМ;  $M_C$ ,  $M_{CO}$ ,  $M_{O_2}$  — атомарная масса углерода и молекулярные массы оксида углерода и кислорода соответственно.

Задача зажигания решается в сопряженной постановке, поэтому при решении системы

уравнений (1)–(10) ставились следующие краевые условия:

$$t = 0: \quad \varphi_i = \varphi_i^0, \quad i = \overline{1, 4}, \quad c_\alpha = c_\alpha^0, \quad \alpha = \overline{1, 3},$$

$$\varphi_{i0} = \varphi_{i0}^0, \quad i = 3, 4, \quad c_{\alpha 0} = c_{\alpha 0}^0, \quad \alpha = \overline{1, 3}, \quad (11)$$

$$T|_{r>r_0} = T^0, \quad T_0|_{r \leq r_c} = T_\Gamma, \quad \rho_5 = \rho_5^0, \quad \rho_{50} = \rho_{50}^0;$$

$$r = 0: \quad \frac{\partial c_{\alpha 0}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T_0}{\partial r} = 0, \quad u_0 = 0;$$

$$r = r_0: \quad c_{\alpha 0} = c_\alpha, \quad \rho_{50} \varphi_{50} D_{\alpha 0} \frac{\partial c_{\alpha 0}}{\partial r} = \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial r}, \quad (12)$$

$$T_0 = T, \quad \lambda_0 \frac{\partial T_0}{\partial r} = \lambda \frac{\partial T}{\partial r}, \quad u_0 = u;$$

$$r = L: \quad c_\alpha = c_\alpha^0, \quad T = T^0, \quad p = p^0,$$

где  $L$  — величина, моделирующая бесконечность,  $r_0$  — радиус головешки. Верхний индекс 0 приписывается функциям в начальный момент времени или величинам, не изменяющимся со временем. Величина  $L$  выбиралась таким образом, чтобы тепловая волна не доходила до точки  $r = L$ .

Если не учитывать внутреннюю структуру головешки и предположить, что она непроницаемое тело с эффективными теплофизическими постоянными (соответствующими прококсованной веточке), причем считать, что теплопроводность в ней значительно больше теплопроводности слоя ЛГМ, то распределением тепла в головешке можно пренебречь и вместо (1)–(10) решать систему (1)–(6) при следующих краевых условиях:

$$t = 0: \quad \varphi_i = \varphi_i^0, \quad i = \overline{1, 4}, \quad c_\alpha = c_\alpha^0, \quad \alpha = \overline{1, 3}; \quad (13)$$

$$T|_{r>r_0} = T^0, \quad T|_{r=r_0} = T_g, \quad \rho_5 = \rho_5^0;$$

$$r = r_0: \quad \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} = R_{35\alpha}^w, \quad u = 0;$$

$$\frac{\rho_0 c_p r_0}{2} \frac{dT_0}{dt} = \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} + q_s R_{3s}^w - \varepsilon \sigma T_0^4; \quad (14)$$

$$r = L: \quad c_\alpha = c_\alpha^0, \quad T = T^0, \quad p = p^0.$$

Здесь  $T_g$  — температура горения головешки,  $R_{35\alpha}^w$  — массовая скорость образования (исчезновения)  $\alpha$ -компонента на поверхности головешки,  $R_{351}^w = k_s \rho_5 \varphi_5 c_1 \exp(-E_s/RT)$ ,  $R_{352}^w = 0$ ,  $R_{353}^w = 0$ ,  $R_{3s}^w = M_C/M_{O_2} R_{351}^w$ . Как следует из (14), в данной постановке учитываются лишь излучение головешки и гетерогенная реакция горения коксика на внешней поверхности.

**Анализ численных результатов.** При решении задачи скорость фильтрации исключалась из системы с помощью уравнения движения в форме Дарси. Уравнения (1), (2) и первое уравнение (7) расписывались в разностях по неявной разностной схеме, а для решения системы уравнений (3)–(5), (7)–(9) использовался итерационно-интерполяционный метод [6], с помощью которого получена неявная разностная схема, а последняя решалась методом Ньютона.

При численном решении краевой задачи (1)–(12) определялись поля температуры, плотности, скорости фильтрации, объемных долей фаз и концентрации компонентов газо-

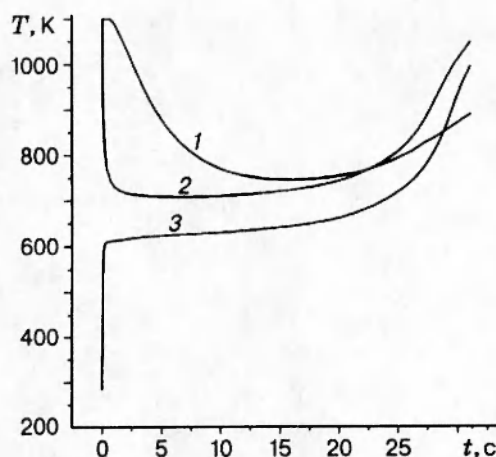


Рис. 1. Зависимость температуры в центре головешки (1), на ее поверхности (2) и в слое опада хвои (3) от времени

вой фазы. В качестве условия зажигания использовалось условие [7]

$$r = r_0: \left. \frac{\partial^2 T_0}{\partial t^2} \right|_{t=t_*} = 0. \quad (15)$$

Теплофизические постоянные, используемые в статье, взяты из книг [8, 9], а кинетические константы — из работ [10–12].

На рис. 1 приведены зависимости температуры в центре головешки, на ее поверхности и в третьей точке разностной сетки слоя ЛГМ от времени. Как следует из рис. 1, температура в центре головешки уменьшается значительно медленнее. Уже через 3 с после внедрения головешки в слой ЛГМ температура на поверхности источника равна  $\sim 720$  К, тогда как в центре она равна еще 960 К. К этому моменту времени начинается прогрев и слоя ЛГМ; так, в прилегающем слое (кривая 3 на рис. 1) температура повысилась от начальной 288 до 630 К. Затем в течение 20 с идет медленный прогрев. За это время температура в центре головешки становится равной температуре на ее поверхности, и на 29-й секунде происходит зажигание головешки, а затем и слоя ЛГМ. Зависимости, приведенные на рис. 1, получены при  $W = 2,5\%$ ,  $\alpha_1 = 4$  Вт/м<sup>2</sup>,  $r_0 = 0,003$  м.

На рис. 2 для этих же условий представлены профили температуры и скорости фильтрации. Кривые 1 построены для момента прогрева (10 с), а кривые 2 — после зажигания ( $t = 30,5$  с). Пик температуры соответствует границе раздела сред (точке  $r = r_0$ ). Анализируя рис. 2, можно сделать вывод, что при зажигании локальным источником тепла прогревается слой ЛГМ толщиной 2,5–3 см, при этом вначале происходит гетерогенное зажигание головешки (кривая 2 на рис. 2,а), а затем и слоя опада. Профиль скорости фильтрации при прогреве и зажигании имеет один и тот же вид с той лишь разницей, что при прогреве модуль скорости несколько меньше, чем при зажигании. В обоих случаях газообразные продукты движутся в сторону максимума температуры, где унос массы в окружающую среду максимальный.

На рис. 3 изображены профили концентрации оксида углерода и кислорода (расчет при тех же параметрах, что и на рис. 1). При прогреве максимум концентрации оксида углерода находится у поверхности источника, а после зажигания слоя ЛГМ максимум вместе с зоной разложения смещается вправо (см. рис. 3,а). При этом, как следует из

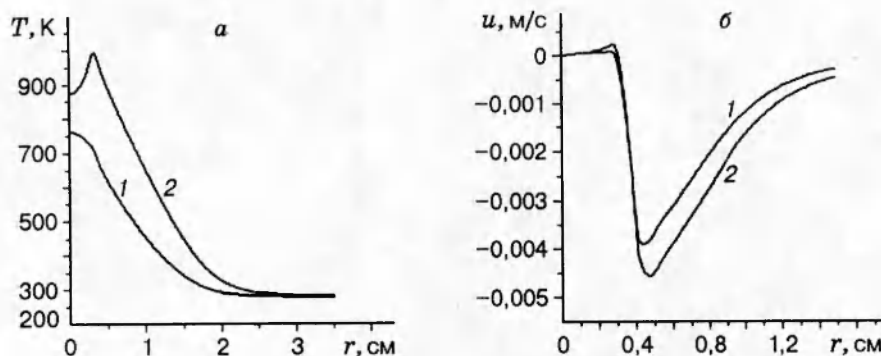


Рис. 2. Профили температуры (а) и скорости фильтрации (б) при прогреве (кривые 1) и зажигании (кривые 2) ЛГМ

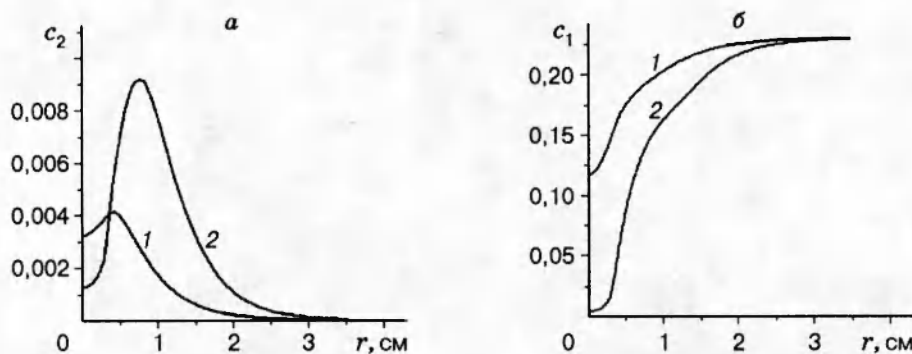


Рис. 3. Профили концентрации оксида углерода (а) и кислорода (б) при прогреве (кривые 1) и зажигании (кривые 2) ЛГМ

анализа кривой 1 рис. 3,б, в поры головешки диффундирует кислород. После зажигания концентрация кислорода в порах очень быстро уменьшается и становится практически равной нулю.

На рис. 3 изображены профили концентрации оксида углерода и кислорода (расчет при тех же параметрах, что и на рис. 1).

И наконец, на рис. 4 приведены зависимости критического радиуса источника зажигания от влагосодержания и коэффициента теплоотдачи. Здесь кривые 1 получены для случая, когда учитывалась внутренняя структура головешки, т. е. решалась краевая задача (1)–(12). Кривые 2 получены при решении краевой задачи (1)–(6), (13), (14). Критический размер источника определялся с точностью до 1%, т. е. при уменьшении радиуса на 1% зажигания не происходило. Рис. 4,а построен до  $w = 11\%$ , так как при дальнейшем увеличении влагосодержания очаг низового пожара не возникал. Аналогичным образом определены критические значения коэффициента теплоотдачи. Так, при  $\alpha_1 < 0,4 \text{ Вт/м}^2$  и  $\alpha_1 > 7,4 \text{ Вт/м}^2$  (см. рис. 4,б) зажигание также не происходило. Предельные условия зажигания слоя по влагосодержанию и коэффициенту теплоотдачи определяли следующим образом. Задавали заведомо завышенный запас тепла в источнике. Например, радиус головешки увеличивали примерно в 10 или 50 раз. В результате слой ЛГМ зажигался и около источника все выгорало, но как только зона горения отходила от источника на некоторое расстояние, горение прекращалось.

Следует отметить, что в силу осреднения по вертикальной переменной задача стано-

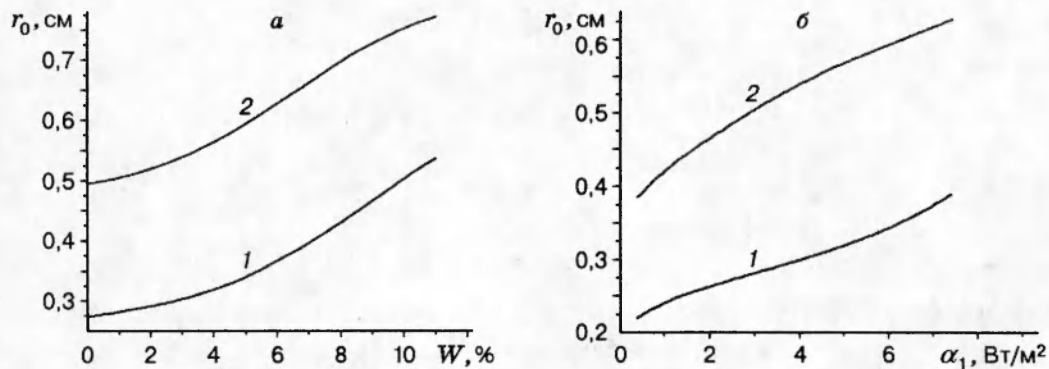


Рис. 4. Значения минимального радиуса головешки, способной инициировать очаг низового пожара, как функции влагосодержания (а) и условий тепло- и массообмена (б)

вится физически тем точнее, чем тоньше слой опада, поэтому при расчетах брался слой толщиной 0,02 м. Так как зависимость критического радиуса от  $\alpha_1$  изменяется с толщиной слоя, можно ввести коэффициент теплоотдачи, отнесенный к толщине слоя  $\alpha_V = \alpha_1/H$  (аналог коэффициента объемного теплообмена). Тогда  $\alpha_V$  будет изменяться от 20 до 370 Вт/м<sup>3</sup>, а графическая зависимость  $r_0(\alpha_V)$  уже не будет функцией толщины слоя ЛГМ. Проведя сравнительный анализ кривых 1 и 2 рис. 4, которые для рис. 4,а получены при  $\alpha_1 = 3$  Вт/м<sup>2</sup> ( $\alpha_V = 150$  Вт/м<sup>3</sup>), а для рис. 4,б — при  $W = 1\%$ , приходим к выводу, что игнорирование внутренней структуры источника зажигания и процессов, происходящих в нем, приводит к завышению критического радиуса головешки, способной инициировать пожар: на 45–75 % для рис. 4,а и 65–70 % для рис. 4,б. На первый взгляд, казалось, что учет внутренней структуры головешки и переноса тепла вдоль радиуса приведет к увеличению критического размера источника, так как в этом случае температура поверхности меньше, а слой ЛГМ загорается поверхностью. Но, как было показано ранее, вначале осуществлялось гетерогенное зажигание головешки, а при учете пористости наружная поверхность головешки стала значительно больше, что привело к уменьшению критического радиуса.

Анализируя рассматриваемую математическую постановку задачи и представленные в работе численные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Изучен механизм зажигания горячей головешкой слоя опада хвои.

2. Если в слой опада хвои, влагосодержание которого не превышает 11%, из зоны лесного пожара попадает горячая головешка, она может инициировать новый очаг низового пожара. Диаметр головешки в зависимости от влагосодержания и условий тепло- и массообмена слоя ЛГМ с внешней средой при этом равен 0,0045–0,0155 м.

3. В большинстве случаев головешка будет падать плашмя на слой ЛГМ, а не втыкаться в него вертикально. Если же горячий источник лежит на слое опада, то поверхность, через которую передается тепло в слой ЛГМ, уменьшится, а тепловые потери от головешки во внешнюю среду увеличатся. Поэтому следует ожидать, что реальный размер головешки, способной инициировать низовой лесной пожар будет несколько больше расчетного.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин А. Н. Исследование критических условий возникновения низового пожара // Сопряженные задачи физической механики и экологии: Тез. докл. Междунар. науч. конф. Томск: Изд-во ТГУ, 1994. С. 149–150.
2. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
3. Джалаурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. М: Мир, 1983.
4. Субботин А. Н. Влияние внешних условий и разрывов на распространение пожара по слою хвои // Сопряженные задачи физической механики и экологии: Тез. докл. Междунар. науч. конф. Томск: Изд-во ТГУ, 1994. С. 150–151.
5. Гришин А. М., Зятнин В. И., Перминов В. А. Экспериментальное исследование перехода низового лесного пожара в верховой. М., 1991. Деп. в ВИНТИ 6.03.91, № 982–В91.
6. Гришин А. М. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений. Томск: Изд-во ТГУ, 1973.
7. Гришин А. М., Берцун В. Н., Зинченко В. И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
8. Теплотехнический справочник: В 2-х т. / Под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. М.: Энергия, 1976. Т. 2.
9. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
10. Гришин А. М., Перминов В. А. Математическое моделирование зажигания полога леса от Тунгусского метеорита с учетом двухтемпературности среды // Сиб. физ.-техн. журн. 1992. Вып. 6. С. 107–111.
11. Щетинков Е. С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
12. Гришин А. М., Сеницын С. П., Акимова И. В. Сравнительный анализ термохимических постоянных сушки и пиролиза лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 17–23.

*Поступила в редакцию 25/III 1996 г.*

---