

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ АДАПТАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЕРШИННЫХ ВЕРХОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Adapted by authors mathematical model of running crown forest fire propagation is considered. Simplifying assumptions, equations of the model, initial and boundary conditions, finite difference approximations are introduced. Refinement of the formula describing the mass rate of burning of gaseous products of combustible forest materials pyrolysis is proposed. According to the numerical experiment results it is concluded that two scenarios of running crown forest fires propagation exist, their characteristics are described.

Лесные пожары подразделяются на низовые, повальные верховые, вершинные верховые, подземные (пожары на торфяниках) и массовые. Ряд исследователей отмечают, что наибольшей скоростью распространения обладают вершинные верховые лесные пожары. Они наиболее опасны в экологическом отношении, и поэтому их математическое моделирование представляется актуальным вопросом.

При описании геометрии распространения лесных пожаров обычно выделяют в горизонтальном направлении: участок выжженной площади, зону горения, невыжженную площадь; в вертикальном разрезе: нижний ярус леса, полог леса, факел, приземный пограничный слой [1–4]. При горении лесных горючих материалов (ЛГМ) определяющими среди физико-химических процессов являются следующие: прогрев, сушка, пиролиз ЛГМ, окисление газообразных, конденсированных и дисперсных продуктов пиролиза, выветривание частиц сажи из коксика (конденсированного продукта пиролиза), выветривание частиц пепла и образование дыма. Общая схема изменения агрегатного состояния и химического состава в зоне лесного пожара описана, например, в [1, 3]: «подвод» теплоты в результате конвекции, теплопроводности и излучения обуславливает изменение состояния и состава ЛГМ. При горении образуются и присутствуют в газодисперсном состоянии монооксид углерода (СО), водород (Н₂), метан (СН₄), углекислый газ (СО₂), водяной пар (Н₂О), частицы сажи (С). В твердой фазе при образовании коксика, который включает в себя углерод (С) и минеральную часть ЛГМ, имеет место образование пепла в результате окисления коксика и частиц дыма в газодисперсной фазе, а также частиц сажи в результате пиролиза и выветривания.

Уравнения математической модели распространения вершинного верхового пожара. Рассмотрим задачу о распространении вершинного верхового пожара. Так называют пожар, при котором ЛГМ сгорают только в пологе леса. Предположим, что известны скорость ветра и температура окружающей среды, геометрические, структурные и реакционные свойства полога леса, температура и размеры очага воспламенения. Обычно делают следующие допущения: среда считается пятифазной, включающей в себя сухое органическое вещество, воду в жидкокапельном состоянии, коксик, золу и газовую фазу; газовая фаза состоит из кислорода, горючих компонентов продуктов пиролиза, инертных компонентов воздуха, а также водяного пара и инертных продуктов горения; градиент температуры поперек полога леса мал по сравнению с градиентом температуры в продольном направлении; влияние силы Кориолиса и центробежной силы на течение среды мало по сравнению с действием силы тяжести [1]. В настоящей работе изучается модель распространения верховых пожаров при следующих дополнительных предположениях: давление считается постоянным; скорость ветра в пологе леса для однонаправленного течения, которое реализуется при распространении вершинного верхового лесного пожара, в основном зависит от параметров структуры лесного фитоценоза и относительно слабо зависит от координаты x и характеристик самого фронта лесного пожара, она принимается равной так называемой равновесной скорости u_∞ , вычисляемой по формуле (4.2.7) [1]; разности тепловых (и диффузионных) потоков на верхней и нижней границах полога леса аппроксимируются по формулам Ньютона [1, 5]; приток тепла в полог леса вследствие излучения от факела пламени пренебрежимо мал. Тогда однотемпературная математическая модель вершинного верхового пожара может быть записана в виде следующей системы дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T), \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T), \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0;$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + u \frac{\partial c_v}{\partial x} - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial}{\partial x} (\rho_s D_T \frac{\partial c_v}{\partial x}) = \Phi_{c_v}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad v = 1, 2;$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{(\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{pj})} (\rho_5 c_{p5} u \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x})) = \Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T); \quad (1)$$

$$\Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T) = -\frac{R_1}{\rho_1}, \quad \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T) = -\frac{R_2}{\rho_2}, \quad \Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{\alpha_c R_1}{\rho_3} - \frac{M_C R_3}{M_1 \rho_3};$$

$$\Phi_{c_i}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{1}{\rho_5} \left(R_{5i} - c_i Q - \frac{\alpha}{c_{p5} \Delta h} (c_i - c_{i\infty}) \right), \quad i = 1, 2;$$

$$\Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) = (q_5 R_5 - q_2 R_2 + q_3 R_3 - \frac{\alpha}{\Delta h} (T - T_\infty) - 4\kappa_R \sigma T^4) / (\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{pj}).$$

Здесь: t – время, x – координата в системе, связанной с серединой первоначального очага пожара (ось x направлена в сторону невозмущенной скорости ветра, параллельной горизонтальной подстилающей поверхности); u – проекция скорости ветра на подстилающую поверхность; T, K – температура, T_∞, K – невозмущенная температура окружающей среды; $\varphi_j, j = 1, 2, 3, 4$, – объемные доли многофазной реагирующей среды, где φ_1 соответствует сухому органическому веществу лесных горючих материалов, φ_2 – связанной с ЛГМ воде в жидкокапельном состоянии, φ_3 – коксика, φ_4 – минеральной части ЛГМ (золе); $\rho_j, j = 1, 2, 3, 4$, – истинные плотности j -й фазы; ρ_5 – плотность газовой фазы (смеси газов), ρ_∞ – невозмущенная плотность смеси газов (плотность воздуха); $c_v, v = 1, 2, 3$, – массовые концентрации компонентов газовой фазы, где c_1 соответствует кислороду, c_2 – горючим газам (горючим компонентам продуктов пиролиза), c_3 – смеси остальных газов (инертных компонентов воздуха, водяного пара, инертных продуктов реакций пиролиза, горения коксика и окисления горючих газов); $c_{1\infty}$ и $c_{2\infty}$ – массовые концентрации кислорода и горючих газов в невозмущенной атмосфере; $M_v, v = 1, 2, 3$, – молекулярные массы компонентов газовой фазы; M_C – молекулярная масса углерода, M_∞ – молекулярная масса (невозмущенная) воздуха; R_1, R_2, R_3 – массовые скорости реакции пиролиза (разложения под действием высокой температуры с выделением горючих газов) сухого органического вещества ЛГМ, испарения воды из ЛГМ (сушки ЛГМ), горения коксового остатка; R_{51}, R_{52}, Q – массовые скорости образования кислорода, горючих газов, газовой фазы; R_5 – массовая скорость реакции горения (окисления) горючих газов; $c_{pj}, j = 1, 2, 3, 4$, – теплоемкости j -й фазы; c_{p5} – теплоемкость газовой фазы; q_2, q_3 и q_5 – тепловые эффекты процессов испарения, горения конденсированного горючего и газообразного горючего продукта пиролиза соответственно; коэффициенты турбулентной теплопроводности λ_T и диффузии D_T считаются постоянными; Δh – высота крон деревьев ($\Delta h = h_3 - h_2$, где h_3 и h_2 – высоты верхней и нижней границ полога леса соответственно); α – коэффициент теплообмена между приземным слоем атмосферы и пологом леса; α_c – коксовое число ЛГМ; κ_R – интегральный коэффициент поглощения; σ – постоянная Стефана – Больцмана,

$$\sum_{v=1}^3 c_v = 1, \quad \rho_5 = \frac{\rho_\infty T_\infty}{M_\infty T} \left(\sum_{v=1}^3 \frac{c_v}{M_v} \right)^{-1}, \quad Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_C}{M_1} R_3.$$

Уравнения модели (1) записаны в виде, который упрощает понимание применяемых разностных аппроксимаций; видно, где и какие нелинейности имеют место; именно в такой математической нотации алгоритм реализован в программе, составленной в компьютерной технической системе **Mathematica**.

Начальные и граничные условия задаются следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} T|_{t=0} &= T_0(x), \quad T(\pm\infty) = T_\infty; \\ c_1|_{t=0} &= c_{10}(x), \quad c_1(\pm\infty) = c_{1\infty}; \quad c_2|_{t=0} = c_{20}(x), \quad c_2(\pm\infty) = c_{2\infty}; \\ c_3|_{t=0} &= 1 - c_{10}(x) - c_{20}(x), \quad c_3(\pm\infty) = 1 - c_{1\infty} - c_{2\infty}; \\ \varphi_j|_{t=0} &= \varphi_{j0}(x), \quad \varphi_j(-\infty) = \varphi_{jK}, \quad \varphi_j(+\infty) = \varphi_{jH}, \quad j = 1, 2, 3; \quad \varphi_4|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Соображения о характере протекания реакций, фазовых переходов, физико-химических превращений в неохваченной процессами пожара части леса диктуют необходимость добавления условий [1]: $R_1 = 0, R_2 = 0, R_3 = 0, R_5 = 0$ при $T_\infty \leq T \leq T^*$, где T^* – задаваемое значение температуры.

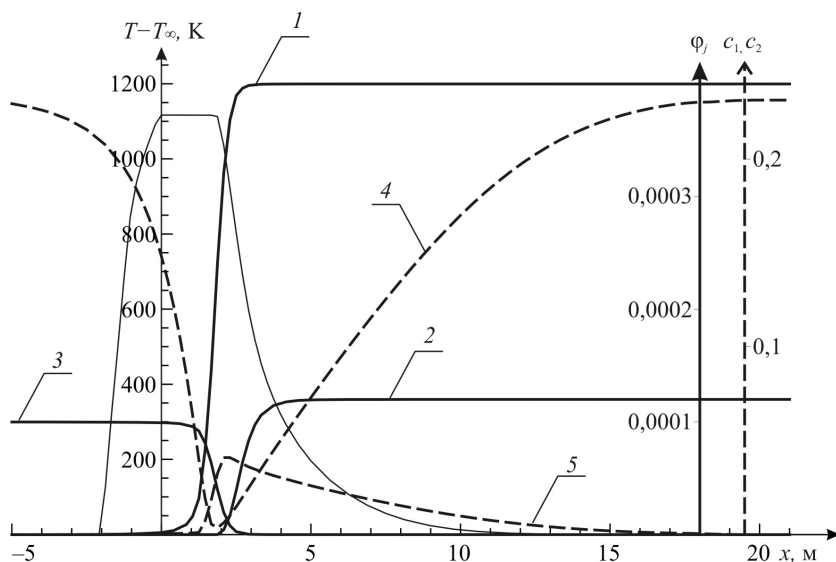


Рис. 1. Начальные распределения объемных долей многофазной среды и концентраций компонентов газовой фазы. Температура показана сплошной тонкой линией; 1, 2, 3 – соответствуют сухому органическому веществу ЛГМ, связанной с ЛГМ воде в жидкокапельном состоянии, коксик; 4, 5 – концентрация кислорода, монооксида углерода

Иначе говоря, учитываемые в модели процессы не происходят, пока не произошел прогрев до определенного уровня. Для конкретного моделируемого лесного массива нужно уточнять истинную плотность сухого органического вещества ρ_1 , определять значения плотности ρ_0 типичного слоя ЛГМ и его влагосодержания $W = (m - m_1) / m_1$, где m и m_1 – массы ЛГМ в естественном и абсолютно сухом состояниях. Значения начальных объемных долей вычисляются по формулам $\varphi_{1H} = \rho_0 / \rho_1$, $\varphi_{3H} = 0$, так как коксик на невыжженном участке еще не образовался, $\varphi_{2H} = (1 - \zeta) W \rho_0 / \rho_2$, ζ – зольность лесных горючих материалов; согласно справочным таблицам [1] значения зольности

колеблются в пределах $0,001 < \zeta < 0,01$. Ряд авторов отмечают, что влияние учета зольности на моделируемые процессы мало, поэтому примем $\varphi_4 = 0$. В предположении, что на выжженном участке ЛГМ полностью сгорели, соотношения для конечных объемных долей можно описать формулами $\varphi_{1K} = 0$, $\varphi_{2K} = 0$, $\varphi_{3K} = \alpha_c \varphi_{1H} \rho_1 / \rho_3$.

Принятый в выполняемых расчетах вид начальных распределений $T_0(x)$, $c_{10}(x)$, $c_{20}(x)$, $\varphi_{10}(x)$, $\varphi_{20}(x)$, $\varphi_{30}(x)$ представлен на рис. 1. Обоснованием таких распределений температуры, объемных долей и концентраций компонентов являются приведенные в [1] результаты наблюдений распространения верховых лесных пожаров в физических экспериментах, а также результаты расчетов по «самоогласованной математической модели». Сформулированные начальные условия соответствуют характеристикам лесных пожаров в случаях, когда возгорание произошло в очаге конечного размера.

Об уточнении математической модели. Для замыкания системы уравнений необходимо записать конкретные зависимости, описывающие скорости пиролиза, сушки ЛГМ, догорания коксика и химических реакций в газовой фазе. Примем [1, 2]:

$$R_1 = k_{01} \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_2 = k_{02} T^{-1/2} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad R_3 = k_{03} s_\sigma \varphi_3 \rho_3 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right);$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2}, \quad R_{52} = (1 - \alpha_c) \nu_\Gamma R_1 - R_5, \quad (3)$$

где k_{01} , k_{02} , k_{03} – предэкспоненты химических реакций [6], E_1 , E_2 , E_3 – энергии активации химических реакций, R – универсальная газовая постоянная, s_σ – удельная поверхность конденсированного продукта пиролиза (коксика), ν_Γ – доля газообразных горючих продуктов пиролиза ЛГМ. Важной компонентой математической модели является выражение скорости горения газообразных продуктов пиролиза ЛГМ R_5 . В научной литературе по этому вопросу нет единого мнения. Часто указывают [1, 2, 6], что в качестве определяющей можно рассматривать только реакцию $CO + 1/2 \cdot O_2 = CO_2 + 68$ ккал/моль, так как именно она вносит наибольший вклад в энергетику лесного пожара. Для описания скорости упомянутой реакции в [1] предлагаются два выражения, заимствованные из различных источников. Они принципиально различаются. Возможность практического использования каждого из них вызывает сомнения, более того, анализ формулы (5.4.19) [1] указывает на несоответствие размерностей в соотношениях, описывающих одну и ту же реакцию при различных концентрациях кислорода.

Адаптированная и применяемая далее математическая модель состоит из приведенных ранее уравнений (1), (3), начальных и граничных условий (2), а также зависимости для R_5 . Если кислород содержится в недостатке, в частности для полного выгорания всего монооксида углерода, описание

реакции R_5 предложенными в [2, 7] формулами дает физически некорректный результат – при любых, в том числе и очень малых, значениях c_1 скорость горения горючих газов и уничтожения кислорода может быть нереально высокой. Анализ определяющих функций и получаемых решений дает основание использовать уточнение описания процесса горения монооксида углерода принятием принципа «избытка-недостатка»:

$$R_5 = \rho_5 \min(c_2, \frac{M_2}{2M_1} c_1) k_{CO} \exp(-\frac{E_{CO}}{RT}). \tag{4}$$

Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что использование (4) не допускает уменьшения концентрации кислорода ниже нулевого уровня, адекватно воспроизводятся условия установившегося режима распространения вершинного пожара по скорости ветра, запасу ЛГМ и его влагосодержанию.

Разностные аппроксимации уравнений модели. Сформулированная краевая задача решается численно с использованием явных разностных аппроксимаций:

$$\begin{aligned} \varphi_{1i}^{n+1} &= \varphi_{1i}^n \frac{2 - z_{1i}^n}{2 + z_{1i}^n}, \quad z_{1i}^n = \Delta t \cdot k_{01} \exp(-E_1/RT_i^n); \\ \varphi_{2i}^{n+1} &= \varphi_{2i}^n \frac{2 - z_{2i}^n}{2 + z_{2i}^n}, \quad z_{2i}^n = \Delta t \cdot k_{02} (T_i^n)^{-1/2} \exp(-E_2/RT_i^n); \\ \varphi_{3i}^{n+1} &= \varphi_{3i}^n \frac{2 - z_{3i}^n}{2 + z_{3i}^n} + (\varphi_{1i}^{n+1} + \varphi_{1i}^n) \frac{\rho_1}{\rho_3} \frac{\alpha_c z_{1i}^n}{2 + z_{3i}^n}, \quad z_{3i}^n = \Delta t \cdot \frac{M_c}{M_1 \rho_3} \rho_{5i}^n k_{03} s_\sigma c_{1i}^n \exp(-E_3/RT_i^n); \\ \rho_{5i}^n &= \rho_{5i}^n(c_{1i}^n, c_{2i}^n, T_i^n) = \frac{\rho_\infty T_\infty}{M_\infty T_i^n} \left(\frac{c_{1i}^n}{M_1} + \frac{c_{2i}^n}{M_2} + \frac{1 - c_{1i}^n - c_{2i}^n}{M_3} \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Для концентраций и температуры уравнения записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} c_{vi}^{n+1} &= c_{vi}^n + \Delta t \left[-u \frac{c_{vi+1/2}^n - c_{vi-1/2}^n}{\Delta x} + \frac{D_T}{\rho_{5i}^n (\Delta x)^2} (\rho_{5i+1/2}^n (c_{vi+1}^n - c_{vi}^n) - \right. \\ &\quad \left. - \rho_{5i-1/2}^n (c_{vi}^n - c_{vi-1}^n)) + \Phi_{cv}(\varphi_{1i}^n, \varphi_{2i}^n, \varphi_{3i}^n, c_{1i}^n, c_{2i}^n, T_i^n) \right], \quad v = 1, 2; \\ T_i^{n+1} &= T_i^n + \Delta t \left(-\frac{1}{(\rho_{5i}^n c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_{ji}^n c_{pj})} (\rho_{5i}^n c_{p5} u \frac{T_{i+1/2}^n - T_{i-1/2}^n}{\Delta x} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\lambda_T}{(\Delta x)^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n)) + \Phi_T(\varphi_{1i}^n, \varphi_{2i}^n, \varphi_{3i}^n, c_{1i}^n, c_{2i}^n, T_i^n) \right). \end{aligned}$$

В приведенных уравнениях значения в полуцелых узлах $i+1/2, i-1/2$ рассчитываются по формулам двухточечная/угловая с ориентацией по потоку [8, 9]. Для обоснования и оптимизации применяемого приближенного метода решения записанной краевой задачи проведены методические расчеты, изучено влияние на точность параметров сетки, методов квазилинеаризации коэффициентов уравнений и свободных членов. Применение упомянутой двухточечной схемы вызвано необходимостью повышения точности рассчитываемых решений вблизи фронтов. Сопоставление численных решений, полученных при аппроксимации формулами центральной, угловой и двухточечной разностей, показало, что, как и в задачах физико-химической подземной гидродинамики, при расчете уравнений модели лесного пожара схема в версии [9] оказывается предпочтительной.

Методическое обоснование описанного алгоритма включало воспроизведение численных решений, полученных итерационно-интерполяционным методом [10] и приведенных в [1, с. 250–251]. Выполнялся также «внутренний» контроль: были получены и сопоставлялись решения с разными временным и пространственным шагами.

Применение явных аппроксимаций накладывает достаточно жесткие ограничения на временной шаг [9, 11]. Контроль «болтанки» и других проявлений неустойчивости, отсутствия сходимости («сильная» нелинейность правых частей в уравнениях для температуры и концентрации кислорода) проводился путем анализа графиков решений. Примененная технология вычислительного эксперимента с использованием разработанных средств наполнения и работы с базой знаний [12] значительно упростила такой контроль.

Режимы распространения вершинного верхового пожара и условия его затухания. Из анализа результатов вычислительных экспериментов по компьютерной реализации модели (1) – (4) следует, что возможны два различных режима протекания (сценария развития) вершинного лесного пожара: затухание и устойчивое распространение [12].

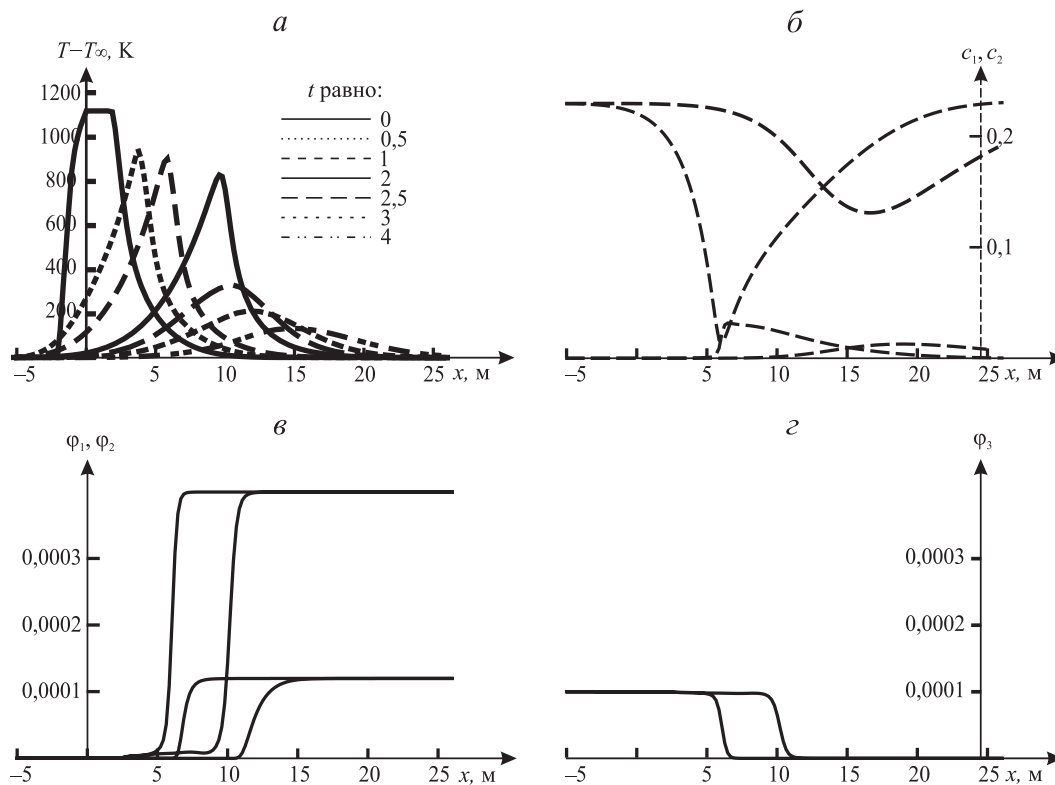


Рис. 2. Характеристики распространения лесного пожара в режиме затухания: а – динамика снижения температуры, решения даны в моменты времени $t = 0; 0,5; 1; 2; 2,5; 3$ и 4 с. В моменты времени $t = 1$ и 3 с показаны рассчитанные типичные профили характеристик затухающего пожара: б – кислорода и монооксида углерода, в – сухого органического вещества и воды в жидкокапельном состоянии, z – коксика

При первом сценарии происходит затухание пожара (рис. 2), распределения массовых концентраций компонентов газовой фазы c_1 и c_2 , температуры T со временем приближаются к соответствующим невозмущенным значениям $c_{1\infty}$, $c_{2\infty}$ и T_{∞} . От очага горения пожар распространяется на некоторое расстояние по направлению ветра; максимальная температура из-за тепловых потерь уменьшается; после достижения критического значения горение прекращается; области пониженной концентрации кислорода и ненулевой концентрации горючих компонентов пиролиза «отрываются» от остановившихся фронтов пиролиза и сушки ЛГМ; эти области расширяются в направлении потока, значения концентраций под действием конвекции постепенно приближаются к соответствующим значениям в невозмущенной атмосфере.

При другом возможном сценарии процесс горения распространяется по направлению потока без затухания. Решения имеют характерные участки поведения, соответствующие изложенным соображениям о геометрии пожара – по направлению ветра прослеживается наличие следующих зон: выжженная, горения, невыжженная. Детализируя, в зоне горения можно выделить участок интенсивного возрастания температуры; относительно узкую зону, где температура максимальна; участок интенсивного снижения температуры, образовавшийся в связи с затратами тепла на прогрев и сушку ЛГМ. Слева от зоны максимума температуры имеем коксик, справа – ЛГМ. На участке возрастания температуры догорает коксик, уже пиролизовались высушенные ЛГМ, сгорели выделившиеся газы. В окрестности максимального значения температуры вследствие пиролиза интенсивно повышается концентрация горючих компонентов продуктов пиролиза c_2 (на этом же участке заметно уменьшается объемная доля ЛГМ), концентрация кислорода c_1 вследствие окисления горючих продуктов пиролиза падает почти до нуля, кислорода недостаточно для полного сгорания монооксида углерода (CO). Далее на участке снижения температуры концентрация c_2 относительно медленно понижается до начального уровня. Профили решений (температура T , объемные доли реагирующей среды ϕ_i ,

$j = 1, 2, 3, 4$, концентрации компонентов газовой фазы $c_v, v = 1, 2, 3$) достаточно быстро приобретают асимптотическую форму. Далее в случае равномерного распределения плотности слоя и влагосодержания ЛГМ в невыжженной области профили «переносятся» с незначительными изменениями кривизны по направлению ветра с постоянной скоростью ω_n . Решения для разных моментов времени показаны на рис. 3. Задаются: $u_\infty = 8$ м/с, $W = 66,66$ %, $\rho_0 = 0,2$ кг/м³, $\Delta h = 5$ м, $T_\infty = 300$ К, $\rho_1 = 500$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_3 = 200$ кг/м³, $\rho_4 = 200$ кг/м³, $\rho_\infty = 1,15$ кг/м³, $c_{1\infty} = 0,23$, $c_{2\infty} = 0$, $M_1 = 32$, $M_2 = 28$, $M_3 = 29$, $M_C = 12$, $M_\infty = 29$, $c_{p1} = 2000$ Дж/(кг·К), $c_{p2} = 4180$ Дж/(кг·К), $c_{p3} = 900$ Дж/(кг·К), $c_{p4} = 1000$ Дж/(кг·К), $c_{p5} = 1000$ Дж/(кг·К), $q_2 = 3 \cdot 10^6$ Дж/кг, $q_3 = 1,2 \cdot 10^7$ Дж/кг, $q_5 = 10^7$ Дж/кг, $\lambda_T = 5 \cdot 10^3$ Дж/(м·с·К), $D_T = 5$ м²/с, $\alpha = 1000$ Вт/(м²·К), $\alpha_c = 0,1$, $\nu_\Gamma = 0,8$, $\kappa_R = 0,8$ м⁻¹, $s_\sigma = 1000$ м⁻¹, $E_1/R = 9400$ К, $E_2/R = 6000$ К, $E_3/R = 10\,000$ К, $k_{01} = 3,63 \cdot 10^4$ с⁻¹, $k_{02} = 6 \cdot 10^5$ К^{0,5}с⁻¹, $k_{03} = 1000$ с⁻¹. Заметим, что аналогичные распределения получены при расчетах по «самосогласованной модели» [1]. Рассчитанные профили и скорость распространения пожара $\omega_n = 0,625u_\infty$ м/с согласуются с результатами, приведенными в [1, с. 250].

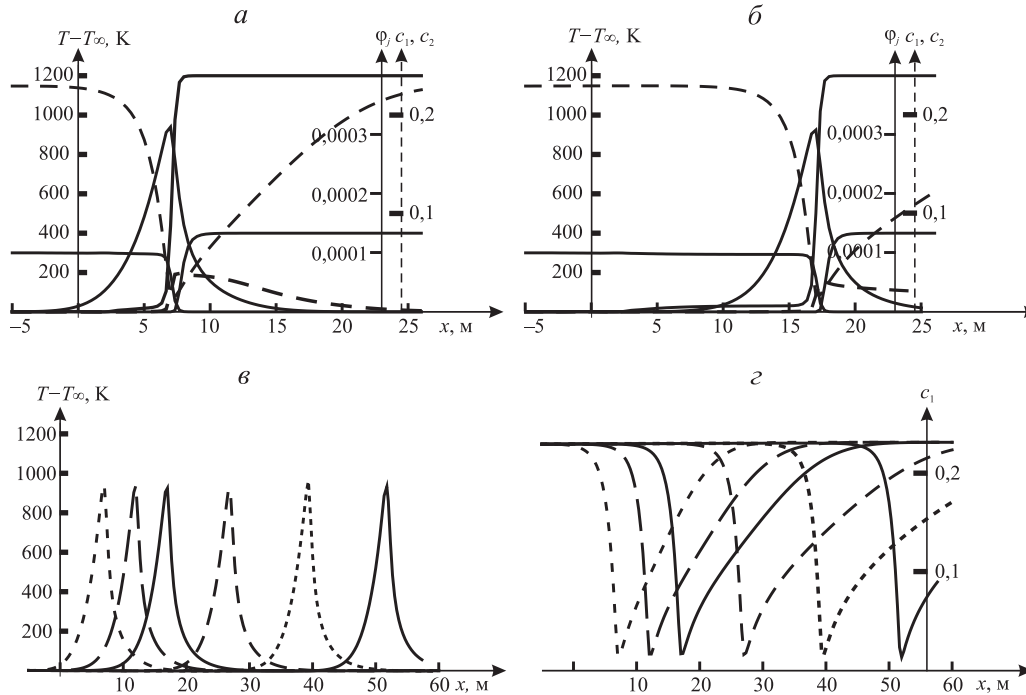


Рис. 3. Характеристики распространения лесного пожара в режиме устойчивого горения: а, б – типичные профили характеристик пожара в моменты времени $t = 1$ и 3 с; в, г – профили температуры и концентрации кислорода в моменты $t = 1; 2; 3; 5; 7,5$ и 10 с

1. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск, 1992.
2. Кулешов А. А. // Информ. технологии и вычисл. системы. 2003. № 4. С. 56.
3. Гришин А. М. // Успехи механики. 2002. № 4. С. 41.
4. Frederic Morandini, Xavier Silvani, Lucile Rossi et al. // Fire Safety Journal. 2006. № 3. Vol. 41. P. 229.
5. Померанцев В. В. Основы практической теории горения. Л., 1986.
6. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения и взрыва. М., 1980.
7. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. Томск, 1981.
8. Todd M.R., O'Dell P.M., Hirasaci G.J. // Soc. Pet. Eng. J. 1972. P. 515.
9. Таранчук В. Б., Чудов Л. А. // Современные проблемы и математические методы теории фильтрации. М., 1987. С. 184.
10. Гришин А. М., Берцун В. Н., Зинченко В. И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск, 1981.
11. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М., 1976.
12. Barovik D. V., Taranchuk V. B. // The Fifth International Workshop CASTR. 2009. Vol. Mathematical Modeling and Mathematical Physics. P. 7.

Поступила в редакцию 09.06.09.

Дмитрий Валентинович Баровик – аспирант кафедры информационного и программно-математического обеспечения автоматизированных производств. Научный руководитель – В. Б. Таранчук.

Валерий Борисович Таранчук – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационного и программно-математического обеспечения автоматизированных производств.