

УДК 531.534:536.245.022

ОБЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ

А. М. Гришин, А.Н. Голованов, А. С. Якимов

Томский государственный университет, Томск, Россия

Известно, что подземные (торфяные) пожары наносят значительный ущерб экономике различных стран мира. Однако торфяные пожары изучены мало по сравнению с обычными лесными пожарами ввиду отсутствия сведений о механизме зажигания и распространения горения вглубь слоя торфа, а также из-за недостатка надежных данных о теплофизических и термокинетических коэффициентах торфа. В работе [1] на основе результатов наблюдения за реальными торфяными пожарами в Томской области предложена общая математическая модель лесных и торфяных пожаров. В дальнейшем были опубликованы результаты экспериментальных и теоретических исследований торфяных пожаров [2] и на базе [1, 2] в ТГУ был выполнен цикл работ по математическому и физическому моделированию торфяных пожаров [3–8], которые подтвердили физические основы математической модели [1]. В [6] предложена уточненная математическая модель торфяных пожаров второго поколения, в рамках которой учитываются двухтемпературность пористой среды, частицы пепла, сажи, дыма, свободной воды и влияние многокомпонентности газовой фазы.

В данной работе на основе модели [6], с учетом экспериментальных данных [7, 8], исследуется возникновение подземного пожара, когда торфяной слой поджигается сверху, а фронт горения распространяется вглубь пласта при различных внешних условиях и влагосодержании торфа.

Постановка задачи. Будем считать, что пожар на торфянике возникает в результате зажигания от наземного очага горения, действие которого на слой торфа моделируется заданием температуры очага T_e и коэффициентов тепло- и массообмена α_e и β_e . Снизу под пласт пористой среды закачивается слой воды или исследуется тление торфа на болоте. Рассматривается двухтемпературная, одномерная, нестационарная задача, ось z направлена вертикально вниз, а начало координат выбирается на границе раздела слой торфа – атмосфера. Согласно [6], предполагаем, что в самом слое торфа имеют место испарение связанной воды (в отличие от [3–5] процесс испарения воды считается равновесным), экзотермическая реакция горения коксика, а также гомогенные реакции пиролиза торфа и горение оксида углерода. Торф в процессе зажигания считался многофазной средой, состоящей из сухого органического вещества, гигроскопической воды, прочно связанной с этим органическим веществом [6], продукта пиролиза органического вещества – коксика, а также конденсированного и газообразного продуктов горения. Принималось, что газовая фаза в слое торфа состоит из шести компонент: CO , H_2O , O_2 ,

CO_2 , CH_4 и N_2 . Влияние тепловыделения от горения компонента водорода невелико в силу незначительной начальной концентрации его и низких температур, которые имели место в процессе тления проницаемого слоя торфа. Рассматривался слой торфа, у которого начальная объемная доля газовой фазы φ_{5H} ($0.1 < \varphi_{5H} < 0.2$) невелика по сравнению с объемными долями конденсированной фазы. Кроме того, процесс зажигания и тления торфа для упрощения анализа считались одномерными. Эта математическая модель представляет частный случай модели, предложенной в [6]. Известно, что при горении слоя торфа в результате процесса пиролиза образуется кокс [1, 6], который затем тлеет в ходе экзотермической реакции окисления. Зона пиролиза находится внутри фронта горения слоя торфа. Линейная скорость тления определялась из уравнения

$$T_1[s_*(t), t] = T_*, \quad (1)$$

где T_* – температура, достигаемая при $z = s_*(t)$, соответствующая температуре тления торфа [2, 7].

Дифференцируя по времени соотношение (1), получаем следующее выражение для линейной скорости тления кокса:

$$\omega = - \left. \frac{\partial T_1}{\partial t} \right|_{z=s_*} / \left. \frac{\partial T_1}{\partial z} \right|_{z=s_*}. \quad (2)$$

Математически сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений [6, 9]

$$\frac{\partial \rho_5 \varphi_5}{\partial t} + \frac{\partial \rho_5 \varphi_5 v}{\partial z} = Q, \quad (3)$$

$$v = - \frac{\xi}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_{is} \rho_{is} \varphi_i \frac{\partial T_1}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + v \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) + q_1 r_1 + q_2 r_2 + q_{1s} R_{1s} - q_{2s} R_{2s} + q_{3s} R_{3s} + q_{4s} R_{4s}, \quad (5)$$

$$c_{2s} \rho_{2s} \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{2s} \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$\rho_5 \rho_5 \left(\frac{\partial c_\alpha}{\partial t} + v \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) - c_\alpha Q + R_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \quad (7)$$

$$\rho_{1s} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_{2s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad (8)$$

$$\rho_{3s} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - R_{3s} - \alpha_4 R_{3s}, \quad \rho_{4s} \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s}, \quad (9)$$

$$\sum_{\alpha=1}^N c_\alpha = 1, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i, \quad P = \frac{\rho_5 RT}{M}, \quad M^{-1} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{c_\alpha}{M_\alpha}.$$

Для решения системы уравнений (3)–(9) необходимы следующие начальные и граничные условия:

$$T_i|_{t=0} = T_n, i = 1, 2, c_\alpha|_{t=0} = c_{\alpha n}, \alpha = 1, 2, \dots, N-1,$$

$$\rho_5|_{t=0} = \rho_{5n}, \varphi_i|_{t=0} = \varphi_{in}, i = 1, \dots, 4. \quad (10)$$

$$\alpha_e (T_e - T_1) = \lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0}, \lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=H_1-0} = \lambda_{2s} \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=H_1+0} - \frac{q_{2s} R_{2s}}{s_2},$$

$$T_1|_{z=H_1-0} = T_2|_{z=H_1+0}, T_2|_{z=H_2} = T_n. \quad (11)$$

Используя аналогию процессов тепло- и массообмена [10] ($\beta_e = \alpha_e / c_{p5}$), имеем граничные условия

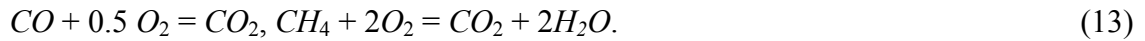
$$\beta_e (c_{\alpha e} - c_\alpha|_{z=0}) = \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=0}, P|_{z=0} = P_e,$$

$$\frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = 0, \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = 0. \quad (12)$$

Здесь и ниже A_s – коэффициент аккомодации; c – массовая концентрация компонент; c_p – коэффициент теплоемкости; D – коэффициент диффузии; d_p – диаметр цилиндрических пор; $E_i, i = 1, 2$ – энергия активации гомогенных реакций окисления; H_1, H_2 – толщина проницаемого слоя торфа и воды; k – постоянная Больцмана; $k_i, i = 1, 2$ – предэкспоненциальные множители реакций окисления; M – молекулярный вес; P – давление газа в порах; $q_i, i = 1, 2$ – тепловые эффекты реакций окисления; $q_{is}, i = \overline{1, 4}$ – тепловой эффект; R – универсальная газовая постоянная; r_1 и r_2 – молярно-объемные скорости окисления оксида углерода и метана; R_{1s} – массовая скорость разложения сухого реагента (торфа); R_{2s} – массовая скорость испарения связанной воды в торфе; R_{3s} – массовая скорость образования коксика; $R_i, i = \overline{1, 4}$ – массовая скорость образования и исчезновения компонент газовой фазы в уравнении диффузии); $s_*(t)$ – граница раздела газообразной и конденсированной фаз; s_2 – удельная поверхность испарения воды; s_3 – удельная поверхность реагирования углерода; t – время; $t_{*(k)}$ и $t_{*(k-1)}$ – время достижения температуры тления T_* при $z = z_{(k)}$ и $z = z_{(k-1)}$, $(k-1)$ – предыдущий слой по z ; T_1 – температура торфа; T_2 – температура воды под слоем торфа; v – скорость газообразных продуктов реакции разложения торфа; $x_j = c_j M/M_j, j = 1, \dots, 5$ – молярная концентрация; $y_i = \rho c_i / M, i = 1, 2$ – молярно-объемная концентрация; z – пространственная координата; α_e – коэффициент теплоотдачи; α_c – доля кокса в ходе реакции пиролиза торфа; $\alpha_4 = v_4 M_{4s} / (v_3 M_{3s})$ – приведенный стехиометрический коэффициент [10]; β_e – коэффициент массообмена; $\varepsilon_{j,\alpha}$ – потенциальная энергия взаимодействия молекул; $\mu = \mu_n$

$(T/T_n)^{0.5}$ – коэффициент динамической вязкости смеси газов; $\eta_i, i = \overline{1, 4}$ – безразмерные параметры; λ – коэффициент теплопроводности; $\sigma_{i,j}$ – сечения взаимодействия молекул; $\xi = \xi_* \varphi_5^3 / (1 - \varphi_5)^2$ – функция, описывающая влияние объемной доли газа на сопротивление; $\xi_* = d_p^2 / 120$ – характерная проницаемость; ρ – плотность; ρ_5 – плотность газовой фазы; φ – безразмерная объемная доля; ω – линейная скорость тления торфа; индексы: s – конденсированная фаза; e – внешняя среда; * – характерная величина; c – кокс; n – начальное значение; 1, ..., 6 – в газовой фазе соответствуют оксиду углерода, парам воды, кислороду, диоксиду углерода, метану, азоту; 1s, ..., 4s – в конденсированной фазе – торф, связанная вода, кокс, зола; p – пора, ан – аналитическое решение.

Сведения о химических реакциях и коэффициентах переноса. Итоговые гомогенные химические реакции в проницаемом слое торфа [11–13]



Уравнения химической кинетики имеют вид [13]

$$\frac{dy_1}{dt} = -k_1 x_1 x_3^{0.25} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) = r_1, \quad \frac{dy_2}{dt} = -k_2 x_5^{-0.5} x_3^{1.5} \frac{P}{T} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) = r_2.$$

Для испарения связанной воды в объеме конденсированной фазы торфа используется закон Герца–Кнудсена [11, 12]

$$R_{2s} = \frac{s_2 M_2 A_s \varphi_2 [k_{2s} \exp(-E_{2s} / RT) - P_2]}{(2\pi RT M_2)^{0.5}}.$$

Для нахождения парциального давления паров воды в слое торфа P_2 используется закон Дальтона [14], согласно которому $P_2/P = x_2$. Тогда для P_2 имеем выражение

$$P_2 = P c_2 \frac{M}{M_2}.$$

Эффективный коэффициент диффузии берется по формуле Фристрона–Вестенберга [10, 15]

$$D_\alpha = (1 - c_\alpha) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq \alpha}}^N \frac{x_j}{d_{\alpha,j}} \right)^{-1}, \quad d_{\alpha,j} = 2.628 \cdot 10^{-7} \frac{[(M_\alpha + M_j)/(M_\alpha M_j)]^{0.5} T^{1.67}}{P \sigma_{j,\alpha}^2 (\varepsilon_{j,\alpha} / kT)^{0.17}}.$$

Формула для коэффициентов теплопроводности компонент газовой фазы $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, N$ взята из [16]

$$\lambda_{5s} = \sum_{i=1}^N \lambda_i c_i, \quad \lambda_j = \lambda_j^0 (0.115 + 0.354 \frac{c_{p,j}}{R}), \quad \lambda_i^0 = 8.3210^{-2} \frac{\sqrt{M_i T}}{M_i \sigma_i^2 \Omega^{(2.2)}}.$$

Коэффициенты теплоемкости компонент газовой фазы $c_{pj} = a_j + b_j T + c_j' / T^2$ берутся из [17], а значения величин λ_{is} в конденсированной фазе приведены в [11]

$$c_{p5} = \sum_{j=1}^N c_{pj} c_j, \quad \lambda = \sum_{i=1}^5 \lambda_{is} \varphi_i.$$

Источники и стоки из (3), (5)–(9) имеют вид

$$\begin{aligned} R_1 &= \eta_1 R_{1s} - M_1 r_1, R_2 = \eta_2 R_{1s} - R_{2s}, + 2M_2 r_2, R_3 = -\eta_3 R_{3s} - M_3 r_1/2 - \\ &- 2M_3 r_2, R_4 = M_4 (r_1 + r_2), R_5 = \eta_4 R_{1s} - M_5 r_2, \\ R_{1s} &= k_{1s} \rho_{1s} \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_{1s}}{RT}\right), R_{3s} = \frac{M_c}{M_3} s_3 k_{3s} \varphi_5 \rho_5 \varphi_3 c_3 \exp\left(-\frac{E_{3s}}{RT}\right), \\ Q &= (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + R_{3s}, \\ \alpha_c &= \frac{M_c}{M_H - M_c}, \eta_1 = \frac{M_1}{M_H}, \eta_2 = \frac{M_2}{M_H}, \eta_3 = \frac{M_3}{M_c}, \eta_4 = \frac{M_5}{M_H}. \end{aligned}$$

Метод решения задачи и численные значения входных данных. Система уравнений (3)–(9) с краевыми условиями (10)–(12) решалась итерационно-интерполяционным методом [18] с переменным шагом по времени с заданной точностью. Программа численного решения задачи тестировалась на точном аналитическом решении по методу пробной функции [18]. Для разных шагов по пространству отклонение численного решения от точного значения на заданном промежутке времени не превышало 1%. Линейная скорость поверхности тления торфа (2) определялась по формуле

$$\omega = \frac{\Delta z}{\Delta t_*} = \frac{z_{(k)} - z_{(k-1)}}{t_{*(k)} - t_{*(k-1)}}.$$

Для теплофизических и термокинетических параметров торфа использовались данные работ [7, 8, 11, 19–21]. Теплофизические значения воды и водяного пара брались из [22]. Приведенные ниже результаты получены при $T_H = 293$ К, $T_* = 650$ К, $T_c = 800 - 1000$ К, $\omega_* = 5 \cdot 10^{-6}$ м/с, $P_H = 1.013 \cdot 10^5$ Н/м², $\mu_H = 1.81 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $\alpha_e = 0.75 - 1.5$ Вт/(м²·К), $M_1 = 28$ кг/кмоль, $M_2 = 18$ кг/кмоль, $M_3 = 32$ кг/кмоль, $M_4 = 44$ кг/кмоль, $M_5 = 16$ кг/кмоль, $M_6 = 28$ кг/кмоль, $M_c = 12$ кг/кмоль, $M_H = 130$ кг/кмоль, $H_1 = H_2 = 1$ м, $\rho_{1s} = 440 - 810$ кг/м³, $\rho_{2s} = 10^3$ кг/м³, $\rho_{3s} = 130$ кг/м³, $\rho_{4s} = 130$ кг/м³, $c_{1s} = 1.29 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $c_{2s} = 4.19 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $c_{3s} = 1.02 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $c_{4s} = 1.02 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $d_p = 10^{-6}$ м, $R = 8.314$ Дж/(моль·К), $\lambda_{1s} = 1.67$ Вт/(м·К), $\lambda_{2s} = 0.6$ Вт/(м·К), $\lambda_{3s} = 0.041$ Вт/(м·К), $\lambda_{4s} = 0.041$ Вт/(м·К), $A_s = 0.08$, $k_{1s} = 2 \cdot 10^4$ с⁻¹, $E_{1s} = 54.47$ кДж/моль, $q_{1s} = -10^3$ Дж/кг, $k_{2s} = 10^6$ кг/(с²·м), $E_{2s} = 16.76$ кДж/моль, $q_{2s} = 2.26 \cdot 10^6$ Дж/кг, $k_{3s} = 10^5$ м/с, $E_{3s} = 41.87$ кДж/моль, $q_{3s} = 10^5$ Дж/кг, $c_{1H} = 0.05$, $c_{2H} = 5 \cdot 10^{-5}$, $c_{3H} = 0.05 - 0.23$, $c_{4H} = 10^{-5}$, $c_{5H} = 0.2$, $c_{ae} = c_{aH}$, $\alpha = 1, 2, 4, 5$, $c_{3e} = 10^{-3}$, $\varphi_{1H} = 0.5 - 0.7$, $\varphi_{2H} = 0.1 - 0.4$, $\varphi_{3H} = 10^{-3}$, $\varphi_{4H} = 10^{-5}$, $s_2 = 0.08$, $s_3 = 0.05$, $\alpha_4 = 0.7$, $\eta_1 = 0.2$, $\eta_2 = 0.02$, $\eta_4 = 0.3$.

Результаты численного решения и их анализ. Сначала был исследован режим зажигания и тления слоя торфа при различных внешних условиях (зажигание от наземного очага горения). Временем возникновения торфяного пожара назовем величину $t = t_*$, при которой для $T_1 \geq T_*$ впервые скорость тления равна или превышает характерную ω_* , а температура поверхности реагента резко возрастает до $T_{1w} = 750$ К. Для определенности полагаем, что $T_* = 650$ К и $\omega_* = 5 \cdot 10^{-6}$ м/с известны из эксперимента [2]. Если $\omega < \omega_*$, то считается, что протекает промежуточный режим, когда скорость тления на порядок больше скорости пиролиза. При $T_{1w} < T_*$ имеет место режим отсутствия тления реагента, при котором его скорость сравнима со скоростью пиролиза торфа. В дальнейшем в табл. 2 и 3 время режима тления с $\omega < \omega_*$ отмечено звездочкой, а пиролиза – прочерком соответственно.

В табл. 1 приведено время зажигания реагента при различных T_e , α_e , ρ_{1s} , φ_{1n} , φ_{2n} для $c_{3n} = 0.23$, значений плотности $\sum_{i=1}^4 \rho_{is} \varphi_{in} = 620$ кг/м³ и опорных входных данных из п. 3.

Как видно из табл. 2, с увеличением количества влаги и с уменьшением плотности торфа ρ_{1s} (ростом рыхлости образца), время зажигания увеличивается. Это связано как с превышением теплоотвода за счет испарения влаги над теплоприходом от экзотермической реакции окисления кокса, так и с наличием в порах воздуха, который снижает эффективный коэффициент теплопроводности и увеличивает время прогрева образцов. В результате при $T_e = 800$ К, $\alpha_e \leq 0.75$ Вт/(м²·К), $\varphi_{2n} = 0.3 - 0.4$, $\alpha_e \leq 1$ Вт/(м²·К) зажигание реагента не происходит, а скорости тления образцов по порядку величины сравнимы со скоростью пиролиза торфа. Это обусловлено уменьшением интенсивности воздействия внешнего очага горения и ростом теплоотвода, связанного с увеличением затрат энергии на испарение воды.

Таблица 1. Время зажигания образцов торфа (t_* , ч)

ρ_{1s} , кг/м ³	φ_{1n}	φ_{2n}	α_e , Вт/ (м ² ·К)	T_e , К		
				1000	900	800
740	0.7	0.1	1.5	4.8	7.1	12.6
			1.0	10.2	16.8	72
			0.75	20.3	48.8	230
600	0.7	0.2	1.5	8.4	14.3	42.5
			1.0	23.7	52.8	159.5
			0.75	63.1	128	317.4
540	0.6	0.3	1.5	14.7	32	101.5
			1.0	59.9	111.6	221.8
			0.75	125.7	199.8	----
440	0.5	0.4	1.5	60.3	111.5	170.6
			1.0	134	180	----
			0.75	150	496	----

В табл. 2 для $\varphi_{1n} = 0.7$, $\varphi_{2n} = 0.1$, $\rho_{1s} = 770$ кг/м³ и прочих опорных величин из базы данных приведено время зажигания и его отсутствия для разной высоты реагента, толщины пласта воды под ним и интенсивности наземного очага горения. При большой высоте реагента $H_1 = 1$ м (табл. 1), $H_1 = 0.75$ м (табл. 2) и толщине столба воды $0.25 \leq H_2 \leq 1$

зажигание торфа имеет место, кроме варианта с незначительной интенсивностью внешнего воздействия: $T_e = 800$ К и $\alpha_e = 0.75$ Вт/(м²·К). С уменьшением толщины слоя торфа $H_1 \leq 0.5$ м для $0.25 \leq H_2 \leq 1$ происходит либо режим тления реагента со скоростью $\omega < \omega_*$, либо его отсутствие при уменьшении воздействия внешнего очага горения: или $T_e = 800$ К, или $\alpha_e = 0.75$ Вт/(м²·К), $T_e = 900$ К (см. табл. 2). Наконец, при малой толщине реагента $H_1 = 0.25$ м промежуточный режим тления торфа остается только при высокой интенсивности внешнего воздействия: $\alpha_e = 1.5$ Вт/(м²·К), $T_e = 1000$ К. Таким образом, теоретически подтвержден факт (тонкий слой торфа на болоте может не тлеть) борьбы с почвенными пожарами, основанный на изоляции очагов тления закачкой воды под слой реагента малой высоты.

Таблица 2. Время зажигания для различных режимов тления торфа (t_* , ч)

H_2 , м	H_1 , м	0.75			0.5			0.25	
	α_e , Вт/ (м ² ·К)	T_e , К			T_e , К			T_e , К	
		1000	900	800	1000	900	800	1000	900
1.0	1.5	9.9	23	121.3	15.3 *	63 *	----	268 *	----
	1.0	29.5	29.5	363	66 *	283 *	----	----	----
	0.75	31	98	----	218 *	----	----	----	----
0.75	1.5	9.9	22.7	121.6	14.4 *	55 *	----	268 *	----
	1.0	29.5	30	361	68 *	282 *	----	----	----
	0.75	31.2	98	----	218 *	----	----	----	----
0.5	1.5	9.8	22.9	121.3	14.3 *	55 *	----	262 *	----
	1.0	29.4	30	349	65.7 *	274 *	----	----	----
	0.75	30.1	98.1	----	216 *	----	----	----	----
0.25	1.5	9.8	22.8	118	14.1 *	55 *	----	229 *	----
	1.0	29.5	30	291	65 *	236 *	----	----	----
	0.75	30.2	98.2	----	194 *	----	----	----	----

На рис. 1 зависимость времени зажигания реагента от коэффициента теплообмена представлена для внешнего источника при $\varphi_{1н} = 0.7$, $\varphi_{2н} = 0.2$, $\rho_{1с} = 600$ кг/м³, $c_{3н} = 0.23$ и входных данных. Из анализа численного решения задачи следует, что с увеличением интенсивности внешнего воздействия (T_e , α_e) время зажигания сокращается. При уменьшении величины коэффициента теплообмена до $\alpha_e \leq 0.75$ Вт/(м²·К) для $800 \leq T_e \leq 900$ скорость тления не превышает скорости пиролиза торфа и зажигание образца отсутствует. Это связано как с уменьшением массообмена с внешней средой (недостаточно кислорода в порах реагента), так и с ростом теплоотвода во внешнюю среду, который становится большим и превышает теплоприход от экзотермической реакции окисления кокса. Подобный эффект отсутствия тления торфа (см. ниже) наблюдается, если начальная концентрация кислорода в порах реагента мала ($c_{3н} < 0.05$) при $T_e \leq 900$ К и $\alpha_e \leq 1.1$ Вт/(м²·К).

На рис. 2 изображены поля температур конденсированной фазы, а на рис. 3 – концентрации компонентов в проницаемой среде (торфе) по пространству для режима тления в различные моменты времени при $\varphi_{1н} = 0.7$, $\varphi_{2н} = 0.2$, $c_{3н} = 0.23$, $T_e = 900$ К, $\alpha_e = 1.1$ Вт/(м²·К) и опорных входных данных. Объемные доли компонентов пористой среды по пространству приведены на рис. 4 для исходного реагента (φ_1), связанной воды в жидко-

капельном состоянии (φ_2), кокса (φ_3), золы (φ_4). Из анализа результатов численного решения задачи следует, что с ростом температуры проницаемого фрагмента среды сначала имеет место прогрев и испарение связанной воды, при этом объемная доля связанной воды при $t > 30$ исчезает, превращаясь в концентрацию паров H_2O (см. рис. 3, а). В области высокой температуры ($T > 380$ К) начинается процесс пиролиза исходного реагента с появлением основной массы паров воды и кокса (см. на рис. 4 линии φ_3). Далее продукт пиролиза – кокс начинает выгорать (тлеть) в результате экзотермической реакции окисления вглубь фрагмента пористой среды с образованием золы (см. на рис. 4 линии 3–5 для φ_4).

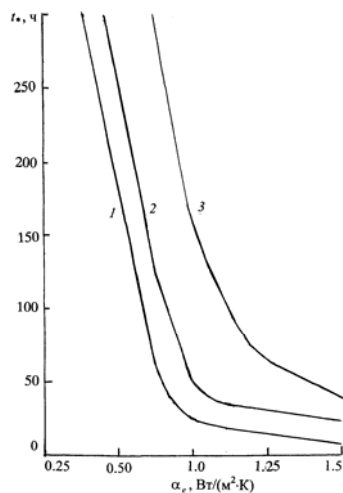


Рис.1. Зависимость времени зажигания торфа от коэффициента теплообмена для внешнего источника с температурой T_e : 1 – 700 К, 2 – 800 К, 3 – 900 К при $\varphi_{1н} = 0.7$, $\varphi_{2н} = 0.2$, $c_{3н} = 0.23$.

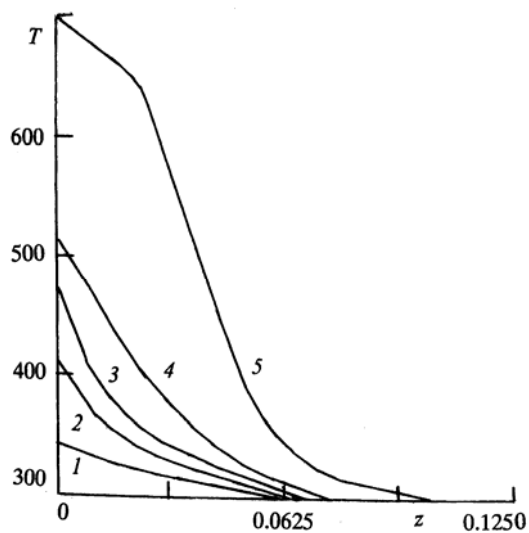


Рис. 2. Зависимость температуры от пространственной переменной в различные моменты времени: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 35, 5 – 37.5.

В то же время продукты пиролиза газообразный CO , который появляется при $T \leq 750$ К и метан практически не окисляются в ходе гомогенных реакций из (13) с образованием CO_2 и H_2O (см. на рис. 3, а линии c_4 и c_5 на рис. 3, б), т.к. концентрация последних мала или изменяется незначительно в силу низких температур реагирующей среды. Известно [13], что газофазные реакции окисления (13) интенсивно начинаются при $T > 1000$ К. Следует отметить, что за все время прогрева и тления торфа, в основном в проницаемой среде, доминирует инертный компонент азот (см. на рис. 3, б кривые c_6). С течением времени $t > 30$ ч в результате сушки, пиролиза торфа и последующего тления, связанного с уменьшением концентрации кислорода (см. на рис. 3, а линии c_3), появление газообразных продуктов: паров воды, оксида и диоксида углерода (см. на рис. 3, а кривые c_2 , c_1 , c_4 соответственно) несколько оттесняет азот в проницаемой среде в окрестности T_{1w} , а скорость тления торфа определяется скоростью поступления кислорода в очаг горения из внешней среды. При уменьшении концентрации кислорода $c_{3н}$ с 0.23 до 0.11 и 0.05 время зажигания реагента увеличивается до $t_{*1} = 37.5$, $t_{*2} = 66$, $t_{*3} = 105$, что обусловлено лимитированием процесса тления реагента содержанием окислителя в порах торфа.

Представляет интерес исследование влияния зависимости содержания начальных объемных долей исходного реагента и влаги (φ_{iH} , $i = 1, 2$) на скорость процесса тления торфа. С уменьшением объемной доли влаги с $\varphi_{2H} = 0.15$ до $\varphi_{2H} = 0.1$ для опорного значения $\varphi_{1H} = 0.7$ имеет место уменьшение времени зажигания от $t_{*1} \leq 24.4$ до $t_{*2} \leq 13.26$, что связано, в основном, с затратами тепла на испарение связанной воды в торфе. С уменьшением запаса начального значения исходного проницаемого реагента от $\varphi_{1H} = 0.7$, $\varphi_{1H} = 0.65$ до $\varphi_{1H} = 0.6$ (с ростом начальной проницаемости торфа ξ_H : 10^{-17} , $3.9 \cdot 10^{-17}$, $1.04 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$) для значения влаги $\varphi_{2H} = 0.2$ время зажигания увеличивается: $t_{*3} \leq 37.5$, $t_{*4} \leq 44$ и $t_{*5} \leq 47$, что связано с ростом пористости торфа – наличием воздуха, который снижает эффективный коэффициент теплопроводности и увеличивает время прогрева образцов. Этот результат качественно согласуется с экспериментальными данными [7].

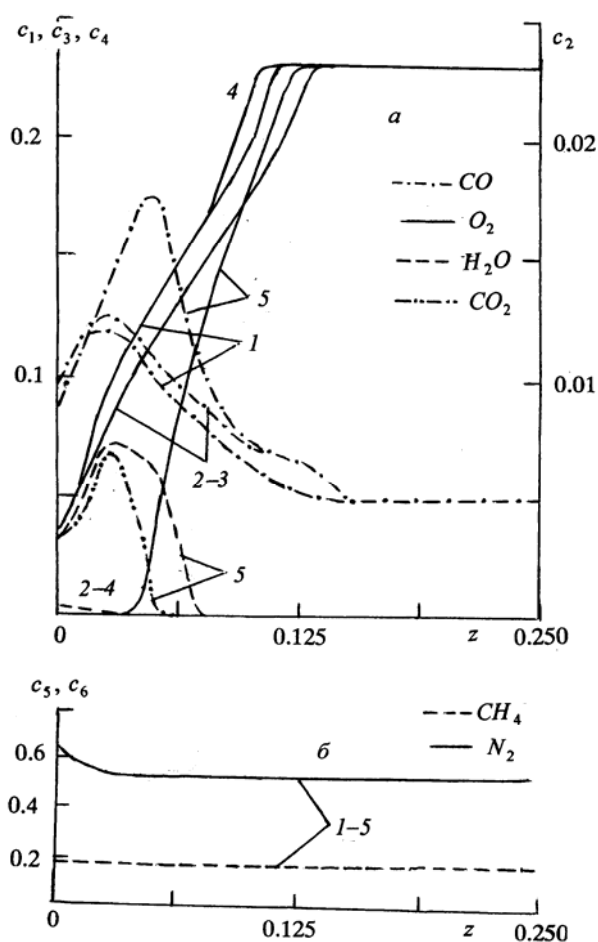


Рис. 3. Распределение концентраций компонент по глубине образца для опорных входных данных и в те же самые моменты времени, что и на рис. 2; а – сплошные кривые отвечают O_2 , штриховые – H_2O , штрихпунктирные – CO , штрихпунктирные с двумя точками – CO_2 ; б – сплошные линии – N_2 , штриховые – CH_4 .

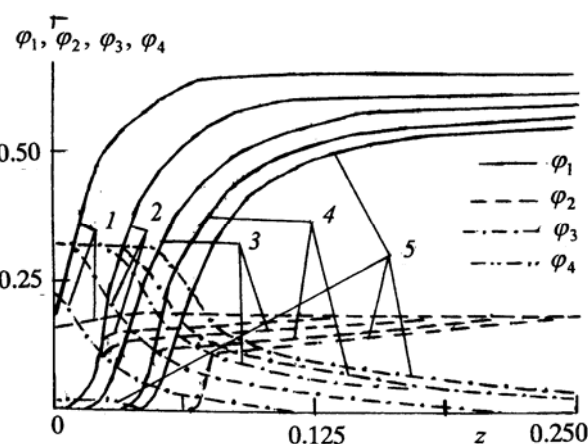


Рис. 4. Зависимости объемных долей от пространственной переменной в те же самые моменты времени, что и на рис. 2. Сплошные кривые соответствуют исходному реагенту (торфу), штриховые – связанной воде, штрихпунктирные – коксу, штрихпунктирная с двумя точками – золе.

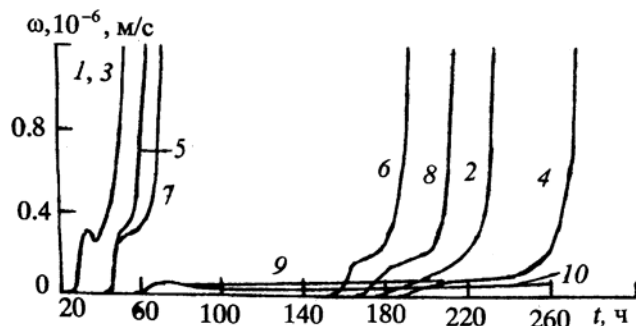


Рис. 5. Зависимость линейной скорости тления торфа от времени при $\omega < \omega_*$ и $0.25 \text{ м} \leq H_i \leq 0.5 \text{ м}$, $i = 1, 2$

На рис. 5 приведена зависимость скорости тления торфа от времени для $0.25 \text{ м} \leq H_i \leq 0.5 \text{ м}$, $i = 1, 2$ из табл. 2, соответствующая промежуточному режиму при $\omega < \omega_*$. Вариант $H_1 = 0.5 \text{ м}$, $T_e = 900 \text{ К}$, $\alpha_e = 1.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ отмечен цифрой 1 для $H_2 = 0.5 \text{ м}$ и цифрой 3 для $H_2 = 0.25 \text{ м}$. Видно, что при низкой температуре внешнего источника толщина слоя воды практически не влияет на время зажигания реагента. Кривые 2, 4 на рис. 6 отвечают $\alpha_e = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $T_e = 900 \text{ К}$, $H_1 = 0.5 \text{ м}$ и $H_2 = 0.25 \text{ м}$, 0.5 м . Оказалось, что при более низком коэффициенте теплообмена и толстом слое воды время зажигания торфа увеличивается. При $H_1 = 0.5 \text{ м}$, $\alpha_e = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ с ростом температуры внешнего источника $T_e = 1000 \text{ К}$ увеличение толщины слоя воды с $H_2 = 0.25 \text{ м}$ (кривая 5 на рис. 5) до $H_2 = 0.5 \text{ м}$ (кривая 7) приводит к росту времени зажигания торфа. Это качество сохраняется при уменьшении коэффициента теплообмена до $\alpha_e = 0.75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, где кривая 6 отвечает $H_2 = 0.25 \text{ м}$, а кривая 8 – $H_2 = 0.5 \text{ м}$. Наконец при $H_1 = 0.25 \text{ м}$, $T_e = 1000 \text{ К}$, $\alpha_e = 1.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ линия 9 на рис. 6 отвечает $H_2 = 0.25 \text{ м}$, а линия 10 – $H_2 = 0.5 \text{ м}$. Как и следовало ожидать для тонкого слоя торфа при увеличении толщины слоя воды время зажигания растёт.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Федерального Агентства по Образованию шифр гранта «П 042242» и гранта РФФИ № 05-01-00201-а.

Литература

- [1] Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1981.
- [2] Борисов А. А., Борисов Ал. А., Горелик Р. С. и др. Экспериментальное исследование и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. Институт теплофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1984. С. 5–22.
- [3] Субботин А. Н. Математическое моделирование распространения фронта пожара на торфяниках // Сб. ст. Механика реагирующих сред и ее приложения. Новосибирск. Наука, 1989. С. 57–63.
- [4] Субботин А. Н. Закономерности развития подземного пожара при разных условиях тепло- и массообмена с внешней средой // Теплообмен – ММФ - 2000. IV Минский междунар. форум, 22–26 мая 2000 г. Минск, 2000. Т. 4. С. 224–231.
- [5] Субботин А. Н. О некоторых особенностях распространения подземного пожара // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 5. С. 159–165.
- [6] Гришин А. М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 4. С. 41–89.
- [7] Гришин А. М., Голованов А. Н., Суков Я. В., Прейс Ю. И. Экспериментальное определение характеристик зажигания и горения торфа // ИФЖ. 2006. Т. 78, № 1. С. 137–142.
- [8] Гришин А. М., Голованов А. Н., Суков Я. В. Экспериментальное определение теплофизических, термокинетических и фильтрационных характеристик торфа // ИФЖ. 2006. Т. 79, № 3. С. 131–135.
- [9] Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука. ГРФМН, 1977.
- [10] Гришин А. М., Фомин В. М. Сопряжённые и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука. СО АН СССР, 1984.
- [11] Гришин А. М. Физика лесных пожаров. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1994.
- [12] Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.
- [13] Щетинков Е. С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.

- [14] Алексеев Б. В., Гришин А. М. Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высш. школ., 1985.
- [15] Campbell E. C., Fristrom R. M. Reaction Kinetics Thermodynamics and Transport in the Hydrogen Bromine System // Chemical Reviews. 1958. Vol. 38, N 2. pp. 173–234.
- [16] Основы практической теории горения / Под редакцией В. В. Померанцева. Л.: Энергия, 1973.
- [17] Мищенко К. П., Равдель А. А. Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1972.
- [18] Гришин А. М., Зинченко В. И., Ефимов К. Н., Субботин А. Н., Якимов А. С. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004.
- [19] Гамаюнов С. И., Миронов В. Л., Гамаюнов С. М. Тепломассоперенос в органических материалах. Процессы обезвоживания. Тверь. ТГТУ, 1998.
- [20] Справочник по торфу / Под редакцией А. В. Лазарева, С. С. Корчунова. М.: Недра, 1982.
- [21] Борисов А. А., Кисилёв Я. С., Удилов В. П. Кинетические характеристики низкотемпературного горения торфа // Теплофизика лесных пожаров. Институт теплофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1984. С. 23–30.
- [22] Вукалович М. П., Ривкин С. А., Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Изд. Стандартов. М., 1969.