

УДК 531.534:536.245.022

Математическое моделирование теплофизических процессов при зажигании и тлении торфа*

А.М. Гришин, А.С. Якимов

Томский государственный университет

E-mail: yakimovas@mail.ru

На основе математической модели пористой реагирующей среды дается новая постановка и численное решение задачи о зажигании слоя торфа в результате действия очага низового пожара. Установлено, что при умеренных температурах ($T_1 \leq 750$ К) тление исходного реагента определяется процессами тепло- и массообмена с очагом лесного пожара, сушки, пиролиза торфа, реакцией окисления оксида углерода, теплофизическими характеристиками и высотой торфа, а также толщиной пласта воды под слоем торфа.

Ключевые слова: теплофизика, торф, сушка, пиролиз, тление, вода.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о пиролизе торфа, по-видимому, впервые обсуждался в работе [1], где и дана величина энергии активации этой реакции $E = 35,1$ кДж/моль, а вопрос об энергетическом балансе беспламенного горения торфяных слоев лесной почвы — в работе [2].

На основе исследования горения верхних торфянистых слоев лесной почвы в работе [2] показано, что процесс распространения торфяного пожара в основном определяется горением коксика — конденсированного продукта пиролиза торфа. Согласно этой работе, углерод, содержащийся в торфе, почти полностью сгорает до CO_2 . В ней утверждается, что одна из причин беспламенного горения торфа заключается в его низкой теплопроводности, а также высказана гипотеза о том, что горение торфа при его высоком влагосодержании объясняется перемещением влаги в направлении теплового потока от фронта горения. В работе [3] с использованием термопар и газоанализатора ВТИ-2 экспериментально исследован газообмен при почвенных пожарах, и установлено, что беспламенное горение торфа происходит вблизи границы раздела слоев кокса и золы, а скорость горения определяется скоростью диффузии кислорода через слой золы в очаг горения. Через этот же слой происходит выброс газообразных и дисперсных продуктов сгорания (CO_2 , CO , частицы зол и др.) в атмосферу. Утверждается, что процесс горения торфа

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 08–01–99019).

происходит с химическим недожогом и при сгорании кокса образуются CO_2 и CO , изменение объема газовой фазы не происходит. К недостатком этой работы следует отнести игнорирование процесса пиролиза торфа и фильтрации газов при горении торфа, а также зависимости параметров состояния реагирующей среды от времени и вертикальной пространственной координаты.

Механизм сгорания торфа при почвенных (подземных пожарах) обсуждается в монографии [4]. В ней утверждается, что слой рыхлой реагирующей среды — торф, с малой степенью разложения, горит в беспламенном режиме. Отдельные частицы слоя (стебельки мха и других растений) соприкасаются друг с другом лишь в отдельных точках. При этом общая структура сохраняется и слой реагирующей среды сгорает как целый кусок, покрываясь сверху золой. Скорость распространения горения рыхлого слоя торфа, согласно [4], лимитируется скоростью распространения раскаленных точек по отдельным частицам торфа. Утверждается, что необходимо учитывать перенос теплоты конвекцией и излучением. В этой же работе на основе закона сохранения энергии предложена полуэмпирическая модель горения рыхлого торфяного слоя, основанная на использовании только одного закона природы — закона сохранения энергии. Наряду с моделью горения “рыхлого слоя” в [4] предложена модель беспламенного горения плотного слоя. В рамках этой модели учтена диффузия кислорода через слой золы и использован закон сохранения массы сгорающего материала в алгебраической форме

$$\rho U(1 - m - n) = \rho_g V s,$$

где ρ — плотность сгоревшего материала, ρ_g и V — плотность газообразных продуктов сгоревшего материала и скорость выброса этих продуктов в атмосферу, s — относительная площадь пор в слое золы, m — доля кокса, n — зольность материала, U — скорость продвижения фронта сгорания (тления). В результате в работе [4] разработаны две полуэмпирические модели горения торфа. Недостатками этих моделей являются игнорирование закона сохранения количества движения, многокомпонентности среды и многокомпонентной диффузии, отсутствие конкретных формул для скоростей химических реакций и уравнения состояния смеси газов, образующейся в торфе при его сгорании.

Математическая модель пористого реагирующего тела с учетом фильтрации и процессов тепло- и массообмена предложена в работах [5–7] в связи с исследованием термохимического разрушения тел при их входе в атмосферу с гиперзвуковой скоростью. В дальнейшем в работе [8] на основе обработки результатов наблюдения за реальными торфяными пожарами в Томской области, с использованием результатов [1–7] и методов механики сплошных реагирующих сред предложена новая общая математическая модель торфяных пожаров. При создании этой модели использованы законы сохранения массы, количества движения (с учетом фильтрации) и энергии, а также уравнение состояния для смеси реагирующих газов. Среда считалась двухтемпературной, и были учтены пиролиз торфа, многокомпонентная диффузия и фильтрация газообразных продуктов пиролиза и воздуха в порах. В справочнике [9] дана информация о свойствах торфа, которая представляет интерес для математического моделирования торфяных пожаров. В нем изложены итоги экспериментальных исследований различных свойств торфа и предложена одномерная система уравнений, описывающая одновременный перенос теплоты и воды при сушке торфа. Недостатком этой модели является игнорирование переноса влаги внутри торфа вследствие фильтрации. Кроме того, в этой системе уравнений не учитываются многофазность среды и скорость испарения. Инте-

ресные экспериментальные и теоретические результаты получены в статье [10]. К недостаткам этой работы следует отнести игнорирование многофазности реагирующей среды при горении торфа и теории фильтрации. Цикл работ [11, 12] по математическому моделированию торфяных пожаров подтвердил физические основы математической модели [8]. Кроме того, в работе [13] была сделана попытка создания базы данных для математической модели. Затем в [14] предложили уточненную математическую модель торфяных пожаров второго поколения, в рамках которой учитываются двухтемпературность пористой среды, частицы пепла, сажи, дыма, свободной воды и влияние многокомпонентности газовой фазы, а в работах [15, 16] были проведены экспериментальные исследования зажигания и горения торфа и сделана попытка уточнить базу данных для общей математической модели [14].

В настоящей работе на основе моделей [8, 14], упрощенных допущением о двумерности пористой среды, с учетом экспериментальных данных [15, 16] исследуется возникновение подземного пожара, когда слой торфа, расположенный на слое воды, поджигается сверху, а фронт горения распространяется в глубь пласта при различных внешних условиях и начальных влагосодержаниях торфа.

1. 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 . Рассматривается двумерная, осесимметричная задача в цилиндрической системе координат (рис. 1): ось z направлена вертикально вниз, начало координат по оси z выбирается на границе раздела слоя торфа и атмосферы, а по оси r — вправо от оси симметрии. Для простоты анализа предполагается, что наземный очаг имеет тороидальный вид, внутренний радиус L_1 которого составляет 10 % от правой границы области определения по r , равной L , а внешний радиус L_2 — 90 % от L . Предполагается, что торф — двухтемпературная среда, т. е. газовая фаза и конденсированная фаза (каркас) имеют разные температуры.

Считается, что под пластом пористой среды находится слой воды, который имеет температуру, отличную от температуры торфа. Делается допущение о том, что на границе раздела торфа и воды температура меньше температуры кипения воды и массообменом на границе раздела слой торфа–слой воды можно пренебречь. На основе анализа экспериментальных данных, представленных в работах [1–4, 10, 15, 16], и теоретических исследований [8, 11–14] можно считать, что в результате зажигания торфа образуется фронт горения, который состоит из зон прогрева, сушки и пиролиза торфа, а также зон горения газообразных и конденсированных продуктов пиролиза с последующим образованием слоя пепла. Иными словами, математическая модель зажигания и горения торфа в данной работе строится на основе физической

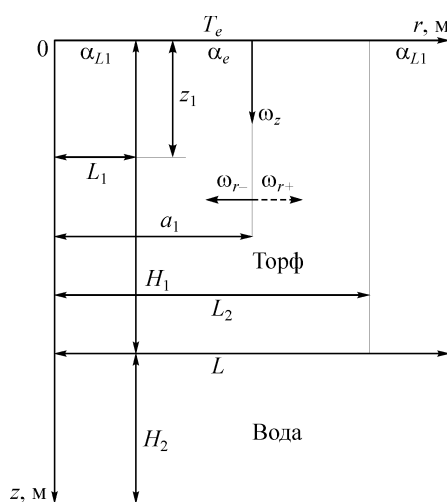


Рис. 1. Система координат и направления процесса тления торфа.

модели, полученной в [8, 14] в результате анализа экспериментальных данных, представленных выше в работах [1–4, 9, 10, 13, 15, 16].

Согласно исследованиям [8, 14], предполагаем, что в самом слое торфа имеют место испарение связанной воды, 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 с объемной долей φ_1 , гигроскопической воды с объемной долей φ_2 , связанной с этим органическим веществом [8], продукта пиролиза органического вещества — коксика с объемной долей φ_3 , а также конденсированного и газообразного продуктов горения (объемные доли φ_4 и φ_5). Принималось, что газовая фаза в слое торфа состоит из шести компонентов: CO, H₂O, O₂, CO₂, CH₄, N₂, массовые концентрации которых c_α , где $\alpha = \overline{1-6}$ соответственно. Влияние тепловыделения от горения компонента водорода H₂ невелико в силу незначительной начальной концентрации его и относительно низких температур, которые имели место в процессе тления проницаемого слоя торфа. Поэтому концентрация H₂ не учитывалась. Рассматривался такой 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. Эта математическая модель представляет частный случай модели, предложенной в [14]. Известно, что при горении слоя торфа в результате процесса пиролиза образуется кокс [8, 14], который затем тлеет в ходе экзотермической реакции окисления. В целом считается, что фронт торфяного пожара при его заглублиении в слой торфа состоит из зоны прогрева, зоны сушки, зоны пиролиза, зоны горения газообразных и конденсированных продуктов пиролиза высушенного торфа и слоя пепла.

Зона пиролиза находится внутри фронта горения слоя торфа. Требуется установить, какое влияние оказывают тепловые потери в слой воды на распространение процесса тления в слое торфа, расположенном над слоем воды. При этом учитываются процессы фильтрации и испарения воды.

Математически сформулированная выше задача с учетом сделанных допущений сводится к решению следующей системы уравнений [8, 14]:

$$\frac{\partial \rho_5 \varphi_5}{\partial t} + \frac{\partial \rho_5 \varphi_5 v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho_5 \varphi_5 u)}{\partial r} = Q, \quad (1)$$

$$\text{grad } \mathbf{P} = -\frac{\mu \mathbf{w}}{\xi}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^4 c_{is} \rho_{is} \varphi_i \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + A_v (T_2 - T_1) + q_{1s} R_{1s} - q_{2s} R_{2s} + q_{3s} R_{3s} + q_{4s} R_{4s}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_5 \varphi_5 c_{p5} \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + v \frac{\partial T_2}{\partial z} + u \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_5 \varphi_5 \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_5 \varphi_5 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \\ &+ \rho_5 \varphi_5 \sum_{\alpha=1}^N D_\alpha c_{p\alpha} \left(\frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) + A_v (T_1 - T_2) + q_{1r} + q_{2r} + \\ &+ c_{1s} (T_1 - T_2) (1 - \alpha_c) R_{1s} + c_{2s} (T_1 - T_2) R_{2s}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$c_s \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varphi_5 \rho_5 \left(\frac{\partial c_\alpha}{\partial t} + v \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} + u \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \right) &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \right) &- c_\alpha Q + R_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\rho_{1s} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_{2s} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad (7)$$

$$\rho_{3s} \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - R_{3s} - \alpha_4 R_{3s}, \quad \rho_{4s} \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = R_{4s}, \quad (8)$$

$$\sum_{\alpha=1}^N c_\alpha = 1, \quad \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i, \quad M^{-1} = \sum_{\alpha=1}^N \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad P = \frac{\rho_5 R T_1}{M}.$$

Для решения системы уравнений (1)–(8) использованы начальные условия:

$$\begin{aligned} T_i \Big|_{t=0} = T_H, \quad i = 1, 2, \quad T \Big|_{t=0} = T_H, \quad c_\alpha \Big|_{t=0} = c_{\alpha H}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N-1, \\ \rho_5 \Big|_{t=0} = \rho_{5H}, \quad \varphi_i \Big|_{t=0} = \varphi_{iH}, \quad i = 1, \dots, 4, \end{aligned} \quad (9)$$

балансовые граничные условия [17]:

$$\begin{aligned} (1 - \varphi_5) \alpha_{L1} (T_e - T_{1w}) &= \lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad 0 \leq r \leq L_1, \\ (1 - \varphi_5) \alpha_e (T_e - T_{1w}) &= \lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad L_1 < r \leq L_2, \\ (1 - \varphi_5) \alpha_{L1} (T_e - T_{1w}) &= \lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad L_2 < r \leq L, \\ \varphi_5 \alpha_{L1} (T_e - T_{2w}) &= \lambda_5 \varphi_5 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad 0 \leq r \leq L_1, \\ \varphi_5 \alpha_e (T_e - T_{2w}) &= \lambda_5 \varphi_5 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad L_1 < r \leq L_2, \\ \varphi_5 \alpha_{L1} (T_e - T_{2w}) &= \lambda_5 \varphi_5 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad L_2 < r \leq L, \end{aligned} \quad (10)$$

а также условия сопряжения на границе раздела торф–вода [18]:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=H_1-0} &= \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H_1+0} - \frac{q_{2s} R_{2s}}{s_2}, \quad T_1 \Big|_{z=H_1-0} = T \Big|_{z=H_1+0}, \\ T_1 \Big|_{z=H_1} &= T_2 \Big|_{z=H_1}, \quad T \Big|_{z=H_1+H_2} = T_H. \end{aligned} \quad (11)$$

Используя аналогию процессов тепло- и массообмена [6] ($\beta_e = \alpha_e / c_{p5}$), имеем граничные условия:

$$\begin{aligned} \beta_{L1}(c_{\alpha e} - c_{\alpha w}) &= \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad 0 \leq r \leq L_1, \\ \beta_e(c_{\alpha e} - c_{\alpha w}) &= \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad L_1 < r \leq L_2, \\ \beta_{L1}(c_{\alpha e} - c_{\alpha w}) &= \varphi_5 \rho_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad L_2 < r \leq L, \end{aligned} \quad (12)$$

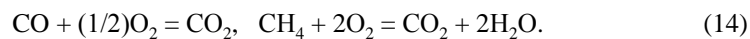
$$\begin{aligned} \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \Big|_{z=H_1} &= 0, \quad \alpha = 1, \dots, N-1, \quad P|_{z=0} = P_e, \quad \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = 0, \\ \frac{\partial P}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0, \quad \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad i = 1, 2, \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad \alpha = 1, \dots, N-1, \\ \lambda \frac{\partial T_i}{\partial r} \Big|_{r=L} &= \alpha_L (T_{iL} - T_H), \quad i = 1, 2, \quad \beta_L (c_{\alpha n} - c_{\alpha L}) = \rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \Big|_{r=L}, \\ u \Big|_{r=L} &= 0, \quad \alpha_L = \alpha_H (1 - 0,9z), \quad 0 \leq z \leq H_1, \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=L} = 0, \quad z > H_1. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь и ниже: t — время, r, z — пространственные координаты, u, v — компоненты вектора скорости \mathbf{w} на оси координат r, z , a_1 — расстояние от центра очага наземного горения до оси симметрии, z_1 — расстояние от поверхности образца вглубь пористого реагента, A_s — коэффициент аккомодации, A_v — объемный коэффициент теплообмена между газовой и конденсированной фазой (к-фазой), 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 — толщины проницаемого слоя торфа и воды по оси z , L_1, L_2 — внутренний и внешний радиусы тороидального внешнего очага горения по оси r , L — правая граница области определения по оси r , 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, R_{1s} — массовая скорость разложения сухого реагента (торфа), R_{2s} — массовая скорость испарения связанной воды в торфе, R_{3s} — массовая скорость горения коксика, R_{4s} — массовая скорость образования золы, $q_{is}, i = \overline{1, 4}$ — тепловые эффекты реакций, упомянутые выше, R — универсальная газовая постоянная, r_1 и r_2 — молярно-объемные скорости окисления оксида углерода и метана, $R_i, i = \overline{1, 5}$ — массовые скорости образования и исчезновения компонентов газовой фазы в уравнениях диффузии (6), s_2 — удельная поверхность испарения воды, s_3 — удельная поверхность реагирования углерода, T_1 — температура торфа, T_2 — температура

газовой фазы, T — температура воды под слоем торфа, T_* — температура тления 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, T_{1w} — температура поверхности, α_e — коэффициент теплообмена, $\alpha_4 = v_4 M_{4s} / (v_3 M_{3s})$ — приведенный стехиометрический коэффициент [6], α_c — доля кокса в ходе реакции пиролиза торфа; эта величина характеризует исчезновение коксика в результате его горения, а правая часть первого уравнения (8) — массовую скорость образования и исчезновения коксика в целом, β_e — коэффициент массообмена, $\varepsilon_{j,\alpha}$ — потенциальная энергия взаимодействия молекул, η_i , $i = \overline{1, 4}$ — безразмерные параметры, λ — коэффициент теплопроводности, $\mu = \mu_n (T_1 / T_n)^{0,5}$ — коэффициент динамической вязкости смеси газов, $\sigma_{i,j}$ — сечения взаимодействия молекул, $\xi = \xi_* \varphi_5^3 / (1 - \varphi_5)^2$ — функция, описывающая влияние объемной доли газовой фазы на сопротивление, $\xi_* = d_p^2 / 120$ — характерная проницаемость, d_p — диаметр поры, φ_i , $i = \overline{1, 4}$ — безразмерные объемные доли, φ_5 — объемная доля газовой фазы, определяемая четвертой формулой из (8), ρ — плотность, ρ_5 — плотность газовой фазы, ω_z — линейная скорость тления торфа в глубь торфа, ω_r — линейная скорость тления торфа вдоль оси r . Индексы соответствуют: w — границе раздела внешний очаг горения–торф, 1 — каркасу торфа, 2 — газовой фазе в пористом реагенте, s — к-фаза, e — внешняя среда, $*$ — характерная величина, c — кокс, n — начальное значение, $L1$ — внутренний радиус тороидального внешнего очага горения, L — правая граница области определения по r , $1, \dots, 6$ — в газовой фазе соответствуют оксиду углерода, парам воды, кислороду, диоксиду углерода, метану, азоту, $1s, \dots, 4s$ — в конденсированной фазе — торф, связанная вода, кокс, зола, v — объемные процессы, p — пара.

2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ПЕРЕНОСА, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Известно [8, 13, 19], что итоговыми гомогенными химическими реакциями в проницаемом слое торф являются:



Уравнения химической кинетики имеют вид [19]:

$$\frac{dy_1}{dt} = -k_1 x_1 x_3^{0,25} T_1^{-2,25} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right) = r_1,$$

$$\frac{dy_2}{dt} = -k_2 x_5^{-0,5} x_3^{1,5} \frac{P}{T_1} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_1}\right) = r_2.$$

Для испарения связанной воды в многофазной среде — торфе используется аналог закона Герца–Кнудсена [7, 13]

$$R_{2s} = \frac{s_2 M_2 A_s \varphi_2 [k_{2s} \exp(-E_{2s} / RT_1) - P_2]}{(2\pi RT_1 M_2)^{0,5}}. \quad (15)$$

Для нахождения парциального давления паров воды в слое торфа P_2 в (15) используется закон Дальтона [7, 8], 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 Фристрема–Вестенберга [6, 20]:

$$D_\alpha = (1 - c_\alpha) \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq \alpha}}^N \frac{x_j}{d_{\alpha,j}} \right)^{-1}, \quad d_{\alpha,j} = 1,66 \cdot 10^{-7} \frac{[(M_\alpha + M_j)/(M_\alpha M_j)]^{0.5} T_1^{1,67}}{P \sigma_{j,\alpha}^2 (\epsilon_{j,\alpha} / k T_1)^{0,17}}.$$

Формула для коэффициентов теплопроводности компонентов газовой фазы λ_j , $j = 1, 2, \dots, N$ взята из [21, 22]:

$$\lambda_5 = \sum_{i=1}^N \lambda_i c_i, \quad \lambda_j = \lambda_j^0 (0,115 + 0,354(c_{p,j}/R)), \quad \lambda_i^0 = 8,32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{M_i T_1}}{M_i \sigma_i^2 \Omega^{(2,2)}}.$$

Коэффициенты теплоемкости компонентов газовой фазы $c_{p,j} = a_j + b_j T_1 + c_j' / T_1^2$ брались из работы [22], а значения величин $\lambda_{i,s}$ в конденсированной фазе приведены в [8, 13]:

$$c_{p5} = \sum_{j=1}^N c_{p,j} c_j, \quad \lambda = \sum_{i=1}^4 \lambda_{i,s} \varphi_i.$$

Источники и стоки в уравнениях (1), (3)–(8) имеют вид:

$$R_1 = \eta_1 R_{1s} - M_1 r_1, \quad R_2 = \eta_2 R_{1s} - R_{2s} + 2M_2 r_2, \quad R_3 = -\eta_3 R_{3s} - M_3 r_1 / 2 - 2M_3 r_2, \quad R_4 = M_4 (r_1 + r_2), \quad R_5 = \eta_4 R_{1s} - M_5 r_2, \quad R_{1s} = k_{1s} \rho_{1s} \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_{1s}}{RT_1}\right),$$

$$R_{3s} = \frac{M_c}{M_3} s_3 k_{3s} \varphi_5 \rho_5 \varphi_3 c_3 \exp\left(-\frac{E_{3s}}{RT_1}\right), \quad Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + R_{3s},$$

$$R_{4s} = \alpha_4 R_{3s}, \quad \alpha_c = \frac{M_c}{M_H - M_c}, \quad \eta_1 = \frac{M_1}{M_H}, \quad \eta_2 = \frac{M_2}{M_H}, \quad \eta_3 = \frac{M_3}{M_c}, \quad \eta_4 = \frac{M_5}{M_H}.$$

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Система уравнений (1)–(8) с краевыми условиями (9)–(13) решалась итерационно-интерполяционным методом [23] с переменным шагом по времени с заданной точностью. Программа численного решения задачи тестировалась точным аналитическим решением по методу пробной функции [23]. Для разных шагов по пространству отклонение численного решения от точного значения на заданном промежутке времени не превышало 1 %. Кроме того, была численно решена одномерная задача прогрева полубесконечного инертного сплошного тела при граничных условиях третьего рода на нагреваемой стороне и первого рода на противоположной границе, для которой известно точное аналитическое решение [18, 25].

Оказалось, что для малых моментов времени численное решение задачи незначительно (меньше 0,5 %) отличается от аналитического [25].

Линейная скорость поверхности тления торфа определялась по формуле

$$\omega_z = \frac{(\Delta z)_*}{(\Delta t)_*} = \frac{z_{(k)} - z_{(k-1)}}{t_{*(k)} - t_{*(k-1)}}, \quad \omega_r = \frac{(\Delta r)_*}{(\Delta t)_*} = \frac{r_{(j)} - r_{(j-1)}}{t_{*(j)} - t_{*(j-1)}}, \quad (16)$$

где $t_{*(k)}$ и $t_{*(k-1)}$ — время достижения температуры тления T_* при $z = z_{(k)}$ и $z = z_{(k-1)}$, k — текущий, а $(k-1)$ — предыдущий слой по z . Аналогично определяются $t_{*(j)}$ и $t_{*(j-1)}$ по оси r . Для теплофизических и термокинетических параметров торфа использовались данные работ [4, 8–10, 13–16, 24]. Теплофизические характеристики воды и водяного пара брались из [26]. Приведенные ниже результаты получены при $T_H = 293$ К, $T_* = 650$ К, $\omega_* = 5 \cdot 10^{-6}$ м/с, $P_H = 1,013 \cdot 10^5$ н/м², $T_e = 900$ – 1100 К, $\mu_H = 1,81 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $\alpha_{L1} = 0,75$ Вт/(м²·К), $1,0 \leq \alpha_e \leq 1,5$ Вт/(м²·К), $A_v = 10^4$ Вт/(м³·К), $\alpha_H = 1$ 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, $H_1 = H_2 = 0,5$ м, $L_1 = 0,1 \cdot L$, $L_2 = 0,9 \cdot L$, $L = 0,5$ м, $\rho_{1s} = 250$ – 1200 кг/м³, $\rho_{2s} = 2 \cdot 10^3$ 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, $q_{2s} = 1,06 \cdot 10^6$ Дж/кг, $k_{3s} = 10^5$ м/с, $E_{3s} = 50,28$ кДж/моль, $q_{3s} = 2 \cdot 10^5$ Дж/кг, $c_{1H} = 0,1$, $c_{2H} = 5 \cdot 10^{-5}$, $c_{3H} = 0,05$ – $0,23$, $c_{4H} = 10^{-5}$, $c_{5H} = 0,2$, $c_{\alpha e} = c_{\alpha H}$, $\alpha = 1, 2, 4, 5$, $c_{3e} = 10^{-3}$, $\varphi_{1H} = 0,5$ – $0,7$, $\varphi_{2H} = 0,05$ – $0,4$, $\varphi_{3H} = 10^{-3}$, $\varphi_{4H} = 10^{-5}$, $s_2 = 0,08$, $s_3 = 0,05$, $\alpha_4 = 0,7$, $\eta_1 = 0,2$, $\eta_2 = 0,02$, $\eta_4 = 0,3$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

Сначала исследовался 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 $T_{1w} \geq T_*$ скорость тления ω_z равна или превышает характерную величину ω_* , а температура поверхности реагента резко возрастает до $T_{1w} = 750$ К. Для определенности полагалось, что величина температуры $T_* = 650$ К и скорости тления $\omega_* = 5 \cdot 10^{-6}$ м/с известны из экспериментальных данных [10]. Если $\omega_z \leq \omega_*$ по глубине торфа вдоль оси z при $r = a_1$ (см. рис. 1), считалось, что имеет место промежуточный режим, при котором скорость тления на порядок больше скорости пиролиза. Для $T_{1w} < T_*$ имеет место режим отсутствия тления реагента, при котором его скорость сравнима со скоростью пиролиза торфа. В дальнейшем в табл. 1 и 2 время режима тления при $\omega \leq \omega_*$ отмечено звездочкой, а пиролиза — прочерком, соответственно.

Таблица 1

Время зажигания образцов торфа, t_* , ч

ρ_{1s} , кг/м ³	$\varphi_{1н}$	$\varphi_{2н}$	α_e , Вт/(м ² ·К)	T_e , К		
				1100	1000	900
1200	0,7	0,05	1,5	3,78	4,82	6,47
			1,25	4,64	5,95	7,5
			1,0	6,07	7,5	9,5
1000	0,7	0,1	1,5	4,84	7,42	14,62
			1,25	6,71	10,6	25,1*
			1,0	10,6	24,57	—
750	0,7	0,2	1,5	6,43	9,3	16,36
			1,25	8,8	12,52	41,64*
			1,0	13,27	26,16*	—
540	0,6	0,3	1,5	9,2	17,06	27,45*
			1,25	13,5	36,8*	—
			1,0	23,680	—	—
250	0,5	0,4	1,5	32,54	59,4	—
			1,25	54,7*	—	—

Для опорного варианта $\varphi_{1н} = 0,7$, $\varphi_{2н} = 0,2$, $c_{3н} = 0,23$, $T_e = 900$ К, $\alpha_e = 1,5$ Вт/(м²·К), $\sum_{i=1}^4 \rho_{is} \varphi_{iн} = 925$ кг/м³, $\rho_{1s} = 750$ кг/м³, входных данных из раздела 3 (см. рис. 3–6), проделана процедура тестирования численного метода. Для решения математической модели использовались последовательности сгущающихся сеток по пространству: $h_z = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, $h_{z1} = 2h_z$, $h_{z2} = h_z / 2$, $h_{z3} = h_z / 4$, $h_r = 10^{-2}$ м, $h_{r1} = 2h_r$, $h_{r2} = h_r / 2$, $h_{r3} = h_r / 4$, где $h_z = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м — опорный шаг пространственной координаты по оси Oz , $h_r = 10^{-2}$ м — по оси Or (см. рис. 1). Фиксировались: время зажигания t_* системы торф–вода, в которой температура поверхности торфа T_{2w} (газа) достигала 750 К; значение температуры торфа (каркаса, газа) на поверхности и в глубине в различные моменты времени; а также среднее значение скорости тления торфа от времени. При этом шаг по времени был переменным и вырабатывался автоматически по заданной точности, одинаковой для всех сеток по пространству.

Различие по времени зажигания t_* падало: $\varepsilon_1 = 20$ %, $\varepsilon_2 = 9$ %, $\varepsilon_3 = 2,7$ %. Тенденция уменьшения различия по температуре торфа (каркаса, газа) сохранялась: $\varepsilon_1 = 7,2$ %, $\varepsilon_2 = 2,4$ %, $\varepsilon_3 = 1,1$ %. Расхождение результатов по средней скорости тления также падало: $\varepsilon_1 = 20$ %, $\varepsilon_2 = 10$ %, $\varepsilon_3 = 5$ %.

Таблица 2

Время различных режимов тления торфа, t_* , ч

H_2 , м	H_1 , м	0,5			0,25	
		T_e , К			T_e , К	
	α_e , Вт/(м ² ·К)	1100	1000	900	1100	1000
0,5	1,5	6,43	9,3	16,36	19,76 *	—
	1,25	8,85	12,52	41,64*	—	—
	1,0	13,27	24,57*	—	—	—
0,25	1,5	6,42	8,84	15,88	19,35*	—
	1,25	8,81	12,41	40,51*	—	—
	1,0	13,41	25,63*	—	—	—

Кроме того, было проведено численное моделирование зажигания слоя торфа без учета второго слоя (воды). Прделана процедура тестирования этой модели на последовательности сгущающихся сеток по пространству. При этом оказалось, что (при задании в качестве характерных значений $T_* = 650$ К и $\omega_* = 5 \cdot 10^{-6}$ м/с из [10] для математической модели статьи) среднее значение скорости тления торфа в глубину слоя ω_z по порядку величины согласуется с экспериментальными данными [10, 15].

В табл. 1 приведено время зажигания реагента при различных T_e , α_e , ρ_{1s} , $\varphi_{1н}$, $\varphi_{2н}$ для $c_{3н} = 0,23$, значения плотности $\sum_{i=1}^4 \rho_{is} \varphi_{iн} = 925$ кг/м³ и входных данных из раздела 3. Как видно из табл. 1, 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 оксида углерода, так и с наличием в порах воздуха, который снижает эффективный коэффициент теплопроводности и увеличивает время прогрева образцов. В результате при $T_e = 900$ К: $\alpha_e \leq 1$ Вт/(м²·К), $0,1 \leq \varphi_{2н} \leq 0,2$, $\alpha_e \leq 1,25$ Вт/(м²·К), $0,3 \leq \varphi_{2н} \leq 0,4$, $\alpha_e \leq 1,25$ Вт/(м²·К), $\varphi_{2н} = 0,4$ и $T_e = 1000$ К: $\alpha_e \leq 1$ Вт/(м²·К), $\varphi_{2н} = 0,3$, $\alpha_e \leq 1,25$ Вт/(м²·К), $\varphi_{2н} = 0,4$ 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 тепловой энергии на испарение воды.

В табл. 2 для $\varphi_{1н} = 0,7$, $\varphi_{2н} = 0,2$, $\rho_{1s} = 750$ кг/м³ и других величин из базы данных (см. раздел 3) приведено время зажигания торфа или его отсутствие для разной высоты слоя реагента, толщины пласта воды под ним и интенсивности наземного очага горения. При большой высоте реагента $H_1 = 0,5$ м (см. табл. 2) и толщине столба воды $0,25 \leq H_2 \leq 0,5$ происходит зажигание торфа, кроме варианта, когда внешнее воздействие малоинтенсивно и когда $T_e \leq 900$ К и $\alpha_e = 1$ Вт/(м²·К). С уменьшением толщины слоя торфа $H_1 < 0,5$ м для $0,25 \leq H_2 \leq 0,5$ происходит режим тления реагента со скоростью $\omega_z \leq \omega_*$. При уменьшении воздействия внешнего очага горения для $T_e \leq 1000$ К и $\alpha_e \leq 1,5$ Вт/(м²·К) (см. табл. 2) наблюдается отсутствие тления торфа. Наконец, при малой толщине реагента $H_1 = 0,25$ м промежуточный режим тления торфа имеет место только при высокой интенсивности внешнего воздействия: $\alpha_e = 1,5$ Вт/(м²·К), $T_e = 1100$ К.

Таким образом, теоретически подтвержден факт, что тонкий слой торфа на болоте, как правило, не тлеет. Этот результат позволяет предложить способ борьбы с торфяными пожарами, основанный на изоляции очагов тления закачкой воды под слой реагента малой высоты.

На рис. 2 приведена зависимость времени зажигания реагента от коэффициента теплообмена при $\varphi_{1н} = 0,7$, $\varphi_{2н} = 0,2$, $\rho_{1s} = 750$ кг/м³, $c_{3н} = 0,23$ и входных данных из раздела 3. 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 $\alpha_e < 1$ Вт/(м²·К) для 900 К $\leq T_e \leq 1000$ К скорость тления не превышает скорости пиролиза торфа

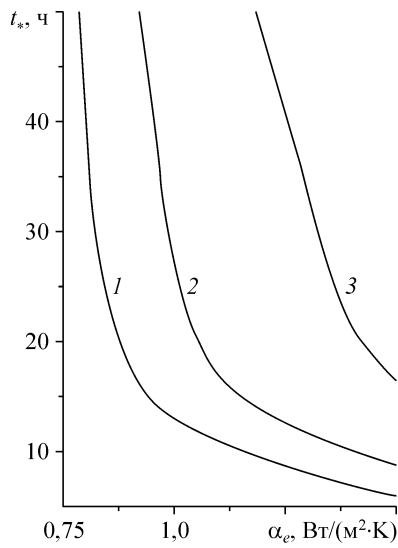


Рис. 2. Зависимость времени зажигания торфа от коэффициента теплообмена для внешнего источника с температурой $T_e = 1100$ (1), 1000 (2), 900 (3) К.

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 оксида углерода. 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 $\alpha_e \leq 1,5$ Вт/(м²×К).

На рис. 3 показано распределение температур поверхности каркаса T_{1w} и газа T_{2w} (штриховые и сплошные кривые соответственно) по продольной переменной r в различные моменты времени: 5 (1), 10 (2), 15 (3), 16,36 (4) ч при $\varphi_{1н} = 0,7$, $\varphi_{2н} = 0,2$, $c_{3н} = 0,23$, $T_e = 900$ К, $\alpha_e = 1,5$ Вт/(м²·К) и входных данных из раздела 3. Видно, что до момента $t < 15$ ч времени зажигания (режиму зажигания $t = t_*$ отвечает кривая 3, имеющая выпуклость вверх на рис. 4) температура газа и каркаса торфа практически совпадают. Затем при $t \geq t_*$ в результате тепловыделения от экзотермической реакции окисления оксида углерода (14) температура газовой фазы T_{2w} превышает температуру каркаса T_{1w} .

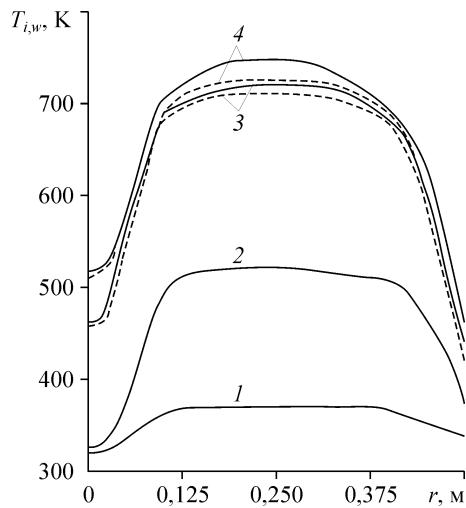


Рис. 3. Зависимость температуры поверхности торфа: каркаса T_{1w} (штриховые кривые) и газа T_{2w} (сплошные кривые) от радиальной переменной r в различные моменты времени.
5 (1), 10 (2), 15 (3), 16,36 (4) ч.

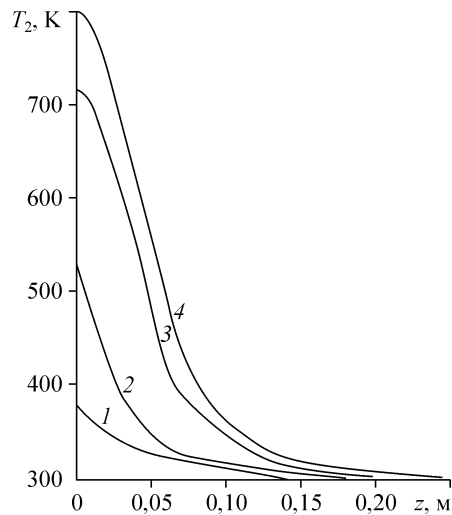


Рис. 4. Зависимость температуры газа T_2 в пористом торфе от осевой координаты z при $r = a_1$ для опорных входных данных (в те же моменты времени, что и на рис. 3).

Рис. 5. Распределение безразмерных концентраций компонент по глубине образца z при $r = a_1$ для опорных входных данных (в те же моменты времени, что и на рис. 3).

На рис. 4 изображено распределение температуры газовой фазы по глубине слоя z при $r = a_1$ (см. рис. 1), где режиму тления отвечают кривые, имеющие выпуклость вверх для тех же $\varphi_{1н}$, $\varphi_{2н}$, $c_{3н}$, T_e , α_e (см. рис. 3), а на рис. 5 — поле концентраций компонент в проницаемой среде (торфе) по z для режима тления в те же самые моменты времени, что и на рис. 3 и входных данных из раздела 3.

На рис. 6 представлены объемные доли компонент пористой среды по глубине слоя z при $r = a_1$ для исходного реагента $\varphi_{1н}$, 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 $t > 10$ исчезает, превращаясь в концентрацию паров H_2O (см. рис. 5, *a*). В области высокой температуры ($T_1 > 380$ К) начинается процесс пиролиза исходного реагента с появлением основной массы паров воды и кокса (см. рис. 6, кривые для φ_3). Далее продукт пиролиза — кокс начинает выгорать (тлеть) в результате экзотермической реакции окисления вглубь фрагмента пористой среды с образованием

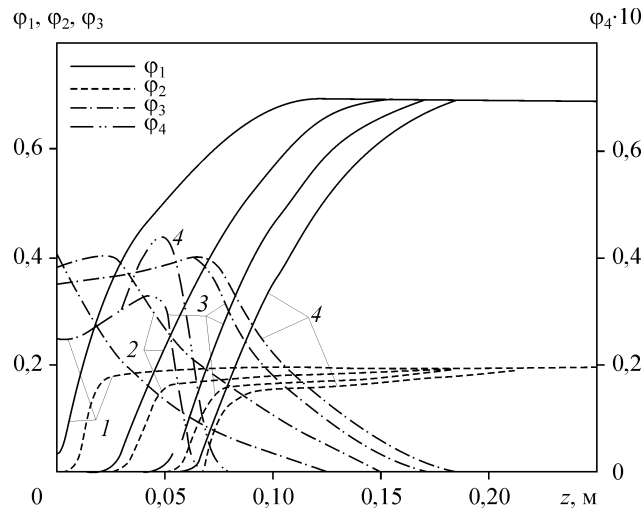
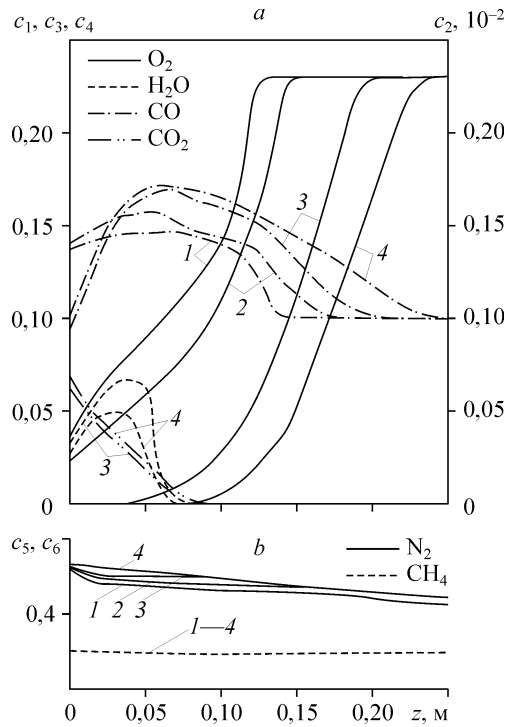


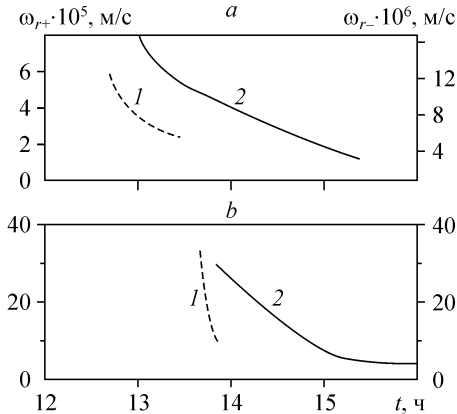
Рис. 6. Зависимости безразмерных объемных долей по глубине торфа от z при $r = a_1$ для опорных входных данных (в те же моменты времени, что и на рис. 3).

зола (см. рис. 6, линии 3, 4 для φ_4). Надо сказать, что метан CH_4 при $T_1 \leq 750$ К практически не окисляется в ходе гомогенной реакции из (14) с образованием H_2O и CO_2 (см. рис. 5, *a* линии H_2O и CO_2 , а на рис. 5, *b* линию CH_4), т. к. концентрации H_2O и CH_4 малы или изменяются незначительно в силу низких температур реагирующей среды. Известно [19], что вторая газофазная реакция окисления из (14) интенсивно начинается при $T_1 > 1000$ К.

Следует отметить, что за все время прогрева и тления торфа в проницаемой среде доминирует, в основном, инертный компонент азот (см. рис. 5, *b*, c_6 , кривые концентраций N_2). С течением времени при $t > 10$ ч в результате сушки, пиролиза торфа и последующего тления, связанного с уменьшением концентрации кислорода (см. рис. 5, *a*, c_3 , линии O_2), имеет место появление газообразных продуктов: паров воды, оксида и диоксида углерода (см. рис. 5, *a*, кривые c_2 , c_1 , c_4 соответственно) в результате чего концентрация азота уменьшается, а скорость тления торфа определяется скоростью поступления кислорода в очаг горения из внешней среды. В результате уменьшения концентрации кислорода $c_{3\text{H}}$ с 0,23 до 0,11 и 0,05 время зажигания реагента увеличивается до $t_{*1} = 16,36$ ч, $t_{*2} = 34,1$ ч, $t_{*3} = 47,1$ ч, что обусловлено замедлением скорости тления реагента в результате уменьшения содержания окислителя в порах торфа. Этот результат качественно согласуется с экспериментальными данными [27], где одним из способов борьбы с почвенными пожарами предложен метод, основанный на изоляции очагов горения от окружающего воздуха.

Представляет интерес исследование влияния зависимости содержания начальных объемных долей исходного реагента и влаги ($\varphi_{i\text{H}}$, $i = 1, 2$) на скорость процесса тления торфа. С уменьшением объемной доли влаги с $\varphi_{2\text{H}} = 0,1$ до $\varphi_{2\text{H}} = 0,05$ для значения $\varphi_{1\text{H}} = 0,7$ имеет место уменьшение времени зажигания от $t_{*1} \leq 14,43$ ч до $t_{*2} \leq 6,47$ ч. Это связано, в основном, с уменьшением затрат теплоты на испарение связанной воды в торфе. С уменьшением запаса начального значения исходного проницаемого реагента от $\varphi_{1\text{H}} = 0,7$, $\varphi_{1\text{H}} = 0,65$ до $\varphi_{1\text{H}} = 0,6$ (с ростом начальной проницаемости торфа ξ_{H} : 10^{-17} , $3,9 \cdot 10^{-17}$, $1,04 \cdot 10^{-16}$ м²) для значения объемной доли влаги $\varphi_{2\text{H}} = 0,2$ время зажигания увеличивается: $t_{*3} \leq 16,36$ ч, $t_{*4} \leq 22$ ч и $t_{*5} \leq 28,2$ ч, 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 [15].

На рис. 7 приведена зависимость линейной скорости тления торфа вдоль оси r от времени (входные данные рис. 3).

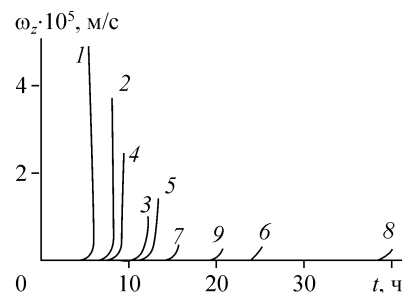


Кривые 1 отвечают распространению процесса тления со скоростью ω_{r+} направо от центра $r = a_1$ (см. рис. 1) очага наземного горения, кривые 2 — со скоростью ω_{r-} влево от центра к оси симметрии. Рис. 7, *a* соответствует $z = 0$,

Рис. 7. Зависимость линейной скорости тления торфа в приповерхностном слое от времени (входные данные рис. 3).

$z = 0$ (*a*), $z_1 = 0,125$ (*b*), ω_{r+} (штриховые кривые), ω_{r-} (сплошные).

Рис. 8. Зависимость линейной скорости тления торфа ω_z по глубине образца z при $r = a_1$ от времени: 1–3 соответствуют $H_1 = 0,5$ м, $H_2 = 0,25$ м, $T_e = 1100$ К, $\alpha_e = 1,5, 1,25, 1,0$ Вт/(м²·К), 4–6 получены при $T_e = 1000$ К и входных данных вариантов 1–3, 7–8 получены при $H_2 = 0,5$ м, $T_e = 900$ К, $\alpha_e = 1,5, 1,25$ Вт/(м²·К), а 9 — при $H_1 = 0,25$ м, $0,25 \leq H_2 \leq 0,5$ м (см. табл. 2).



а рис. 7, b — глубине слоя $z_1 = 0,0125$ м (см.

рис. 1). Видно, что сначала в период прогрева образца торфа $t > 12,5$ ч процесс тления реагента продвигается вправо. Затем по мере приближения к правому холодному торцу $r = L$ (см. рис. 1) он замедляется и тление торфа начинает распространяться от центра к оси симметрии пористого тела вплоть до момента загорания ($t \geq t_*$). Эта картина качественно повторяется в глубине слоя при $z = z_1$ (см. рис. 7, b) со смещением по времени ($t > 13,7$ ч) для ω_{r+} , т. к. необходимо некоторое время для прогрева нижележащих слоев торфа. При этом скорость тления торфа в приповерхностных слоях вдоль образца ω_r может быть на порядок выше, чем поперек ω_z . Это связано с тем, что распространение тления по приповерхностным слоям идет по предварительно нагретому пористому образцу торфа со стороны наземного очага горения. В то же время процесс тления вглубь тела со скоростью ω_z происходит в контакте с холодными нижележащими слоями проницаемой среды. Поэтому одним из способов борьбы с торфяными пожарами может быть своевременное удаление поверхностного слоя тлеющего торфа.

На рис. 8 приведена зависимость скорости тления торфа ω_z при $r = a_1$ (см. рис. 1) от времени для $0,25 \text{ м} \leq H_i \leq 0,5 \text{ м}$, $i = 1, 2$ (см. табл. 2). Вариант $H_1 = 0,5$ м и $H_2 = 0,25$ м при $T_e = 1100$ К для $\alpha_e = 1,5, 1,25$ и $1,0$ Вт/(м²·К) отмечен цифрами 1, 2 и 3 соответственно. Варианты 4–6 получены при $T_e = 1000$ К и входных данных вариантов 1–3, а 7–8 — при $T_e = 900$ К для $\alpha_e = 1,5$ и $1,25$ Вт/(м²·К). Видно, что с уменьшением интенсивности массообмена α_e (ср. кривые 3 и 4, 6 и 7) и температуры внешнего очага горения время загорания реагента увеличивается. При этом толщина слоя воды практически не влияет на время загорания торфа (см. табл. 2). Кривая 9 на рис. 8 соответствует $H_1 = 0,25$ м и $0,25 \text{ м} \leq H_2 \leq 0,5$ м из табл. 2. Как и следовало ожидать, для тонкого слоя торфа при увеличении толщины слоя воды время загорания реагента растет.

ВЫВОДЫ

1. Представлена новая постановка задачи о загорании слоя торфа, расположенного на слое воды, с учетом процессов сушки, пиролиза и окисления газообразных и конденсированных продуктов и конкретной базы данных.

2. Установлено, что при изменении T_e и α_e в пределах $900 \text{ К} \leq T_e \leq 1100 \text{ К}$ и $1 \leq \alpha_e \leq 1,5$ Вт/(м²·К) время загорания и тления торфа определяется интенсивностью внешнего очага горения, начальным содержанием окислителя в порах реагента, процессами сушки, пиролиза, экзотермической реакцией окисления оксида углерода, а также высотой пласта торф–вода.

3. Показано, что результаты расчетов по величине скорости тления торфа согласуются с экспериментальными данными [10, 15, 27].

4. Установлено, что с уменьшением толщины слоя торфа над слоем воды при одинаковой глубине воды под ним и равных значениях плотности теплового потока от внешнего очага горения время зажигания увеличивается. Для тонкого слоя торфа при утолщении под ним слоя воды время зажигания увеличивается.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- s — относительная площадь пор в слое золы,
 m — доля кокса,
 n — зольность материала,
 U — скорость продвижения фронта сгорания [4], м/с,
 V — скорость выброса газообразных продуктов сгоревшего материала в атмосферу, м/с,
 t — время, час,
 r, z — пространственные координаты, м,
 u, v — компоненты вектора скорости w на оси координат r, z , м/с,
 a_1 — расстояние от центра очага наземного горения до оси симметрии, м,
 z_1 — расстояние от поверхности образца вглубь пористого реагента, м,
 A_s — коэффициент аккомодации,
 A_v — объемный коэффициент теплообмена между газовой и конденсированной фазой, Вт/(м³·К),
 c — массовая концентрация компонент,
 c_p — коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·К),
 D — коэффициент диффузии, м²/с,
 H_1, H_2 — толщина проницаемого слоя торфа и воды, м,
 L_1, L_2 — внутренний и внешний радиусы торoidalного внешнего очага горения по оси r , м,
 L — правая граница области определения по оси r , м,
 $E_i, i = 1, 2$ — энергия активации гомогенных реакций окисления, Дж/моль,
 k — постоянная Больцмана, Дж/К,
 $k_i, i = 1, 2$ — предэкспоненциальные множители реакций окисления, с⁻¹,
 M — молекулярный вес, кг/кмоль,
 P — давление газа в порах, Н/м²,
 $q_i, i = 1, 2$ — тепловые эффекты реакций окисления, Дж/кг,
 R_{1s} — массовая скорость разложения сухого реагента (торфа),
 R_{2s} — массовая скорость испарения связанной воды в торфе,
 R_{3s} — массовая скорость горения коксика,
 R_{4s} — массовая скорость образования золы,
 $q_{is}, i = 1, 4$ — тепловые эффекты реакций, упомянутые выше,
 $R_i, i = 1, 5$ — массовая скорость образования и исчезновения компонент газовой фазы в уравнении диффузии (6), кг/(м³·с),
 s_2 — удельная поверхность испарения воды, м⁻¹,
 s_3 — удельная поверхность реагирования углерода, м⁻¹,
- $t_{*(k)}$ 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 каркаса торфа, К,
 T_2 — температура газовой фазы в порах торфа, К,
 T — температура воды под слоем торфа, К,
 T_* — температура тления торфа, К,
 $x_j = c_j M_j / M, j = 1, \dots, 5$ — молярная концентрация,
 $y_i = \rho c_i / M, i = 1, 2$ — молярно-объемная концентрация, моль/см³,
 T_{1w} — температура поверхности, К,
 $\alpha_4 = v_4 M_{4s} / (v_3 M_{3s})$ — приведенный стехиометрический коэффициент [6], характеризующий исчезновение коксика в результате его горения, а правая часть первого уравнения (8) характеризует массовую скорость образования и исчезновения коксика в целом,
 α_e — коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К),
 α_c — доля кокса в ходе реакции пиролиза торфа,
 β_e — коэффициент массообмена, кг/(м²·с),
 $\varepsilon_{i,\alpha}$ — потенциальная энергия взаимодействия молекул, Дж,
 $\eta_i, i = 1, 4$ — безразмерные параметры,
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К),
 $\mu_n (T_1/T_n)^{0.5}$ — коэффициент динамической вязкости смеси газов, кг/(м·с),
 $\sigma_{i,j}$ — сечения взаимодействия молекул, ангстрем,
 $\xi = \xi_* \varphi_5^3 / (1 - \varphi_5)^2$ — функция, описывающая влияние объемной доли газа на сопротивление,
 $\xi_* = d_p^2 / 120$ — характерная проницаемость, м²,
 d_p — диаметр цилиндрических пор,
 $\varphi_i, i = 1, 4$ — безразмерные объемные доли,
 ρ — плотность, кг/м³,
 ρ_5 — плотность газовой фазы, кг/м³,
 φ_5 — объемная доля газовой фазы, определяемая четвертой формулой из (8),
 ω_z — линейная скорость тления вглубь торфа при $r = a_1$, м/с,
 ω_{r+} — скорость тления торфа вдоль оси r вправо от центра очага горения, м/с,
 ω_{r-} — скорость тления торфа вдоль оси r влево от центра очага горения, м/с,
 h_z — опорный шаг пространственной координаты по оси Oz , м,
 h_r — опорный шаг по оси Or , м.

ИНДЕКСЫ

w — соответствует нагреваемой стороне поверхности торфа вдоль оси r ,

* — характерная величина,
 c — кокс,

- 1 — каркас торфа,
 2 — газовая фаза в пористом реагенте,
 L_1 — внутренний радиус тороидального внешнего очага горения,
 L — правая граница области определения по r ,
 s — конденсированная фаза,
 e — внешняя среда,
- 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фарберов И.Л. О процессах пиролиза // Теоретический и окислительный пиролиз топлив и высокополимерных материалов. М.: Наука, 1966. С. 3–8.
2. Гундар С.В. Об энергетическом балансе беспламенного горения органической части почвы // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР. 1974. С. 74–82.
3. Гундар С.В. О газообмене при почвенных пожарах // Проблемы лесной пирологии. — Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР. 1974. С. 137–146.
4. Колев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1977. 239 с.
5. Гришин А.М. Математическое моделирование некоторых нестационарных азотермохимических явлений. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1973. 282 с.
6. Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение. 1984. 319 с.
7. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред. М.: Высшая школа, 1985. 464 с.
8. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. 277 с.
9. Справочник по торфу / Под ред. А. В. Лазарева, С. С. Корчунова. М.: Недра, 1982. 440 с.
10. Борисов А.А., Борисов Ал.А., Горелик Р.С. и др. Экспериментальное исследование и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск, 1984. С. 5–22.
11. Субботин А.Н. Закономерности развития подземного пожара при разных условиях тепло- и массообмена с внешней средой // Теплообмен-ММФ–2000: IV Междунар. форум, 22–26 мая 2000, Минск. 2000. Т. 4. С. 224–231.
12. Субботин А.Н. О некоторых особенностях распространения подземного пожара // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, № 5. С. 159–165.
13. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. 207 с.
14. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 4. С. 41–89.
15. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В., Преис Ю.И. Экспериментальное определение характеристик зажигания и горения торфа // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 78, № 1. С. 137–142.
16. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В. Экспериментальное определение теплофизических, термодинамических и фильтрационных характеристик торфа // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79, № 3. С. 131–135.
17. Гришин А.М., Голованов А.Н., Якимов А.С. Сопряженный теплообмен в композиционном материале // Прикл. механ. и технич. физика. 1991. № 4. С. 141–148.
18. Гришин А.М., Якимов А.С. Математическое моделирование процесса зажигания торфа // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81, № 1. С. 191–199.
19. Щетников Е. С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965. 739 с.
20. Campbell E.C., Fristrom R.M. Reaction kinetics thermodynamics and transporting the hydrogen bromine system // Chemical Reviews. 1958. Vol. 38, No. 2. P. 173–234.
21. Основы практической теории горения / Под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергия, 1973. 264 с.
22. Мищенко К.П., Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1972. 200 с.
23. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Субботин А. Н., Якимов А.С. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. 320 с.
24. Борисов А.А., Кисилев Я.С., Удилов В.П. Кинетические характеристики низкотемпературного горения торфа // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО АН СССР. 1984. С. 23–30.
25. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
26. Вукалович М.П., Ривкин С.А., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд-во Стандартов, 1969. 430 с.
27. Гундар С.В. Определение минимальной концентрации кислорода при беспламенном горении почв // Лесное хозяйство. 1976, № 5. С. 53–54.

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2009 г.