

УДК 521.534:536.245.022

А.М. Гришин

**О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ**

Дается краткий обзор работ и общая система уравнений для математического моделирования торфяных пожаров. Предлагается программа дальнейших научных исследований этих пожаров для анализа условий их возникновения и распространения, а также создания новых способов борьбы с ними.

**Ключевые слова:** торф, торфяной пожар, физическая модель, пиролиз и сушка торфа, горение, процессы переноса, атмосфера, математическое моделирование.

**Обзор физического и математического моделирования торфяных пожаров**

К отдельному типу лесных пожаров относятся почвенные и торфяные пожары, которые возникают в результате действия очагов горения при низовых лесных пожарах. Под влиянием излучения и конвективного теплового потока от фронта низового лесного пожара, горящих пней и валежника происходит нагревание, высушивание, пиролиз, а затем зажигание подстилки – слоя полуразложившихся листья, хвои, травы и тонких веточек. Плотность подстилки в абсолютно сухом состоянии изменяется в пределах от 30 до 300 кг/м<sup>3</sup> [1 – 5], что выше, чем плотность опада. Влагосодержание подстилки тоже выше, чем у напочвенного покрова, и по данным [1-5] изменяется, как правило, в пределах от 470 до 560 %. Поэтому подстилка высыхает значительно медленнее, чем напочвенный покров, и лишь в очень сухую погоду достигает минимального значения – 14 % [1 – 5]. Если под подстилкой расположен слой торфа, то процесс заглубления горения может продолжаться, и может возникнуть торфяной пожар. Согласно [1 – 5], торфом называется продукт неполного разложения отмершей растительной массы, образующийся в условиях избыточной влажности и недостаточной аэрации. Как правило, залежи торфа (торфяники) имеются на болотах. Торфяники образуются в результате так называемого процесса заболачивания озер на равнинах, покрытых лесом. Например, значительная часть территории Томской области покрыта Васюганскими болотами. Болота имеются и в европейской части России (Московская, Владимирская, Тверская, Рязанская области).

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 работах [2 – 5].

На основе исследования горения верхних торфянистых слоев лесной почвы в [3, 4] было установлено, что процесс распространения торфяного пожара в основном определяется горением коксика – конденсированного продукта пиролиза торфа. Согласно [3], углерод, содержащийся в торфе, почти полностью сгорает до CO<sub>2</sub>. Утверждается [3], что одна из причин беспламенного горения торфа заключается в его низкой теплопроводности. Высказана гипотеза о том, что горение торфа при его высоком влагосодержании объясняется перемещением влаги в на-

правлении теплового потока от фронта горения [3]. В работе [4] 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 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ , частицы зол и др.) в атмосферу. Утверждается, что процесс горения торфа происходит с химическим недожогом [4] и при сгорании кокса образуются  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , а 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 [5]. 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 горения рыхлого слоя торфа согласно [5] лимитируется скоростью распространения «раскаленных точек» по отдельным частицам торфа. Утверждается, что необходимо учитывать перенос теплоты конвекцией и излучением. Э.В. Коневым 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 [5] 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 [5]

$$\rho u(1 - m - n) = \rho_g v s,$$

где  $\rho$  – плотность сгоревшего материала,  $\rho_g$  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 итоге в [5] разработаны две полуэмпирические модели горения торфа. Недостатком моделей, предложенных Э.В. Коневым, является 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 была предложена в [6 – 8] в связи с исследованием термохимического разрушения тел при их входе в атмосферу с гиперзвуковой скоростью. В дальнейшем в работе [9] на основе обработки результатов наблюдения за реальными торфяными пожарами в Томской области, с использованием результатов [1 – 8] и методов механики сплошных реагирующих сред была 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, много-

компонентная диффузия и фильтрация газообразных продуктов пиролиза и воздуха в порах. В справочнике [10] 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 вследствие фильтрации. Кроме того, в этой системе уравнений не учитывается многофазность среды и нет выражения для скорости испарения воды. Интересные экспериментальные и теоретические результаты были получены в статье [11]. К недостаткам этой работы следует отнести игнорирование многофазности реагирующей среды при горении торфа и теории фильтрации. В дальнейшем был выполнен цикл работ по математическому моделированию торфяных пожаров [12 – 15], которые подтвердили физические основы математической модели [8]. Кроме того, в работе [13] была сделана попытка создания базы данных для математической модели. Затем в [16] была 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, а в работе [17] были получены некоторые аналитические решения задач о зажигании слоя торфа.

В статье [18] рассмотрены вопросы глобального мониторинга и оценки экологических последствий природных пожаров.

### Физическая модель почвенных и торфяных пожаров

Структура болота представлена на рис. 1, а на рис. 2 предложена схема основных физико-химических процессов, характеризующих механизм распространения торфяного пожара. Она получена в результате анализа экспериментальных и натурных данных о торфяных пожарах [1 – 5].

В дальнейшем эта схема использовалась при создании первого варианта общей математической модели торфяных пожаров [9] и при конкретном математическом моделировании возникновения и распространения торфяных пожаров в работах [12 – 17].

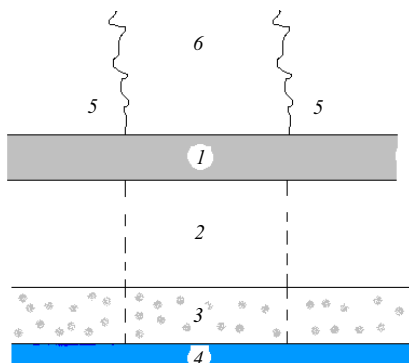


Рис. 1. Структура болота: 1 – подстилка; 2 – слой торфа; 3 – слой воды; 4 – дно водоема; 5 – границы зоны горения торфа; 6 – конвективная колонка над очагом торфяного пожара

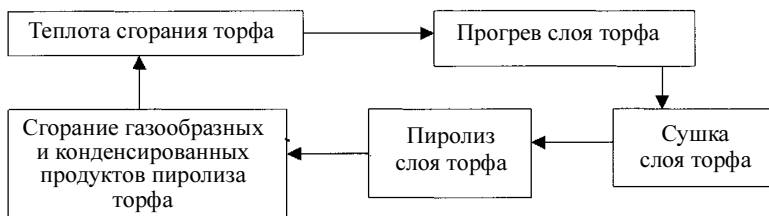


Рис. 2. Схема основных физико-химических процессов во фронте торфяного пожара

В работе [7] обсуждались экологические последствия торфяных пожаров. В июле 2002 г. в окрестностях Москвы загрязнение окружающей среды привело к снижению видимости до расстояния менее 100 метров. В воздухе находились дискретные частицы диаметром меньше микрона, формальдегид, полициклические ароматические углеводороды и окись углерода.

Схема основных физико-химических процессов и экологических последствий торфяных пожаров с учетом физико-химических процессов в зоне торфяного пожара представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема физико-химических процессов и экологических последствий, возникающих при торфяных пожарах

Стрелки показывают последовательность событий и символизируют процессы переноса теплоты и массы компонентов в слое торфа и контрольном объеме приземного слоя атмосферы над торфяником.

В итоге при торфяных пожарах образуется рыхлый слой серого пепла и облако (конвективная колонка) газообразных и дисперсных продуктов неполного сгорания торфа, в том числе оксида углерода и частиц сажи, которые оказывают негативное влияние на людей и животных в зоне действия торфяного пожара. В сентябре 2002 г. были случаи госпитализации некоторых москвичей в результате действия смога, образовавшегося в некоторых районах Московской области [18], так как задымление этой области в результате действия торфяных пожаров, длившееся с конца июля по начало сентября 2002 г., оказало вредное влияние на здоровье москвичей, поскольку дым торфяных пожаров содержит вредные для здоровья людей вещества [18] (частицы сажи и пепла) с диаметром менее микрона, формальдегид, полициклические ароматические углеводороды и окись углерода).

Схему процессов, представленную на рис. 3, можно рассматривать как физическую модель торфяного пожара второго поколения. В ее рамках более полно учитываются реальные физико-химические процессы в очаге торфяного пожара и окружающей среде.

Пожары на торфяниках затухают при прекращении доступа кислорода и при сильном увлажнении торфа, в результате чего увеличиваются тепловые потери от фронта торфяного пожара. Таким образом, предельные условия распространения торфяных пожаров имеют вид

$$c_e \leq c^*, W > W^*, \quad (1)$$

где  $c_e$  – равновесная концентрация кислорода в торфяной залежи, а индекс \* приспосабливается критическим значениям концентрации кислорода и влагосодержания, при которых горение торфа прекращается.

### **Система уравнений для математического моделирования процессов, возникающих в слое торфа при торфяных пожарах**

Известно, что наряду с лесными пожарами огромный ущерб окружающей среде и людям приносят торфяные пожары. Для их тушения отсутствуют эффективные методы, и поэтому привлечение больших материальных и людских сил для тушения торфяников в Московской области летом 1972 г. и летом 2002 г. не привело к успеху.

В связи с этим представляет интерес математическое моделирование торфяных пожаров для исследования закономерностей их распространения и определения предельных (критических) условий, при создании которых горение торфа прекращается.

В составе торфа 56 % углерода, 36 % кислорода, 6 % водорода и 2 % азота [3]. Энергетический баланс при горении торфяников обсуждался в работах [12, 13]. Очевидно, что представляют интерес уравнения состояния среды, баланса массы различных компонентов, количества движения и энергии. В отличие от верховых лесных пожаров при горении торфяников в порах торфа, очевидно, не образуются достаточно крупные горящие частицы, а дисперсная среда состоит из частичек дыма, размер которых значительно меньше радиуса пор. Вместе с тем, имея ввиду особенности процессов переноса при пожарах на торфяниках, можно сделать следующие упрощающие предположения:

1. Торфяник является двухтемпературной горючей недеформируемой пористо-дисперсной средой, состоящей из следующих фаз:  $\phi_1$  – сухое горючее органиче-

ское вещество из лигнина и целлюлозы;  $\varphi_2$  – вода, связанная с этим веществом;  $\varphi_3$  – коксик (из твердого продукта пиролиза торфа);  $\varphi_4$  – пористый слой золы;  $\varphi_5$  – газовая фаза;  $\varphi_6$  – частицы сажи;  $\varphi_7$  – частицы дыма.

2. Скорость и температура дисперсных частиц совпадают со скоростью и температурой несущей газовой фазы в соответствующей точке пространства.

3. Газодисперсная фаза состоит из тех же компонентов, что и в общей физико-математической модели лесных пожаров [16].

4. Силы инерции в уравнении движения газовой фазы малы по сравнению с силой давления, и уравнения сохранения количества движения можно использовать в форме квадратичного закона Дарси [10].

5. Влиянием обмена энергией между газовой фазы в порах дисперсными частицами дыма можно пренебречь по сравнению с теплообменом со стенками макропор, а последний учитывается выбором коэффициента объемной теплоотдачи.

6. Температура газовой фазы совпадает с температурой дисперсных частиц.

С учетом сделанных допущений и результатов, полученных в [1 – 6, 11, 16], имеем следующую систему уравнений в частных производных для описания физико-химических процессов, протекающих в слое торфа.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = Q, \quad j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

$$\varphi \overline{\text{grad}} p = - \left( \frac{\mu}{k_s} + \beta_s \frac{\rho |\vec{v}|}{\sqrt{k_s}} \right) \vec{v} + \rho \vec{F}, \quad \varphi = \sum_{i=5}^8 \varphi_i, \quad (3)$$

$$\frac{dT}{dt} \sum_{i=5}^7 \rho_i \varphi_i c_{pi} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda_{\text{эфф}j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial T}{\partial x_j} \left( \rho \sum_{\alpha=1}^N D_{\text{эфф}\alpha} C_{p\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) + \alpha_V (T_s - T) + c_{ps} (T_s - T) (1 - \alpha_c) R_{1s} + \quad (4)$$

$$+ c_{p7} (T_s - T) R_{2s} + q_{3s} R_3^{(s)} + q_{52} R_{52} + q_{53} R_{53} + q_{54} R_{54} + q_{2s} (R_{8-}^{(s)} - R_{8+}^{(s)});$$

$$\rho \frac{d_\alpha c_\alpha}{dt} = R_\alpha + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_{\text{эфф}\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) - c_\alpha Q, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda_{sj} \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) + q_{1s} R_{1s} - q_{2s} R_{2s} + q_{3s} R_{3s} + \alpha_V (T - T_s); \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}; \quad (7)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_C}{M_1} R_{3s} - \alpha_4 R_{3s} - R_6^{(s)}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s} - R_7^{(s)}; \quad (8)$$

$$\sum_{\alpha=1}^7 c_\alpha = 1, \quad \sum_{i=1}^7 \varphi_i = 1, \quad p = \rho_r RT \sum_{\alpha=1}^{N_r} \frac{c_{\alpha r}}{M_\alpha}, \quad N_r = N - 3; \quad (9)$$

$$Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_C}{M_1} R_3 + R_6^{(s)} + R_7^{(s)} + R_8^{(s)}. \quad (10)$$

Здесь  $t$  – время,  $\vec{r}$  – радиус-вектор любой точки в рассматриваемом слое торфа;  $x_j$  – декартовы координаты этой точки;  $Q$  – массовая скорость образования газодис-

персной фазы,  $\kappa_s$  – коэффициент фильтрации;  $c_{pi}$ ,  $c_{p7}$ ,  $c_{ps}$  – теплоемкости при постоянном давлении отдельных фаз, водяного пара и газообразных продуктов пиролиза;  $v_j$ ,  $|\vec{v}|$  – компоненты и модуль осредненной скорости газа и дисперсных частиц;  $\rho_i$  – истинная плотность  $i$ -й фазы;  $R_8^s = R_{8+}^s - R_{8-}^s$ ;  $R_{8-}^{(s)}$ ,  $R_{8+}^{(s)}$  – массовые скорости конденсации паров и испарения свободной воды в газодисперсной фазе;  $q_{1s}$ ,  $q_{2s}$ ,  $q_{3s}$  – теплоты пиролиза, испарения связанной воды и горения коксика;  $q_{52}$ ,  $q_{53}$ ,  $q_{54}$  – теплоты горения  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ;  $p$  – давление газа в порах;  $c_\alpha$  – массовая концентрация  $\alpha$ -компонента в газодисперсной среде;  $N$  – количество компонентов в газодисперсной среде;  $N_f = N - 3$  – количество компонентов газовой фазы;  $R_\alpha$  – массовая скорость образования  $\alpha$ -компонента газовой фазы в результате пиролиза торфа, испарения воды, гетерогенных и гомогенных химических реакций;  $R_6^{(s)}$ ,  $R_7^{(s)}$ ,  $R_8^{(s)}$  – массовые скорости образования частиц сажи, дыма и капелек воды при конденсации ее паров;  $\rho_f = \sum_{\alpha=1}^7 \rho_{\alpha f}$  – плотность газовой фазы;  $\rho_{\alpha f}$  – парциальные плотности компонентов газовой фазы (индекс 1 соответствует кислороду, 2 –  $\text{CO}$ ; 3 –  $\text{H}_2$ ; 4 –  $\text{CH}_4$ ; 5 –  $\text{CO}_2$ ; 6 –  $\text{N}_2$ ; 7 – парам воды  $\text{H}_2\text{O}$ );  $c_{\alpha f} = \rho_{\alpha f} / \rho_f$ ,  $\alpha = 1, 2, \dots$ ; 7 – массовые концентрации для смеси газов;  $c_\alpha = \rho_\alpha^0 / \rho$ ,  $\alpha = 1, 2, \dots$ ; 10 – массовые концентрации компонентов газодисперсной смеси, в которую входят все 7 компонентов газовой фазы и частиц пепла;  $\rho_\alpha^0$  – парциальные плотности отдельных компонентов газодисперсной фазы ( $\alpha = 1, 2, \dots, 10$ ; первые семь значений  $\rho_\alpha^0$  соответствуют компонентам газовой фазы, а последние 8 – частицам сажи; 9 – частицам дыма; 10 – капелькам воды);  $\rho = \rho_5 \varphi_5 + \rho_6 \varphi_6 + \rho_7 \varphi_7 + \rho_8 \varphi_8$  – плотность газодисперсной смеси;  $\rho_5 - \rho_8$  – истинные плотности газовой фазы, частиц сажи, частиц дыма и капелек воды в макропорах торфа;  $\lambda$  – коэффициент молекулярной теплопроводности газовой фазы;  $D_{\alpha \text{эфф}}$  – эффективный коэффициент диффузии  $\alpha$ -компонента, в том числе частиц сажи, золы и капелек воды;  $\alpha_V$  – коэффициент внутреннего теплообмена;  $R_{5\alpha}$  – массовые скорости изменения компонентов газовой фазы (индекс 1 соответствует скорости изменения –  $\text{O}_2$ , 2 соответствует горению  $\text{CO}$ , 3 –  $\text{H}_2$ , 4 –  $\text{CH}_4$ );  $R_{is}$  – массовые скорости образования (исчезновения) вещества конденсированных фаз (индекс 1 соответствует скорости пиролиза торфа, 2 – испарению воды, связанной с торфом, 3 – горению коксика);  $T$  и  $T_s$  – температуры газовой и конденсированной фаз;  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности пористой конденсированной фазы;  $q_k$  – тепловые эффекты химических реакций;  $k = 1, 2, 3$ , где 1 соответствует реакции пиролиза, 2 – массовой скорости испарения связанной воды, 3 – скорости горения коксика;  $\alpha_C$  – коксовое число торфа;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $M_c$  и  $M_1$  – атомарная и молекулярная массы углерода и кислорода;  $M_\alpha$  – молекулярная масса  $\alpha$ -компонента газовой фазы; как правило,  $\vec{F} = \vec{g}$  – ускорение силы тяготения;  $\lambda_{\text{эфф}}$  и  $\mu_{\text{эфф}}$  – эффективные коэффициенты теплопроводности и вязкости газа;  $\alpha_V = s\alpha_s$  – коэффициент объемного теплообмена в слое торфа;  $s$  – удельная поверхность торфа в данной торфяной залежи;  $\alpha_s$  – коэффициент теплообмена типичного элемента торфа с окружающей средой; в (10) нижний индекс « $j$ » соответствует реакциям с участием конденсированных веществ; верхний индекс « $s$ » – характеристикам дисперсной фазы.

### **О математическом моделировании процессов переноса в приземном слое атмосферы в окрестности очага торфяного пожара**

Над очагом торфяного пожара возникает конвективная колонка (облако дисперсных и газообразных продуктов горения торфа). Математическое описание параметров состояния этой колонки (скорости, давления, температуры, концентраций компонентов) представляет сложную задачу математической физики. Эта система уравнений может быть получена как частный случай из общей математической модели лесных пожаров [17]. Для упрощения этой системы были сделаны следующие допущения:

1. В результате торфяных пожаров над поверхностью торфяника возникает конвективная колонка из нагретого очагом пожара воздуха, а также продуктов пиролиза и горения торфа.

2. Для упрощения постановки задачи конвективная колонка считается осесимметричной.

3. Соответствующая система уравнений для моделирования процессов переноса в атмосфере над очагом торфяного пожара как частный случай может быть получена из системы уравнений, предложенной в [17] для описания состояния газодисперсной среды, возникающей при лесных пожарах.

4. На границе раздела атмосферы и очага торфяного пожара должны выполняться соотношения, выражающие законы сохранения массы, количества движения и энергии, примеры которых даны в [17, 18].

Кроме того, для математического моделирования такой нестационарной задачи, как зажигание и горение торфа, необходимы начальные условия, аналогичные условиям, представленным в [13].

### **База данных общей математической модели лесных и торфяных пожаров и методики численного решения задач**

В основную систему уравнений (2) – (10) входят теплофизические коэффициенты, скорости сушки и реакций пиролиза и горения и множество эмпирических постоянных, совокупность которых представляет базу данных общей математической модели. Компоненты базы данных определялись, с одной стороны, из литературных источников, а с другой – на основе экспериментальных исследований с помощью решения обратных задач механики реагирующих сред. Очень важно, чтобы все компоненты базы данных были согласованы друг с другом. Это осуществлялось методом их варьирования в пределах их точности и выбора из условия наилучшего согласования соответствующих расчетных и экспериментальных данных. Очень важно, при этом, чтобы решение прямых и обратных задач математической теории лесных пожаров при численном решении определялось с контролируемой точностью, что представляет собой сложную математическую задачу, так как основная система уравнений (2) – (10) нелинейна. Для численного решения прямых задач теории лесных пожаров использовались разработанные в ТГУ итерационно-интерполяционный метод и специальные методики численного счета, основанные на применении метода Патанкара – Сполдинга.

В систему уравнений (2) – (10), представленную выше, входит ряд параметров, которые характерны только для торфяных пожаров ( $k_s$ ,  $\beta_s$  – коэффициенты теплопроводности и диффузии, теплофизические и термокинетические коэффициенты). К сожалению, из-за ограниченности полноценных экспериментальных дан-



ных по возникновению и распространению торфяных лесных пожаров значительной базы данных для математической модели (2) – (10) до сих пор нет. Поэтому расчеты проводились с использованием правдоподобных допущений о порядках величин упомянутых выше величин и коэффициентах тепло- и массообмена, использованных при записи граничных условий. В качестве основных методов решения задач теории торфяных пожаров использовались итерационно-интерполяционный метод и некоторые приближенные аналитические методы.

### **Некоторые результаты исследования торфяных пожаров**

Основные результаты научных исследований, полученных в Томском государственном университете по проблеме моделирования торфяных пожаров, состоят в следующем:

1. Разработаны общие математические модели торфяных лесных пожаров первого и второго поколения, в рамках которых учитываются известные экспериментальные данные по исследованию торфяных пожаров [6, 17].

2. Созданы упрощенные двух- и трехфронтные модели для одномерного нестационарного распространения процесса горения на торфяниках [17, 18].

3. В результате математического моделирования исследованы основные закономерности физико-химических процессов в пористых реагирующих средах [1-16] Показано, что при инициировании горения торфяника источником повышенной температуры для одних значений коэффициентов тепло- и массообмена, описывающих взаимодействие слоя горящего торфа с атмосферой и с инертной почвой, на которой расположен этот слой, может возникнуть поверхностное горение торфа вблизи границы раздела «атмосфера – горящий слой торфа», а для других – волна тления уходит в глубь торфяника [18].

4. С использованием упрощенной математической модели торфяных пожаров [18] была решена задача о стационарном распространении фронта торфяного пожара. Было установлено, что структура фронта торфяного пожара в качественном отношении совпадает со структурой фронта лесного пожара и горение носит диффузионный характер, т.е. лимитируется притоком окислителя. Расчеты показали, что скорость распространения  $\omega$  сильно зависит от начальной пористости торфа и коэффициента массообмена с окружающей средой и с ростом этих величин  $\omega$  растет вследствие наличия запаса кислорода в порах и притока  $O_2$  во фронт торфяного пожара из приземного слоя атмосферы.

5. Для создания баз данных, характеризующих свойства реагирующих пористых сред, разработаны методы решения обратных задач математической физики.

### **Выводы и предложения по развитию теории торфяных пожаров**

Проблема математического и физического моделирования торфяных пожаров далеко не исчерпана. Представляет интерес исследование следующих принципиальных вопросов:

1. Создание экспериментальных установок и методик для определения теплофизических характеристик для определения коэффициентов теплопроводности и диффузии в слое торфа в обычных условиях и при распространении торфяных пожаров.

2. Создание экспериментальных установок и методик для определения термokinетических постоянных, характеризующих процессы сушки и пиролиза торфа.

3. Создание детерминированно-вероятностной модели для прогноза возникновения торфяных пожаров в конкретных метеорологических и техногенных условиях с использованием геоинформационных технологий.

4. Создание компьютерных программ для прогноза развития процесса горения торфяных залежей, а также экологических последствий горения торфяников с использованием геоинформационных технологий.

5. Исследование предельных условий распространения торфяных пожаров и разработка новых способов и устройств для борьбы с ними.

Решение этих вопросов позволит в первом приближении завершить создание математической теории торфяных пожаров и использовать ее для создания как способов и средств для борьбы с торфяными пожарами, так и прогнозов экологических последствий торфяных пожаров. На основании имеющегося опыта исследования задач теории лесных пожаров [17 – 19] можно утверждать, что для их решения необходимо сочетать экспериментальные и теоретические методы исследования. В качестве методической основы теории торфяных пожаров целесообразно использовать механику многофазных реагирующих сплошных сред и теорию горения и метод математического моделирования с применением технологии распараллеливания вычислительных операций на суперкомпьютерах, что позволит существенно уменьшить затраты машинного времени и получать поля температур и другие характеристики торфяного пожара в режиме, опережающем реальное время развития торфяного пожара. Для сокращения числа эмпирических входных данных, например эмпирических коэффициентов тепло- и массообмена, целесообразно использовать теорию сопряженных задач механики реагирующих сред и методы решения некорректных задач математической физики [20].

Поскольку в рамках общей системы уравнений (2) – (10) учитывались основные физико-химические процессы, определяющие распространение пожара, то с помощью нее можно давать прогноз экологических последствий торфяных пожаров.

Кроме того, в рамках этой модели можно определить поля плотности излучения над очагом торфяного пожара в различные моменты времени, что в принципе позволяет с использованием метода акад. А.Н. Тихонова [21] и математической теории катастроф создать новую методику обнаружения и диагностики торфяных пожаров по данным аэрокосмического мониторинга. Очевидно, что при этом целесообразно использовать современные геоинформационные технологии и спутниковый мониторинг торфяных пожаров в реальном времени для принятия своевременных решений по борьбе с торфяными пожарами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фарберов И.Л. О процессах пиролиза // Теоретический и окислительный пиролиз топлив и высокополимерных материалов: Сб. статей. М.: Наука, 1966. С. 3 – 8.
2. Курбатский Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1970. С. 3 – 5.
3. Гундар С.В. Об энергетическом балансе беспламенного горения органической части почвы при лесных пожарах // Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1974. С. 74 – 82.
4. Гундар С.В. О газообмене при почвенных пожарах // Проблемы лесной пирологии: Сб. статей. Красноярск: Институт леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, 1974. С. 137 – 146.
5. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 239 с.