

ТЕПЛОМАССОБМЕН В МНОГОФАЗНЫХ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ ПРИРОДНЫХ СРЕДАХ И ТЕОРИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

А. М. Гришин

Томский государственный университет, Томск, Россия

Известно, что природные (лесные, степные и торфяные) пожары наносят огромный вред окружающей среде и человечеству в целом. В настоящее время в мире ежегодно регистрируется около 7 000 000 природных пожаров. Например, в США в мае 2000 года в результате действия лесного пожара сгорели деревянные строения в городе Лос-Аламосе. Экономический ущерб составил 1 200 000 000 долларов. В России в результате действия лесных пожаров ежегодно погибают от 15 000 до 18 000 человек, а экономический ущерб достигает 13 000 000 000 рублей. В Томском государственном университете (ТГУ) с использованием основных понятий и методов теории теплообмена еще в XX веке были разработаны общие математические модели лесных и торфяных пожаров.

На основе обобщения известных экспериментальных и теоретических данных в [1–5] была разработана математическая модель лесных пожаров первого поколения, в рамках которой лес моделировался пористо - дисперсной средой, а ее костяк считался недеформируемым твердым телом. Кроме того, предложена универсальная физическая модель энергетики лесных и степных природных пожаров, согласно которой теплота, выделившаяся при сгорании ЛГМ за счет излучения свободной и вынужденной конвекции, передается несгоревшим ЛГМ, в результате чего они прогреваются, высушиваются и пиролизуются. Затем газообразные и конденсированные продукты пиролиза сгорают и процесс повторяется в указанном порядке.

Эти математические модели использовались учеными Канады, США, Франции и Португалии. В данной работе дается обзор работ, выполненных в ТГУ за последние 5 лет, в результате чего были созданы уточненные теплофизические модели горения растительных горючих материалов в зоне природных (лесных, степных и торфяных) пожаров и получены новые результаты по математическому моделированию природных пожаров [6–9].

Уточненная физико-химическая модель лесных и степных пожаров. Модель первого поколения, как выяснилось, в целом адекватна изучаемому явлению и может служить основой для создания математической теории лесных пожаров. Вместе с тем возникла необходимость уточнения этой модели и создания общей математической модели верховых и низовых лесных пожаров второго поколения. В частности, известно [10], что колебания элементов теплообменников (труб и стержней различного диаметра и форм) сильно влияют на характеристики их тепло- и массообмена с высокоэнтропийным потоком. В [10] показано, что несимметричный отрыв потока при обтекании стержня возбуждает собственные колебания трубы, которые могут усиливаться, если частота наиболее представительных турбулентных пульсаций потока близка к собственной частоте колебаний. Кроме того, как показывают наблюдения, при массовых лесных пожарах имеет место эффект задымленности больших территорий [1] и образование облаков над зоной пожара в результате конденсации водяного пара, образующегося при сгорании ЛГМ. Крупный лесной пожар можно рассматривать как своеобразный метеотрон – устройство для искусственного вызывания осадков. Поэтому предложенная в [4] схема физико-химических процессов во фронте лесного пожара (рис. 1, а) должна быть

дополнена соответствующей схемой [6] тепло- и массопереноса в приземном слое атмосферы (рис. 1, б).

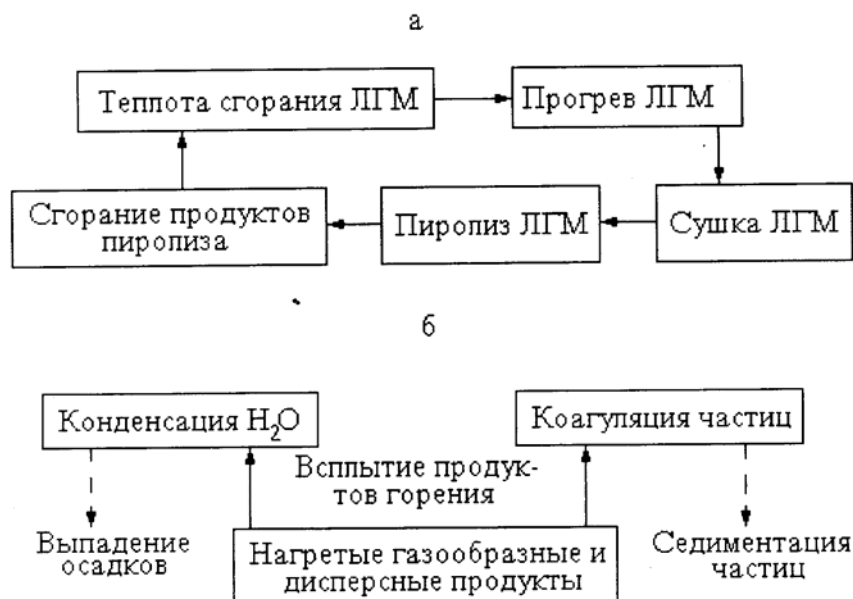


Рис. 1. Схемы физико-химических процессов в зоне лесного (степного) пожара (а) и в приземном слое атмосферы (б)

В последнее время в [6, 8] разработана схема изменения агрегатного состояния и химического состава во фронте лесного пожара (см. рис. 2).

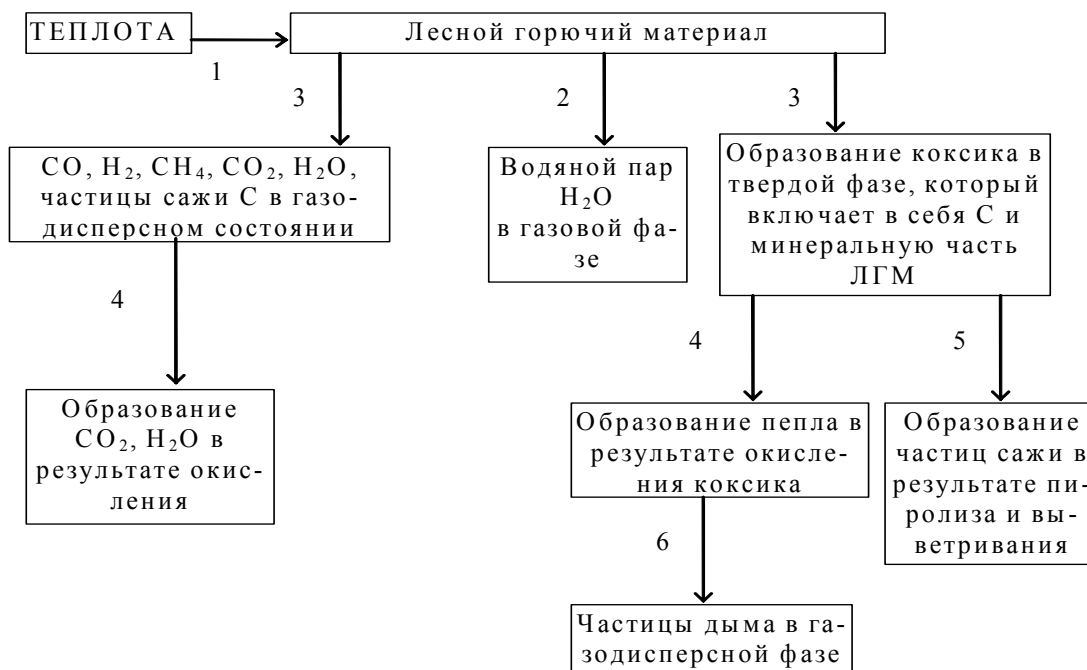


Рис. 2. Схема изменения агрегатного состояния и химического состава лесных (степных) горючих материалов во фронте лесного пожара: стрелки обозначают: 1- подвод теплоты в результате конвекции, теплопроводности и излучения; 2-сушка ЛГМ; 3-пиролиз ЛГМ; 4- окисление газообразных, конденсированных и дисперсных продуктов пиролиза; 5- выветривание частиц сажи из коксика; 6-выветривание частиц пепла и образование частиц дыма

На основании вышеизложенного можно считать, что лес в процессе пожара представляет собой многофазную многоярусную пористо - дисперсную, пространственно - неоднородную среду, которая состоит из сухого органического вещества (объемная доля φ_1), воды в жидко - капельном состоянии (φ_2), связанной с этим веществом, конденсированного продукта пиролиза (коксика, φ_3), конденсированного продукта горения коксика (пепла, φ_4), газовой фазы (φ_5), дисперсных частиц сажи (φ_6) и золы (φ_7), а также капель воды (φ_8) над очагом лесного пожара. Элементы ЛГМ (тонкие веточки, хвоинки, листва) имеют одну температуру, а газовая и дисперсная фазы - другую. Под влиянием ветра элементы среды колеблются. Эффект изгибных колебаний этих элементов, или аэроупругость среды, сказывается только на значениях силы сопротивления и коэффициентов тепло- и массообмена элементов ЛГМ с газовой фазой, т.е. среда считается квазитвердой (почти недеформирующейся при порывах ветра). Тепловая энергия, выделившаяся во фронте пожара в результате свободной и вынужденной конвекции и излучения, передается ЛГМ, которые нагреваются, высушиваются и затем разлагаются на газообразные горючие и инертные продукты пиролиза и конденсированный горючий продукт пиролиза (коксик), после чего газообразные и конденсированные продукты сгорают и процесс повторяется сначала. Предполагается, что длина свободного пробега фотона ℓ_ϕ при лесном пожаре много меньше характерных размеров лесного фитоценоза \bar{r} и \bar{h} , где \bar{r} - эффективный диаметр макропор (среднее расстояние между отдельными деревьями), а \bar{h} - средняя высота слоя ЛГМ. Оптические свойства лесных горючих материалов зависят от длины волны излучения и изменяются с ростом температуры. Над фронтом пожара имеет место конвективная колонка, которая возникает в результате свободной конвекции и содержит большое количество паров воды. Последние могут конденсироваться с образованием капель воды в верхних, относительно более холодных слоях атмосферы над зоной пожара.

Основная система уравнений. Используя принятые выше опущения, произвольную декартову систему координат и тензорную символику для описания процессов тепло- и массопереноса в зоне лесного и степного пожара, имеем следующую систему уравнений [6, 7]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = Q, \quad j = 1, 2, 3, \quad \varphi = \sum_{i=5}^8 \varphi_i; \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\varphi \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho F_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - Q v_i - \rho c_d s \left(v_i |\vec{v}| + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \overline{(v'_i - v'_{is})^2} \cos \alpha_i + \sum_{j=1}^3 \overline{(v'_i - v'_{is})(v'_j - v'_{js})} \cos \alpha_j \right), \quad \vec{F} = \vec{g} + (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \times \vec{\Omega} + 2\vec{v} \times \vec{\Omega}, \quad (2)$$

$i, j = 1, 2, 3;$

$$\frac{dT}{dt} \sum_{i=5}^8 \rho_i \varphi_i c_{pi} = \sum_{i=5}^8 \varphi_i \frac{dp}{dt} + \rho F_j v_j + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{\varphi j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial T}{\partial x_j} \left(\rho \sum_{\alpha=1}^N D_{\varphi \alpha} c_{p\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) -$$

$$-(\kappa + \kappa^{(s)}) [cU_R - B(T)] + \alpha_V (T_s - T) + c_{ps} (T_s - T)(1 - \alpha_c) R_{1s} +$$

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

$$\rho \frac{d_\alpha c_\alpha}{dt} = R_\alpha + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{\phi\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) - c_\alpha Q, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i \phi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{sj} \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) - \kappa_s [cU_R - B(T_s)] + q_{1s}R_{1s} - q_{2s}R_{2s} + q_{3s}R_{3s} + \alpha_V(T - T_s); \quad (5)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = -R_{2s}; \quad (6)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial t} = \alpha_C R_{1s} - \frac{M_C}{M_1} R_{3s} - \alpha_4 R_{3s} - R_6^{(s)}, \quad \rho_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s} - R_7^{(s)}; \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^8 c_\alpha = 1, \quad \sum_{i=1}^8 \phi_i = 1, \quad P = \rho_e RT \sum_{\alpha=1}^{N_g} \frac{c_{\alpha\Gamma}}{M_\alpha}, \quad N_\Gamma = N - 3; \quad (8)$$

$$Q = (1 - \alpha_c)R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_C}{M_1} R_3 + R_6^{(s)} + R_7^{(s)} + R_8^{(s)}; \quad (9)$$

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}^{(1)} + \tau_{ij}^{(2)}, \quad \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Здесь t - время, \vec{r} - радиус-вектор любой точки; x_j - декартовы координаты этой точки; κ , $\kappa^{(s)}$, κ_s - интегральные коэффициенты поглощения газа, дисперсных частиц и конденсированной фазы; B - функция Планка; U_R - интегральная плотность излучения; 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; v' , v'_s - пульсационные составляющие скорости потока и изгибных колебаний элементов ЛГМ; ρ_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 испарения горения CO , H_2 , CH_4 ; p - давление газа; $\tau_{ij}^{(1)}$, $\tau_{ij}^{(2)}$ - компоненты тензоров касательных (тангенциальных) напряжений для ламинарных и турбулентных течений; c_α - массовая концентрация α -компонента в газодисперсной среде; N - количество компонентов в газодисперсной среде; $N_\Gamma = N - 3$ - количество компонентов газовой фазы; R_α - массовая скорость образования α -компонента газовой фазы в результате пиролиза ЛГМ, 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; ρ

$= \sum_{\alpha=1}^7 \rho_{\alpha\Gamma}$ – плотность газовой фазы; $\rho_{\alpha\Gamma}$ – парциальные плотности компонентов газовой фазы (индекс 1 соответствует кислороду, 2 – CO; 3 – H₂; 4 – CH₄; 5 – CO₂; 6 – N₂; 7 – парам воды); $c_{\alpha\Gamma} = \rho_{\alpha\Gamma} / \rho_{\Gamma}$, $\alpha = 1, 2, \dots, 7$ – массовые концентрации для смеси газов; $c_{\alpha} = \rho_{\alpha}^0 / \rho$, $\alpha = 1, 2, \dots, 10$ – массовые концентрации компонентов газодисперсной смеси; ρ_{α}^0 – парциальные плотности отдельных компонентов газодисперсной фазы ($\alpha=1, 2, \dots, 10$; первые семь значений ρ_{α}^0 соответствуют компонентам газовой фазы, а последние 8 – частицам сажи; 9 – частицам дыма; 10 – капелькам воды); $\rho = \rho_5 \Phi_5 + \rho_6 \Phi_6 + \rho_7 \Phi_7 + \rho_8 \Phi_8$ – плотность газодисперсной смеси; $\rho_5 - \rho_8$ – истинные плотности газовой фазы, частиц сажи, частиц дыма и капелек воды; D_{α} , D_T – коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузий; λ , λ_T – коэффициенты молекулярной и турбулентной теплопроводностей газовой фазы; $D_{N-1\text{эф}}$, $D_{N\text{эф}}$ – эффективные коэффициенты диффузии частиц дыма, где $N-2$ соответствует частицам сажи, а $N-1$ – частицам золы, а N – каплям воды; $D_{\alpha\text{эф}} = D_{\alpha} + D_T$ – эффективный коэффициент диффузии α -компонента; α_v – коэффициент внутреннего теплообмена; $R_{5\alpha}$ – массовые скорости горения компонентов газовой фазы (индекс 2 соответствует горению CO, 3 – H₂, 4 – CH₄; R_{is} – массовые скорости образования (исчезновения) вещества конденсированных фаз (индекс 1 соответствует скорости пиролиза ЛГМ, 2 – испарению воды, связанной с ЛГМ, 3 – горению коксика); T и T_s – температуры газовой и конденсированной фаз; λ_s – коэффициент теплопроводности пористой конденсированной фазы; \vec{q}_R , \vec{q}_{Rs} – векторы плотности лучистого теплового потока в газодисперсной фазе и пористой среде; q_{Rj} , q_{Rjs} – компоненты векторов \vec{q}_R и \vec{q}_{Rs} ; $\cos \alpha_i = v_i / v$ – направляющие косинусы вектора средней скорости газодисперсной фазы; q_k – тепловые эффекты химических реакций; $k = 1, 2, 3$, где 1 соответствует реакции пиролиза, 2 – массовой скорости испарения связанной воды, 3 – скорости гетерогенного коксика; α_C – коксовое число ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; M_c и M_1 – атомарная и молекулярная массы углерода и кислорода; M_{α} – молекулярная масса α -компонента газовой фазы; \vec{g} – ускорение силы тяготения; $\vec{\Omega}$ – угловая скорость вращения Земли; $\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_T$ и $\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_T$ – эффективные коэффициенты теплопроводности и вязкости газа; C_d – эмпирический коэффициент сопротивления растительности; $\alpha_v = s \alpha_s$ – коэффициент объемного теплообмена элемента ЛГМ со средой; s – удельная поверхность ЛГМ в данном ярусе леса; α_s – коэффициент теплообмена типичного элемента ЛГМ с окружающей средой; F_j – компоненты вектора \vec{F} ; нижний индекс “ j ” соответствует реакциям с участием конденсированных веществ; верхний индекс “ s ” – характеристикам дисперсной фазы.

В уравнении (4) полная производная для компонентов газовой фазы при $\alpha = 1, 2, \dots, N-3$ имеет вид

$$\frac{d_{\alpha}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial}{\partial x_3},$$

а для компонентов дисперсной фазы $\alpha = N-2, N-1, N$:

$$\frac{d_{\alpha}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + (v_3 - v_{3\alpha}^{(s)}) \frac{\partial}{\partial x_3}.$$

Здесь $v_{3\alpha} = 18g\mu / \rho_{\alpha}^{(s)} d_{\alpha}^2$ – стоксова скорость оседания дисперсных частиц; μ – молекулярная динамическая вязкость газовой фазы; g – ускорение свободного падения; $\rho_{\alpha}^{(s)}$ и d_{α}^2 – плотность и диаметр дисперсных частиц.

Таким образом, в соответствии с [4, 8] среда считается двухскоростной, что позволяет учесть седиментацию - оседание частиц под действием силы тяжести.

Уравнение (1) представляет собой закон сохранения массы газодисперсной фазы; уравнение (2) – закон сохранения количества движения газодисперсной фазы в проекциях на оси декартовой системы координат. В (2) входят члены, обусловленные силовым взаимодействием газодисперсного потока с костяком пористо-дисперсной среды. Уравнение (3) представляет собой закон сохранения энергии в газодисперсном потоке с учетом переноса энергии как конвекцией, так и излучением, а также выделения и поглощения тепловой энергии в результате различных физических и химических процессов. Уравнение (4) – закон сохранения и изменения массы отдельных компонентов в газодисперсном потоке с учетом процессов конвекции и диффузии, а также физико-химических превращений. Уравнение (5) является законом сохранения энергии в конденсированной фазе, а уравнения (6) описывают кинетику пиролиза и сушки ЛГМ. Уравнения (7) описывают баланс массы коксика – промежуточного конденсированного продукта пиролиза ЛГМ и пепла – конечного конденсированного продукта горения. Первое и второе соотношения (8) представляют собой алгебраический интеграл основной системы уравнений, а третье – уравнение состояния для газовой фазы. Соотношение (9) определяет скорость генерации газовой и дисперсной фазы в результате испарения и химических реакций, а выражения (10) – тангенциальные компоненты тензора напряжений через производные от компонентов скорости осредненного течения.

Как показано в [7, 9] система уравнений (1)–(10) может быть использована для математического моделирования степных пожаров.

Математическая модель торфяных пожаров второго поколения. Известно, что наряду с лесными пожарами огромный ущерб окружающей среде и людям приносят торфяные пожары. Для тушения этих пожаров 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. Поэтому представляет интерес математическое моделирование торфяных пожаров для исследования закономерностей их распространения и определения предельных (критических) условий, при создании которых горение торфа прекращается.

Известно, что торф является продуктом неполного разложения растительных материалов в условиях избыточной влажности и недостаточной аэрации [11, 12]. Поэтому его в процессе торфяного пожара можно моделировать пористой многофазной реакционноспособной средой. В составе торфа 56 % углерода, 36 % кислорода, 6 % водорода и 2 % азота. В отличие от верховых пожаров при горении торфяников в порах, 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: Φ_1 – сухое горючее органическое вещество¹; Φ_2 – вода, связанная с этим веществом; Φ_3 – коксик (твердого продукта пиролиза торфа); Φ_4 – зола; Φ_5 – газовая фаза; Φ_6 – частицы сажи; Φ_7 – частицы дыма и Φ_7 – капельки воды.

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

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

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 [6].

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 [6, 8], имеем следующую систему уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = Q, \quad j = 1, 2, 3, \quad (11)$$

$$\varphi \overrightarrow{\text{grad}} p = - \left(\frac{\mu}{k_s} + \beta_s \frac{\rho |\vec{v}|}{\sqrt{k_s}} \right) \vec{v} + \rho \vec{F}, \quad \varphi = \sum_{i=5}^8 \Phi_i, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} \sum_{i=5}^8 \rho_i \Phi_i c_{pi} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{\varphi j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial T}{\partial x_j} \left(\rho \sum_{\alpha=1}^N D_{\varphi \alpha} C_{p\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) + \\ & + \alpha_V (T_s - T) + c_{ps} (T_s - T) (1 - \alpha_c) R_{1s} + \end{aligned} \quad (13)$$

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

$$\rho \frac{d_\alpha c_\alpha}{dt} = R_\alpha + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{\varphi \alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) - c_\alpha Q, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \rho_i \Phi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{sj} \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) + \\ & + q_{1s} R_{1s} - q_{2s} R_{2s} + q_{3s} R_{3s} + \alpha_V (T - T_s); \end{aligned} \quad (15)$$

¹ Сухое органическое вещество состоит из лигнина и целлюлозы.

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}; \quad (16)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_C}{M_1} R_{3s} - \alpha_4 R_{3s} - R_6^{(s)}, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s} - R_7^{(s)}; \quad (17)$$

$$\sum_{\alpha=1}^8 c_\alpha = 1, \sum_{i=1}^8 \varphi_i = 1, P = \rho_G RT \sum_{\alpha=1}^{N_G} \frac{c_{\alpha G}}{M_\alpha}, N_G = N - 3; \quad (18)$$

$$Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_C}{M_1} R_3 + R_6^{(s)} + R_7^{(s)} + R_8^{(s)}; \quad (19)$$

Здесь выбрана декартова система координат, ось z которой направлена вертикально вверх;

$\rho = \sum_{i=5}^8 \rho_i \varphi_i$ – плотность газодисперсной смеси в порах пласта торфа; $\rho_e = \rho - \rho^{(s)}$ –

плотность газа в порах; $\rho^{(s)}$ – плотность дисперсных частиц в порах; $c_{\rho_{\alpha G}} / \rho_G$ –

массовая концентрация α -компонента газовой фазы в порах; k_s – коэффициент проницаемости торфа; β_s – эмпирический коэффициент в квадратичном законе сопротивления при фильтрации, а остальные обозначения полностью соответствуют обозначениям, приведенным в предыдущем разделе.

В отличие от уравнений, приведенных в предыдущем разделе, уравнение сохранения количества движения записано в виде закона Дарси.

Надо сказать, что в данном случае использована гиперболическая форма уравнений сохранения массы газовой и дисперсной фаз, а все потоковые величины определяются по формулам, данным выше с учетом того, что $T = T^{(s)}$.

Некоторые результаты математического и физического моделирования лесных пожаров. Общая математическая модель лесных пожаров использовалась многими исследователями [13–16] для решения ряда задач математической теории лесных пожаров.

К сожалению, приходится констатировать, что существующая в настоящее время база данных еще недостаточна для всестороннего количественного анализа процесса распространения верховых и низовых лесных пожаров.

Тем не менее, уже сейчас на основе полученных численных и аналитических результатов можно сделать следующие выводы:

1. Большой лесной пожар представляет собой принципиально нестационарный и трехмерный аэротермохимический процесс, в котором значительную роль играет сила Кориолиса [1].
2. Полное физическое моделирование лесных пожаров невозможно без полного совпадения характеристик природы и модели [1].
3. Типы лесных пожаров удастся идентифицировать при помощи таких существенных критериев подобия, как числа Струхала, Фруда, Кориолиса, Рейнольдса, безразмерного дувла и безразмерной температуры во фронте горения [1].

4. В результате численного решения плоских двумерных задач аэродинамики лесных пожаров установлено, что при взаимодействии ветра с вдуваемыми из фронта лесного пожара нагретыми продуктами горения имеют место два предельных типа течения: однонаправленное (струйный пограничный слой) и конвективная колонка (наклонная струя нагретых газодисперсных продуктов сгорания). Для последнего типа течения перед фронтом лесного пожара реализуется крупный тороидальный вихрь (см. рис. 3, 4), в результате чего скорости потока вблизи подстилающей поверхности и в приземном слое атмосферы имеют разное направление, причем скорость ветра вблизи фронта лесного пожара в приземном слое атмосферы увеличивается [1, 2, 11, 14].

5. Численно показано, что напряжение трения перед фронтом пожара резко падает, а тепловой поток меняет знак, что свидетельствует о том, что однонаправленное течение и теплоперенос в приземном слое атмосферы в окрестности фронта пожара при значительной скорости ветра имеют характер тепловой завесы (см. рис. 5). Установлено, что в этом случае свободная конвекция нагретых продуктов горения относительно слабо влияет на величину конвективного теплового потока перед фронтом пожара [1, 2].

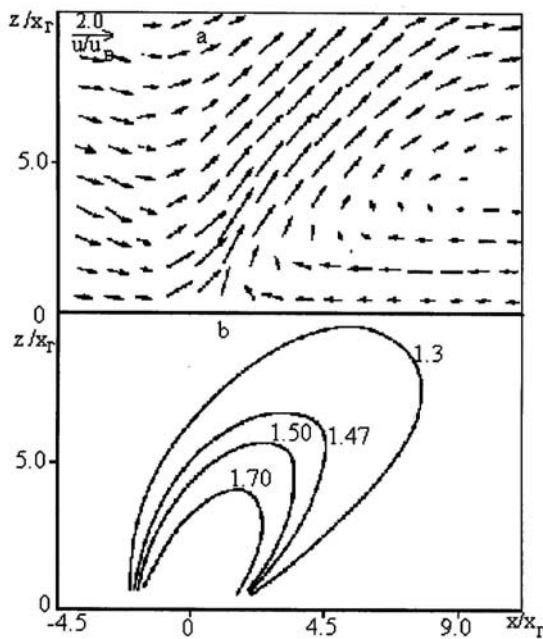


Рис. 3. Поле скоростей (а) и изотермы (б) над плоским фронтом лесного пожара при наклонной конвективной колонке [2, 14]: U_B - скорость ветра на высоте 10 м вдали от фронта пожара

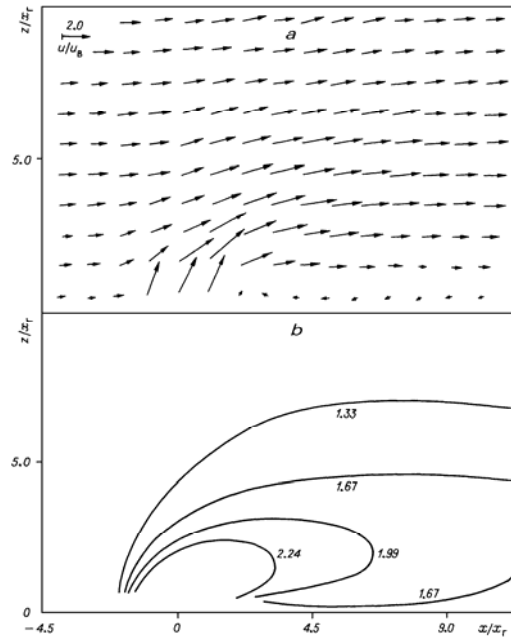


Рис. 4. Поле скоростей (а) и изотермы (б) над плоским фронтом лесного пожара при струйном пограничном слое (течение типа «плюмаж») [2, 14]: U_B - скорость ветра на высоте 10 м вдали от фронта пожара

6. Исследованы закономерности распространения горящих частиц перед фронтом пожара. Показано, что с ростом скорости ветра, угла вылета и температуры частиц дальность их полета возрастает, а с ростом их размера и плотности - убывает [17].

7. В результате численного решения задачи аэродинамики осесимметричного лесного пожара показано, что в его окрестности имеет место крупный тороидальный вихрь, обеспечивающий тепло- и массообмен зоны горения с внешней средой (см. рис 6). Численно, с использованием точной K - ε -модели турбулентности, показано, что для описания установившихся турбулентных течений может быть использована равновесная K - ε -модели турбулентности (модифицированная модель Прандтля), а для

неустановившихся течений использование упрощенной модели приводит к значительным погрешностям в определении полей скорости и температуры [13].

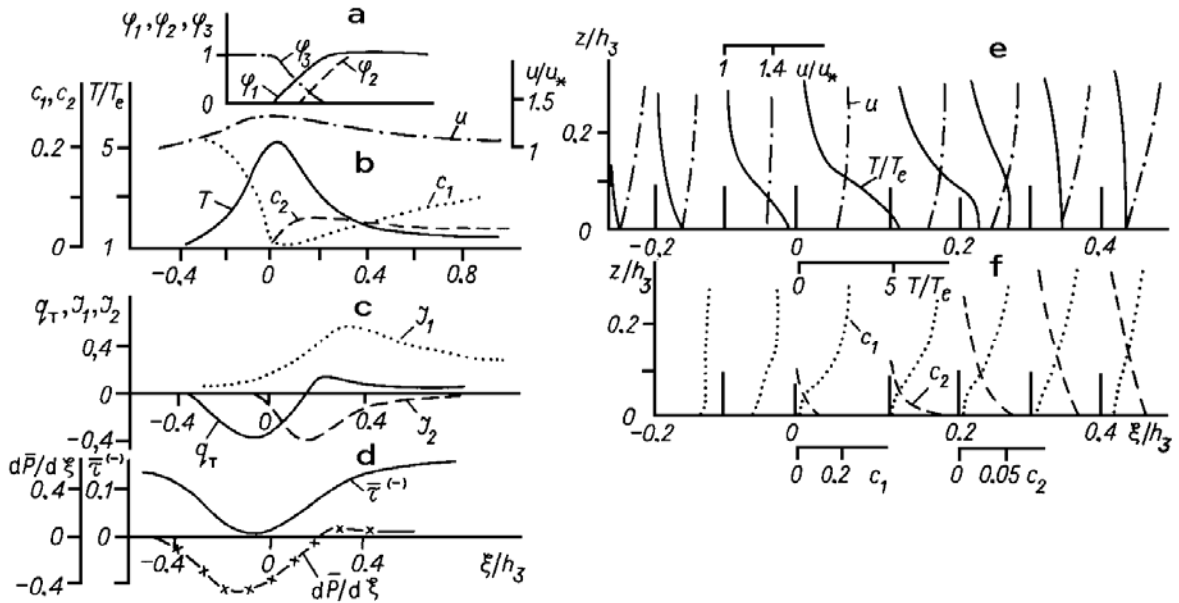


Рис. 5. Профили параметров состояния среды во фронте вершинного пожара и в приземном слое атмосферы над ним [2, 15] в системе координат, связанной с фронтом пожара: $U_{*\infty} = 8$ м/с – равновесная скорость ветра; $T_e = 293$ К – температура окружающей среды; $h_3 = 5$ м – высота верхней границы крон деревьев; $W = 66,6$ % – влагосодержание; J_1, J_2 – плотности диффузионных потоков кислорода и газообразных горючих продуктов пиролиза; q_T – плотность турбулентного теплового потока; $\bar{\tau} = \tau / \rho_{5\infty} U_{*\infty}^2$ – безразмерное напряжение трения, $\bar{P} = P / \rho_{5\infty} U_{*\infty}^2$ – безразмерное давление, P_e – давление в окружающей среде; $\bar{\phi}_2 = \phi_2 / \phi_{2H}$; c_1 и c_2 – концентрации кислорода и горючих продуктов пиролиза

8. В рамках теории термиков численно показано, что на траекторию центра масс термика, возникающего при лесном пожаре, значительное влияние оказывает сила Кориолиса [1, 2].

9. Предложена самосогласованная математическая модель верховых лесных пожаров, точно в рамках законов сохранения массы, импульса и энергии учитывающая тепло- и массообмен между приземным слоем атмосферы и пологом леса во время лесного пожара. В результате численного решения задачи о возникновении и распространении верхового пожара получена та же структура фронта, что и в опытах, и установлено, что горение во фронте пожара носит диффузионный характер, т.е. лимитируется притоком окислителя и газообразных горючих продуктов пиролиза в зону горения. Показано, что основное количество энергии в этой зоне выделяется при горении газообразных продуктов пиролиза [1, 2, 8].

10. Теоретически, методом малых возмущений [2] и численно исследована устойчивость контура лесного пожара с учетом сложной структуры его фронта. Доказано, что контур лесного пожара абсолютно неустойчив по отношению к малым возмущениям. Для больших лесных пожаров, когда поперечный размер очага пожара превышает некоторую величину, контур теряет первоначальную форму и становится выпукло-вогнутым (см. рис.

7). Этот результат согласуется с данными наблюдений за реальными лесными пожарами [1, 2, 8].

11. Численно исследовано зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии [16, 18].

12. Исследованы предельные условия распространения низовых и верховых лесных пожаров, что позволило разработать новые способы борьбы с ними [1, 2].

13. В результате математического и физического моделирования процессов тепло- и массопереноса в лесном фитоценозе во время лесного пожара показано, что для вершинных верховых лесных пожаров, распространяющихся в продуваемых лесных фитоценозах, основное количество энергии из фронта пожара в фитоценоз перед ним передается за счет вынужденной конвекции (ветра), в результате которой факел пламени сильно отклоняется от вертикали (см. рис. 6), а для низовых и повальных верховых лесных пожаров большое значение имеет перенос энергии излучением [1, 15, 16, 18].



Рис. 6. Фронт повального верхового пожара, распространяющегося по лесной полосе из соснового молодняка. Ширина полосы 3 м., длина 10 м, высота соснового древостоя 3,5 м, напочвенный покров - слой лишайника *Cladonia* толщиной 0,1 м

14. В результате упрощающих допущений получены приближенные аналитические формулы для скорости распространения низовых и верховых лесных, а также степных пожаров, плотности суммарного теплового потока и ширины фронта лесного пожара, которые удовлетворительно согласуются с результатами численных расчетов [1, 2, 9].

15. Численно и аналитически установлено, что лесопожарные заслоны более эффективны в противопожарном отношении, чем лесопожарные разрывы [2, 6].

16. В результате математического моделирования перехода низового лесного пожара в верховой было установлено, что для соснового древостоя это явление имеет место при высоте нижней границы крон деревьев над высотойна почвенного покрова около 0,7 м при условии, что удельный тепловой импульс в полог леса не меньше 2600 кДж/м^2 . Это согласуется с экспериментальными данными [5, 6]. Установлено, что коэффициент излучения ϵ является функцией времени, которая параметрически зависит от лесопирологических свойств низового пожара и лесных фитоценозов. Показано, что

зажигание полога леса носит газофазный характер, а игнорирование двухтемпературности среды в пологе леса приводит к уменьшению критической высоты полога леса на 40-50 % [16].

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 ТГУ, 1981. 277 с.
- [2] Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
- [3] Гришин А.М. Физика лесных пожаров Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. 218 с.
- [4] Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложение // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, №5. С. 34–54.
- [5] Grishin A.M. Mathematical modeling of forest fire and new methods of fighting them // Translated of forest fires and new method of fighting them (Translated by Marek Czuma, L. Chikina and L. Smokotina, Edited by Frank Albin) Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997. 390 p.
- [6] Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и новые способы борьбы с ними // Успехи механики. 2002. Т.1, №4. С. 41-89.
- [7] Гришин А.М. Общая математическая модель степных пожаров и ее приложения // Экологические системы и приборы. 2004. №12. С. 25-29.
- [8] Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Часть 2. Кемерово: Изд-во «Практика». 2005. 560 с.
- [9] Бурасов Д.М., Гришин А.М. Математическое моделирование лесных и степных пожаров. Кемерово: Изд-во «Практика», 2006. 134 с.
- [10] Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 471 с.
- [11] Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука. 1977. 239 с.
- [12] Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника. 1975. С.318.
- [13] Фомин А.А. Структура течения и прогрев окружающей среды над локальным очагом лесного пожара: Дис.... канд. ф.-м.н. Томск, 1989. 221 с.
- [14] Грузин А.Д. Аэродинамика и сопряженный тепломассоперенос в приземном слое атмосферы при распространении лесных пожаров: Дис.... канд. ф.-м. н. Томск, 1983. 180 с.
- [15] *Зверев В.Г. Математическое моделирование аэродинамики и тепломассопереноса при распространении вершинных лесных пожаров: Дис.... канд. ф.-м.н. Томск, 1985. 222 с.
- [16] *Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения массовых и верховых лесных пожаров с учетом теплообмена и двухтемпературности среды: Дис.... канд. ф.-м.н. Томск, 1995.187 с.
- [17] Гришин А.М., Грузин А.Д. Конвективный тепломассоперенос и закономерности распространения горящих частиц в приземном слое атмосферы при верховых лесных пожарах //ДАН СССР. 1983. Т. 253. С.549-553.
- [18] Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергией // Физика горения и взрыва. 1995. № 5. С. 107-115.

*Диссертации выполнены под научным руководством проф., д.ф.-м.н. А.М. Гришина