УДК 004.056.55
Н.М. Ліщина
Луцький інститут розвитку людини Університету «Україна»

ЗАГАЛЬНА МОДЕЛЬ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗОНІ ЛІСОВОЇ ПОЖЕЖІ

Розглянуто математичну модель лісових пожеж першого покоління, у рамках якої ліс моделюється пористо-дисперсним середовищем, а її кістяк вважається недеформованим твердим тілом.
Ключові слова: *математична модель, лісові займисті матеріали, піроліз.*

Вступ

На основі узагальнення відомих експериментальних та теоретичних даних запропоновано математичну модель лісових пожеж першого покоління, у рамках якої ліс моделювався пористо-дисперсним середовищем, а її кістяк вважається недеформованим твердим тілом. Запропоновано також універсальну фізичну модель енергетики лісових і степових природних пожеж, згідно якій теплота, що вивільняється підчас згоряння ЛЗМ (лісових займистих матеріалів) за рахунок вільної та вимушеної конвекції, передається ЛЗМ, що ще не згоріли, внаслідок чого вони прогріваються, висушуються і піролізуються. Потім газоподібні та конденсовані продукти піролізу згорають.

Модель першого покоління може слугувати основою для створення математичної моделі лісових пожеж. Крупна лісова пожежа може розглядатися як деякий метеотрон – пристрій для штучного спонукання опадів. Тому схема фізико-хімічних процесів у фронті лісової пожежі має бути доповнена відповідною схемою тепло і масоперенесення у приземному шарі атмосфери.

Теплова енергія, що виділяється у фронті пожежі у результаті конвекції та випромінювання, передається лісовим займистим матеріалам, які внаслідок нагрівання і сушіння розкладаються на газоподібні продукти горіння та коксик (конденсований займистий продукт піролізу). Над фронтом пожежі наявна конвективна колонка, що виникає у результаті вільної конвекції, і містить значну кількість парів води.

Основна частина

Отже, ліс у процесі пожеж являє собою багатофазне багаторівневе пористо-дисперсне, просторово неоднорідне середовище, яке складається із сухої органічної речовини (об'ємна частка φ_1), води у рідинно-капельному стані (φ_2), конденсованого продукту горіння коксику (φ_3), конденсованого продукту горіння коксику (попелу, φ_4), газової фази (φ_5), дисперсійних частинок сажі (φ_6) і золи (φ_7), а також капель води (φ_8) над осередком лісової пожежі.

Теплова енергія, що виділяється у фронті пожежі у результаті вільної і вимушеної конвекції та випромінювання, передається ЛЗМ, які нагріваються, висушуються і потім розкладаються на газоподібні горючі та інертні продукти піролізу та конденсований займистий продукт піролізу (коксик), після чого вони згоряють і процес повторюється.

Над фронтом пожежі наявна конвективна колонка, яка виникає у результаті вільної конвекції.

Із використанням прийнятих допущень маємо систему рівнянь:

$$\frac{d\rho}{dt} = Q, \quad \varphi = \sum_{j=5}^{8} \varphi_j; \qquad (1.21)$$

$$\rho \frac{v_i}{dt} = -\varphi \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho F_i + \frac{\partial \tau_n}{\partial x_i} - Q v_i - \rho C_d; \qquad (1)$$

$$F = g + (\mathbf{\Omega} \times r \times \mathbf{\Omega} + 2v \times \mathbf{\Omega}, \quad i, j = 1,2,3;$$

$$\rho\varphi c_p \frac{dT}{dt} = \varphi \frac{dp}{dt} + \rho F_j v_j + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda_{efj}\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)\left(\rho\sum_{l=1}^{N} D_{lef_j} c_{pl}\frac{\partial c_l}{\partial x_j}\frac{\partial T}{\partial x_j}\right) -$$

$$-(\kappa+\kappa^{(s)})[cU_R - B(T)] + c_{ps}(T_s - T)(1-\alpha_c)R_{1s} + q_{3s}R_3^{(s)} + q_5 R_5 + q_{2s}(R_{8-}^{(s)} - R_{8+}^{(s)}; \quad (2)$$

$$\rho\frac{dc_l}{dt} = R_l + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho D_{lefj}\frac{\partial c_l}{\partial x_j}\right) - c_l Q, \quad l = \overline{1,N}; \quad (3)$$

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

$$\rho_1\frac{\partial\varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_2\frac{\partial\varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}; \quad (5)$$

$$rho_3\frac{\partial\varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_s}{M_1}R_{3s} - \alpha_4 R_{3s} - R_6^{(s)};$$

$$\rho_4\frac{\partial\varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s} - R_7^{(s)}. \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^{8} c_l = 1, \quad \sum_{l=1}^{8}\varphi_l = 1, \quad p = \rho_\Gamma RT\sum_{l=1}^{N_\Gamma}\frac{c_{l\Gamma}}{M_l}, \quad N_{|Gamma} = N - 3, \quad (7)$$

$$Q = (1-\alpha_c)R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_c}{M_1}R_3 + R_6^{(s)} + R_7^{(s)} + R_8^{(s)}, \quad (8)$$

$$\tau_{ij} = \tau_8^{(1)} + \tau_8^{(2)}, \quad \tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right), \; i = 1,2,3, \; j = 1,2,3. \quad (9)$$

У цих рівняннях t – час, r – радіус-вектор будь-якої точки, x_j – декартові координати цієї точки, κ, $\kappa^{(s)}$, κ_s – інтегральні коефіцієнти поглинання газу, дисперсних частинок та конденсованої фази; B – функція Планка; U_R – інтегральна густина випромінювання; c_{pi}, c_{p7}, c_{ps} – тепломісткості за сталого тиску окремих фаз, водяного пару і газоподібних продуктів піролізу відповідно; v_j, $|v|$ – компоненти і модуль осередненої швидкості газу та дисперсних частинок; v', v'_s – пульсаційні складові швидкості потоку та коливань елементів ЛЗМ; ρ_i – істинна густина і-ї фази; $R_8^{(s)} = R_{8+}^{(s)} - R_{8-}^{(s)}$ – масові швидкості конденсації парів і випаровування вільної води у газодисперсній фазі; q_{1s}, q_{2s}, q_{3s} – теплоти піролізу, випаровування зв'язної води і горіння коксику; q_2 – теплота випаровування (конденсації) вільної води; p – тиск газу; $\tau_{ij}^{(1)}$, $\tau_{ij}^{(2)}$ – компоненти тензорів дотичних (тангенціальних) напружень для ламінарних і турбулентних течій; c_l – масова концентрація l-компонента у газодисперсному середовищі; N – кількість компонентів у газодисперсному середовищі; $N_r = N - 3$ – кількість компонентів газової фази; R_l

– масова швидкість утворення l-компонента газової фази у результаті піролізу ЛЗМ, випаровування води, гетерогенних і гомогенних хімічних реакцій; $R_6^{(s)}$, $R_7^{(s)}$, $R_8^{(s)}$ – масові швидкості утворення частинок сажі, диму і капелек води при конденсації її парів; $\rho_Г = \sum_{l=1}^{7} \rho_{lГ}$ – густина газової фази; $\rho_{lГ}$ – парціальні густини компонентів газової фази (індекс 1 відповідає кисню, 2 – CO, 3 – H_2, 4 – CH_4, 5 – CO_2, 6 – N_2, 7 – парам води); $c_{lГ} = \rho_{lГ}/\rho Г$, $l = \overline{1,10}$, 7 – масові концентрації для суміші газів $c_l = \rho_l^0/\rho$, 10 – масові концентрації компоненти газодисперсної суміші; ρ_l^0 – парціальні густини окремих компонентів газодисперсного середовища; перші сім значень ρ_l^0 відповідають компонентам газової фази, восьме – частинкам сажі, 9-е – частинкам диму, 10-е – каплям води; $\rho = \sum_{5}^{8} \rho_j \varphi_j$ – густина газодисперсної суміші; $\rho_5 \_ \rho_8$ – істинні густини газової фази, частинок сажі, частинок диму і капельок води; D_l, $D_Г$ – коефіцієнти молекулярної і турбулентної дифузії; λ, λ_T – коефіцієнти молекулярної і турбулентної теплопровідності газової фази; $D_{lef} = D_l + D_Г$ – ефективні коефіцієнти дифузії l-компонента; α_v – коефіцієнт внутрішнього теплообміну; R_{is} – масові швидкості утворення (зникнення) речовини конденсованих фаз (індекс 1 відповідає швидкості піролізу ЛЗМ, 2 – випаровуванню води, 3 – горінню коксика); T, T_s – температури газової і конденсованої фаз; λ_s – коефіцієнт теплопровідності пористої конденсованої фази; q_R, q_{Rs} – вектори густини променистого теплового потоку у газодисперсному і пористому середовищі; $\cos\alpha_j = v_j/v$ – напрямні косинуси вектора середньої швидкості газодисперсної фази; q_k – теплові ефекти хімічних реакцій (1 відповідає реакції піролізу, 2 – масовій швидкості випаровування води, 3 – швидкості гетерогенного коксику); α_c – коксове число ЛЗМ; R – універсальна газова стала; M_c і M_1 – атомарна і молекулярна маси вуглецю і кисню; M_α – молекулярна маса α-компонента газової фази; $\mathbf{\Omega}$ – кутова швидкість обертання Землі; $\lambda_{ef} = \lambda + \lambda_T$, $\mu_{ef} = \mu + \mu_T$ – ефективні коефіцієнти теплопровідності і в'язкості газу; C_d – емпіричний коефіцієнт опору рослинності; $\alpha_v = s\alpha_s$ – коефіцієнт об'ємного теплообміну елемента ЛЗМ із середовищем; s – питома поверхня ЛЗМ у даному ярусі лісу; α_s – коефіцієнт теплообміну елемента ЛЗМ із навколишнім середовищем; нижній індекс s приписується параметрам стану конденсованої фази і швидкостям реакцій за участі конденсованих речовин; верхній індекс (s) – характеристикам дисперсної фази.

Отже, середовище вважається двохшвидкостним, що надає можливість врахувати седиментацію – осідання частинок під впливом сили тяжіння. Рівняння (1) являє собою закон збереження маси газодисперсної фази, рівняння (2) – закон збереження кількості руху газодисперсної фази у проекціях на осі декартової системи координат. У (2) входять члени, обумовлені силовою дією газодисперсійного потоку із кістяком пористо-лисперсного середовища.

Рівняння (2) являє собою закон збереження енергії у газодисперсному потоці із урахуванням перенесення енергії конвекцією та випромінюванням, а також виділення та поглинання теплової енергії у результаті різних фізичних і хімічних процесів.

Рівняння (3) – закон збереження та змінювання маси окремих компонентів у газодисперсному потоці із урахуванням процесів конвекції і дифузії, а також фізико-хімічних перетворень.

Рівняння (4) є закон збереження енергії у конденсованій фазі, а рівняння (5) описує кінетику піролізу та сушіння ЛЗМ.

Рівняння (6) описує баланс маси коксику (проміжного конденсованого продукту піролізу ЛЗМ) і попелу (кінцевого конденсованого продукту горіння).

Перше і друге співвідношення (7) являє собою алгебраїчний інтеграл основної системи рівнянь, а третє – рівняння стану для газової фази.

Співвідношення (8) визначає швидкість генерації газової і дисперсної фаз у результаті випаровування і хімічних реакцій, а вираз (9) – тангенціальні компоненти тензору напружень через похідні від компонентів швидкості осередненої течії.

Математичні моделі рідинних середовищ.

Побудова математичної моделі рідинного середовища передбачає отримання замкненої системи диференціальних рівнянь та рівнянь стану, що адекватно описують її реальний рух. Такими рівняннями у випадку в'язкої теплопровідної рідини є:

рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div\ (\rho v) = 0, \qquad (10)$$

рівняння кількості руху

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F + \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z}, \qquad (11)$$

рівняння енергії

$$\rho \frac{dE}{dt} = p_x \frac{\partial v}{\partial x} + p_y \frac{\partial v}{\partial y} + p_z \frac{\partial v}{\partial z} + div\ q + \boldsymbol{\varepsilon}, \qquad (12)$$

рівняння зв'язку тензора напружень із тензором швидкостей деформації у формі закону в'язкості Нав'є–Стокса;

рівняння зв'язку теплового потоку із температурою потоку у формі закону Фур'є;

вираз для внутрішньої енергії E через параметри стану T, p; співвідношення, що визначають параметри μ і k.

Для отримання основного рівняння руху в'язкого газодисперсного середовища використовують рівняння у напруженнях

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F + div\ P. \qquad (13)$$

Після заміщення у ньому значення P із узагальненого закону Ньютона отримаємо рівняння Нав'є–Стокса динаміки в'язкого газу

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - grad\ \left(p + \frac{2}{3}\mu div\ v \right) + 2Div(\mu S). \qquad (14)$$

У проекціях на осі координат воно набуває вигляду

$$\rho \frac{dv_x}{dt} = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x}(\mu div\ v), \qquad (15)$$

$$\rho \frac{dv_y}{dt} = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + 2\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right] - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial y}(\mu div\ v), \qquad (16)$$

$$\rho \frac{dv_z}{dt} = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + 2\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x}\right)\right] +$$
$$+ \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y}\right)\right] - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial z}(\mu div\ v). \quad (17)$$

Для випадку газу, що не стискається, $\mu = const$, векторна форма рівняння руху така:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \nabla p + \mu \Delta v. \quad (18)$$

За допомогою узагальненого закону Ньютона можна виключити p_x, p_y, p_z також із рівняння енергії:

$$p_x \frac{\partial v}{\partial x} + p_y \frac{\partial v}{\partial y} + p_z \frac{\partial v}{\partial z} = -p div\ v + \Phi. \quad (19)$$

$$\Phi = \mu[2\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right)^2 +$$
$$+ \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x}\right)^2] + \lambda(div\ v)^2. \quad (20)$$

Сформульована математична модель описує процеси, що є загальні для руху деякої субстанції у полі масових сил (рух газу, рідини суспензії тощо).

1. Гришин А.М. Конвективный тепломассоперенос и закономерности распространения горящих частиц в приземном слое атмосферы при верховых лессовых пожарах / А.М. Гришин, А.Д. Грузин //докл. АН СССР. – 1980.–Т.253, №3.–с.549–553.
2. Гришин А.М. Математическая теория верховых лессовых пожаров / А.М. Гришин, А.Д. Грузин, В.Г. Зверев // Теплофизика лесных пожаров.– Нов–ск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1984. – с.38–75.
3. Зеленський К.Х. Математичне моделювання низинних лісових пожеж/ К.Х. Зеленський, В.О. Ліщина, Є.Я. Ваврук// Комп’ютерні науки та інформаційні технології.– Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2009.— № 638.– с.95–98.