

УДК 533.6

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ЗАЖИГАНИЮ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ ЛУЧИСТЫМ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ

¹Барановский Н.В., ²Томан П.Н.

¹*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, e-mail: firedanger@narod.ru;*

²*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь, Минск, e-mail: g_pn83@mail.ru*

В настоящей статье представлена усовершенствованная физическая и математическая модели процесса зажигания слоя лесного горючего материала под воздействием лучистого теплового потока. Рассматриваются два варианта структурной организации слоя лесного горючего материала – как монолитное, так и пористое строение слоя. Математическая модель представлена системой нелинейных нестационарных уравнений теплопроводности и диффузии с соответствующими начальными и граничными условиями. Представлены результаты сравнительного анализа численного моделирования и экспериментальных данных по зажиганию слоя лесных горючих материалов лучистым тепловым потоком. Анализ результатов показал удовлетворительное согласование данных численного моделирования и экспериментального исследования. Настоящая работа вносит вклад в развитие теорий прогностического моделирования лесной пожарной опасности и зажигания горючих материалов при их локальном нагреве.

Ключевые слова: лесной пожар, зажигание, лесной горючий материал, лучистый тепловой поток, закон Бугера–Ламберта–Бера

COMPARATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL MODELLING AND EXPERIMENTAL DATA ON FOREST FUEL IGNITION BY RADIANT THERMAL FLUX

¹Baranovskiy N.V., ²Goman P.N.

¹*National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, e-mail: firedanger@narod.ru;*

²*Command-engineering institute of the Ministry of Emergency Measures of Byelorussia, Minsk, e-mail: g_pn83@mail.ru*

The improved physical and mathematical models of ignition process of forest fuel layer under the influence of a radiant thermal flux are presented in the present paper. It is considered two variants of the structural organisation of forest fuel layer – both monolithic, and a porous structure of a layer. The mathematical model is presented by system of the nonlinear non-stationary equations of heat conductivity and diffusion with corresponding initial and boundary conditions. Results of the comparative analysis of numerical simulation and experimental data on ignition of forest fuel layer by a radiant thermal flux are presented. The analysis of results has shown the satisfactory coordination of the data of numerical simulation and an experimental research. The present work brings the contribution to development of theories of prognostic modelling of forest fire danger and ignition of combustible materials at their local heating.

Keywords: forest fire, ignition, forest combustible material, radiant thermal flux, Buger-Lambert-Ber law

Основные механизмы передачи тепла при распространении фронта лесного пожара – конвективный и радиационный теплообмен [4]. Представляет интерес изучение процессов воспламенения свежей порции лесного горючего материала (ЛГМ) при воздействии лучистого теплового потока. В качестве инструмента исследования предлагается численное моделирование процессов зажигания ЛГМ на вычислительной технике. Для верификации результатов математического моделирования предлагается использовать сравнительный анализ с экспериментальными данными.

Целью публикации является численное моделирование условий зажигания слоя ЛГМ в результате воздействия излучения с учетом пористости лесного горючего материала и проникновения излучения в слой.

Физико-математическая модель

Рассматривается достаточно типичный рыхлый слой ЛГМ, образованный опадом сосновой хвои [5]. В соответствии с [3] объемную долю сухого органического вещества φ_1 можно оценить по формуле: $\varphi_1 = m/(\rho_1 V)$, где m – масса образца слоя ЛГМ в контрольном объеме; V – величина контрольного объема; ρ_1 – типичная плотность элемента ЛГМ (хвоинки). Как показали оценки [3], для слоя из хвоинок объемная доля сухого органического вещества меняется в пределах $0,03 < \varphi_1 < 0,06$, т.е. объемная доля конденсированного вещества существенно мала по сравнению с объемной долей воздуха.

В [3] сделан вывод о том, что ослабление лучистого потока при прохождении через слой хвои описывается выражением, аналогичным уравнению закона Бугера–Ламберта–Бера.

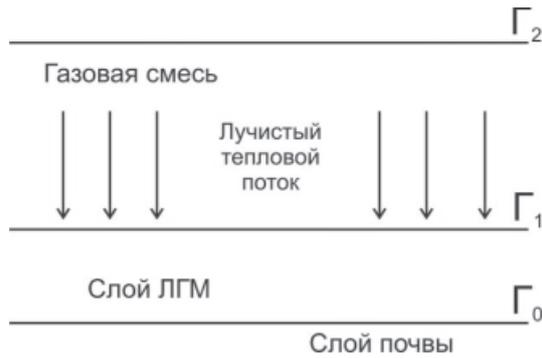


Рис. 1. Область решения

При постановке задачи принята следующая схема исследуемого процесса. На подстилающей поверхности расположен слой ЛГМ, на который воздействует лучистый тепловой поток. Слой ЛГМ нагревается и термически разлагается с образованием газообразных продуктов пиролиза. Состав газовой смеси принимается трехкомпонентным (горючее – монооксид углерода, окислитель – кислород, инертные компоненты). Продукты пиролиза диффундируют в область газовой смеси. При определенных температуре и концентрациях реагирую-

щих газов происходит зажигание смеси. Кинетическая схема включает одну брутто-реакцию окисления монооксида углерода до диоксида [4]: $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$.

Приняты следующие критерии зажигания:

1) теплоприход от химической реакции превышает тепловой поток от нагретой поверхности в область газовой смеси;

2) температура в газовой смеси достигает критического значения.

На рис. 1 представлена геометрия области решения. Символами Γ обозначены границы области решения и различных слоев. Процесс зажигания слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком описывается системой одномерных нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии (1)–(2), (6), (9) с соответствующими начальными и граничными условиями. Численная реализация проведена с использованием конечно-разностного метода [7]. Разностные аналоги одномерных уравнений теплопроводности и диффузии решены методом прогонки в сочетании с методом простой итерации [7]. Ниже представлена математическая модель, которая является развитием модели [1].

Уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_{ef} c_{ef} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_{ef} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_p k_1 \rho_1 \phi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right) + (1 - \phi_1) q_s \exp(-k_r \rho_{ef} z). \quad (1)$$

Уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + q_5 (1 - v_5) R_5. \quad (2)$$

Граничные условия для уравнений (1)–(2):

$$\Gamma_0 \quad \alpha_1 (T - T_{es}) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}; \quad (3.1)$$

$$\Gamma_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} + \phi_{1w} q_s; \quad T_1 = T_2; \quad (3.2)$$

$$\Gamma_2 \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}. \quad (3.3)$$

Начальные условия для уравнений (1)–(2):

$$T_i|_{t=0} = T_{i0}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Кинетическое уравнение и начальное условие:

$$\rho_1 \frac{\partial \phi}{\partial t} = -k_p \rho_1 \phi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right); \quad \phi_{t=0} = \phi_0. \quad (5)$$

Уравнение диффузии для окислителя:

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_4}{\partial z^2} - \frac{M_4}{M_5} R_5. \quad (6)$$

Граничные условия для уравнения (6):

$$\Gamma_1 \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0; \quad (7.1)$$

$$\Gamma_2 \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0. \quad (7.2)$$

Начальные условия для уравнения (6):

$$C_4|_{t=0} = C_{4.0}. \quad (8)$$

Уравнение диффузии для горючих компонент пиролиза:

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_5}{\partial z^2} - R_5. \quad (9)$$

Граничные условия для уравнения (9):

$$\Gamma_1 \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = Y_5; \quad (10.1)$$

$$\Gamma_2 \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = 0. \quad (10.2)$$

Начальные условия для уравнения (9):

$$C_5|_{t=0} = C_{5.0}. \quad (11)$$

Уравнение баланса массы:

$$\sum_{i=4}^6 C_i = 1. \quad (12)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=4}^6 \frac{C_k}{M_k} M_i}, \quad (15)$$

где T_i , ρ_i , c_i , λ_i – температура, плотность, теплоемкость, теплопроводность (1 – слой ЛГМ, 2 – воздуха); C_i , M_i – концентрация и молярная масса (4 – окислителя, 5 – горючего газа, 6 – инертных компонентов воздуха); q_p – тепловой эффект реакции пиролиза ЛГМ; k_p – предэкспонент реакции пиролиза ЛГМ; E_i – энергия активации реакции пиролиза ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; ϕ_i – объемная доля сухого органического вещества ЛГМ ($i = 1$) и воздуха ($i = 2$); q_s – тепловой эффект реакции окисления оксида углерода; v_s – доля теплоты, поглощенная слоем ЛГМ; R_s – массовая скорость реакции окисления оксида углерода; α_1 – коэффициент теплопередачи; α_2 – коэффициент теплоотдачи; k_s – предэкспонент реакции окисления оксида углерода; E_i – энергия активации реакции окисления оксида углерода; D – коэффициент диффузии; Y_s – поток массы горючих продуктов пиролиза; x_i – вспомогательная переменная; q_s – поток сфокусированного солнечного излучения; k_r – коэффициент ослабления; z – пространственная координата;

Начальные условия для уравнения (12):

$$C_6|_{t=0} = C_{6,0}. \quad (13)$$

Выражение для массовой скорости реакции R_s [4]:

$$R_s = k_s M_s T^{-2,25} \exp\left(-\frac{E_s}{RT_1}\right) \cdot \begin{cases} x_1^{0,25} x_2, & x_1 > 0,05 \\ x_1 x_2, & x_1 \leq 0,05 \end{cases}; \quad (14)$$

ната; t – временная координата. Индексы es , ea , 0 , w , ef соответствуют параметрам окружающей среды в почве, воздухе, начальный момент времени, на границе раздела ЛГМ-воздух и эффективным характеристикам. При численном моделировании использованы следующие исходные данные [2]: $\rho_1 = 500$ кг/м³; $\rho_2 = 0,1$ кг/м³; $c_1 = 1400$ Дж/(кг·К); $c_2 = 1200$ Дж/(кг·К); $\lambda_1 = 0,102$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 0,1$ Вт/(м·К); $q_p = 1000$ Дж/кг; $k_p = 3,63 \cdot 10^4$; $E_i/R = 9400$ К; $\phi_p = 1$; $q_s = 10^7$ Дж/кг; $k_s = 3 \cdot 10^{13}$ с⁻¹; $E_s/R = 11500$ К; $v_s = 0,3$; $\alpha_1 = 20$ Вт/(м²·К); $\alpha_2 = 80$ Вт/(м²·К); $D = 10^{-6}$; $M_4 = 0,032$; $M_5 = 0,028$; $M_6 = 0,044$; $k_r = 5,1$ м²/кг.

Основные результаты исследования

Задачей исследования было проведение сравнительного анализа моделей и экспериментальных данных загорания слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком. Исследовались две модели:

1) слой ЛГМ полностью заполнен сухим органическим веществом;

2) структура слоя ЛГМ рыхлая и пористая.

В таблице представлены результаты численного определения времени задержки воспламенения как по первой модели, так и по второй. Также представлены экспериментальные данные.

Время задержки воспламенения слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком

Тепловой поток, q_s , кВт/м ²	Время задержки воспламенения (расчет, вар. 1), t_{ign} , с	Время задержки воспламенения (расчет, вар. 2), t_{ign} , с	Время задержки воспламенения (эксперимент), t_{ign} , с
15	96	119	Нет загорания
20	59	80	197–207
25	31	50	93–100
30	24	42	40–42
35	20	37	27–30
40	18	34	18–26

Порядок определения пожарно-технических и теплофизических характеристик ЛГМ в лабораторных условиях регламентирован техническими нормативными правовыми актами [6]. Так, например, такая пожарно-техническая характеристика, как воспламеняемость, определяется соответ-

ственно с использованием установки для испытаний на воспламеняемость [6]. Принципиальные схемы данных установок представлены на рис. 2.

Теоретический предел q_s , при котором еще возможно воспламенение слоя ЛГМ, в обоих вариантах составил 15 кВт/м².

В диапазоне 15–25 кВт/м² теоретические оценки времен задержки воспламенения ниже таковых, установленных экспериментально (для обеих моделей). Наиболее близкое согласование теоретических и экспериментальных значений t_{ign} соответствует $q_s = 30$ кВт/м². В диапазоне 35 кВт/м² и выше более адекватно процесс описывается моделью без учета пористой структуры ЛГМ. Для модели пористого слоя ЛГМ

установлено, что теоретические значения t_{ign} превышают на 40% времена задержки воспламенения, рассчитанные по модели монолитного слоя. Этот результат обусловлен тем, что при радиационном теплоотводе энергии от нагреваемой поверхности вглубь материала температура в тонком приповерхностном слое меньше по сравнению с вариантом монолитной (непористой) структуры ЛГМ.

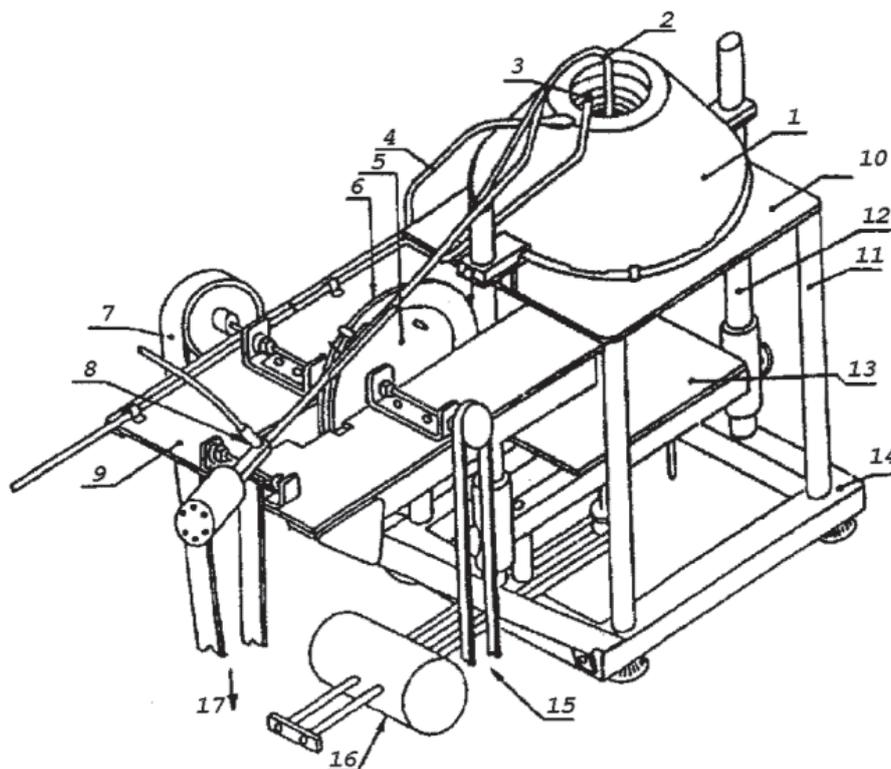


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки для испытаний на воспламеняемость:
 1 – радиационная панель с нагревательным элементом; 2 – подвижная горелка;
 3 – вспомогательная стационарная горелка; 4 – силовой кабель нагревательного элемента;
 5 – кулачок с ограничителем хода для ручного управления подвижной горелкой; 6 – кулачок для автоматического управления подвижной горелкой; 7 – приводной ремень; 8 – втулка для подсоединения подвижной горелки к системе подачи топлива; 9 – монтажная плита для системы зажигания и системы перемещения подвижной горелки; 10 – защитная плита;
 11 – вертикальная опора; 12 – вертикальная направляющая; 13 – подвижная платформа для образца; 14 – основание опорной станины; 15 – ручное управление; 16 – рычаг с противовесом; 17 – привод к электродвигателю

Типичное распределение температуры по вертикальной координате в системе «слой ЛГМ-газовая смесь» в момент зажигания представлено на рис. 3: 1 – вариант модели сплошного слоя; 2 – вариант модели с учетом пористой структуры слоя. Пик на температурной кривой соответствует месту локализации химической реакции окисления монооксида углерода до диоксида угле-

рода. Анализ результатов изменения температуры показывает, что пористый слой прогревается глубже и, как следствие, на большую глубину происходит его термическое разложение. Если для варианта 1 разложение слоя происходит в пределах 1,5 мм от верхней границы слоя, то в случае пористой структуры слой разлагается на глубину до 5 мм (рис. 4).

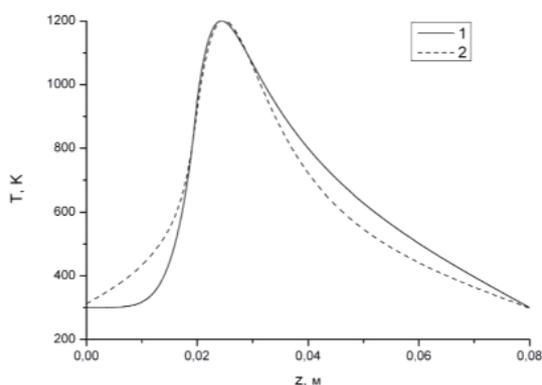


Рис. 3. Распределение температуры в системе «слой ЛГМ-газовая смесь» в момент зажигания при $q_s = 15000 \text{ Вт/м}^2$

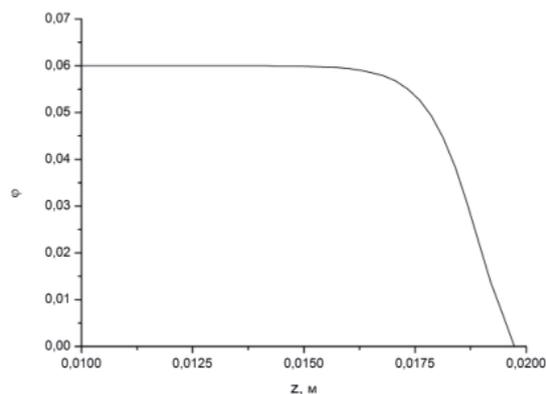


Рис. 4. Зависимость объемной сухой органического вещества ЛГМ от вертикальной координаты в момент зажигания при $q_s = 15000 \text{ кВт/м}^2$

Заключение

Полученные посредством численного моделирования процессов теплопереноса, предшествующих зажиганию лесного горючего материала лучистым тепловым потоком, результаты показывают возможность дальнейшего развития математических моделей, описывающих физические процессы в ЛГМ и в тонком газовом слое вблизи его поверхности при воздействии лучистого теплового потока.

Установленное влияние внутрипорового радиационного теплопереноса на условия зажигания ЛГМ отражает специфику процессов прогрева ЛГМ в период, предшествующий зажиганию, и демонстрирует направления дальнейших исследований с целью повышения достоверности прогнозов лесной пожарной опасности.

Список литературы

1. Барановский Н.В., Тойчув Р.М. Упрощенная математическая модель оценки тепловых режимов воздействия очага возгорания на слой почвы после стадии зажигания лесного горючего материала // Бутлеровские сообщения. – 2013. – Т. 34. – № 5. – С. 136–145.
2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.
3. Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т. и др. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т.38, № 1. – С. 30–35.
4. Гришин А.М., Шипулина О.В. Математическое моделирование распространения вершинных лесных пожаров в однородных лесных массивах и вдоль просек // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 6. – С. 17–29.
5. Курбатский Н.П. Исследование свойств и количества лесных горючих материалов // Сборник статей «Вопросы лесной пирологии». – Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1970. – С. 5–58.

6. Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость: ГОСТ 30402–96. – Введ. 30.04.97. – Минск: Межгос. научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 1996. – 31 с.

7. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – С. 33–36.

References

1. Baranovskij N.V., Tojchuev R.M. Uproshhennaya matematicheskaya model' ocenki teplovykh rezhimov vozdeystviya ochaga vozgoraniya na sloj pochvy posle stadii zazhiganiya lesnogo goryuchego materiala // Butlerovskie soobshheniya. 2013. T. 34. no. 5. pp. 136–145.
2. Grishin A.M. Matematicheskoe modelirovanie lesnykh pozharov i novye sposoby bor'by s nimi. Novosibirsk: Nauka, 1992. 408 p.
3. Grishin A.M., Zima V.P., Kuznecov V.T. i dr. Zazhiganie lesnykh goryuchix materialov potokom luchistoj e'nergii // Fizika gorenija i vzryva. 2002. T. 38, no. 1. pp. 30–35.
4. Grishin A.M., Shipulina O.V. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya vershinnyx lesnykh pozharov v odnorodnyx lesnyx massivax i vdol' prosek // Fizika gorenija i vzryva. 2002. T. 38, no. 6. pp. 17–29.
5. Kurbatskij N.P. Issledovanie svojstv i kolichestva lesnykh goryuchix materialov // Sbornik statej «Voprosy lesnoj pirologii». Krasnojarsk : ILiD SO AN SSSR, 1970. pp. 5–58.
6. Materialy stroitel'nye. Metod ispytaniya na vosplameny-aemost': GOST 30402–96. – Vved. 30.04.97. Minsk: Mezghos. nauchno-texnicheskaya komissiya po standartizacii, texnich-eskomu normirovaniyu i sertifikacii v stroitel'stve, 1996. 31 p.
7. Samarskij A.A. Teoriya raznostnyx sxem. M.: Nauka, 1983. pp. 33–36.

Рецензенты:

Немова Т.Н., д.т.н., профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск;

Пахомов М.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск.

Работа поступила в редакцию 03.09.2013.