

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ СЛОЯ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА СФОКУСИРОВАННЫМ СОЛНЕЧНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Барановский Н.В., Кузнецов Г.В.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
firedanger@narod.ru*

В последние годы интенсивно развивается теория детерминированно-вероятностного прогноза лесной пожарной опасности [1-3]. Детерминированные компоненты этой теории представлены математическими моделями зажигания ЛГМ, описывающими достаточно подробно физико-химические процессы тепломассопереноса, которые предшествуют непосредственному возгоранию [4-6]. Но в работах [4-6] рассмотрены в качестве источников нагрева ЛГМ только грозовые разряды [4,5] и нагретые до высоких температур частицы [6]. До настоящего времени теоретический анализ условий возгорания ЛГМ под действием солнечного излучения не проводился. В частности, нет достоверных оценок минимальных значений радиационных тепловых потоков, при которых возможно зажигание, например, сухой хвои. Для мониторинга и прогноза лесных пожаров по таким неочевидным причинам, как сфокусированное солнечное излучение, следует разработать соответствующие методики прогноза на основе детерминированных моделей зажигания ЛГМ радиационным тепловым потоком.

Цель исследования – численное моделирование условий зажигания слоя ЛГМ в результате воздействия сфокусированного потока солнечного излучения.

В настоящей работе рассматривается сценарий катастрофической пожарной опасности, когда влага в ЛГМ отсутствует. События 2010 года в европейской части России показали, что разработка таких моделей имеет высокий уровень актуальности.

Принята следующая схема исследуемого процесса. На подстилающей поверхности расположен слой ЛГМ, на малом участке которого фокусируется поток солнечного излучения (рис. 1).

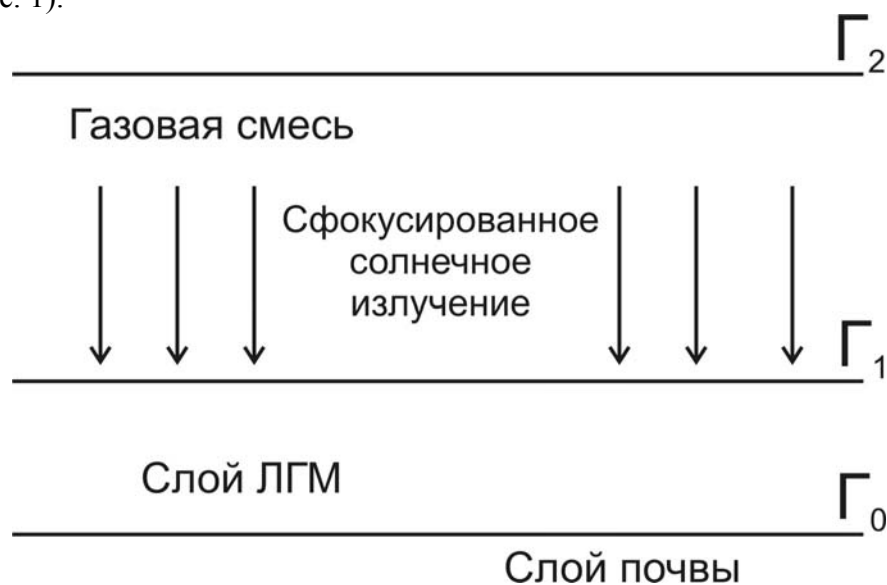


Рис. 1. Область решения

Процессы, происходящие в фокусирующем элементе, не моделируются в связи с отсутствием, как экспериментальных данных, так и результатов теоретических исследований по этой проблеме. 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 реагирующих газов происходит зажигание смеси. 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.

Процесс воспламенения слоя ЛГМ сфокусированным потоком солнечного излучения описывается системой одномерных нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии с соответствующими начальными и граничными условиями.

Уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_p k_1 \rho_3 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad (1)$$

Уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + q_5 (1 - \nu_5) R_5, \quad (2)$$

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

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

$$\Gamma_1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} + q_s, \quad T_1 = T_2, \quad (3.2)$$

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

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

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

Кинетическое уравнение и начальное условие:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -k_p \rho_1 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad \varphi|_{t=0} = \varphi_0, \quad (5)$$

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):

$$C_4|_{t=0} = C_{40}, \quad (8)$$

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:

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

Начальные условия для уравнения (12):

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

Выражение для массовой скорости реакции R_5 [7]:

$$R_5 = k_5 M_5 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT_1}\right) \cdot \begin{cases} x_1^{0.25} x_2, x_1 > 0.05 \\ x_1 x_2, x_1 \leq 0.05 \end{cases}, \quad (14)$$

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

где $T_i, \rho_i, c_i, \lambda_i$ – 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_l – предэкспонент реакции пиролиза ЛГМ; E_l – энергия активации реакции пиролиза ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; φ – объемная доля сухого органического вещества ЛГМ; q_s – тепловой эффект реакции окисления оксида углерода; ν_5 – доля теплоты поглощенная слоем ЛГМ; R_5 – массовая скорость реакции окисления оксида углерода; α_1 – коэффициент теплопередачи; α_2 – коэффициент теплоотдачи; k_5 – предэкспонент реакции окисления оксида углерода; E_5 – энергия активации реакции окисления оксида углерода; D – коэффициент диффузии, Y_5 – поток массы горючих продуктов пиролиза, x_i – вспомогательная переменная; q_s – поток сфокусированного солнечного излучения. z – пространственная координата. t – временная координата. Индексы es, ea, n – соответствуют параметрам окружающей среды в почве, воздухе и в начальный момент времени.

При численном моделировании использованы следующие исходные данные: $\rho_1=500$ 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; $k_l=3.63 \cdot 10^4$; $E_l/R=9400$ К; $\varphi_{ln}=1$; $q_s=10^7$ Дж/кг; $k_5=3 \cdot 10^{13}$ с⁻¹; $E_5/R=11500$ К; $\nu_5=0.3$; $\alpha_1=20$ Вт/(м²·К); $\alpha_2=80$ Вт/(м²·К); $D=10^{-6}$; $M_4=0.032$; $M_5=0.028$; $M_6=0.044$.

Численная реализация проведена с использованием конечно-разностного метода [8]. Разностные аналоги одномерных уравнений теплопроводности и диффузии решены методом прогонки в сочетании с методом простой итерации [8].

Задачей исследования было определение нижнего предела потока сфокусированного солнечного излучения, при котором возможно воспламенение слоя ЛГМ. В таблице 1 представлены результаты численного расчета времени задержки воспламенения. Также представлены известные экспериментальные данные [9]. Нижний предел q_s , при котором возможно воспламенение слоя ЛГМ, по результатам численного исследования составил 15 кВт/м². Эта величина примерно 10-кратно превышает значение несфокусированного теплового потока солнечной радиации [10]. Среднее отклонение результатов численного

моделирования от экспериментальных данных [9] составило около 42 %. Согласно [11] погрешность решения задач теории лесных пожаров лежит в пределах от 15 до 580 %. Таким образом, полученные результаты можно считать удовлетворительными с точки зрения соответствия теоретических результатов экспериментальным данным [9]. Следует отметить, что разность теоретических и экспериментальных значений времени задержки воспламенения уменьшается с увеличением величины потока сфокусированного излучения.

Таблица 1

Время задержки воспламенения слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком

Тепловой поток, q_s , кВт/м ²	Время задержки воспламенения (расчет), t_{ign} , с	Время задержки воспламенения (эксперимент [8]), t_{ign} , с
15	96	Нет зажигания
20	59	197-207
25	31	93-100
30	24	40-42
35	20	27-30
40	18	18-26

Можно также отметить, что экспериментальные значения времен задержки воспламенения во всем диапазоне изменения q_s превышают теоретические. Это очевидно обусловлено наличием влаги в ЛГМ в экспериментах [9]. Кроме того, все ЛГМ существенно отличаются по своему составу. Соответственно, и отличаются термохимические характеристики, например, сосновой хвои из разных регионов России и Белоруссии. Различные кинетические параметры процессов пиролиза хвои, с которой проводились эксперименты [9] и хвои, для которой велось численное моделирование, являются источником определенных отклонений по временам задержки воспламенения ЛГМ.

Типичное распределение температуры по вертикальной координате в системе “слой ЛГМ-газовая смесь” в момент зажигания представлено на рисунке 2. Пик на температурной кривой соответствует месту локализации химической реакции окисления монооксида углерода до диоксида углерода.

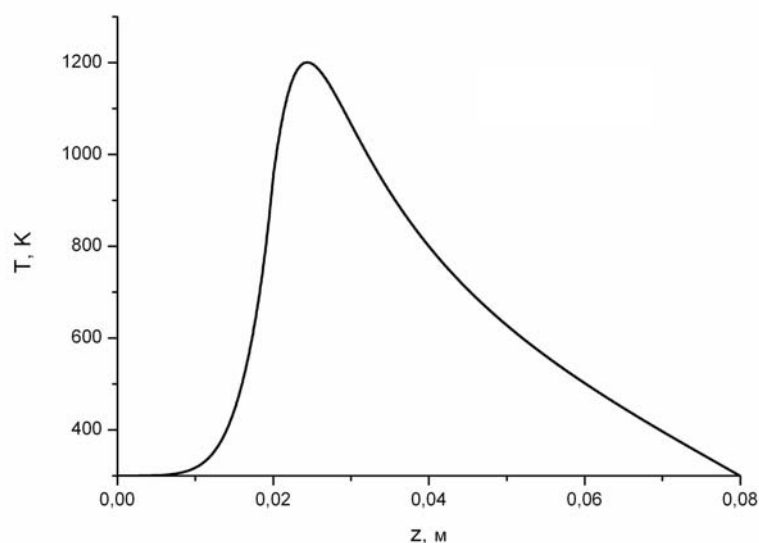


Рис. 2. Распределение температуры в системе “слой ЛГМ-газовая смесь” в момент зажигания при $q_s=15000$ Вт/м²

Следует отметить, что для более точных прогнозов и оценок пожарной опасности ЛГМ в рассмотренных условиях необходимы также специальные исследования масштабов концентрации солнечного излучения при его прохождении через большие капли смолы и стеклянные емкости различных размеров, частично или полностью заполненные водой. При этом целесообразным является анализ влияния ориентации “концентратора” лучистой энергии относительно поверхности ЛГМ и направления потока солнечного излучения.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о большой вероятности возгораний сухих ЛГМ при воздействии на них концентрированных потоков солнечного излучения. Причем степень концентрации энергии не очень высока и представляется вполне достижимой на практике в случае прохождения солнечного излучения не только через пустые или частично наполненные водой емкости (стеклянные банки или бутылки) или их осколки, но, возможно, и через большие капли смолы хвойных деревьев.

На основании результатов выполненных теоретических исследований можно сделать вывод о целесообразности учета рассмотренного в данной работе фактора в системах прогноза лесной пожарной опасности. Решение поставленной задачи имеет важное значение для развития теории зажигания ЛГМ. Полученные результаты создают базис для дальнейшего развития физико-математических моделей зажигания ЛГМ и других пожароопасных материалов.

Литература

1. Барановский Н.В. Концептуальная база российской системы прогноза лесной пожарной опасности // Безопасность в техносфере. 2010. № 6. С. 34 – 42.
2. Барановский Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 59 – 61.
3. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Конкретизация неустановленных причин в детерминированно-вероятностной модели прогноза лесной пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20, № 6. С. 24 – 27.
4. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании лиственного дерева наземным грозовым разрядом // Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 24. № 1. С. 122 – 132.
5. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания дерева хвойной породы наземным грозовым разрядом // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 3. С. 41 – 45.
6. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2006, Т. 15. № 4, С. 42 – 46.
7. 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.
8. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. С. 33 – 36.
9. Касперов Г.И., Гоман П.Н. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2010. Вып. XVIII. С. 337–340. (Беларусь)
10. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Вып. 20. (Томская, Новосибирская, Кемеровская области и Алтайский край). Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1993. 718 С.
11. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 С.