

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ХВОЙНОГО ДЕРЕВА НАЗЕМНЫМ ГРОВОМ РАЗРЯДОМ

Барановский Н.В., Кузнецов Г.В.

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

Ранее разработанная одномерная модель позволяла исследовать процесс газофазного зажигания хвойного дерева для предельного случая полного отсутствия коркового слоя на внешней границе ствола дерева. Другой предельный вариант характеризуется тем, что кора сплошным слоем покрывает ствол дерева. Оба варианта не являются представительными для большинства деревьев реальных лесных массивов и представляют только теоретический интерес. Однако в реальности для коркового слоя характерно наличие различных структурных неоднородностей. Наиболее часто встречаются растрескивания, глубина которых нередко доходит до внешней границы подкоркового слоя. Как известно [1], в деревьях хвойных пород транспорт влаги осуществляется именно в подкорковой зоне (является проводником электрического тока). Поэтому необходимо комплексно исследовать механизмы термического разложения и образования газообразных горючих продуктов, химического реагирования компонентов в газовой фазе при наличии структурных дефектов коры при зажигании хвойного дерева наземным грозовым разрядом. Цель исследования – математическое моделирование процесса газофазного зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом с учетом структурной неоднородности коры. Схема области решения представлена на рис. 1, где 1 – сердцевина, 2 – подкорковая зона, 3 – кора, 4 – газовая фаза в трещине коры дерева; R_e – радиус внешней границы области решения, R_s – внешний радиус ствола, R_1 – граница раздела подкорковой зоны и коры, R_2 – граница раздела сердцевины и подкорковой зоны. Γ_r , Γ_ϕ – донная (совпадает с R_1 в случае отсутствия коркового барьера) и боковые границы трещины. Под корковым барьером понимается слой коры от границы подкорковой зоны до дна трещины.

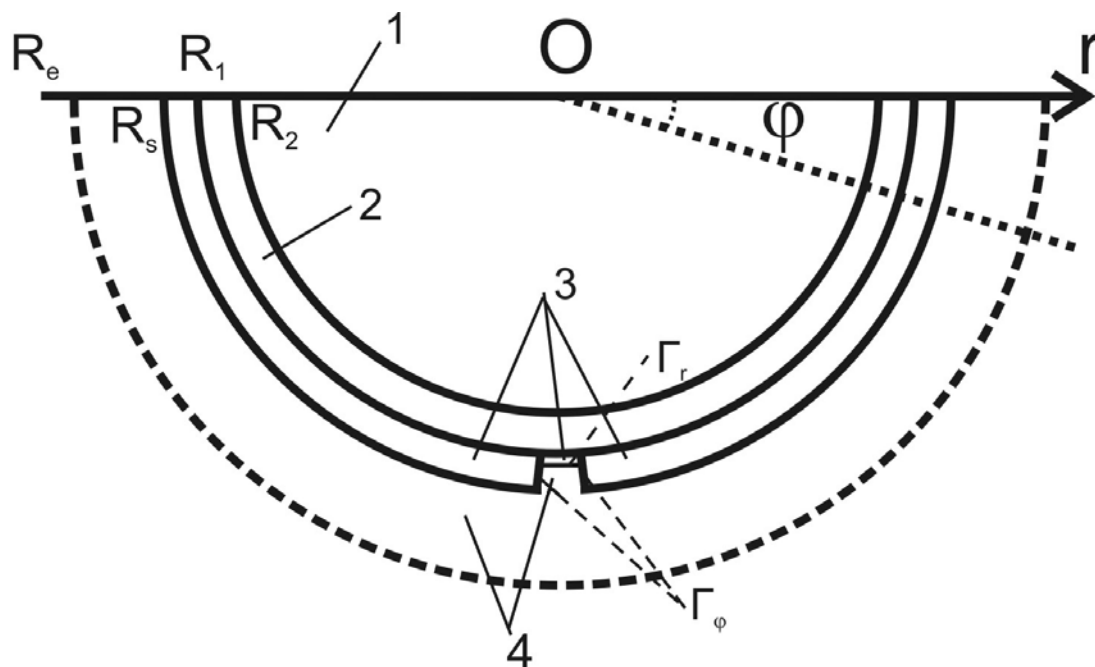


Рис. 1. Схема области решения

Основные допущения и предположения: 1) Разряд класса облако-земля действует на отдельно стоящее дерево; 2) В различных горизонтальных сечениях ствола параметры электрического тока одинаковы и он протекает в подкорковой зоне хвойного дерева; 3) В структуре коры присутствует неоднородность “трещина”. Трещина считается “идеальной”, то есть проходит по всей вертикале ствола. Это и есть приближение “идеальной” трещины, которое позволяет использовать 2D-постановку задачи; 4) Разогрев древесины происходит за счет выделения Джоулева тепла [2]; 5) Подкорковая зона – проводник электрического тока типа резистор, для которого справедлив закон Ома; 6) При термическом разложении материала выделяются газообразные горючие продукты, основным горючим компонентом которых является монооксид углерода [3,4]; 7) Состав газовой фазы: кислород, монооксид углерода, инертные компоненты; 8) Влиянием влажности древесины на процесс зажигания пренебрегается. Горючие компоненты поступают в область газовой фазы и смешиваются с воздухом, содержащим кислород. При определенных концентрациях и температуре происходит воспламенение хвойного дерева в газовой фазе. Условием зажигания является превышение теплоприхода от химической реакции над теплоприходом из подкорковой зоны. Задача решается для цилиндра, который моделирует ствол дерева, в коре которого имеется “идеальная” трещина.

Математически процесс газозазажного зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом в рамках предложенной физической модели описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности и диффузии. Система уравнений решена локально-одномерным конечноразностным методом [5]. Для решения разностных аналогов одномерных дифференциальных уравнений использовался метод прогонки в сочетании с методом простой итерации [5].

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2} - Q_p k_p \rho_1 \varphi_7 \exp \left(-\frac{E_1}{RT_1} \right), \quad (1)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_2}{r^2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial \varphi^2} + JU - Q_p k_p \rho_2 \varphi_7 \exp \left(-\frac{E_1}{RT_2} \right), \quad (2)$$

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_3}{r^2} \frac{\partial^2 T_3}{\partial \varphi^2} - Q_p k_p \rho_3 \varphi_7 \exp \left(-\frac{E_1}{RT_3} \right), \quad (3)$$

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{\lambda_g}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_g}{r^2} \frac{\partial^2 T_g}{\partial \varphi^2} + Q_5 (1 - \nu_5) R_5, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_4}{\partial r} \right) + \frac{D}{r^2} \frac{\partial^2 C_4}{\partial \varphi^2} - R_5 \frac{M_4}{2M_5}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_5}{\partial r} \right) + \frac{D}{r^2} \frac{\partial^2 C_5}{\partial \varphi^2} - R_5, \quad (6)$$

$$\sum_{i=4}^6 C_i = 1, \quad (7)$$

$$\sum_{i=7}^8 \varphi_i = 1, \quad (8)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_7}{\partial t} = -k_p \rho_1 \varphi_7 \exp \left(-\frac{E_1}{RT_1} \right), \quad (9)$$

$$\rho_2 \frac{\partial \varphi_7}{\partial t} = -k_p \rho_2 \varphi_7 \exp \left(-\frac{E_1}{RT_2} \right), \quad (10)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_7}{\partial t} = -k_p \rho_3 \varphi_7 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_3}\right), \quad (11)$$

$$R_5 = k_5 M_5 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT_3}\right) \cdot \begin{cases} x_4^{0.25} x_5, x_4 > 0.05 \\ x_4 x_5, x_4 \leq 0.05 \end{cases} [6], \quad (12)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=4}^6 \frac{C_k}{M_k} M_i}, \quad (13)$$

$$P = \frac{\rho RT}{M}, \frac{1}{M} = \frac{C_4}{M_4} + \frac{C_5}{M_5} + \frac{C_6}{M_6}. \quad (14)$$

Граничные условия для системы уравнений (1) – (14):

$$r=0, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad (15)$$

$$r=R_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2, \quad (16)$$

$$r=R_l, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, \quad T_2 = T_3, \quad (17)$$

$$\Gamma_r, \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r}, \quad T_3 = T_g, \quad (18)$$

$$r=R_s, \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r}, \quad T_3 = T_g, \quad (19)$$

$$r=R_e, \quad \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r} = \alpha(T_e - T_g), \quad (20)$$

$$\varphi=0, \quad \frac{\partial T_i}{\partial \varphi} = 0, \quad i=1,2,3,g \quad (21)$$

$$\varphi=\pi, \quad \frac{\partial T_i}{\partial \varphi} = 0, \quad i=1,2,3,g \quad (22)$$

$$\Gamma_\varphi, \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial \varphi} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial \varphi}, \quad T_3 = T_g, \quad (23)$$

$$\Gamma_r, \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial r} = 0, \quad (24)$$

$$\rho D \frac{\partial C_5}{\partial r} = Y_5, \quad (25)$$

$$r=R_s, \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial r} = 0, \quad (26)$$

$$\rho D \frac{\partial C_5}{\partial r} = Y_5, \quad (27)$$

$$r=R_e, \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial r} = 0, \quad (28)$$

$$\rho D \frac{\partial C_5}{\partial r} = 0, \quad (29)$$

$$\Gamma_\varphi, \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial \varphi} = 0, \quad (30)$$

$$\rho D \frac{\partial C_5}{\partial \varphi} = 0, \quad (31)$$

Начальные условия для системы уравнений (1) – (14):

$$t=0, \quad T_i(r) = T_{i0}(r), \quad i=1,2,3,g \quad (32)$$

$$t=0, \quad C_i(r) = C_{i0}(r), \quad i=4,5,6 \quad (33)$$

$$t=0, \quad \varphi_i(r) = \varphi_{i0}(r), \quad i=7,8 \quad (34)$$

где T_i , ρ_i , c_i , λ_i – температура, плотность, теплоемкость и теплопроводность соответственно сердцевины ($i=1$), подкорковой зоны ($i=2$), коры ($i=3$), газовой фазы в трещине коры ($i=g$) ствола; C_i , M_i – концентрация и молярная масса кислорода ($i=4$), монооксида углерода ($i=5$), инертных компонент (азот и диоксид углерода) ($i=6$); φ_i – объемная доля органического вещества ($i=7$) и газовой фазы ($i=8$); α – коэффициент теплоотдачи; J – сила тока; U – напряжение; Y_5 – поток массы; D – коэффициент диффузии; P – давление; R – универсальная газовая постоянная; Q_p – тепловой эффект пиролиза; k_p – предэкспоненциальный множитель реакции пиролиза; E_1 – энергия активации реакции пиролиза; Q_5 – тепловой эффект реакции окисления монооксида углерода; k_5 – предэкспоненциальный множитель реакции окисления монооксида углерода; E_5 – энергия активации реакции окисления монооксида углерода; ν_5 – доля теплоты, поглощенная слоем древесины; x_4 , x_5 – вспомогательные переменные; r , φ – полярные координаты, t – время. Индексы “ e ” и “ 0 ” соответствуют параметрам внешней среды и параметрам в начальный момент времени.

Численное моделирование проведено с использованием следующих исходных данных (древесина сосны, сердцевина): $\rho=500 \text{ кг/м}^3$; $c=1670 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\lambda=0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Параметры подкоркового слоя: $\rho=500 \text{ кг/м}^3$; $c=2600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\lambda=0,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Теплофизические характеристики коры: $\rho=500 \text{ кг/м}^3$; $c=1670 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\lambda=0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Характеристики газовой фазы: $\rho=0,1 \text{ кг/м}^3$; $c=1200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; $\lambda=0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$; $M_4=0,032 \text{ кг/моль}$; $M_5=0,028 \text{ кг/моль}$; $M_6=0,044 \text{ кг/моль}$. Термокинетические параметры [6]: $Q_p=1000 \text{ Дж/кг}$; $k_p=3,63\cdot 10^4 \text{ 1/с}$; $E_1/R=9400 \text{ K}$; $Q_5=10^7 \text{ Дж/кг}$; $k_5=3\cdot 10^{13} \text{ 1/с}$; $E_5/R=11500 \text{ K}$; $\nu_5=0,3$. Геометрические характеристики области решения: $R_5=0,25 \text{ м}$; $R_1=0,245 \text{ м}$; $R_2=0,235 \text{ м}$. Параметры внешней среды: $T_e=300 \text{ K}$, $\alpha=80 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$.

Вычислительный эксперимент проведен для следующего сценария. В условиях грозоопасной обстановки на сосну действует отрицательный грозовой разряд класса облако-земля длительностью 500 мс с пиковым током удара в 23.5 кА [7,8] и напряжением 100 кВ. Распределение температуры в различных сечениях в момент зажигания ствола дерева электрическим током ($t=0.453 \text{ с}$) представлено на рис. 2.

Исследовано влияние вольт-амперных характеристик наземного грозового разряда на процесс зажигания древесины ствола в результате прохождения электрического тока наземного грозового разряда. Для приближения “идеальной” трещины получены те же времена задержки воспламенения, что и для более простой одномерной модели. Однако использование усовершенствованной модели позволило установить, что именно в местах локализации трещин происходит зажигание хвойного дерева. Причем трещина в коре должна углубляться практически до подкоркового слоя. Поскольку наличие коркового барьера толщиной даже 1,5 мм не позволяет за период действия тока наземного грозового разряда прогреть газовую смесь в трещине до температур, при которых протекает реакция окисления монооксида углерода до диоксида углерода. В тоже время концентрация реагирующих газов в такой трещине достаточна, чтобы в случае повышения температуры газовой фазы до определенного значения такая реакция началась.

Рис. 2 показывает, что в результате действия рассматриваемого наземного грозового разряда ствол дерева в подкорковой зоне разогревается до повышенных температур и

происходит пиролиз древесины. В области трещины при достижении определенной температуры газовой смеси и концентраций реагирующих компонент происходит их взаимодействие с выделением теплоты. Область реагирования находится на небольшом удалении от дна трещины и характеризуется пиком на кривой изменения температуры по радиусу ствола дерева.

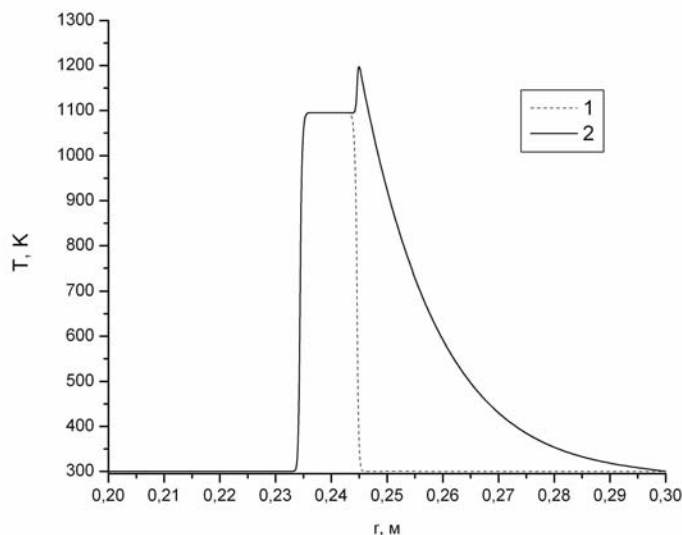


Рис. 2. Распределение температуры по радиальной координате в момент зажигания: 1 – вне трещины, 2 – в сечении, проходящем через трещину

Разработка усовершенствованной математической модели позволяет оценить условия зажигания в лесных массивах хвойных деревьев. Эта модель может быть применена на практике и достаточно легко реализована в составе систем прогноза лесной пожарной опасности [9-11]. Поставщиком исходных данных для такой системы должны являться сети регистрации грозных разрядов класса облако-земля [8]. Они позволяют зафиксировать необходимые параметры разряда. Другим возможным выходом является использование в информационно-вычислительных системах мониторинга и прогноза лесных пожаров программного генератора псевдослучайных чисел для задания параметров разряда в некотором диапазоне значений. Теплофизические характеристики любых типов древесины могут быть определены достаточно простыми способами [12] для каждого уровня влажности.

Разработана усовершенствованная физико-математическая модель газофазного зажигания древесины ствола хвойного дерева при действии наземного грозного разряда. Использование приближения “идеальной” трещины позволило установить новые закономерности в процессе теплопереноса при зажигании дерева током разряда. В рамках численного исследования предлагаемой физико-математической модели установлено, что наличие коркового барьера в трещине даже порядка 1,5 мм препятствует зажиганию дерева. В результате кондуктивного теплообмена газовая фаза в трещине не прогревается до критических температур. Однако требуется дополнительное исследование этого процесса и возможно построение более сложной модели, которая бы учитывала двухтемпературность среды и вдув “горячих” газообразных продуктов пиролиза из подкорковой зоны в область газовой фазы в трещине коры, их фильтрацию через слой коры и ряд других физико-химических эффектов.

Кроме того, разработка настоящей модели позволяет говорить о создании в ближайшем времени более общей и реалистичной трехмерной физико-математической модели с учетом

широкого спектра факторов: пиролиз древесины, локализация реактивной древесины и дефектов в коре, химическое реагирование в газовой фазе. Особым образом следует отметить, что дальнейшее развитие предлагаемой в настоящей статье модели позволит исследовать совокупное влияние указанных выше факторов.

Литература

1. Эзау К. Анатомия семенных растений. Книга 1. М.: Мир, 1980. 218 С.
2. Яворский Б.М., Селезнев Ю.А. Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и самообразования. Москва: Наука, 1984. 383 С.
3. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. 277 С.
4. Перельгин Л.М. Древесиноведение. М.: Наука, 1957. 252 С.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. С. 33 – 36.
6. 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.
7. Soriano L.R., De Pablo F., Tomas C. Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. Vol. 67. N 16. P. 1632 – 1639.
8. Cummins K.L., Murphy M.J., Bardo E.A., Hiscox W.L., Pyle R.B., Pifer A.E. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. national lightning detection network // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol. 103. P. 9035 – 9044.
9. Барановский Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 59 – 61.
10. Барановский Н.В. Влияние продолжительности действия электрического разряда на вероятность возникновения лесных пожаров // Инженерная физика. 2009. № 4. С. 43 – 46.
11. Барановский Н.В. Оценка вероятности возникновения лесных пожаров с учетом метеоусловий, антропогенной нагрузки и грозовой активности // Пожарная безопасность. 2009. № 1. С. 93 – 99.
12. Заболотный А.Е., Заболотная М.М., Заболотная Ю.А., Тимошин В.Н. Определение зон безопасного применения твердотопливных генераторов пожаротушащих аэрозолей // Вопросы специального машиностроения. 1995. Вып. 7 – 8. С. 15 – 21