

3. Х. Энхжаргал, С. Батмунх, А.С. Заворин, В.В. Саломатов, А.Ю. Долгих. Некоторые результаты исследования угля Шивэ-Овооского месторождения Монголии с целью его энергетического использования // Энергетика и теплотехника: сб. науч. трудов / под ред. акад. РАН В.Е.Накорякова. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2009, Вып.14, с.125-132.

УДК 536.24

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАЖИГАНИИ ЛИСТВЕННОГО ДЕРЕВА НАЗЕМНЫМ ГРОВОМ РАЗРЯДОМ

Кузнецов Г.В.¹, Барановский Н.В.¹, Баракнин М.Б.^{2,3}

¹ Томский политехнический университет, Томск

² Высшая школа информатики НГУ, Новосибирск

К настоящему времени разработаны детерминировано-вероятностная методика прогноза лесных пожаров с учетом грозовой активности [1-3], а также система прогноза грозовой пожарной опасности в лесу по спутниковым данным TOVS [4]. Функциональность таких систем может быть значительно расширена с помощью математической модели зажигания дерева наземным грозовым разрядом [5]. Различные породы древесины отличаются по многим своим характеристикам, в том числе теплофизическим и структурным. Известно, что наиболее существенны различия между хвойной и лиственной древесиной [6]. Поэтому модель [5], разработанная для хвойных пород не может автоматически использоваться для оценки условий зажигания дерева лиственной породы наземным грозовым разрядом.

Цель исследования – создание физико-математической модели зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом и определение условий его воспламенения. Протекание электрического тока в стволе лиственного и хвойного деревьев различно [6]. Это обусловлено тем, что у деревьев лиственных пород транспорт влаги осуществляется в массивной центральной части [6]. Более влажная центральная часть является проводником электрического тока. Анализ известной информации о свойствах древесины лиственных пород показывает, что для таких деревьев необходимо учитывать наличие влаги в структуре древесины ствола. Даже в условиях быстропротекающих процессов наличие влаги может существенно изменить условия зажигания древесины. Поэтому при постановке задачи для деревьев лиственных пород целесообразно учитывать влияние влагосодержания на теплофизические характеристики древесины.

Рассматривается следующая физическая модель. В ствол дерева в фиксированный момент времени ударяет наземный грозовой разряд.

Электрический ток наземного грозового разряда протекает по стволу. Предполагается, что выделение тепла происходит в сердцевине согласно закону Джоуля-Ленца и в различных сечениях

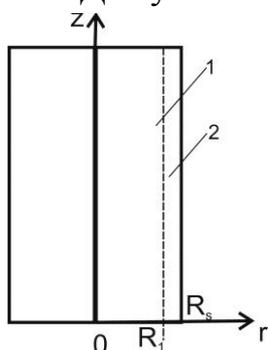


Рис. 1. Схема области решения

ствола электрический ток имеет одинаковые параметры. Считается, что испарение влаги можно описать уравнением Кнудсена-Ленгмюра [7]. В результате протекания электрического тока происходит разогрев древесины за счет выделения Джоулева тепла и при достижении критических тепловых потоков к поверхности зажигания и критической температуры происходит воспламенение дерева. Предполагается, что образовавшееся поровое пространство заполняется водяным паром. Изменения объемных долей фаз отражается на теплофизических свойствах древесины внутренней части лиственного дерева. Ствол дерева моделируется цилиндром. Рассматривается представительное сечение ствола. Схема области решения представлена на рис. 1.

Математически процесс разогрева ствола дерева перед зажиганием наземным грозовым разрядом описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений:

$$\rho_{ef} c_{ef} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_{ef}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + JU - QW\varphi_2, \quad (1)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

$$\rho_4 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -W, \quad (4)$$

$$\sum_{i=3}^5 \varphi_i = 1, \quad (5)$$

$$W = \frac{A(P^s - P)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}, \quad (6)$$

$$\rho_{ef} = \rho_3\varphi_3 + \rho_4\varphi_4 + \rho_5\varphi_5, \quad c_{ef} = c_3\varphi_3 + c_4\varphi_4 + c_5\varphi_5, \quad \lambda_{ef} = \lambda_3\varphi_3 + \lambda_4\varphi_4 + \lambda_5\varphi_5, \quad (7)$$

$$r=0, \quad \lambda_{ef} \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad (8)$$

$$r=R_1, \quad \lambda_{ef} \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2 \quad (9)$$

$$r=R, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha(T_e - T_{Rs}), \quad (10)$$

$$t=0, \quad T_i(r) = T_{i0}(r), \quad \varphi_i(0) = \varphi_{i0}, \quad (11)$$

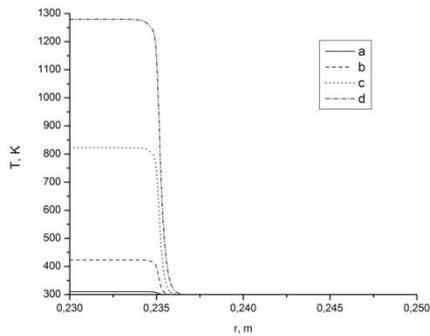


Рис. 2. Распределение температуры по радиусу ствола дерева в различные моменты времени (продолжительность действия разряда 500 мс): а - $t=0.01$ с; б - 0.1 с; в - 0.3 с; д - 0.5 с

где T_i – температура внутренней части ствола ($i=1$) и коры ($i=2$); φ_i – объемная доля: органического вещества ($i=3$), воды ($i=4$) и водяного пара ($i=5$); ρ_i , c_i , λ_i – плотность, теплоемкость и теплопроводность коры ($i=2$), органического вещества ($i=3$), воды ($i=4$) и водяного пара ($i=5$); ρ_{ef} , c_{ef} , λ_{ef} – эффективная плотность, теплоемкость и теплопроводность древесины внутренней

части ствола; α – коэффициент теплоотдачи; J – сила тока; U – напряжение; Q – тепловой эффект испарения влаги; r – координата; t – время. W – массовая скорость испарения воды, A – коэффициент аккомодации, P^s – давление насыщенного водяного пара, P – парциальное давление паров воды в воздухе, R – универсальная газовая постоянная, M – молекулярный вес воды. Индексы "Rs", "e" и "0" соответствуют параметрам на внешней границе ствола дерева, внешней среды и параметрам в начальный момент времени.

Численное исследование проведено с использованием следующих исходных данных: $\rho_3=650$ кг/м³; $c_3=1670$ Дж/(кг·К); $\lambda_3=0.29$ Вт/(м·К) [8]; $\rho_4=1000$ кг/м³; $c_4=4180$ Дж/(кг·К); $\lambda_4=0.588$ Вт/(м·К); $\rho_5=0.598$ кг/м³; $c_5=2130$ Дж/(кг·К); $\lambda_5=0.024$ Вт/(м·К). Параметры испарения: $Q=2250$

Дж/кг; $A=0.1$; $R=8.31$ Дж/(моль·К); $M=0.010$ кг/моль. Параметры внешнего воздействия: $\alpha=80$ Вт/(м²·К).

Сформулированная система уравнений (1) – (5) с краевыми и начальными условиями (8) – (11) решена методом конечных разностей [8]. Для решения разностных аналогов одномерных уравнений использовался метод прогонки в сочетании с методом простой итерации [8].

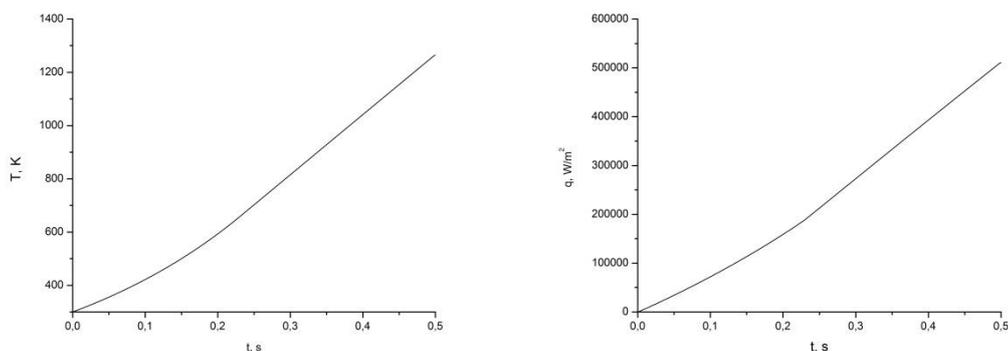


Рис.3. Температура границы подкорковой зоны ствола лиственного дерева (а) и тепловой поток к поверхности зажигания ствола дерева из подкорковой зоны (б) в различные моменты времени

В качестве критериев зажигания древесины использованы условия [9] по температуре и тепловому потоку (табл. 1). Рассматривался следующий сценарий зажигания. На лиственное дерево, например, березу действует отрицательный грозовой разряд длительностью 500 мс с пиковым током удара в 23.5 кА и напряжением 100 кВ. На рис. 2 представлено распределение температуры по радиусу ствола дерева в различные моменты времени до и в момент зажигания электрическим током (начальная температура 300 К: а) – $t=0.01$ с; б) – 0.1 с; в) – 0.3 с; г) – 0.5 с. На рис. 3.а показана зависимость теплового потока к поверхности от времени. На рис. 3.б приведено распределение температуры поверхности зажигания во времени. В процессе испарения не происходит значительного понижения температуры (рис. 2), так как интенсивность тепловыделения от прохождения электрического тока значительно превышает сток тепла в результате испарения.

В таблице 2 приведены параметры разряда и условия зажигания в зависимости от напряжения наземного грозового разряда, полученные в результате решения задачи (1) – (11). В таблице 3 представлены параметры разряда и условия зажигания в зависимости от силы тока наземного грозового разряда.

Таблица 1. Экспериментальные данные по условиям зажигания березовой древесины [9]

Время задержки зажигания, с	Тепловой поток, кВт/м ²	Температура поверхности, К
136	15	-
61.2	21	645
17.2	42	688
1.8	125	755
0.43	210	801

Таблица 2. Условия зажигания дерева в зависимости от напряжения разряда при силе тока $J=23.5$ кА

Напряжение, U, кВ	Соответствие условиям [9]	Температура поверхности, К	Плотность теплового потока из подкорковой зоны к поверхности, кВт/м ²
1 – 45	Нет	<801	<210
50		<801	252
55	Да	801	268
60	Да	801	268
80	Да	801	268
100	Да	801	268
110	Да	801	268

Анализ представленных на рис. 2 зависимостей показывает, что в результате действия рассматриваемого наземного грозового разряда ствол дерева разогревается до температуры воспламенения (более 1000 К).

Таблица 3. Условия зажигания дерева в зависимости от силы тока разряда при напряжении $U=100$ кВ

Сила тока, J, кА	Соответствие условиям [9]	Температура поверхности, К	Тепловой поток из подкорковой зоны к поверхности, кВт/м ²
1 – 5	Нет	<801	<210
10		<801	214
15	Да	801	267
20	Да	801	268
23.5	Да	801	268
30	Да	801	268
35	Да	801	273

Анализ результатов, которые проиллюстрированы на рис. 3 и рис. 4, показывает, что по критическим [9] температуре (801 К) и значению

теплового потока (268 кВт/м^2) условия зажигания лиственного дерева достигаются для типичного наземного грозового разряда.

Установлены пределы зажигания ствола дерева в течение действия электрического разряда при различных напряжениях (табл. 2) и силе тока (табл. 3). При силе тока менее 15 кА и напряжении 1 – 50 кВ не происходит зажигания в период действия наземного грозового разряда (продолжительность действия 500 мс) [10-13].

В результате численного решения задачи о зажигании содержащего влагу лиственного дерева наземным грозовым разрядом показана возможность его воспламенения в результате протекания электрического тока. Выделенные закономерности характерны для типичного диапазона изменения параметров внешнего воздействия на древесину лиственных деревьев в грозоопасной обстановке. Полученные результаты имеют не только практическое значение, заключающееся в обосновании реальности механизма зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом. Установленные закономерности являются также базой для дальнейшего развития моделей зажигания пожароопасных материалов и теории лесных пожаров [14-17]. Существующие методики прогноза лесной пожарной опасности могут быть дополнены подсистемами прогноза загораемости лиственных деревьев [18-20]. В частности, при создании геоинформационных систем мониторинга лесных пожаров анализ спутниковых снимков позволяет установить тип лесного покрова (хвойный или лиственный) на различных участках массива леса, что, в свою очередь, обеспечивает возможность локального применения соответствующей модели зажигания наземным грозовым разрядом и в конечном итоге значительно повысить точность прогноза.

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (шифр федеральной целевой научно-технической программы 2.1410.2014).

Список литературы:

1. N.V. Baranovskiy, *Matematicheskoe modelirovanie naibolee veroyatnikh scenariy i usloviy vozniknoveniya lesnikh pozharov. Diss. ... Cand. fiz.-mat. nauk.* (2007) (In Russian)
2. N.V. Baranovskiy, *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, **6**, 835 (2004) (In Russian)
3. N.V. Baranovskiy, *Ecologia i promyshlennost Rossii*, **9**, 59 (2008) (In Russian)
4. E.I. Ponomarev E.I., V.A. Ivanov, *Geographia i prirodnie resursi*, **1**, 147 (2006) (In Russian)
5. G.V. Kuznetsov, N.V. Baranovskiy, *EPJ Web of Conferences*.76, (01028), 1 (2014)
6. K. Esau *Anatomy of seed plants.* (1977)
7. A.V. Gusarov, I. Smurov, *Physics of Fluid*, **14**, 4242 (2002)
8. P. Majumdar, *Computational Methods for Heat and Mass Transfer.* (2005)

9. A.E. Zabolotniy, M.M. Zabolotnaya, J.A. Zabolotnaya, V.N. Timoshin, *Voprosy specialnogo mashinostroeniya*, **7 – 8**, 15 (1995) (In Russian)
10. D. Latham, E. Williams, *Forest fires: Behavior and Ecological Effects*. (2001)
11. C.P. Burke, D.L. Jones, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **58**, 531 (1996)
12. L.R. Soriano, F. De Pablo, C. Tomas, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **67**, 1632 (2005)
13. K.L. Cummins, M.J. Murphy, E.A. Bardo, W.L. Hiscox, R.B. Pyle, A.E. Pifer, *Journal of Geophysical Research*, **103**, 9035 (1998)
14. A.M. Grishin, N.V. Baranovskij, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, **76**, 166 (2003)
15. N.V. Baranovskiy, M.V. Zharikova, *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography – LNG&C. Thematic Cartography for the Society*. 13 (2014)
16. N.V. Baranovskiy, E.P. Yankovich, *Proceedings of 5th International Conference on Cartography and GIS (Riviera, Bulgaria, 15 – 20 June 2014)*, **2**, 756 (2014)
17. E.P. Yankovich, N.V. Baranovskiy, *14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM – 2014. GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing*, **1**, 607 (2014) (DOI: 10.5593/sgem2014B21)
18. K.L. Pew, C.P.S. Larsen, *Forest Ecology and Management*, **140**, 1 (2001)
19. M. Conedera, G. Cesti, G.B. Pezzatti, T. Zumbrunnen, F. Spinedi, *Forest Ecology and Management*, **234**, S68 (2006)
20. F.G. Plummer, *Bulletin 111. USDA Forest Service*. (1912)

УДК 62-97

НОВЫЙ ПОДХОД К ЧИСЛЕННОМУ АНАЛИЗУ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Кузнецов Г.В., Кравченко Е.В.

Томский политехнический университет, г. Томск

Проведено пространственное моделирование нестационарных полей температур в печатном узле микроэлектроники с учетом конвективного и радиационного теплообмена с внешней средой. По данным численного моделирования температурных полей определены характеристики старения полимерного материала, являющегося конструктивным элементом изделий электронной техники.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости учета пространственных неоднородных температурных полей в оценках степени деградации полимерных материалов при длительной эксплуатации изделий, а также о влиянии старения полимеров на показатели надежности устройств микроэлектроники.

Надежность изделий микроэлектроники зависит от многих факторов, в том числе и от применяемых материалов [1]. Среди множества материалов широко распространены полимерные композиционные материалы, например: слоистые пластики, диэлектрики, пластмассы, ком-