

Н. В. Барановский^{1,2}, Г. В. Кузнецов¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет
пр. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия

² Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета
пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия
E-mail: firedanger@narod.ru

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ РЕАКТИВНОЙ ДРЕВЕСИНЫ НА ПРОЦЕСС ЗАЖИГАНИЯ ЛИСТВЕННОГО ДЕРЕВА ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ НАЗЕМНЫМ ГРОВОЗОВЫМ РАЗРЯДОМ

Представлены физико-математическая постановка и результаты численного решения задачи о зажигании лиственного дерева (березы) наземным грозовым разрядом. Задача рассматривается в плоской постановке в цилиндрической системе координат. Рассмотрены особенности теплопереноса с учетом локализации реактивной древесины. Проведен параметрический анализ и определены условия зажигания ствола дерева в типичном диапазоне изменения параметров воздействия положительных разрядов.

Ключевые слова: зажигание, наземный грозовой разряд, реактивная древесина.

Введение

В высокогорных и малообжитых регионах лесные пожары возникают главным образом в результате грозовой активности [1–3]. Источниками пожаров, как правило, являются наземные грозовые разряды [4], которые регистрируются в различных странах мира [5–7].

В период с 1992 по 2000 гг. в России на лесные пожары от гроз при относительном количестве 8,8–17,5 % приходилось от 37 до 53 % пройденной огнем площади [8]. В Канаде лесные пожары от гроз составляют 35 % всех зарегистрированных пожаров [9]. Обширная статистика по наземным грозовым разрядам собрана в рамках функционирования Национальной сети обнаружения молний в США [10]. Эта система может идентифицировать большинство наземных грозовых разрядов на территории США и Канады с пространственным разрешением в несколько километров и точностью определения во времени 1 мс. В результате работы системы архивируются данные о поляр-

ности удара, пиковом токе удара, кратности удара (единичный или мультиудар) [3].

К настоящему времени созданы эмпирические [11; 12] и детерминированно-вероятностные [13; 14] модели прогноза лесной пожарной опасности. Дальнейшая модернизация этих систем возможна посредством создания адекватных физике процесса моделей зажигания лиственных деревьев наземным грозовым разрядом.

Полярность, пиковый ток удара и напряжение, а также продолжительность действия являются основными характеристиками наземных грозовых разрядов [15]. Средний пиковый ток удара может достигать [5]: $J = 23,5$ кА для отрицательного разряда и $J = 35,3$ кА для положительного.

Древесина является самым распространенным и наиболее сложным для исследования механизма зажигания и горения материалом [16]. Это твердое пористое вещество с различным строением и термической стойкостью входящих в него компонентов. На условия зажигания древесины существенное влияние оказывает содержание

влаги в пористой структуре исходного материала.

Наличие ветвей и крупных сучьев по вертикали ствола дерева должно влиять на условия прохождения разряда и, следовательно, на механизм разогрева и достижения критических условий воспламенения. Представляет особый интерес исследование теплопереноса с учетом локализации реактивной древесины. Такая древесина образуется в верхней части ветвей у лиственных пород деревьев и называется древесиной растяжения [17]. Реактивная древесина отличается от обычной физико-химическими свойствами [17] и является более плотной. По этой причине целесообразно моделирование процессов тепло- и массообмена, которые происходят при прогреве древесины ствола лиственного дерева под действием наземного грозового разряда в двумерной постановке.

Цель настоящего исследования – определение условий зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом в зависимости от параметров разряда с учетом локализации реактивной древесины.

Физическая постановка задачи

Протекание электрического тока имеет свои особенности в случае удара молнии в

ствол дерева лиственной породы, так как влагоперенос внутри ствола осуществляется по сосудам, расположенным в сердцевине ствола лиственного дерева [17]. Поэтому электрический ток разряда молнии в стволе лиственного дерева проходит по сердцевине.

Рассматривается следующая физическая модель. В фиксированный момент времени в ствол отдельно стоящего лиственного дерева ударяет грозовой разряд определенной полярности и продолжительности действия. Допускается, что вольт-амперные характеристики разряда одинаковы для различных сечений ствола дерева. Разогрев древесины ствола происходит за счет выделения Джоулева тепла [18] в сердцевине ствола дерева. В результате протекания электрического тока происходит разогрев древесины, и при достижении критических тепловых потоков из сердцевины к поверхности зажигания и ее критической температуре дерево воспламеняется. Испарение влаги из древесины описывается уравнением Кнудсена – Ленгмюра [19].

Область решения представлена на рис. 1, а, где цифрами обозначены области: 1 – сердцевина ствола дерева; 2 – кора дерева; 4 – реактивная древесина верхней части ветвей; 5 – древесина нижней части ветвей; 6 – часть сердцевины, которая имеет такие же

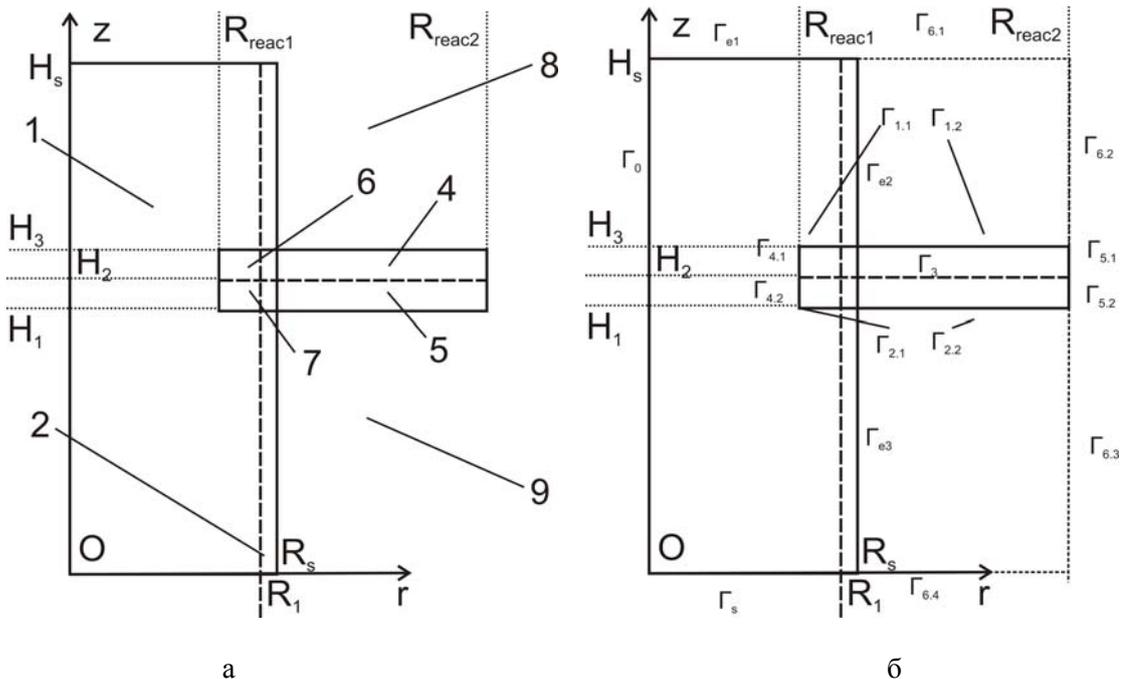


Рис. 1. Схема области решения (а) и границы подобластей (б)

свойства, как область 4; 7 – часть сердцевинны, которая имеет такие же свойства, как область 5; 8, 9 – воздух. Границы областей обозначены на рис. 1, б.

Математическая постановка задачи

Теплоперенос в рассматриваемой системе описывается с помощью нестационарных уравнений теплопроводности:

$$\rho_{ef1} c_{ef1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_{ef1}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \lambda_{ef1} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + JU - QW\varphi_2, \quad z_0 \leq z \leq H_1, \quad (1)$$

$$0 \leq r \leq R_1,$$

$$H_1 \leq z \leq H_3,$$

$$0 \leq r \leq R_{\text{reac1}},$$

$$H_3 \leq z \leq H_s,$$

$$0 \leq r \leq R_1;$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}, \quad z_0 \leq z \leq H_1, \quad (2)$$

$$R_1 \leq r \leq R_s,$$

$$H_3 \leq z \leq H_s,$$

$$R_1 \leq r \leq R_s;$$

$$\rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \frac{\lambda_4}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2}, \quad H_2 \leq z \leq H_3, \quad (3)$$

$$R_1 \leq r \leq R_{\text{reac2}};$$

$$\rho_{ef4} c_{ef4} \frac{\partial T_4}{\partial t} = \frac{\lambda_{ef4}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + \lambda_{ef4} \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} + JU - QW\varphi_2, \quad H_2 \leq z \leq H_3, \quad (4)$$

$$R_{\text{reac1}} \leq r \leq R_1;$$

$$\rho_5 c_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \frac{\lambda_5}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_5}{\partial r} \right) + \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2}, \quad H_1 \leq z \leq H_2, \quad (5)$$

$$R_1 \leq r \leq R_{\text{reac2}};$$

$$\rho_{ef5} c_{ef5} \frac{\partial T_5}{\partial t} = \frac{\lambda_{ef5}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_5}{\partial r} \right) + \lambda_{ef5} \frac{\partial^2 T_5}{\partial z^2} + JU - QW\varphi_2, \quad H_1 \leq z \leq H_2, \quad (6)$$

$$R_{\text{reac1}} \leq r \leq R_1;$$

$$\rho_6 c_6 \frac{\partial T_6}{\partial t} = \frac{\lambda_6}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_6}{\partial r} \right) + \lambda_6 \frac{\partial^2 T_6}{\partial z^2}, \quad z_0 \leq z \leq H_1, \quad (7)$$

$$R_s \leq r \leq R_{\text{reac2}},$$

$$H_3 \leq z \leq H_s,$$

$$R_s \leq r \leq R_{\text{reac2}};$$

$$\rho_7 \frac{\partial \varphi_7}{\partial t} = 0; \quad (8)$$

$$\rho_8 \frac{\partial \varphi_8}{\partial t} = -W; \quad (9)$$

$$\sum_{i=7}^9 \varphi_i = 1; \quad (10)$$

$$\rho_{ef} = \rho_7 \varphi_7 + \rho_8 \varphi_8 + \rho_9 \varphi_9, \quad c_{ef} = c_7 \varphi_7 + c_8 \varphi_8 + c_9 \varphi_9, \quad (11)$$

$$\lambda_{ef} = \lambda_7 \varphi_7 + \lambda_8 \varphi_8 + \lambda_9 \varphi_9;$$

$$W = \frac{A(P^H - P)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}. \quad (12)$$

В начальный момент времени поставлены условия:

$$T_i(0, r, z) = T_{in}; \quad (13)$$

$$\varphi_1(0) = 0,715; \quad (14)$$

$$\varphi_2(0) = 0,285. \quad (15)$$

Граничные условия для уравнений (1)–(7):

$$\Gamma_0: \quad \lambda_{\text{ef1}} \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0; \quad (16)$$

$$\Gamma_{\text{e1}}: \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = 0, \quad i = 1, 2; \quad (17)$$

$$\Gamma_s: \quad -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = \alpha_s (T_s - T_i), \quad i = 1, 2; \quad (18)$$

$$\Gamma_{\text{e2}}: \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial r}, \quad T_2 = T_6; \quad (19)$$

$$\Gamma_{\text{e3}}: \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial r}, \quad T_2 = T_6; \quad (20)$$

$$\Gamma_{1.1}: \quad \lambda_{\text{ef4}} \frac{\partial T_4}{\partial z} = \lambda_{\text{ef1}} \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad T_4 = T_1; \quad (21)$$

$$\Gamma_{1.2}: \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} = \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z}, \quad T_4 = T_6; \quad (22)$$

$$\Gamma_{2.1}: \quad \lambda_{\text{ef5}} \frac{\partial T_5}{\partial z} = \lambda_{\text{ef1}} \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad T_5 = T_1; \quad (23)$$

$$\Gamma_{2.2}: \quad \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial z} = \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z}, \quad T_5 = T_6; \quad (24)$$

$$\Gamma_{4.1}: \quad \lambda_{\text{ef1}} \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{\text{ef4}} \frac{\partial T_4}{\partial r}, \quad T_1 = T_4; \quad (25)$$

$$\Gamma_{4.2}: \quad \lambda_{\text{ef1}} \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{\text{ef5}} \frac{\partial T_5}{\partial r}, \quad T_1 = T_5; \quad (26)$$

$$\Gamma_{5.1}: \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} = \alpha_e (T_e - T_4); \quad (27)$$

$$\Gamma_{5.2}: \quad \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial r} = \alpha_e (T_e - T_5); \quad (28)$$

$$\Gamma_{6.1}: \quad T_6 = T_e; \quad (29)$$

$$\Gamma_{6.2}: \quad T_6 = T_e; \quad (30)$$

$$\Gamma_{6.3}: \quad T_6 = T_e; \quad (31)$$

$$\Gamma_{6.4}: \quad -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial z} = \alpha_s (T_s - T_6), \quad (32)$$

где T_i , ρ_i , λ_i , c_i – температура, плотность, теплопроводность и теплоемкость соответствующих подобластей ($i = 1, \dots, 6$); ρ_{ef} , c_{ef} , λ_{ef} – эффективная плотность, теплоемкость и теплопроводность древесины внутренней части ствола; φ_k , ρ_k , c_k , λ_k – объемная доля, плотность, теплоемкость и теплопроводность сухого органического вещества ($k = 7$), воды ($i = 8$) и водяного пара ($i = 9$); W – скорость испарения воды, A – коэффициент аккомодации, P^{H} – давление насыщенного водяного пара, P – парциальное давление паров воды в воздухе, R – универсальная газовая постоянная, M – молекулярный вес воды; J – сила

тока, U – напряжение, α_e , α_s – коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи соответственно, r , z – пространственные координаты, t – время; R_s – внешний радиус ствола, R_1 – граница раздела коры и сердцевины ствола, H_s – высота ствола дерева, $H_1 H_2$ – толщина зоны реактивной древесины (нижней зоны ветви), $H_2 H_3$ – толщина верхней зоны ветви, Γ_i , Γ_{ij} – обозначения границ областей.

Численное исследование проведено с использованием следующих исходных данных: $\rho = 1\,000$ кг/м³; $c = 4\,180$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,588$ Вт/(м·К) (вода); $\rho = 0,1$ кг/м³; $c = 1\,200$ Дж/(кг·К); $\lambda = 0,1$ Вт/(м·К) (воз-

дух); $\rho = 650 \text{ кг/м}^3$; $c = 1670 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\lambda = 0,29 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ (сухое органическое вещество и кора березы) [20]. Параметры испарения: $Q = 2\,250 \text{ Дж/кг}$; $A = 0,1$; $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$; $M = 0,010 \text{ кг/моль}$. Параметры внешней среды: $T_e = 300 \text{ К}$, $T_s = 297 \text{ К}$, $\alpha = 80 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, $\alpha_s = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Геометрические характеристики области решения: $R_s = 0,25 \text{ м}$; $R_1 = 0,245 \text{ м}$; $R_{\text{реac1}} = 0,225 \text{ м}$; $R_{\text{реac2}} = 0,5 \text{ м}$; $H_s = 17 \text{ м}$; $H_1H_2 = 0,05 \text{ м}$; $H_2H_3 = 0,05 \text{ м}$.

Результаты численного моделирования и обсуждение

Система уравнений (1)–(12) с краевыми и начальными условиями (13)–(32) решена локально одномерным конечно-разностным методом [21]. Для решения разностных аналогов одномерных уравнений использовался метод прогонки в сочетании с методом простой итерации [21].

Анализ условий зажигания проведен для типичного сценария: по стволу березы проходит ток наземного грозового разряда положительной полярности длительностью 500 мс. Пиковый ток разряда составляет 23,5 кА, а напряжение 100 кВ. На рис. 2 представлено распределение температуры по радиусу и высоте ствола лиственного дерева в различные моменты времени. На рис. 3 показаны зависимости теплового потока из сердцевины ствола дерева от времени на различной высоте от поверхности земли. На рис. 4 представлена зависимость температуры поверхности зажигания в различные моменты времени на определенных уровнях над поверхностью земли. На рис. 3, 4 цифрами 1 и 2 обозначены кривые для обычной ($z = 0,2 \text{ м}$) и реактивной ($z = 0,52 \text{ м}$) древесины соответственно.

В качестве критериев зажигания в рамках настоящего исследования использованы условия воспламенения, полученные в работе [20] экспериментально (табл. 1). В рассматриваемом исследовании данные условия численно определялись для обычной и реактивной древесины. Такой же подход использован в работе [22].

Исследовано влияние вольт-амперных характеристик наземного грозового разряда на процесс зажигания ствола дерева лиственной породы. В табл. 2 приведены условия зажигания, определенные численно, в

зависимости от напряжения наземного грозового разряда при силе тока $J = 23,5 \text{ кА}$ для представительного сечения ствола дерева ($z = 0,2 \text{ м}$).

Кроме того, варьировалась сила тока наземного грозового разряда. В табл. 3 представлены условия зажигания, определенные численно, при фиксированном напряжении $U = 100 \text{ кВ}$ для представительного сечения ствола дерева ($z = 0,2 \text{ м}$).

Анализ результатов, представленных в табл. 2 и 3, показывает, что наземный грозовой разряд с параметрами $U = 55\text{--}110 \text{ кВ}$ и $J = 15\text{--}35 \text{ кА}$ вызывает воспламенение обычной древесины лиственного дерева. Этот же факт был установлен в приближении одномерной математической модели зажигания ствола дерева лиственной породы наземным грозовым разрядом [23].

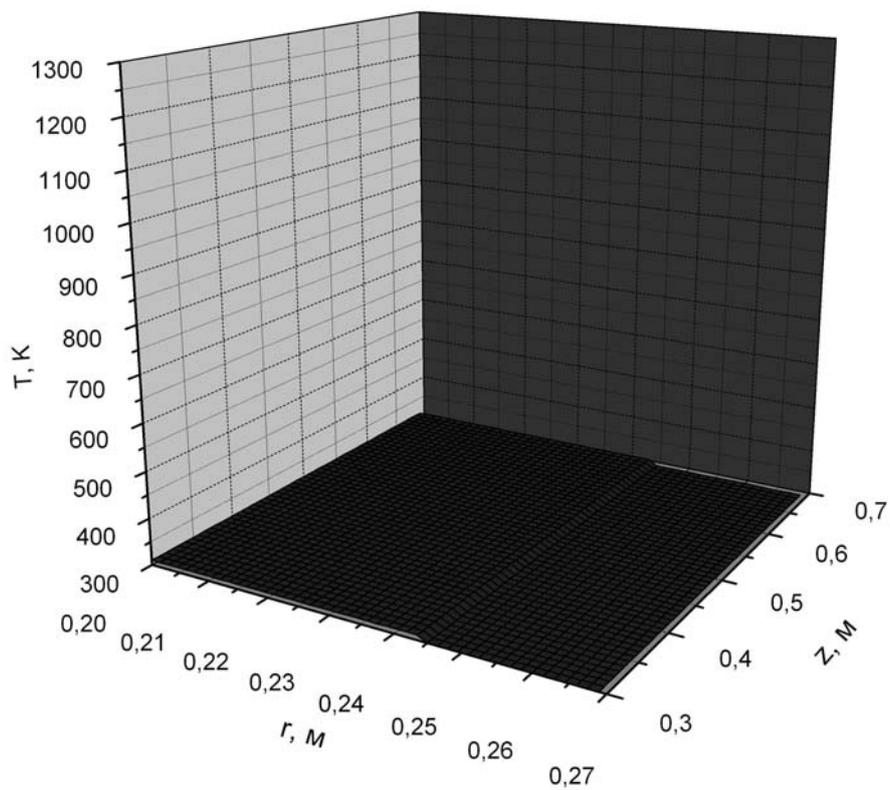
В табл. 4 приведены теоретически определенные условия зажигания реактивной древесины в зависимости от напряжения наземного грозового разряда при силе тока $J = 23,5 \text{ кА}$ ($z = 0,52 \text{ м}$).

В табл. 5 представлены теоретически определенные условия зажигания реактивной древесины в зависимости от силы тока наземного грозового разряда при напряжении $U = 100 \text{ кВ}$ ($z = 0,52 \text{ м}$).

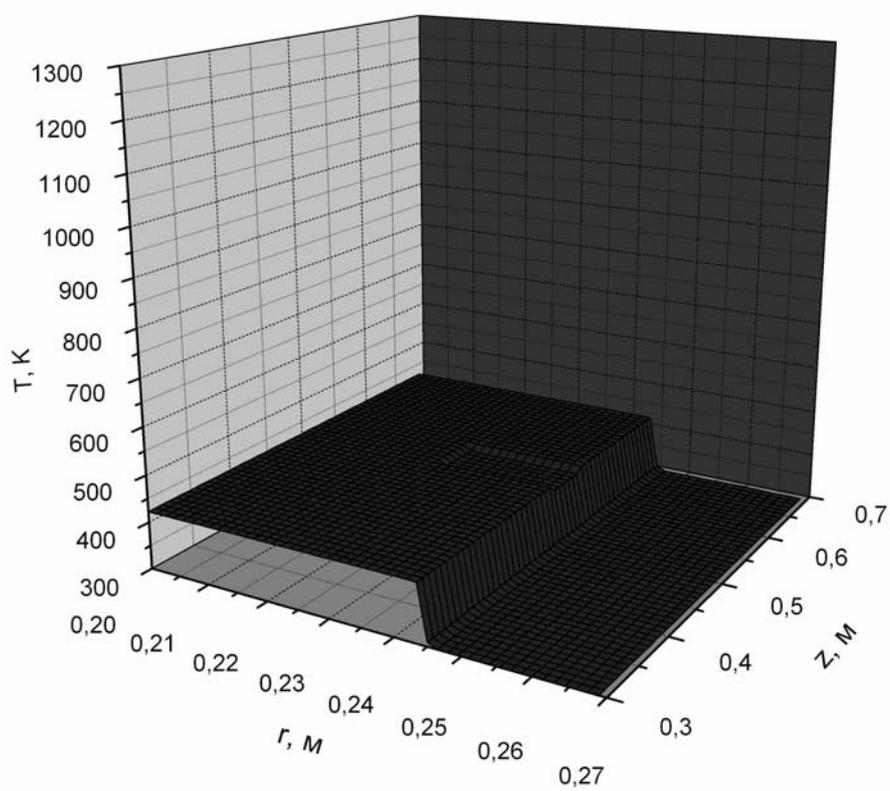
Условия зажигания [20] не всегда выполняются для реактивной древесины при одновременном их достижении для обычной. Установлено, что только при напряжении 70 кВ и выше наблюдается выполнение условий зажигания [20]. Варьирование силы тока наземного грозового разряда показало, что только при силе тока 20 кА и выше достигаются условия зажигания [20].

Анализ распределений, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод, что в результате действия рассматриваемого наземного грозового разряда ствол дерева в зоне сердцевины разогревается до температур, при которых лесные горючие материалы горят (более 1 000 К) и ствол дерева воспламеняется. В области реактивной древесины формируется поле более низкой температуры, что является следствием различий в теплофизических свойствах обычной и реактивной древесины.

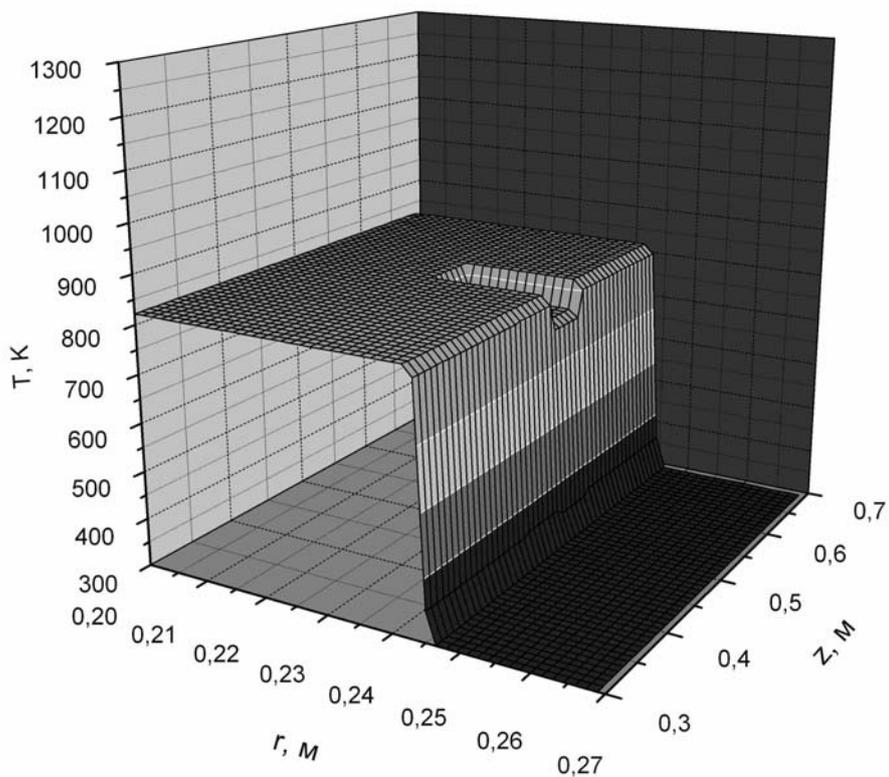
По температуре (801 К) и тепловому потоку (268 кВт/м^2) условия зажигания обычной древесины (см. рис. 3, 4) для рассматриваемого разряда достигаются для достаточно типичных параметров грозового



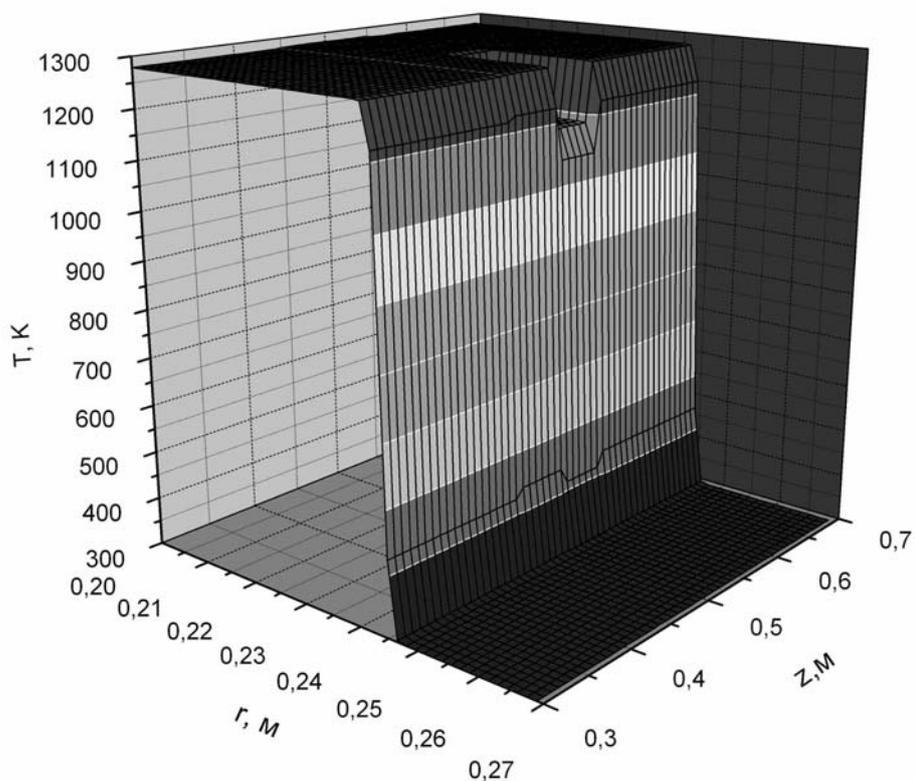
а



б



В



Г



▲
▲ *Рис. 2.* Распределение температуры по радиусу и высоте ствола дерева в различные моменты времени: *a* – 0,01 с; *б* – 0,1 с; *в* – 0,3 с; *г* – 0,5 с

Таблица 1

Экспериментально определенные условия
зажигания березы [20]

Время задержки зажигания, с	Тепловой поток, кВт/м ²	Температура поверхности зажигания, К
136	15	–
61,2	21	645
17,2	42	688
1,8	125	755
0,43	210	801

Таблица 2

Условия зажигания ствола лиственного дерева от напряжения
при силе тока $J = 23,5$ кА

Напряжение, U , кВ	Выполнение условий зажигания [20]	Температура поверхности, К	Тепловой поток изнутри ствола к поверхности, кВт/м ²
1–45	За время действия наземного грозового разряда условия зажи- гания не достигаются	< 801	< 210
50		< 801	262
55	Условия зажигания выполняются	801	268
60	Условия зажигания выполняются	801	268
80	Условия зажигания выполняются	801	268
100	Условия зажигания выполняются	801	268
110	Условия зажигания выполняются	801	268

Таблица 3

Условия зажигания ствола лиственного дерева от силы тока
при напряжении $U = 100$ кВ

Сила тока, J , кА	Выполнение условий зажигания [20]	Температура поверхности, К	Тепловой поток изнутри ствола к поверхности, кВт/м ²
1–5	За время действия наземного грозо- вого разряда условия зажигания не достигаются	< 801	< 210
10		< 801	214
15	Условия зажигания выполняются	801	267
20	Условия зажигания выполняются	801	268
23,5	Условия зажигания выполняются	801	268
30	Условия зажигания выполняются	801	268
35	Условия зажигания выполняются	801	273

Таблица 4

Условия зажигания реактивной древесины от напряжения при силе тока $J = 23,5$ кА

Напряжение, U , кВ	Выполнение условий зажигания [20]	Температура поверхности, К	Тепловой поток изнутри ствола к поверхности, кВт/м ²
1–50	За время действия наземного грозового разряда условия зажигания не достигаются	< 801	< 210
55		< 801	223
60		< 801	242
70	Условия зажигания выполняются	801	268
80	Условия зажигания выполняются	801	268
100	Условия зажигания выполняются	801	268
110	Условия зажигания выполняются	801	268

Таблица 5

Условия зажигания реактивной древесины от силы тока при напряжении $U = 100$ кВ

Сила тока, J , кА	Выполнение условий зажигания [20]	Температура поверхности, К	Тепловой поток изнутри ствола к поверхности, кВт/м ²
1–10	За время действия наземного грозового разряда условия зажигания не достигаются	< 801	< 210
15		< 801	246
20	Условия зажигания выполняются	801	268
23,5	Условия зажигания выполняются	801	268
30	Условия зажигания выполняются	801	268
35	Условия зажигания выполняются	801	273

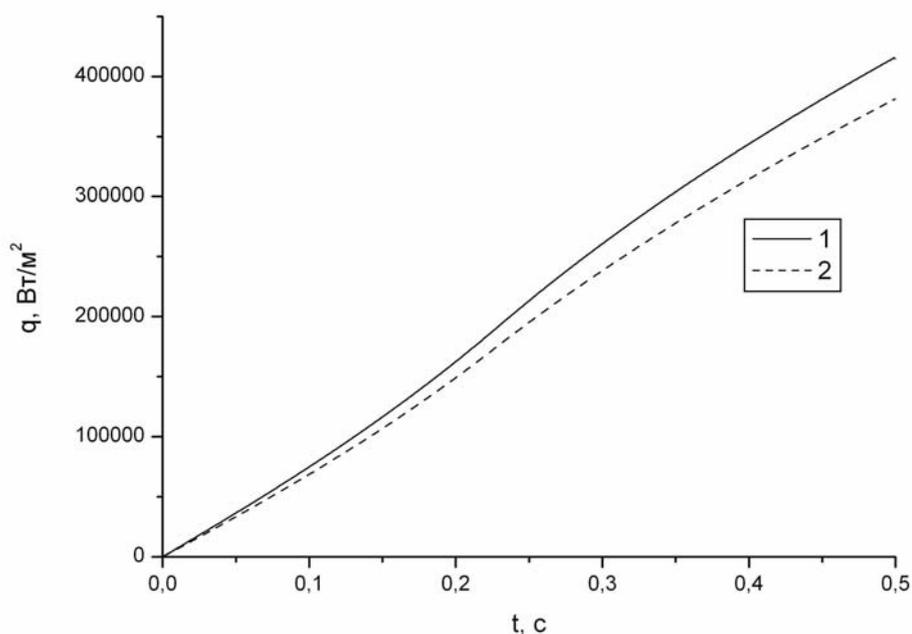


Рис. 3. Зависимость теплового потока из сердцевины к поверхности зажигания от времени

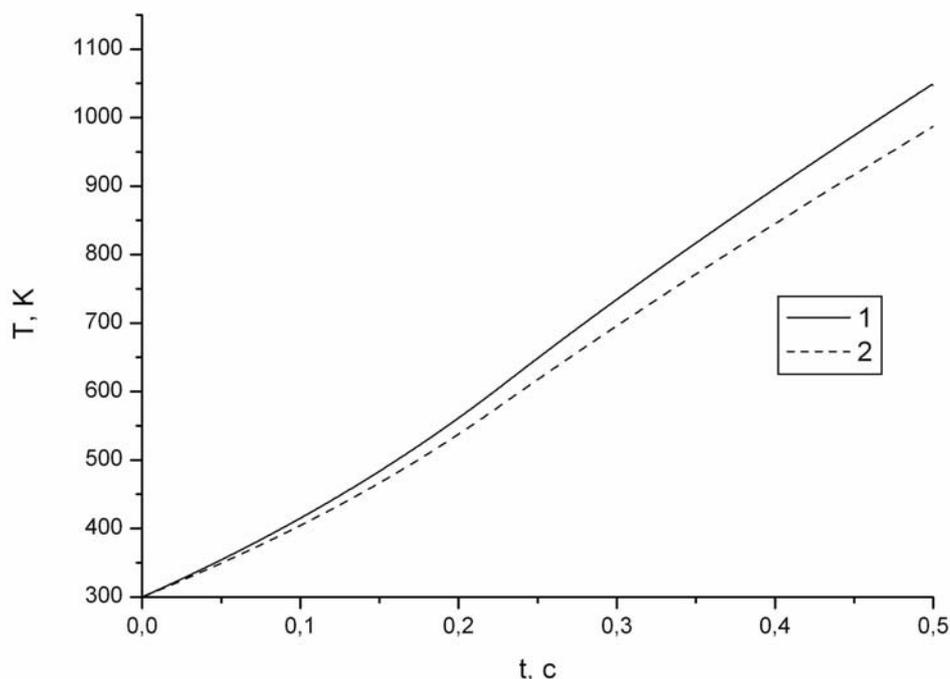


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности зажигания от времени

разряда. Одновременно наблюдаются отставание в прогреве и меньшие тепловые потоки к поверхности зажигания в случае реактивной древесины. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наличие сучьев и больших ветвей изменяет характер зажигания ствола дерева лиственной породы. В рамках одномерной постановки этот факт установить не удается.

Заключение

Таким образом, в результате решения важной научно-практической задачи разработана физико-математическая модель зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом с учетом локализации реактивной древесины.

Выявлены условия зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом. В зоне реактивной древесины формируется область более низкой температуры. Следствием этой закономерности является тот факт, что грозовой разряд с одинаковыми характеристиками тока будет с большей вероятностью приводить к зажиганию высоких деревьев с малым количе-

ством ветвей. И наоборот, зажигание деревьев с развитой системой ветвей и сучьев имеет меньшую вероятность. Этот теоретический вывод согласуется с данными наблюдений [24], где было установлено, что деревья с пирамидальными, островершинными кронами чаще фигурируют в статистике повреждений, чем деревья с кронами широко горизонтальными, раскидистыми.

В результате проведенного исследования созданы условия для дальнейшего развития моделей зажигания пожароопасных материалов и детерминированно-вероятностных подходов к оценке пожарной опасности в лесах и лесостепях [25–28].

Список литературы

1. Conedera M., Cesti G., Pezzatti G. B., Zumbrunnen T., Spinedi F. Lightning-Induced Fires in the Alpine Region: An Increasing Problem // *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 234. Suppl. 1. P. S68.
2. Flannigan M. D., Wotton B. M. *Lightning-Ignited Fires in Northwestern On-*

- tario // Canadian Journal of Forest Research. 1991. Vol. 21. P. 277–287.
3. Latham D., Williams E. Lightning and Forest Fires // Forest Fires: Behavior and Ecological Effects. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2001. P. 375–418.
 4. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 с.
 5. 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. No. 16. P. 1632–1639.
 6. Seity Y., Soula S., Sauvageot H. Radar Observation and Lightning Detection in Coastal Thunderstorms // Physics and Chemistry of the Earth. Pt. B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. 2000. Vol. 25. No. 10–12. P. 1107–1110.
 7. Pinto O. Jr., Pinto I. R. C. A., Naccarato K. P. Maximum Cloud-To-Ground Lightning Flash Densities Observed by Lightning Location Systems in the Tropical Region: A Review // Atmospheric Research. 2007. Vol. 84. No. 3. P. 189–200.
 8. Азметов Р. Р., Беляев А. И., Москоченко В. М. Перспективы создания Российской системы электромагнитного мониторинга гроз для нужд охраны лесов от пожаров, энергетики, авиации, метеорологии и прогнозирования стихийных бедствий // Сопряженные задачи механики и экологии: Материалы междунар. конф. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 9–11.
 9. Weber M. G., Stocks B. J. Forest Fires and Sustainability in the Boreal Forests of Canada // Ambio. 1998. Vol. 27. P. 545–550.
 10. 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.
 11. Курбатский Н. П., Костырина Т. В. Национальная система расчета пожарной опасности США // Обнаружение и анализ лесных пожаров: Сб. науч. ст. Красноярск: ИД СО АН СССР, 1977. С. 38 – 90.
 12. Larjavaara M., Kuuluvainen T., Rita H. Spatial Distribution of Lightning-Ignited Fires in Finland // Forest Ecology and Management. 2005. Vol. 208. No. 1–3. P. 177–188.
 13. Барановский Н. В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2007. 153 с.
 14. Барановский Н. В. Влияние антропогенной нагрузки и грозовой активности на вероятность возникновения лесных пожаров // Сибирский экологический журнал. 2004. № 6. С. 835–842.
 15. Burke C. P., Jones D. L. On the Polarity and Continuing Current in Unusually Large Lightning Flashes Deduced from ELF Events // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1996. Vol. 58. P. 531–548.
 16. Абдурагимов И. М., Андросов А. С., Бартак М. Воспламенение и горение древесины под влиянием тепловых потоков // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 1. С. 10–13.
 17. Эзау К. Анатомия семенных растений. М.: Мир, 1980. Кн. 1. 218 с.
 18. Яворский Б. М., Селезнев Ю. А. Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и самообразования. М.: Наука, 1984. 383 с.
 19. Панкратов Б. М., Полежаев Ю. В., Рудько А. К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками / Под ред. В. С. Зуева. М.: Машиностроение, 1975. 224 с.
 20. 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.
 21. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. С. 33–36.
 22. Бельцова Т. Г., Корольченко О. Н. Показатели воспламеняемости огнезащитной древесины // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17, № 4. С. 31–33.
 23. Барановский Н. В. Математическое моделирование зажигания листового дерева наземным грозовым разрядом // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Тез. докл. X Всерос. шк.-конф. молодых ученых. Новосибирск, 2008. С. 25–26.
 24. Погребняк П. С. Общее лесоводство. М.: Колос, 1968. 439 с.

25. Кузнецов Г. В., Барановский Н. В. Детерминированно-вероятностный прогноз лесопожарных возгораний // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15, № 5. С. 56–59.

26. Барановский Н. В., Гришин А. М., Лоскутникова Т. П. Информационно-прогностическая система определения вероятности возникновения лесных пожаров // Вычислительные технологии. 2003. № 2. С. 16–26.

27. Барановский Н. В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 59–61.

28. Барановский Н. В. Прогноз степной пожарной опасности // Экологические системы и приборы. 2006. № 11. С. 42–46.

Материал поступил в редколлегию 15.02.2011

N. V. Baranovskiy, G. V. Kuznetsov

**MATHEMATICAL MODELLING OF DECIDUOUS TREE IGNITION
BY GROUND LIGHTNING DISCHARGE TAKING INTO ACCOUNT LOCALIZATION
OF REACTIVE WOOD**

Physical and mathematical statement and results of the numerical simulation of a problem about deciduous tree (birch) ignition by ground lightning discharge are presented. The problem is considered in flat statement in cylindrical system of coordinates. Heat transfer features taking into account localization of reactive wood are considered. The parametrical analysis is carried out and conditions of tree trunk ignition in a typical range of parameters of influence of positive discharges are obtained.

Keywords: ignition, ground lightning discharge, reactive wood.