УДК 533.6

ГАЗОФАЗНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ЛИСТВЕННОГО ДЕРЕВА НАЗЕМНЫМ ГРОЗОВЫМ РАЗРЯДОМ В ПРИБЛИЖЕНИИ КРУПНЫХ СОСУДОВ

Кузнецов Г.В.[1], Барановский Н.В.[1,2]

[1]*Томский политехнический университет, Томск, Россия*
[2]*Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Численно реализована физико-математическая модель газофазного зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом. Использовано приближение крупных сосудов. Показана возможность зажигания лиственного дерева в газовой фазе в условиях прохождения грозы разрядом класса облако-земля. Установлено, что наличие большого количества влаги в крупных сосудах на начальном этапе замедляет разогрев древесины березы. Задача решена в приближении идеальной трещины. Зажигание дерева происходит в месте локализации трещины. Исследовано влияние вольт-амперных характеристик наземного грозового разряда на время задержки воспламенения лиственного дерева. Представленная физико-математическая модель может стать дополнительным модулем в системах оценки лесной пожарной опасности.

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии наземного грозового разряда [1] электрический ток в стволе дерева протекает по областям, насыщенным влагой [2]. Существует два основных типа распределения в древесине покрытосеменных (к ним относятся лиственные деревья). Если сосуды имеют в основном одинаковый диаметр и равномерно распределены в годичном кольце, древесину называют рассеяннососудистой [2]. Древесину с сосудами неодинакового диаметра, наиболее крупные из которых сосредоточены в ранней древесине, называют кольцесосудистой [2]. Между этими двумя крайними типами встречаются и различные промежуточные варианты. В пределах этих крупных типов распределения отдельные сосуды могут быть изолированы друг от друга или встречаются группами разных размеров и формы. Сосуды, расположенные группами, уплощены (то есть имеют границы параллельные поверхностям r=const и φ=const) вдоль линии их контакта друг с другом [2]. Исследования проводимости у разных видов с помощью радиоактивного фосфора и красящих веществ показывают, что у одних видов сосуды связаны только в пределах слоя прироста, тогда как у других наблюдается связь между отдельными слоями прироста [3].

Ранее показана возможность воспламенения лиственного дерева электрическим током наземного грозового разряда [4]. Было установлено, что из сердцевины к слою коры направлен тепловой поток, достаточный для зажигания древесины березы. Известно, что при таких температурах происходит термическое разложение древесины с выделением газообразных горючих продуктов пиролиза [5]. В зависимости от вида материала и способа теплопередачи могут реализовываться случаи, когда может быть выделена так называемая ведущая экзотермическая реакция, которая определяет основные закономерности процесса зажигания [6]. В соответствии с местом локализации ведущей реакции ряд моделей зажигания получили названия твердофазной, гетерогенной и газофазной [6]. В полной постановке модель зажигания твердого вещества включает стадии разогрева вещества, быстрого реагирования в поверхностном слое с образованием продуктов пиролиза, самоускорения химических реакций при выходе скорости горения на стационарный режим [6].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Цель настоящего исследования – разработка физико-математической модели газофазного зажигания лиственного дерева в приближении крупных сосудов с учетом испарения влаги и анализ влияния вольт-амперных характеристик наземного грозового разряда.

Рассматривается отдельно стоящее дерево лиственной породы (относятся к покрытосеменным [7]). В фиксированный момент времени в ствол дерева ударяет наземный грозовой разряд. Электрический

ток наземного грозового разряда протекает по стволу. Предполагается, что ствол дерева представляет собой проводник электрического тока типа резистора, для которого справедливы законы Ома и Джоуля-Ленца [8]. В различных сечениях ствола параметры тока принимаются одинаковыми. Основные допущения: 1) влагопроводящие пути расположены группами, то есть могут быть объединены в крупные пучки (сосуды); 2) сосуды уплощены вдоль линии контакта; 3) сосуды связаны между отдельными кольцами прироста. Совокупность выше указанных допущений и составляет базис приближения крупных сосудов. В структуре коркового слоя присутствует неоднородность “трещина”. Трещина считается “идеальной”, то есть проходит по всей вертикале ствола. Это допущение позволяет использовать 2D-постановку задачи. Испарение влаги описывается уравнением Кнудсена-Ленгмюра [9]. Образующиеся водяные пары мгновенно уходят из древесины. При разогреве древесины происходит ее термическое разложение и газообразные горючие компоненты пиролиза мгновенно поступают в область трещины, где смешиваются с воздухом. При достижении определенных концентраций реагентов и температуры газовой смеси происходит окисление моноксида углерода до диоксида углерода. Считается, что мгновенный выход водяного пара и газообразных продуктов пиролиза возможен только из приповерхностного слоя крупных сосудов. Критерии зажигания: 1) теплоприход от химической реакции превышает теплоприход из сердцевины ствола дерева; 2) температура в области зажигания достигает определенного критического значения.

Задача решается в полярных координатах в плоской постановке. Моделируется горизонтальный срез ствола дерева. Схема области решения представлена на рис.1, где 1 – сердцевина, 2 – кора, 3 – крупные сосуды, 4 – газовая фаза; R_s – внешний радиус ствола, R_1 – граница раздела сердцевины и коры.

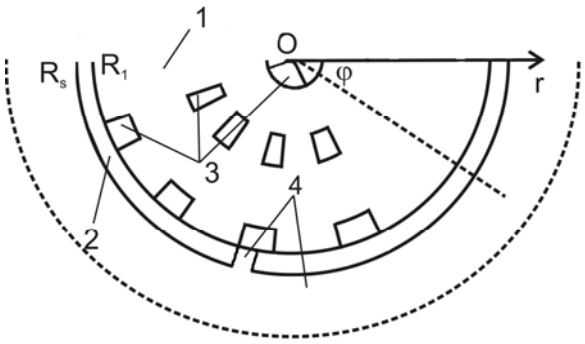

Рис.1 Геометрия области решения

Математически процесс газофазного зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности и диффузии:

$$\rho_{ef1}c_{ef1}\frac{\partial T_1}{\partial t}=\frac{\lambda_{ef1}}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_1}{\partial r}\right)+\frac{\lambda_{ef1}}{r^2}\frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2}- \\ -QW\varphi_9-Q_p k_p\rho_8\varphi_8\exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad (1)$$

$$\rho_{ef2}c_{ef2}\frac{\partial T_2}{\partial t}=\frac{\lambda_{ef2}}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_2}{\partial r}\right)+ \\ +\frac{\lambda_{ef2}}{r^2}\frac{\partial^2 T_2}{\partial \varphi^2}-Q_p k_p\rho_8\varphi_8\exp\left(-\frac{E_1}{RT_2}\right), \quad (2)$$

$$\rho_{ef3}c_{ef3}\frac{\partial T_3}{\partial t}=\frac{\lambda_{ef3}}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_3}{\partial r}\right)+\frac{\lambda_{ef3}}{r^2}\frac{\partial^2 T_3}{\partial \varphi^2}+ \\ +JU-QW\varphi_9-Q_p k_p\rho_8\varphi_8\exp\left(-\frac{E_1}{RT_3}\right), \quad (3)$$

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

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

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

$$\frac{\partial C_6}{\partial t}=\frac{D}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial C_6}{\partial r}\right)+\frac{D}{r^2}\frac{\partial^2 C_6}{\partial \varphi^2}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=4}^{7}C_i=1, \quad (8)$$

$$\rho_8\frac{\partial \varphi_8}{\partial t}=-k_p\rho_8\varphi_8\exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad (9)$$

$$\rho_8\frac{\partial \varphi_8}{\partial t}=-k_p\rho_8\varphi_8\exp\left(-\frac{E_1}{RT_2}\right), \quad (10)$$

$$\rho_8\frac{\partial \varphi_8}{\partial t}=-k_p\rho_8\varphi_8\exp\left(-\frac{E_1}{RT_3}\right), \quad (11)$$

$$\rho_9\frac{\partial \varphi_9}{\partial t}=-W_{ev}, \quad (12)$$

$$\sum_{i=8}^{10}\varphi_i=1, \quad (13)$$

$$W = \frac{A(P^{н} - P)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}, \quad (14)$$

$$R_5 = k_5 M_5 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT_3}\right) \times \begin{cases} x_4^{0.25} x_5, x_4 > 0.05 \\ x_4 x_5, x_4 \le 0.05 \end{cases}, \quad (15)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=4}^{7} \frac{C_k}{M_k} M_i}, \quad (16)$$

$$P = \frac{\rho RT}{M}, \frac{1}{M} = \frac{C_4}{M_4} + \frac{C_5}{M_5} + \frac{C_6}{M_6} + \frac{C_7}{M_7}, \quad (17)$$

$$\rho_{efi} = \rho_8\varphi_8 + \rho_9\varphi_9 + \rho_{10}\varphi_{10},$$
$$c_{efi} = c_8\varphi_8 + c_9\varphi_9 + c_{10}\varphi_{10}, \quad (18)$$
$$\lambda_{efi} = \lambda_8\varphi_8 + \lambda_9\varphi_9 + \lambda_{10}\varphi_{10}$$

Граничные условия для уравнений (1) – (18):

r=0, $$\lambda_{ef1}\frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad (19)$$

Гi, $$\lambda_{ef1}\frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{ef2}\frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2, \quad (20)$$

Гj, $$\lambda_{ef3}\frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_{ef2}\frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_3 = T_2, \quad (21)$$

Гk.r, $$\lambda_{ef3}\frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_{ef1}\frac{\partial T_1}{\partial r}, \quad T_3 = T_1, \quad (22)$$

Гg, $$\lambda_{ef2}\frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial r}, \quad T_2 = T_g, \quad (23)$$

Гc.r, $$\lambda_{ef3}\frac{\partial T_3}{\partial r} = \lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial r}, \quad T_3 = T_g,$$

или (24)

$$\lambda_{ef1}\frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial r}, \quad T_1 = T_g,$$

Гe, $$\lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial r} = \alpha_e\left(T_e - T_g\right), \quad (25)$$

Г0.1,Г0.2, $$\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial \varphi} = 0, \quad (26)$$

Гk.φ, $$\lambda_{ef3}\frac{\partial T_3}{\partial \varphi} = \lambda_{ef1}\frac{\partial T_1}{\partial \varphi}, \quad T_3 = T_1, \quad (27)$$

Гc.φ, $$\lambda_{ef2}\frac{\partial T_2}{\partial \varphi} = \lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial \varphi}, \quad T_2 = T_g, \quad (28)$$

Начальные условия для уравнений (1) – (18):

t=0, $$T_i(r,\varphi) = T_{i0}(r,\varphi), \quad \text{i=1,2,3,g} \quad (29)$$

$$C_i(r,\varphi) = C_{i0}(r,\varphi), \quad \text{i=4,5,6,7} \quad (30)$$

$$\varphi_i(r,\varphi) = \varphi_{i0}(r,\varphi), \quad \text{i=8,9,10} \quad (31)$$

где T_i, ρ_{efi}, c_{efi}, λ_{efi} – температура, эффективные плотность, теплоемкость и теплопроводность соответственно сердцевины (i=1), коры (i=2), крупных сосудов (i=3) ствола; T_g, ρ_g, c_g, λ_g – температура, плотность, теплоемкость и теплопроводность газовой фазы; C_i, M_i – концентрация и молярная масса кислорода (i=4), моноксида углерода (i=5), водяного пара (i=6) и инертных компонент (i=7); φ_k, ρ_k, c_k, λ_k – объемная доля, плотность, теплоемкость и теплопроводность органического вещества (k=8), воды (k=9) и газовой смеси (k=10); α_e – коэффициент теплоотдачи; J – сила тока; U – напряжение; Q – тепловой эффект испарения влаги; W – массовая скорость испарения воды, A – коэффициент аккомодации, $P^{н}$ – давление насыщенного водяного пара, P – парциальное давление паров воды в воздухе, R – универсальная газовая постоянная; Y_5 – поток массы (моноксид углерода); Y_6 – поток массы (водяной пар); Q_p – тепловой эффект пиролиза; k_p – предэкспоненциальный множитель реакции пиролиза; E_1 – энергия активации реакции пиролиза; Q_5 – тепловой эффект реакции окисления моноксида углерода; k_5 – предэкспоненциальный множитель реакции окисления моноксида углерода; E_5 – энергия активации реакции окисления моноксида 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. В граничных условиях (24) первый вариант соответствует случаю, когда трещина открывает поверхностный сосуд. Второй вариант соответствует случаю, когда открыта межсосудная часть древесины.

АНАЛИЗ

Численное исследование проведено с использованием следующих исходных данных: ρ_8=650 кг/м^3; c_8=1670 Дж/(кг·К); λ_8=0.29 Вт/(м·К); ρ_9=1000 кг/м^3; c_9=4180 Дж/(кг·К); λ_9=0.588 Вт/(м·К); ρ_{10}=0.598 кг/м^3; c_{10}=2130 Дж/(кг·К); λ_{10}=0.024 Вт/(м·К); ρ_g=1.2 кг/м^3; c_g=2130 Дж/(кг·К); λ_g=0.102 Вт/(м·К). Параметры испарения: Q=2250 Дж/кг; A=0.1; R=8.31 Дж/(моль·К); M_6=0.010 кг/моль. Термокинетиче-

ские параметры: Q_p=1000 Дж/кг; $k_p=3.63\cdot10^4$ 1/с; E_1/R=9400 К; $Q_5=10^7$ Дж/кг; $k_5=3\cdot10^{13}$1/с; E_5/R=11500 К; ν_5=0.3; M_4=0.032 кг/моль; M_5=0.028 кг/моль; M_7=0.044 кг/моль. Параметры внешнего воздействия: α=80 Вт/(м^2·К), T_e=300 К. Геометрические характеристики области решения: R_s=0.25 м; R_1=0.245 м.

Сформулированная математическая модель (1) – (18) с краевыми и начальными условиями (19) – (31) решена локально-одномерным конечно-разностным методом [10]. Для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений использовался метод прогонки в сочетании с методом простой итерации [10]. Рассматривается следующая схема исследуемого процесса. На ствол дерева, например, березу действует отрицательный грозовой разряд длительностью 500 мс с пиковым током удара в 23.5 кА [11] и напряжением 100 кВ. На рис.2 представлено распределение температуры по радиальной координате в сечении ствола дерева, проходящего через трещину в коре, в момент зажигания током наземного грозового разряда (начальная температура 300 К).

Анализ представленной на рис.2 температурной зависимости показывает, что в результате действия типичного наземного грозового разряда ствол дерева в области крупных сосудов разогревается до температур, при которых происходит образование продуктов пиролиза. Получены зависимости объемных долей органического вещества, влаги и водяного пара в области крупного сосуда от времени. Сначала с повышением температуры происходит интенсивное испарение влаги, содержащейся в древесине. Интенсификация процессов термического разложения органического вещества древесины начинается в условиях, когда практически вся влага из древесины испарилась. Получено распределение объемных долей фаз по радиальной координате в момент зажигания (рис.3). К этому моменту вся влага переходит в пар. В области крупных сосудов в результате термодеструкции происходит уменьшение объемной доли органического вещества. Оба этих процесса приводят к увеличению объемной доли газовой фазы. Возможно, именно в результате частичного разложения материала крупных сосудов происходит повреждение влагопроводящих путей в стволе дерева, что приводит к его гибели или частичному увяданию [12]. Образовавшиеся газообразные горючие продукты пиролиза и водяной пар мгновенно попадают в область газовой фазы. На рис.4 представлено распределение концентраций компонент газовой фазы по радиальной координате. Концентрация водяного пара превосходит концентрацию газообразных горючих продуктов пиролиза (максимум наблюдается на дне трещины, где происходит их вдув из приповерхностных крупных сосудов). Однако ее значение меньше, чем при прохождении электрического тока в стволе хвойного дерева. Тем не менее, зажигание происходит, так как газовая фаза в области трещины прогревается до большей температуры, чем это происходит при воздействии грозового разряда на хвойное дерево (или на лиственное дерево, имеющего равномерное распределение влагопроводящих путей в горизонтальном сечение ствола).

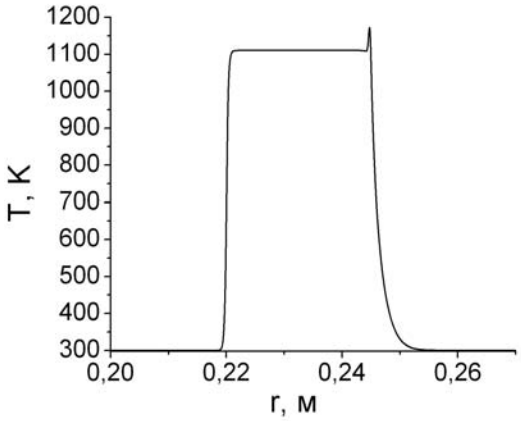

Рис.2 Распределение температуры по радиальной координате в сечении трещины в момент зажигания

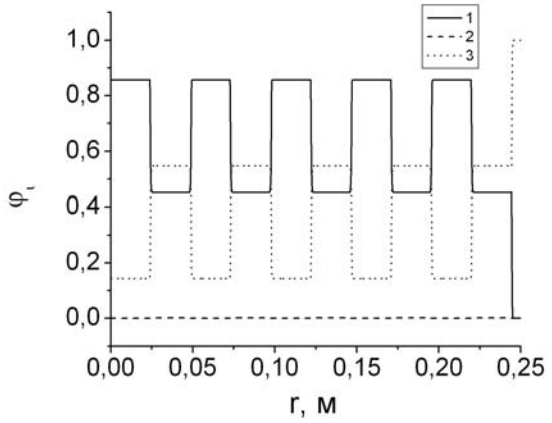

Рис.3 Распределение объемных долей фаз по радиальной координате в момент зажигания (1 – органическое вещество, 2 – влага, 3 – водяной пар)

Установлено, что вне зоны трещины корковый слой не позволяет прогреться газовой смеси до критических температур. Наличие структурных неоднородностей (трещин) в коре изменяет ситуацию. Было рассмотрено три варианта:

1. трещина открывает поверхностный сосуд полностью;
2. трещина открывает полностью межсосудную древесину;
3. трещина частично открывает крупный сосуд.

В зоне крупных сосудов формируется повышенное поле температур.

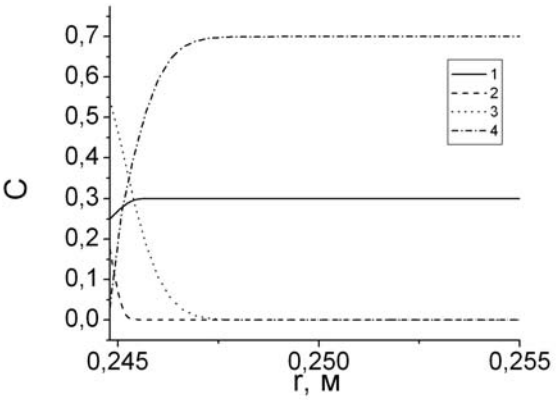

Рис.4. Распределение концентраций компонент газовой смеси по радиальной координате в сечении трещины в момент зажигания (1 – кислород, 2 – моноксид углерода, 3 – водяной пар, 4 – инертные компоненты)

Установлено, что если трещина частично или полностью граничит с поверхностным сосудом, то именно в трещине газовая смесь прогревается до необходимых температур и при определенных концентрациях реагентов происходит окисление моноксида углерода до диоксида углерода с выделением тепла. На рис.2 видно, что на некотором удалении от дна трещины кривая температур имеет пик, обусловленный теплоприходом от химической реакции. В непосредственной близости к поверхности ствола (на дне трещины) температура газовой фазы ниже, так как здесь происходит вдув продуктов пиролиза и водяного пара, и концентрация окислителя становится меньше. Химического реагирования в таких условиях не происходит. Отметим, что при решении задачи использовалось дополнительное допущение о том, что только из слоя приповерхностных крупных сосудов газообразные вещества могут мгновенно оказаться на границе ствола и газовой фазы. Предполагается, что из внутренних сосудов продукты пиролиза и водяной пар не успевают достигнуть этой границы за период воздействия грозового разряда. На рис.3 видно, что между крупными сосудами имеется более плотная древесина, которая должна играть роль барьера. В результате численного исследования модели установлено, что при силе тока 1 – 15 кА и напряжении 1 – 60 кВ не происходит зажигания лиственного дерева при воздействии наземного грозового разряда.

Следует заметить, что внутренние сосуды при прохождении электрического тока также выделяют Джоулево тепло, достаточное для воспламенения древесины березы. Однако отсутствие окислителя в этой зоне приведет к тому, что зажигания в реальных условиях на границах внутренних сосудов происходить не будет. Отметим также, что приближение крупных сосудов объясняет случаи, когда на поверхности ствола возникают ожоговые борозды после удара наземного грозового разряда. Происходит разогрев и ожог только в зоне крупного поверхностного сосуда, по которому проходит электрический ток. Межсосудная часть древесины не разогревается до критических температур.

Численно реализована физико-математическая модель газофазного зажигания лиственного дерева в результате протекания по его стволу электрического тока наземного грозового разряда. Использовано приближение крупных сосудов и идеальной трещины. Показана возможность газофазного зажигания лиственного дерева в условиях прохождения грозы разрядом класса облако-земля. Определены времена задержки зажигания в зависимости от напряжения при силе тока 23.5 кА: 70 кВ – 0.480; 80 кВ – 0.445; 90 кВ – 0.415; 100 кВ – 0.4; 105 кВ – 0.391; 110 кВ – 0.380. Также определены времена задержки зажигания в зависимости от силы тока для напряжения 100 кВ: 20 кА – 0.428; 23.5 кА – 0.4; 25 кА – 0.385; 30 кА – 0.350; 35 кА – 0.320. При силе тока 1 – 15 кА и напряжении 1 – 60 кВ зажигания лиственного дерева не происходит.

ВЫВОДЫ

В результате настоящего исследования разработана фундаментальная (базовая) модель газофазного зажигания лиственного дерева электрическим током наземного грозового разряда. Модель позволяет обосновать саму возможность газофазного зажигания лиственного дерева в указанных условиях. Однако многие вопросы требуют дополнительного рассмотрения. Например, более адекватно процесс поступления водяного пара и газообразных продуктов пиролиза следует моделировать с учетом их фильтрации, как из приповерхностных, так и из внутренних крупных сосудов. Необходимо более подробно исследовать влияние водяного пара на условия зажигания лиственного дерева. Существенно отличается процесс воздействия наземного грозового разряда на лиственное дерево по сравнению с хвойным деревом. В ряде случаев возможно повреждение или фрагментация ствола первого под влиянием возрастающего давления в его сердцевине (в результате испарения влаги). Таким образом, представленная модель создает фундамент для развития на ее основе целого набора более сложных и содержательных физико-математических моделей зажигания и повреждения деревьев лиственных пород с учетом широкого спектра факторов исследуемого процесса.

Представленная физико-математическая модель может стать дополнительным модулем в системах оценки лесной пожарной опасности [13-16]. Кроме того, полученные результаты имеют самостоятель-

ное фундаментальное значение для теории лесных пожаров. Они позволяют объяснить физическую природу исследуемого явления зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Larjavaara M., Kuuluvainen T., Rita H. Spatial distribution of lightning-ignited fires in Finland // Forest Ecology and Management. – 2005. – Vol. 208. – N 1-3. – P. 177 – 188.
2. Эзау К. Анатомия семенных растений. Книга 1. – М.: Мир, 1980. – 218 С.
3. Braun H.J. Die organization des hydrosystems im stammholz der baume und straucher // Deut. Bot. Gesell. Ber. – 1963. – Vol. 75. – P. 401 – 410.
4. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Условия зажигания дерева лиственной породы наземным грозовым разрядом с учетом испарения влаги // Тезисы докладов Всероссийской конференции “Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение”. – Новосибирск: Институт гидродинамики СО РАН, 2009. – С. 27 – 28.
5. 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.
6. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. – Новосибирск: Наука. 1984, – 187 С.
7. Абаимов В.Ф. Дендрология: учеб. пособие для студентов ВУЗов. 3-е изд., перераб. – М.: Издательский центр “Академия”, 2009. – 368 С.
8. Яворский Б.М., Селезнев Ю.А. Справочное руководство по физике для поступающих в вузы и самообразования.–М.:Наука, 1984. – 383С.
9. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками / Под ред. В.С. Зуева. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 С.
10. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. – М.: Наука. 2001. – 320 С.
11. 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.
12. Иванов В.А. Методологические основы классификации лесов Средней Сибири по степени пожарной опасности от гроз. Дисс. … доктора сель.-хоз. наук. – Красноярск: СибГТУ. 2006. – 350 С.
13. Барановский Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. – 2008. – № 9. – С. 59 – 61.
14. Барановский Н.В. Перспективы создания российской системы прогноза лесной пожарной опасности // Инженерная физика. 2009. № 8. С. 39 – 49.
15. Барановский Н.В. Интегральная оценка лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. 2010. № 3. С. 58 – 59.
16. Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностный прогноз безопасности населенного пункта при лесных пожарах // Инженерная физика. 2009. № 8. С. 50 - 53