

УДК 541.1

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЗАЖИГАНИИ ЛИСТВЕННОГО ДЕРЕВА НАЗЕМНЫМ ГРОВОМ РАЗРЯДОМ

© 2011 г.

*Н.В. Барановский, Г.В. Кузнецов*

Томский политехнический университет

firedanger@narod.ru

*Поступила в редакцию 24.08.2011*

Представлены результаты численного решения пространственной задачи о зажигании дерева лиственной породы (березы) наземным грозовым разрядом. Задача решена в трехмерной цилиндрической системе координат. Рассматривается осесимметричная постановка. Использовано приближение крупных сосудов. Проведен параметрический анализ влияния вольт-амперных характеристик, типичных для отрицательных и положительных наземных грозовых разрядов, на процесс разогрева древесины ствола. Установлены условия воспламенения ствола дерева в типичном диапазоне изменения параметров воздействия разряда.

*Ключевые слова:* зажигание, пространственная постановка, наземный грозовой разряд, химическая реакция.

Лесопожарные происшествия создают напряженную обстановку на территории многих стран мира (Россия, США, Канада, Австралия, Португалия и т.д.). Ученые этих стран прикладывают усилия для разработки национальных систем прогноза лесной пожарной опасности. Например, в Канаде создана Canadian Forest Fire Rating System, в США разработана National Fire Danger Rating System. На территории России используется ГОСТ Р 22.1.09-99 «Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования». Как отечественные, так и зарубежные методики имеют существенные недостатки, а именно игнорируют реальные физико-химические процессы при зажигании лесных горючих материалов [1]. Современная система оценки лесной пожарной опасности должна удовлетворять ряду требований и спецификаций [2]. Основным условием разработки эффективной системы является наличие модулей, основанных на физически содержательных математических моделях зажигания лесных горючих материалов. Многие массивы представлены смешанными лесами с включением деревьев лиственных пород. Необходима разработка физико-математических моделей зажигания лиственных деревьев наземным грозовым разрядом.

Цель исследования – разработка обобщенной физико-математической модели зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом с учетом широкого спектра факторов.

В соответствии с [3] электрический ток наземного грозового разряда проходит в сердцевине ствола лиственного дерева. Основные допущения

и предположения: 1) реактивная древесина образуется в верхней части ветвей; 2) используется приближение «идеальной» трещины в коре; 3) при расчетах рассматривается только часть ветви, вырастающая из ствола. Остальное продолжение не рассматривается, так как ранее установлено, что за время воздействия электрического тока наружная часть ветви не успевает разогреться; 4) основным продуктом пиролиза является монооксид углерода; 5) ведущей химической реакцией является реакция окисления монооксида углерода до диоксида углерода; 6) дерево рассматривается как проводник типа резистор, для которого справедливы законы Ома и Джоуля–Ленца; 7) используется приближение крупных сосудов; 8) испарение влаги описывается уравнением Кнудсена–Ленгмюра.

Для описания моделируемого процесса принята следующая физическая модель. Рассматривается отдельно стоящее дерево лиственной породы. В фиксированный момент времени в ствол дерева ударяет грозовой разряд определенной полярности и продолжительности действия. Считается, что вольт-амперные характеристики разряда одинаковы для различных сечений ствола дерева. В результате протекания электрического тока в крупном сосуде древесина разогревается за счет выделения джоулева тепла. В процессе дальнейшего нагрева происходит термическое разложение древесины с образованием газообразных продуктов пиролиза. Продукты пиролиза мгновенно поступают в область газовой фазы и смешиваются с окислителем. При определенных

температуре и концентрациях реагентов происходит химическая реакция окисления монооксида углерода. Считается, что зажигание происходит, если достигаются критические значения следующих параметров: 1) тепловой поток из зоны химической реакции превосходит тепловой поток из подкорковой зоны дерева; 2) температура газовой смеси.

Процесс зажигания листового дерева наземным грозовым разрядом описывается системой трехмерных нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии с соответствующими начальными и граничными условиями. Для численной реализации использован локально-одномерный конечно-разностный метод. Разностные аналоги одномерных уравнений теплопроводности решены методом прогонки в сочетании с методом простой итерации.

В результате действия типичного наземного грозового разряда ствол дерева в области крупных сосудов разогревается до температур, при которых происходит образование продуктов пиролиза. Интенсификация процессов термического разложения органического вещества древесины начинается в условиях, когда практически вся влага из древесины испарилась. 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. Образовавшиеся газообразные горючие продукты пиролиза и водяной пар мгновенно попадают в область газовой фазы. 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 листовое дерево, имеющее равномерное распределение влагопроводящих путей в горизонтальном сечении ствола).

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:

- а) трещина открывает поверхностный сосуд полностью;
- б) трещина открывает полностью межсосудную древесину;
- в) трещина частично открывает крупный сосуд.

В зоне крупных сосудов формируется поле повышенных температур. 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 монооксида углерода до диоксида углерода с выделением тепла. 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, 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. В результате численного исследования модели установлено, что при силе тока 1–15 кА и напряжении 1–60 кВ не происходит зажигания листового дерева при воздействии грозового разряда (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Время задержки зажигания  
в зависимости от напряжения**

$U$ , кВ	$t^*$ , с
1–60	Возгорания дерева не происходит
70	0.480
80	0.445
90	0.415
100	0.400
105	0.391
110	0.380

Таблица 2

**Время задержки зажигания  
в зависимости от силы тока**

$J$ , кА	$t^*$ , с
1–15	Возгорания дерева не происходит
20	0.480
23.5	0.400
25	0.385
30	0.350
35	0.320

Представленная физико-математическая модель может стать дополнительным модулем в системах оценки лесной пожарной опасности. Кроме того, полученные результаты имеют самостоятельное фундаментальное значение для теории лесных пожаров. Они позволяют объяснить физическую природу исследуемого явления зажигания лиственного дерева наземным грозовым разрядом.

*Список литературы*

1. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 с.
2. Барановский Н.В. Концептуальная база российской системы прогноза лесной пожарной опасности // Безопасность в техносфере. 2010. №6. С. 34–42.
3. Эзау К. Анатомия семенных растений. Кн. 1. М.: Мир, 1980. 218 с.

**PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES OF THE IGNITION OF A DECIDUOUS TREE  
BY A GROUND LIGHTNING DISCHARGE**

*N.V. Baranovskiy, G.V. Kuznetsov*

The results of numerically analyzing a 3D formulation of the problem of ignition of a deciduous tree by electric current of a ground lightning discharge are presented. The large-vessel approximation is used. A parametrical analysis of the effect of volt-ampere characteristics on the heating process of the trunk wood is done. Tree trunk ignition conditions in a typical range of acting parameters of the discharge are determined.

*Keywords:* ignition, spatial statement, ground lightning discharge, chemical reaction.