УДК 533.6

ПЛОСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ЗАЖИГАНИИ СЛОЯ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА НАГРЕТОЙ ДО ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ЧАСТИЦЕЙ

Барановский Н.В., Кузнецов Г.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты численной реализации плоской постановки задачи о зажигании слоя лесного горючего материала (ЛГМ) нагретой до высоких температур частицей. Задача рассматривается в декартовых координатах в симметричной постановке. Процесс зажигания частицей описывается системой нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности и диффузии. Рассматривается газофазный механизм воспламенения слоя ЛГМ. Выявлены условия зажигания слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей и определены времена задержки воспламенения.

ВВЕДЕНИЕ

Все причины возникновения лесных пожаров могут быть разделены на природные и антропогенные [1]. Под природной причиной понимается грозовая активность. Обобщенный механизм возникновения лесного пожара от грозы [2] предполагает возникновение вторичных источников зажигания (частиц, образующихся в результате термодеструкции и механического повреждения ствола дерева после удара наземного грозового разряда [3]). Анализ обобщенного механизма возникновения лесного пожара от антропогенных причин показывает [4], что частицы, нагретые до высоких температур, являются наиболее распространенными источниками зажигания. Ранее показана возможность воспламенения слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей металлов и неметаллов [5]. Была рассмотрена одномерная постановка задачи о зажигании слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей. Предполагалось, что газообразные продукты пиролиза мгновенно оказываются над частицей, где смешиваются и воспламеняются при определенной температуре и концентрациях реагентов. Поэтому исследование этого процесса требует разработки более адекватных физико-математических постановок.

Цель исследования – разработка плоской физико-математической постановки задачи о зажигании слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей и определение времен задержки воспламенения.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И ГЕОМЕТРИЯ ОБЛАСТИ РЕШЕНИЯ

Рассматривается сценарий катастрофической пожарной опасности, когда влага в ЛГМ отсутствует. На подстилающей поверхности расположен слой ЛГМ, на который выпадает нагретая до высоких температур частица металла или неметалла. Слой ЛГМ нагревается и термически разлагается с образованием газообразных веществ. Продукты пиролиза диффундируют в область газовой фазы по бокам частицы, где смешиваются с окислителем. При определенных температуре и концентрациях реагирующих газов происходит газофазное зажигание слоя ЛГМ.

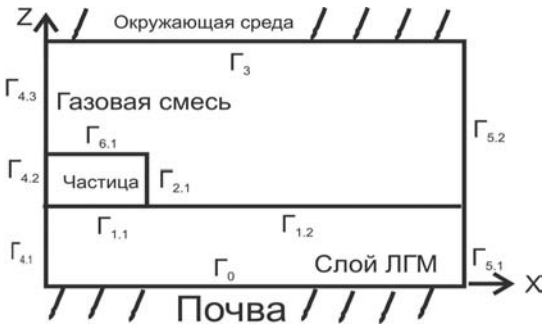

Рис.1 Область решения

© Барановский Н.В., Кузнецов Г.В.

Критерии зажигания: 1) теплоприход от химической реакции превышает теплоприход от нагретой частицы; 2) температура в газовой смеси достигает критического значения. На рис.1 представлена геометрия области решения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА

Процесс воспламенения слоя ЛГМ нагретой до высоких температур частицей описывается системой двумерных нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии (1) – (3), (5), (6) с соответствующими граничными и начальными условиями. На границе раздела сред выставляются граничные условия четветрого рода, на границе с окружающей средой выставляются граничные условия третьего рода, на оси симметрии выставляется условие нулевого теплового потока. При t=0 задаются начальные значения температуры слоя ЛГМ, частицы и газовой смеси, а также концентраций компонент газовой смеси и объемной доли сухого органического вещества. Численная реализация проведена с использованием локально-одномерного конечно-разностного метода [6]. Разностные аналоги одномерных уравнений теплопроводности и диффузии решены методом прогонки в сочетании с методом простой итерации [6]. Алгоритм программы был протестирован на задаче зажигания тонкой пластины при продолжительном действии источника тепла [7].

Уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + q_5 (1 - \nu_5) R_5, \quad (1)$$

Уравнение энергии для частицы:

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

Уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) - q_1 k_1 \rho_3 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_3} \right), \quad (3)$$

Кинетическое уравнение и начальное условие:

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -k_1 \rho_3 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_3} \right), \quad (4)$$

Уравнение диффузии для окислителя:

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

Уравнение диффузии для горючих компонент пиролиза:

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

Уравнение баланса массы:

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

где T_i, ρ_i, c_i, λ_i – температура, плотность, теплоемкость, теплопроводность (1 - воздуха, 2 – частицы, 3 – слоя ЛГМ); C_i, M_i – концентрация и молярная масса (4 – окислителя, 5 – горючего газа, 6 – инертных компонентов воздуха); q_p – тепловой эффект реакции пиролиза ЛГМ; k_1 – предэкспонент реакции пиролиза ЛГМ; E_1 – энергия активации реакции пиролиза ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; φ – объемная доля сухого органического вещества ЛГМ; q_5 – тепловой эффект реакции окисления оксида углерода; ν_5 – доля теплоты поглощенная слоем ЛГМ; R_5 – массовая скорость реакции окисления оксида углерода; k_5 – предэкспонент реакции окисления оксида углерода; E_5 – энергия активации реакции окисления оксида углерода; D – коэффициент диффузии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В известных пожароопасных ситуациях температура нагретых частиц может изменяться в интервале от 330 К до 1800 К. В реальных лесопожарных происшествиях начальная температура частиц, как правило, имеет значения в диапазоне от 900 К до 1200 К. Параметрический анализ показал, что математическая модель адекватно описывает процессы тепло- и массообмена при зажигании слоя ЛГМ одиночной нагретой до высоких температур частицей.

В качестве входных параметров варьировались теплофизические характеристики слоя ЛГМ. Это позволит в будущем рассмотреть физико-химические процессы воспламенения не только соснового ЛГМ, но и других хвойных пород и лиственницы.

События лета 2010 года показали, что катастрофические явления лесных пожаров могут нанести колоссальный экономический и экологический ущерб. Становится понятным, что существующая методика прогноза лесных пожаров не совершенна [1]. Современная система оценки лесной пожарной опасности должна удовлетворять ряду требований и спецификаций [8]. Главным условием создания адекватной методики прогноза возникновения лесных пожаров является наличие в системе моделей зажигания ЛГМ. Такие системы могут базироваться на результатах обработки экспериментальных данных [9,10] или физико-математических моделях численного исследования процессов воспламенения ЛГМ различными источниками [4]. Уже разработаны обобщенные механизмы возникновения лесных пожаров от грозовой активности и антропогенной нагрузки, которые включают сценарий зажигания слоя ЛГМ частицей. Следует уточнить физическую модель. Предполагается, что газовая смесь представлена тремя компонентами: окислитель – кислород, горючий газ – монооксид углероды, инертные компоненты – азот и диоксид углерода. Полагаем, что продукты пиролиза мгновенно оказываются в области газовой фазы. Процессы фильтрации их в слое ЛГМ к поверхности слоя из-под частицы не учитываются. Такой подход хорошо зарекомендовал себя, например, при изучении физико-химических процессов термодеструкции полимерных материалов [11] и в решении вопросов тепловой защиты. Граничные условия ненулевого потока массы выставляются в узкой области вокруг частицы. Диффузия продуктов пиролиза осуществляется в узкой пристенной области частицы. Выход продуктов пиролиза из слоя ЛГМ осуществляется в месте локализации повышенной температуры.

Поток массы в области под частицей и сбоку суммировался и распределялся пропорционально множителю T[i,iz]/T[xz,iz], где xz – боковая граница частицы, а iz – нижняя граница частицы. Это приближение обеспечивает снижение выделения газообразных продуктов пиролиза с уменьшением температуры слоя ЛГМ. На рис.2 представлено распределение объемной доли сухого органического вещества в момент зажигания.

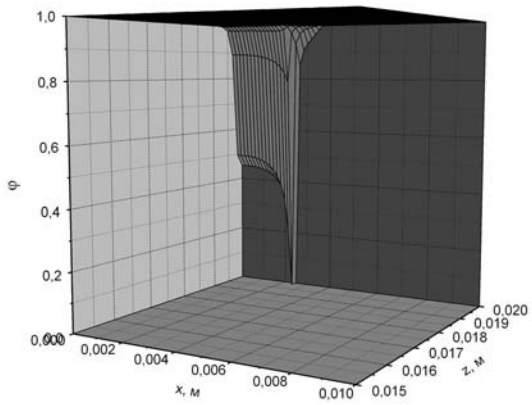

Рис.2 Распределение объемной доли сухого органического вещества в слое ЛГМ в момент зажигания

Заметим, что в настоящей работе не рассматриваются вопросы термического разложения целлюлозы и других компонентов ЛГМ. Используются эффективные термокинетические постоянные процесса пиролиза [12]. Такие постоянные получены для каждого вида ЛГМ. В настоящей работе рассматривается слой ЛГМ, состоящий из опада хвои сосны. Влага в ЛГМ отсутствует в соответствии со сценарием катастрофической лесной пожарной опасности. Воздействие повышенной температуры частицы обеспечивает значительное разложение слоя ЛГМ под ней. Химическая реакция сбоку от частицы формирует дополнительный тепловой поток к слою ЛГМ. Сбоку под частицей слой разлагается сильнее.

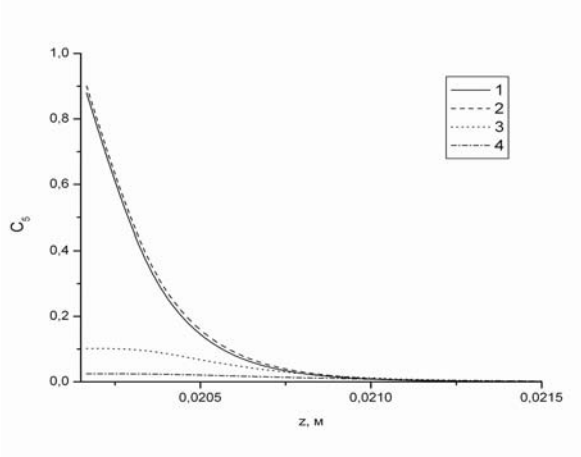

Рис.3 Распределение концентрации газообразных продуктов пиролиза в газовой фазе в момент зажигания в различных сечениях

Рассмотрим процессы массообмена в окрестности частицы. Пик концентрации газообразных горючих компонент пиролиза наблюдается в пристенной области частицы. Кроме того, отмечена диффузия монооксида углерода в горизонтальном направлении. С течением времени пик концентрации монооксида углерода сдвигается в противоположном от частицы направлении. Распределение концентраций газообразных продуктов пиролиза, кислорода и инертных компонент в газовой фазе в момент зажигания представлено, соответственно, на рис.3, 4 и 5.

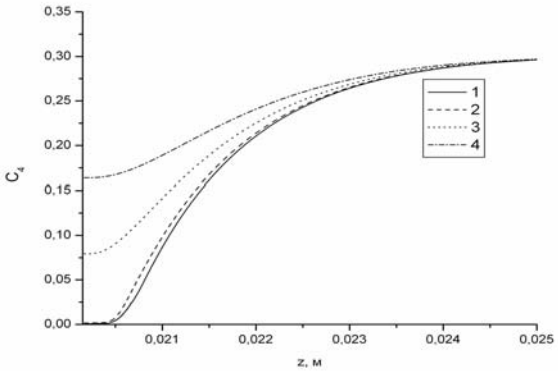

Рис.4 Распределение концентрации кислорода в газовой фазе в момент зажигания в различных сечениях

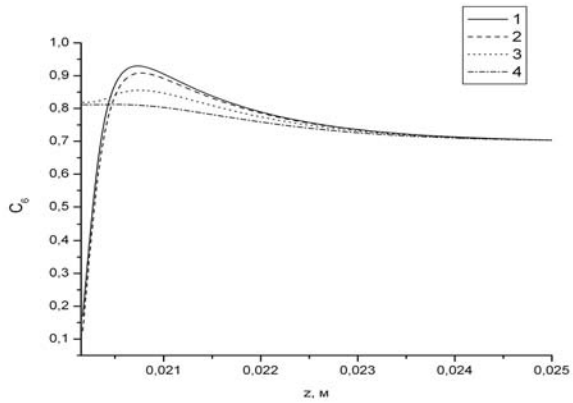

Рис.5 Распределение концентрации инертных компонент в газовой фазе в момент зажигания в различных сечениях

На рисунках кривые 1,2,3,4 соответствуют координатам x=0.0026 м; 0.0031 м; 0.0036 м; 0.0041 м. В пристенной области происходит вдув продуктов пиролиза и окисление монооксида углерода до диоксида углерода. Следствием этих физико-химических процессов концентрация кислорода в пристенной области с течением времени стремится к нулю. Первый из описанных процессов способствует снижению концентрации инертных компонент, которые также вытесняются из пристенной области. На некотором расстоянии от частицы наблюдается пик на кривой концентрации инертных компонент. Это место локализации химической реакции окисления монооксида углерода до диоксида углерода.

На рис.6 представлено распределение температуры в системе “газовая смесь-частица-ЛГМ” в момент зажигания. На температурной кривой может быть выделен пик, который соответствует месту локализации химической реакции. В этом месте достигаются критические условия воспламенения, то есть выполняются критерии зажигания.

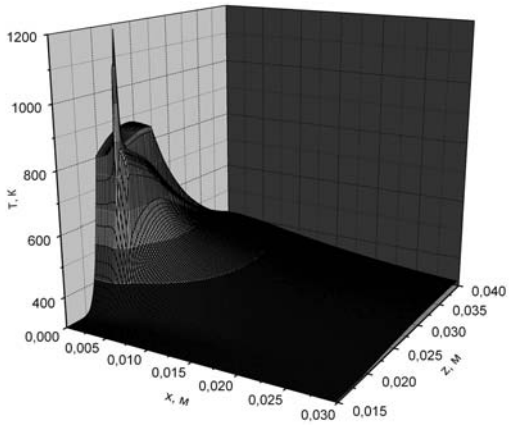

Рис.6 Распределение температуры в системе “газовая смесь-частица-слой ЛГМ” в момент зажигания

Определены времена задержки зажигания для различных температур углеродистой частицы: 900 К – 2.69 с; 1000 К – 1.38 с; 1100 К – 0.64 с; 1200 К – 0.24 с. Для стальной частицы получены следующие данные: 900 К – 1.35 с; 1000 К – 0.76 с; 1100 К – 0.38 с; 1200 К – 0.18 с. Минимальная температура углеродистой или стальной частицы, при которой еще наблюдается воспламенение, соответствует 900 К. При температурах меньше этого критического значения критерии зажигания не выполняются.

Получены отличающиеся от одномерной постановки времена задержки зажигания. Это объясняется особенностями массопереноса в двумерной постановке и кинетикой химической реакции. В двумерной постановке удается по-

лучить более физически содержательные результаты по сравнению с одномерной [13].

Сравнение с известными экспериментальными данными позволяет говорить о качественном согласовании результатов теории и эксперимента [14]. Получено численное согласование времени задержки воспламенения для стальной частицы с начальной температурой в 900 К. Более высокие температуры частицы требуют проведения дополнительных экспериментальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках настоящего исследования решена важная научно-практическая задача – разработан фундаментальный базис новой системы оценки лесной пожарной опасности на основе численного моделирования физико-химических процессов зажигания ЛГМ источниками природного и антропогенного характера (нагретые до высоких температур частицы металлов и неметаллов). Кроме того, решение поставленной задачи имеет важное значение для развития теории лесных пожаров, а именно раздела зажигания ЛГМ различными источниками повышенной температуры. Полученные результаты создают базис для дальнейшего развития физико-математических моделей зажигания ЛГМ и других пожароопасных материалов.

Следует заметить, что рассматривается сценарий катастрофической лесной пожарной опасности, когда влага в ЛГМ отсутствует. Как показывает практика лесоохранной деятельности это важный сценарий. Актуальность такого сценария будет расти вслед за наблюдаемыми и прогнозируемыми изменениями климата на планете.

ЛИТЕРАТУРА

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. Обобщенная схема механизма возникновения лесного пожара в результате грозовой активности // Материалы восемнадцатой научно-технической конференции “Системы безопасности” – СБ-2009. М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. С. 169 – 171.
3. Azlinda Ahmad N., Fernando N., Baharudin Z.A., Rahman M., Cooray V., Saleh Z., Dwyer J.R., Rassoul H.K. The first electric field pulse of cloud and cloud-to-ground lightning discharge // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2010. Vol. 72. N 2-3. P. 143 – 150.
4. Барановский Н.В. Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностная модель механизма возникновения лесного пожара по причинам антропогенного характера // Материалы 19-ой научно-технической конференции “Системы безопасности” – СБ – 2010. М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. С. 142 – 144.
5. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров. Дисс. … к. ф.-м. н. Томск: ТГУ, 2007. 153 С.
6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. М.: Наука. 2001. 320 С.
7. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука. 1984, 187 С.
8. Барановский Н.В. Концептуальная база российской системы прогноза лесной пожарной опасности // Безопасность в техносфере. 2010. № 6. С. 34 – 42.
9. Барановский Н.В. Детерминированно-вероятностный прогноз лесной пожарной опасности на основе экспериментальных данных по зажиганию лесного горючего материала // Наукоемкие технологии. 2009. № 6. С. 66 – 70.
10. Митрофанов Д.П. Сравнение пирологических характеристик некоторых лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1972. С. 52 – 76.
11. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1991. ч С.
12. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
13. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2006, Т. 15. № 4, С. 42 – 46.
14. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П. и др. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34. № 6, С. 14 – 22.

© Барановский Н.В., Кузнецов Г.В.