

УДК 544+620.9(063)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА УГЛЕРОДИСТОЙ ЧАСТИЦЕЙ

Барановский Н.В., Захаревич А.В., Максимов В.И.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск*

Введение

Известно, что такие частицы могут образовываться при растрескивании дров в непотушенном костре, при деструкции древесины различных пород в условиях прохождения через ствол тока наземного грозового разряда, в различных технологических процессах, при развитии “пятнистых” лесных пожаров. Понятно, что процесс зажигания нагретой частицей требует подробного изучения.

Цель работы, освещаемой в статье – экспериментальное исследование процесса зажигания слоя лесного горючего материала (ЛГМ) углеродистой одиной нагретой до высоких температур частицей и выделение предельных условий возгорания типичного ЛГМ.

Объект и методика эксперимента

Использовалась экспериментальная установка и методика, подробно описанные в [1,2]. Источники нагрева при возгорании ЛГМ моделировались изготовленными из графита частицами в форме параллелепипеда с характерными размерами по трем координатным направлениям (14 мм, 8 мм, 8 мм). Вес такой частицы графита составлял 1,3 г. Эксперименты выполнялись в диапазоне изменения начальных температур T_0 от 1113 К до 1273 К. Этот диапазон был выбран для того, чтобы выделить, во-первых, нижние пределы зажигания исследовавшегося ЛГМ по температуре. Верхний предел по температуре выбирался исходя из условий возгорания частицы графита на воздухе (горящая частица всегда при выпадении на слой ЛГМ вызывала его воспламенение).

Эксперименты проводились по классическому плану с рандомизацией в связи с тем, что до настоящего времени не определена математическая модель, описывающая связь времени задержки зажигания ЛГМ от начальной температуры локального источника нагрева. При постоянном значении T_0 проводились 5-7 экспериментов, рассчитывалось среднеквадратичное отклонение и доверительные интервалы определения t_{ign} с доверительной вероятностью $P = 0.95$. Эксперименты выполнялись с группой идентичных по размерам и условиям изготовления графитовых частиц. Перед опытами проводилась термическая обработка источников нагрева в индукционной печи для “выжигания” летучих соединений. Каждая частица использовалась только в одном эксперименте, потому что ее состояние (форма, размеры, структура приповерхностных слоев) после опыта менялась. Эти изменения в целом были незначительные, но для уменьшения погрешностей проводимых исследований частицы повторно не использовались.

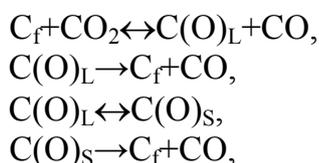
Первым объектом исследования были модельные слои типичного ЛГМ (сосновой хвои), которые формировались в стеклянной огнеупорной кювете посредством хаотической укладки хвоинок равномерным слоем. Следует отметить, что плотность укладки соответствовала плотности опада хвои в реальном лесном массиве с пористостью больше 0,9 [3]). Характеристики хвои: а) на внешний вид побуревшая; б) хвоя прошлогоднего сбора частично разложившаяся; в) предварительно высушенная; г) основную фракцию составляли отдельные хвоинки с размером 7 – 8 см в продольном и 0.7 – 1.2 мм в поперечном направлении; д) фракция отличающихся от основной части хвоинок составляла около 5 % (вероятно, наличие в опаде таких хвоинок можно объяснить какими-либо заболеваниями деревьев и соответственно их меньшей механической прочностью).

Вторая серия экспериментов выполнена с листьями березы, собранными летом 2011 года, высушенными и очищенными от инородных включений. Непосредственно перед опытами листья также высушивались в сушильном шкафу в течение 2-3 часов. Опыты проводились с навесками исследованного ЛГМ, в которые включались 5-6 листьев. Укладка листьев была равномерной. Выполненные эксперименты показали, что в первом приближении можно было бы использовать в одном опыте и по одному березовому листу. Но было сочтено целесообразным использовать навески из нескольких листьев в целях обеспечения идентичности условий теплообмена элемента ЛГМ с окружающей средой в опытах и в реальных условиях лесных массивов.

Характеристика источника возгорания

Источник повышенной температуры моделировался графитовыми частицами в форме параллелепипеда. Следует отметить, что процесс зажигания углеродистой частицей отличается от аналогичного процесса со стальной частицей в качестве источника возгорания. Для одиночных углеродистых частиц при высоких температурах характерен процесс газификации, который происходит при интенсивном проникновении газовых реагентов через пористую структуру частицы. То есть оказываются важными процессы диффузии (показано [4], что для крупных частиц значительное влияние на процесс газификации оказывают именно диффузионные явления) и преобразования компонентов внутри частицы, что приводит к изменению самой пористой структуры [4].

Вид глобальной реакции газификации следующий [4]: $C+CO_2 \rightarrow 2CO$. Согласно [5], этот процесс включает цепочку реакций на поверхности пор:



где C_f , $C(O)_L$, $C(O)_s$ – соответственно свободные активные углеродные центры, атом кислорода, соединенный с атомом углерода подвижной ионной связью, и атом кислорода, образующий неподвижную карбонильную связь с атомом углерода.

Первоначально были проведены эксперименты с углеродистой частицей в форме диска из древесного угля (использовались стандартные таблетки “Активированный уголь МС”). В результате опытов с помещением таких таблеток в

индукционную печь для нагрева было установлено, что во всем диапазоне исследуемых температур такие частицы горят в пламенном режиме. То есть частицы древесного угля однозначно приведут к возникновению очага возгорания при взаимодействии с ЛГМ.

По результатам тестовых опытов для экспериментов были выбраны частицы в форме параллелепипеда, изготовленные из графитового бруска с характерными размерами: высота $h=14$ мм; ширина $x_1=8$ мм; толщина $x_2=8$ мм; $m=1,3$ г. Предварительное помещение их в индукционную печь показало, что в диапазоне температур 1113 – 1273 К графитовая частица горит в пламенном режиме. Выпадение такой частицы на слой ЛГМ также однозначно приводит к возникновению возгорания. Вероятно, первоначальный нагрев графитовой частицы сопровождается выходом каких-либо летучих соединений, которые сгорают в газовой фазе.

Механизм зажигания сосновой хвои

Установлены следующие закономерности исследуемого процесса. Возможны два варианта реализации условий зажигания:

1. Первоначально исследован механизм возникновения возгорания в результате действия горячей графитовой частицы. Углеродистая частица сопровождаемая факелом пламени горения летучих соединений выпадает на слой ЛГМ. Слой ЛГМ прогревается в результате действия трех механизмов передачи тепла: кондукции, конвекции и излучения (скорее всего конвективный и лучистый перенос являются основными в данном механизме зажигания). Отдельные хвоинки прогреваются и начинают термически разлагаться с выделением газообразных продуктов пиролиза. Происходит вдув газообразных горючих продуктов и зажигание ЛГМ в газовой фазе. Для момента зажигания характерно появление второго факела пламени (первый формируется в результате горения летучих продуктов, выделяемых частицей). Затем происходит объединение факелов и последующее распространение пламени по слою ЛГМ. Характерный кадр видеосъемки представлены на рис. 1.а

2. На рис. 1.б представлен типичный кадр видеосъемки процесса зажигания слоя ЛГМ нагретой до высоких температур углеродистой частицей (безпламенный режим). После начальной стадии непродолжительного периода инертного прогрева слоя ЛГМ начинается термическое разложение материала с выделением газообразных продуктов пиролиза. В приповерхностном слое ЛГМ разлагается практически полностью с небольшим коксовым остатком, который выпадает на подложку. В пористой среде ЛГМ происходит фильтрация газообразных продуктов пиролиза к нагреваемой поверхности слоя и их смешивание с окислителем, нагрев газовой смеси с последующим зажиганием. Затем пламя появляется по всему периметру частицы.

Механизм зажигания березовых листьев

При проведении опытов велась видеосъемка исследуемых процессов, по результатам анализа которой сформулированы основные выводы по механизму зажигания исследовавшегося ЛГМ локальным малоразмерным источником энергии (размеры частицы много меньше размеров типичных листьев, с которыми

выполнялись эксперименты). Первая серия опытов проведена с частицей графита, горячей в пламенном режиме.

Установлено, что после выпадения частицы на лицевую сторону листа происходит инертный прогрев материала в течение 0,1-0,2 с. Следующая стадия процесса – газификация эфирных соединений и газофазное воспламенение смеси горючего с воздухом. Если частица выпадает на тыльную сторону листа, то механизм зажигания несколько отличается. Отдельный лист прогревается и начинает термически разлагаться с выделением газообразных продуктов пиролиза и последующим их вдувом в область повышенной температуры и зажиганием ЛГМ в газовой фазе. Для условий зажигания ЛГМ характерным является возникновение второго факела пламени (первый формируется в результате горения летучих продуктов, выделяемых частицей). Затем происходит объединение факелов и последующее распространение пламени по слою ЛГМ.

Визуальные наблюдения процессов зажигания опада из листьев березы и просмотр кадров видеосъемки позволяют сформулировать физическую модель возникновения возгорания ЛГМ при нагреве малой по размерам частицей (беспламенный режим нагрева). Первая короткая стадия – инертный прогрев листа локальным источником повышенной температуры. В дальнейшем возможны два варианта развития процесса.

Если частица находится на тыльной стороне листа после инертного прогрева начинается термическое разложение ЛГМ с образованием газообразных продуктов пиролиза. Продукты пиролиза фильтруются в микропористой структуре ЛГМ к поверхности контакта “лист-частица”, смесь горючего и окислителя нагревается и происходит возгорание на некотором расстоянии от поверхности частицы.

Если частица находится на лицевой стороне листа после инертного прогрева начинается высокотемпературная газификация эфирных масел и аналогов терпеновых соединений. Диффузия этих паров в воздухе приводит к взрывоподобному зажиганию смеси горючего и окислителя в результате локального нагрева (визуально картина процесса в целом соответствует картине зажигания жидких топлив). В ряде случаев зажигание начинается до значительного термического разложения ЛГМ. В последствие газообразные продукты пиролиза вдуваются в разогретую область и усиливают очаг горения.

В большинстве опытов факел пламени формировался по всему периметру частицы. Иногда за доли секунды возникал объемный факел пламени над всей поверхностью частицы.

Наиболее информативный кадр видеосъемки процесса зажигания представлены на рис. 1.в, а зависимость времени задержки зажигания от начальной температуры частицы на рис. 2.б

По результатам исследований можно сделать вывод, что нагрев частицей лицевой стороны листа приводит к значительному ускорению процесса зажигания ЛГМ. Меньшие на 25 % времена задержки зажигания являются результатом реализации второго механизма зажигания с высокотемпературным испарением эфирных масел.



Рис. 1. Характерные кадры видеосъемки: а) зажигание хвои сосны горячей частицей ($t=0.08$ с – возгорание ЛГМ, на фото видно два факела пламени – горячей частицы, второй слоя ЛГМ); б) зажигание хвои сосны нагретой до высоких температур частицей ($t=0.72$ с – объединение пламени над частицей); в) зажигание листьев березы нагретой до высоких температур частицей ($t=0.2$ сек – горение газообразных продуктов пиролиза и объединение факела пламени)

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена зависимость времени задержки зажигания от начальной температуры частицы с обозначением доверительных интервалов. Выделен нижний предел зажигания по температуре. Хвоя характеризовалась случайным распределением отдельных хвоинок и расстоянием между ними (как и в реальном слое; наблюдения показали, что частица граничит с 4 – 7 отдельными хвоинками), что привело к достаточно высоким значениям среднеквадратичных отклонений результатов измерений t_{ign} от средних значений. За счет этого в каждом конкретном эксперименте из серии опытов при идентичной начальной температуре отличались и условия теплообмена между источником возгорания и слоем ЛГМ.

Анализ рис. 2 показывает, что зависимость времени задержки зажигания от температуры можно аппроксимировать прямой. При зажигании ЛГМ происходит комплекс диффузионных и конвективных процессов, как в пористой структуре приповерхностного слоя материала, так и над ним (эти явления существенно взаимосвязаны). Следствием этого является вид зависимости времени задержки зажигания ЛГМ, который существенно отличается от кривых, характерных, например, для топливных композиций [1,6,7].

Проведенные экспериментальные исследования показали высокую устойчивость процесса зажигания слоя ЛГМ с очень высокой пористостью (объемная доля сухого органического вещества около 0,06) одиночной нагретой до высоких температур углеродистой частицей. Ранее были проведены исследования процесса зажигания ЛГМ одиночной “горячей” частицей стали. Частицы углерода и стали имели различную форму, но одинаковые характерные размеры. Сравнительный анализ показывает, что при зажигании ЛГМ углеродистой частицей времена задержки зажигания больше на 10 – 25 % по отношению к таковым для источника возгорания из стали. Однако при достижении температуры в 1300 К разница в средних значениях времени задержки зажигания составляет около 2 %. В связи с этим можно сделать вывод о том, что при высоких температурах (более 1300 К) ни материал частицы, ни ее форма и размеры не влияют на время задержки процесса зажигания (начальные значения температуры источника локального нагрева являются определяющими).

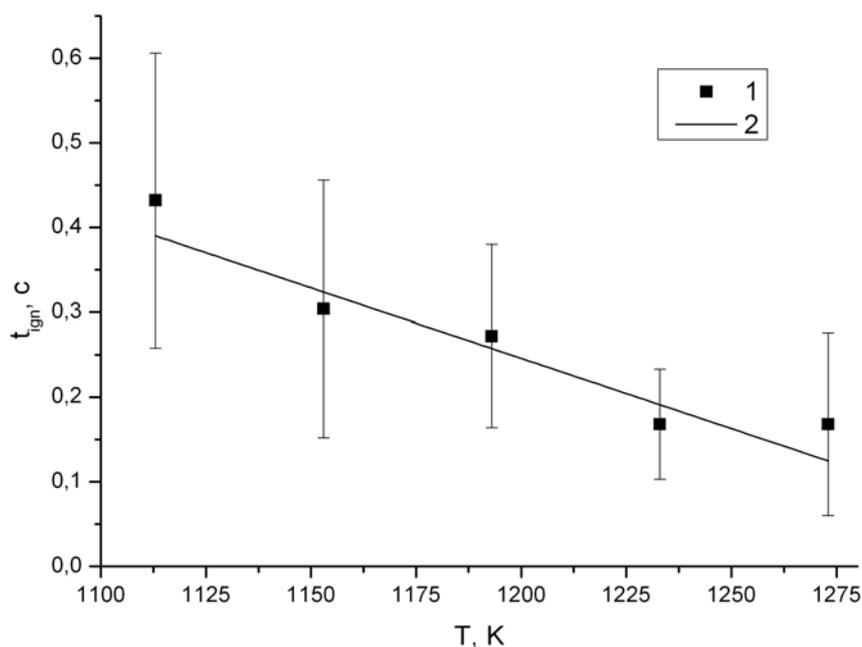


Рис. 2. Зависимости времени задержки зажигания ЛГМ от начальной температуры частицы: хвоя сосны (1, 2 – усредненные значения и аппроксимирующая прямая (частица $h=14$ мм; $x_1=8$ мм; $x_2=8$ мм; $m=1,3$ г)

При этом следует отметить, что для углеродистой частицы характерен более низкий предел зажигания по начальной температуре (для графитовой частицы он составил 1113 К). Вероятно, это объясняется рядом факторов, связанных с поведением пористой структуры углеродистой частицы, которая формируется после предварительного выжигания летучих соединений. В порах протекают газофазные и гетерогенные реакции углеродсодержащих соединений, что обуславливает интенсификацию тепловыделения от графитовой частицы. Это влияние более заметно при относительно низких значениях начальной температуры частицы.

В результате экспериментов исследованы закономерности зажигания ЛГМ нагретыми до высоких температур углеродистыми частицами. Установлено, что возможно два сценария развития процесса: а) первый сопровождается выпадением и горением углеродистой частицы, что однозначно приводит к возникновению возгорания; б) выпадение нагретой частицы без сопровождения горением летучих соединений (второй сценарий также приводит к возникновению возгорания при температурах более 1113 К). Экспериментально определены нижний предел зажигания по температуре и времена задержки воспламенения для различных начальных температур углеродистой частицы.

Аппроксимирующая зависимость t_{ign} от T_0 для листьев березы (рис. 3) также является линейной функцией и существенно отличается от кривых, характерных, например, для твердых топлив [1,6,7]. Это отличие связано с существенной структурной неоднородностью нагреваемого локальным источником элемента ЛГМ (листа) и условиями теплоотвода из зоны нагрева.

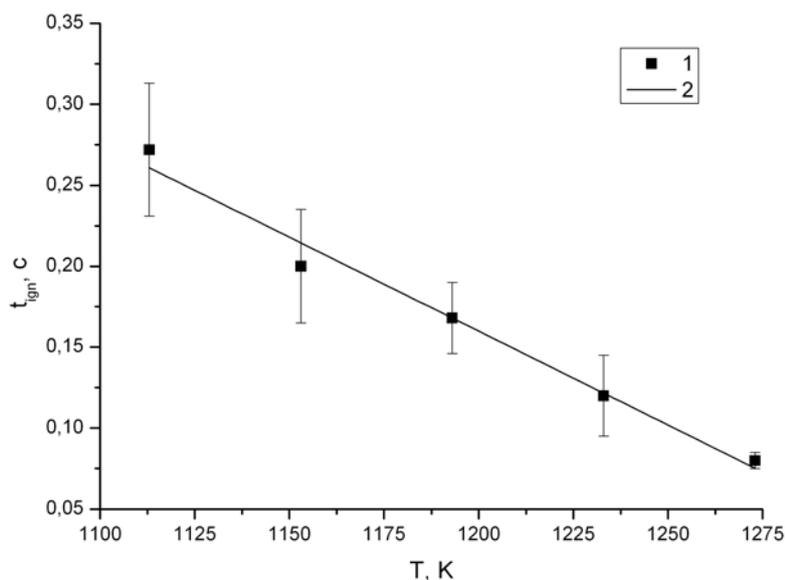


Рис. 3. Зависимости времени задержки зажигания ЛГМ от начальной температуры частицы: листья березы (1, 2 – усредненные значения и аппроксимирующая прямая (частица $h=14$ мм; $x_1=8$ мм; $x_2=8$ мм; $m=1,3$ г)

Следует особо отметить, что экспериментальные значения t_{ign} (рис. 3) при $T_0=1273$ К можно сравнить со значениями времени задержки воспламенения типичного жидкого топлива – керосина в адекватных условиях теплового воздействия [8]. t_{ign} керосина более чем в три раза превышает аналогичное значение для опада широколиственных пород деревьев. При этом нижние предельные значения температур зажигания керосина почти на 200 К превышают представленные на рис. 3. Можно сделать вывод о том, что сухие листья березы представляют большую по сравнению с керосином пожарную опасность при локальном нагреве. Установленное по результатам экспериментов соотношение между характерными временами зажигания опада лиственных деревьев и типичного жидкого топлива обусловлено особенностями тепломассопереноса в прогретом слое и на поверхности этих горючих веществ при локальном тепловом воздействии.

Так, например, результаты исследований [9-11] показывают, что при нагреве как пленок, так и больших масс жидких топлив значительная часть подводимой тепловой энергии расходуется на энергоемкий процесс образования паров горючего. Теплота фазового перехода – испарения любого жидкого топлива существенно (более чем в 10 раз) выше теплоты, затрачиваемой на газификацию лесного горючего материала (термическое разложение). Соответственно необходим более длительный прогрев жидкого топлива по сравнению с ЛГМ для инициирования химической реакции горения.

В заключение можно отметить, что полученные в описанных выше экспериментах значения t_{ign} скорее всего характеризуют пожарную опасность сухого опада многих видов лиственных деревьев (не только березы), так как их свойства [12] отличаются незначительно. Также следует отметить, что для листьев березы характерно меньшее значение нижнего предела зажигания по начальной

температуре частицы по сравнению с сосновой хвоей. Это обстоятельство может иметь определяющее значение в развитии пожароопасных ситуаций в смешанных лесах.

Литература

1. Захаревич А.В., Кузнецов В.Т., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 5. С. 54 – 57.
2. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Зажигание дизельного топлива одиночной “горячей” металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 4. С. 28 – 30.
3. Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т., Скорик А.И. Зажигание лесных горючих материалов потоком лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 1. С. 30 – 35.
4. Самуйлов Е.В., Фаминская М.В., Головина Е.С. Модель и расчет процесса газификации одиночной углеродной частицы // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 1. С. 86 – 94.
5. Laurendau N.M. Heterogeneous kinetics of coal char gasification and combustion // Prog. Energy and Combust. Sci. 1978. Vol. 4. N 4. P. 221 – 270.
6. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Таратушкина Г.В. Зажигание конденсированного вещества «горячей» частицей // Химическая физика. 2004. Т. 23. № 3. С. 67 – 72.
7. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Таратушкина Г.В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 1. С. 78 – 85.
8. Захаревич А.В. Зажигание твердых и жидких конденсированных веществ одиночными нагретыми до высоких температур частицами. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Томск: ТПУ, 2008. 117 С.
9. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Нагретые до высоких температур частицы металла как источники локальных возгораний жидких веществ // Пожарная безопасность. 2008. № 4. С. 72 – 76.
10. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. 3D Problem of heat and mass transfer at the ignition of a combustible liquid by a heated metal particle // Journal of Engineering Thermophysics. 2009. Vol. 18. N 1. P. 72 – 79.
11. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Моделирование воспламенения жидкого вещества горячей частицей // Химическая физика. 2009. Т. 28. № 5. С. 91 – 98.
12. Курбатский Н.П. Исследование свойств и количества лесных горючих материалов // Вопросы лесной пирологии. ИЛИД СО АН СССР, Красноярск, 1970. С. 5—58.