

Зажигание целлюлозных материалов: измерение характеристик воспламенения

© Каргин¹⁺ Артем Вячеславович, Еналеев^{2*} Рустем Шакирович,
Гимранов¹ Фидаис Мубаракович и Гасилов¹ Вячеслав Сергеевич

¹ Кафедра промышленной безопасности; ² Кафедра химической кибернетики. Казанский
национальный исследовательский технологический университет. Ул. К. Маркса, 68. г. Казань, 420015.
Республика Татарстан. Россия. Тел.: 8-9297239816. E-mail: a_a384@rambler.ru

*Ведущий направление; +Поддерживающий переписку

Ключевые слова: тепловое излучение, целлюлозные материалы, температура поверхности, автоматизированный эксперимент.

Аннотация

Проведен анализ отечественных и зарубежных данных по измерению характеристик воспламенения целлюлозных материалов. Разработана методика контактного измерения температуры поверхности древесины, текстильных материалов, бумаги. Обоснована конструкция автоматизированного измерительного модуля со сменными держателями крепления образцов. Представлены результаты экспериментов по измерению характеристик зажигания целлюлозных материалов.

Введение

В природных и техногенных катастрофах происходит не контролируемое превращение химической энергии натуральных и синтетических топлив в энтальпию высокотемпературных продуктов горения. Воздействия опасных факторов пожара в виде высокоинтенсивных радиационно-конвективных тепловых потоков на горючие полимерные материалы может привести к их зажиганию и катастрофическим экологическим, материальным и социальным последствиям.

Исследование закономерностей термического разложения природных и синтетических полимеров и композиционных материалов на их основе имеет важное теоретическое значение для понимания сложных механизмов физико-химической деструкции и воспламенения полимеров при высокоинтенсивном нагреве. Результаты теоретических исследований имеют важный прикладной аспект при прогнозировании последствий аварийных ситуаций и создании пожаробезопасных материалов.

Наиболее распространенным природным полимером является целлюлоза и композиционные материалы на основе целлюлозы – древесина, лесные горючие материалы (ЛГМ), торф, текстильные материалы, бумага.

Очевидно, системный анализ термической деструкции целлюлозных материалов (ЦМ) целесообразно проводить с применением уравнений математической физики, инвариантных к закономерностям процессов в реальных объектах.

Системный подход является теоретической основой в решении проблемы прогнозирования последствий теплового поражения объектов различной физико-химической и биологической природы в чрезвычайных ситуациях.

Зажигание ЦМ может привести к возникновению вторичных очагов пожара и материальному потерям. Важно отметить, что зажигание текстильных материалов одежды кроме материального ущерба может вызвать массовые термические поражения человека.

Таким образом, прогнозирование последствий воздействия опасных факторов природных и техногенных пожаров на объекты окружающего пространства является важной социально-экономической проблемой.

Состояние анализируемой проблемы мотивировало проведение экспериментальных и теоретических исследований с целью создания математической модели прогнозирования зажигания ЦМ.

Полная исследовательская публикация — Каргин А.В., Еналеев Р.Ш., Гимранов Ф.М. и Гасилов В.С.

В данной статье приводятся результаты исследования по измерению характеристик зажигания ЦМ – температуре и времени воспламенения. Стандартные показатели пожарной опасности – температуры воспламенения, самовоспламенения, тления, определяемые в лабораторных условиях [1], существенно отличаются от реальных по механизмам нагрева и граничным условиям теплообмена образца с окружающей средой.

В международных стандартах [2, 3] время воспламенения и скорость распространения пламени определяются только при воздействии открытого пламени. Для определения времени воспламенения строительных материалов при воздействии теплового излучения принят отечественный метод ГОСТ 30402-96, идентичный международному методу ISO 5657. В [4,5] приводятся результаты лабораторных и натурных испытаний по времени зажигания различных горючих материалов без указания их теплофизических и оптико-геометрических свойств.

В периодических изданиях «*AIAA Journal*», «*Combustion and Flame*», «*Fire and Materials*», «*Физика горения и взрыва*» и других профильных журналах представлен огромный расчетно-экспериментальный материал по зажиганию конденсированных систем.

Опубликованные результаты исследований используются авторами применительно к разработке методов прогнозирования критических условий зажигания ЦМ.

Например, в [6] представлены экспериментальные результаты исследования по зажиганию полупрозрачного баллиститного пороха. Опыты проводились на установке светового излучения с графитовой панелью, нагреваемой электрическим током. Максимальная плотность теплового потока составляла 5 кал/см·сек (209 кВт/м²).

Образы пороха представляли таблетки диаметром 20 мм и высотой 6-8 мм. Измерение температуры проводилось ленточными термопарами толщиной 5-6 микрон. Контакт термопары с поверхностью образца осуществлялся вклеиванием спая в размягченную ацетоном поверхность пороха с дальнейшей притиркой на оптическом стекле. Результаты представлены на рис. 1.

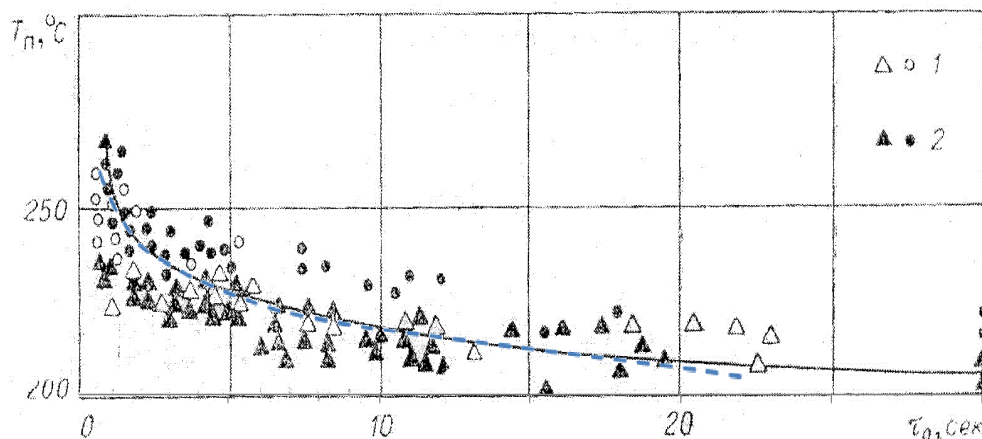


Рис. 1. Экспериментальные данные по зажиганию нитроглицеринового пороха тепловым излучением:
1 – Воздух; 2 – Азот; — аппроксимация Ковальского, Хлевногo, Михеева
--- аппроксимация по универсальному критерию [7]

Показания термопары записывались на зеркальный гальванометр осциллографа Н-700. Момент воспламенения фиксировался по резкому подъему температуры поверхности в момент воспламенения.

В отечественных источниках периодической литературы по зажиганию древесины имеются единичные публикации по записи динамики изменения температуры поверхности [8, 9], в которых, в отличие от многочисленных зарубежных публикаций, в записи поверхностной температуры отсутствует излом в показаниях термопары, что затрудняет определение характеристик зажигания. Очевидно, это объясняется отсутствием идеального теплового контакта спая термопары с поверхностью материала, стандартной градуировки термопар и недостаточной разрешающей способности измерительной техники.

В данной работе в качестве объектов исследования для комплексного измерения характеристик зажигания выбраны древесина (береза, сосна, дуб), ЛГМ (хвойные иглы, листья

ЗАЖИГАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСПЛАМЕНЕНИЯ _ 17-24 березы, клена, липы), текстильные материалы из синтетических и натуральных волокон, бумага (ксероксная, ватман, оберточная).

Характеристики зажигания определялись при имитации теплового излучения наиболее опасного техногенного сценария – «огненного шара»

Экспериментальная часть

Важно отметить, что достоверность и корректность измерения характеристик зажигания имеют первостепенное значение при идентификации неизвестных параметров и коэффициентов математических моделей зажигания ЦМ.

Поэтому основное внимание авторов сфокусировано на разработке техники автоматизированного эксперимента по контактному измерению поверхностной температуры различных по своей физической структуре целлюлозных материалов.

Эксперименты по зажиганию ЦМ проводились на установке с коническим нихромовым нагревателем по ГОСТ 30402-96. Плотность теплового потока варьировалась в пределах 20-50 кВт/м².

Характеристика зажигания определялась с помощью специально сконструированного и изготовленного измерительного модуля со сменными держателями образцов для древесины, ЛГМ, текстильных материалов и бумаги. Автоматизированная запись термодинамических параметров термического разложения ЦМ проводилась с использованием аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы *L-Card*. В крейте АЦП имеется 8 измерительных каналов. Частота опроса датчиков может изменяться от 0.5 до 400 Гц. В вычислительном комплексе по специальной программе обрабатываются результаты измерений и графическая информация представляются в приложении Excel. Например, при преобразовании термоЭДС медь-константановой термопары (тип Т) в градусы по шкале Цельсия применяется аппроксимирующий полином 14-го порядка в соответствии с Государственной системой обеспечения единства измерений [10].

Результаты и их обсуждение

С целью обеспечения плотного теплового контакта авторами апробированы различные способы создания контакта: натяга дополнительным грузом термоэлектродов термопары, приклеиванием проводов с фронтальной, как это сделано на рис. 2 [5], и тыльной поверхностями образца. Сравнительные испытания различных способов крепления показали, что наиболее адекватным оказался способ «вдавливания» спая термопары в образец с помощью специального пресса, схематично показанного на рис. 3.

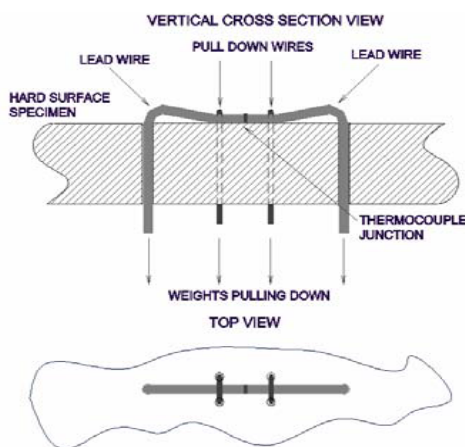


Рис. 2. Создание теплового контакта «при прижатии» спая термопары

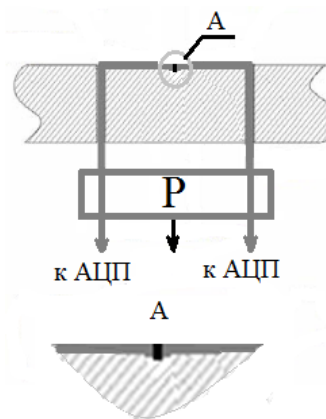


Рис. 3. Создание теплового контакта методом «вдавливач»

Температура текстильных материалов измерялась на обеих поверхностях образца: фронтальной относительно вектора теплового облучения и тыльной. Также как и в конденсированных веществах [6], в данной работе обоснован метод «углубленного» контактного измерения температуры ЦМ. При этом учитывалась структура текстильного материала в виде переплетения нитей и образования на обеих поверхностях материала канавок глубиной десятой доли миллиметра. В эти канавки укладывалась термопара с длиной термоэлектродов

Полная исследовательская публикация ___ Каргин А.В., Еналеев Р.Ш., Гимранов Ф.М. и Гасилов В.С.
4-5 мм от спая. Плотный контакт осуществлялся за счет натяжения электродов и их крепления с тыльной стороны образца папиросной бумагой толщиной 0.08 мм и клеем БФ-6.

1. Характеристики воспламенения

1.1. Древесина

Образцы древесины – березы, сосны, дуба диаметром 40 мм и толщиной 20 мм подвергались облучению на стандартной установке с зажиганием продуктов термического разложения от газовой микрогорелки.

В качестве примера на рис. 4, 5 приведены характеристика зажигания образцов сосны.

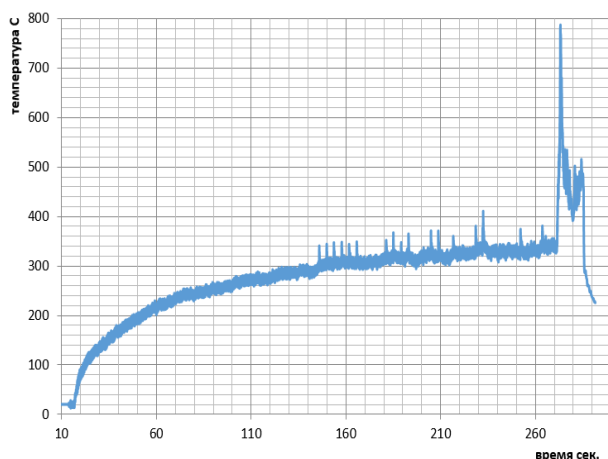


Рис. 4. Характеристики зажигания образцов сосны при плотности теплового потока излучения 20 кВт/м²

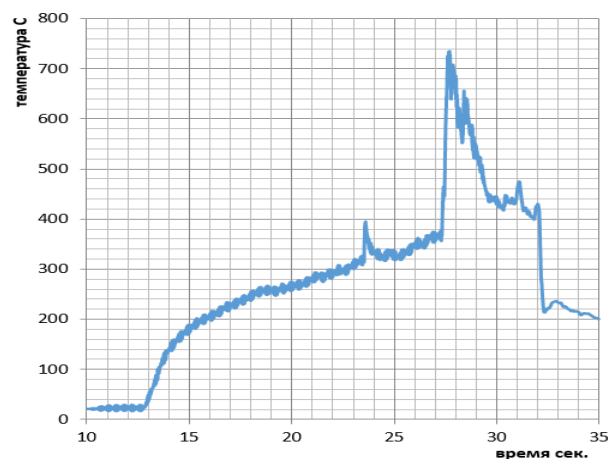


Рис. 5. Характеристики зажигания образцов сосны при плотности теплового потока излучения 50 кВт/м²

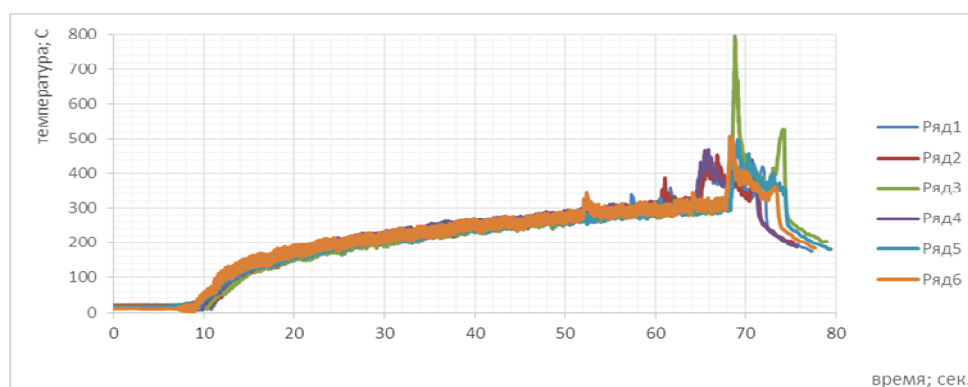


Рис. 6. Результаты параллельных опытов для образцов дуба при плотности 30 кВт/м²

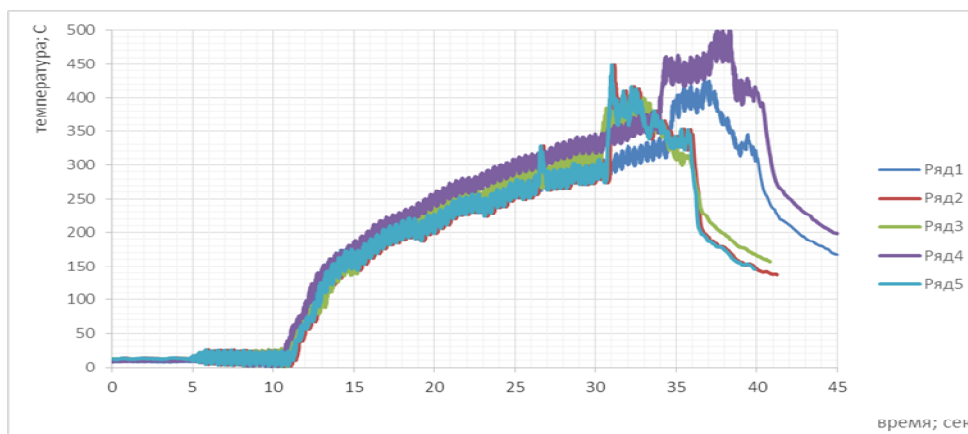


Рис. 7. Результаты параллельных опытов для образцов березы при плотности 50 кВт/м²

В отдельных опытах (рис. 4, 5) наблюдается явление всплеск (на графиках вертикальные периодические «всплески» температуры) без воспламенения. Единственное объясне-

ЗАЖИГАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСПЛАМЕНЕНИЯ _ 17-24
ние данного явления – не достаточная массовая скорость выхода газообразных продуктов
пиролиза. В результате в газовой фазе не достигаются низшие концентрационные пределы
смеси горючего и окислителя.

Характеристики зажигания при 20 кВт/м^2 : время воспламенения по первой вспышке – 130 с, по температуре излома – 266 с, температура 320°C ; при 50 кВт/м^2 – время воспламенения 10.5 и 14.3 секунды. Температура воспламенения 360°C соответственно.

При снижении плотности теплового потока ниже 20 кВт/м^2 воспламенение древесины не происходит. Полученные результаты согласуются с данными [11], в которых минимальное критическое значение теплового потока, установленное в натурных испытаниях, равно 18.5 кВт/м^2 .

Результаты параллельных опытов для образцов древесины представлены на рис. 6, 7.

Доверительный интервал среднеквадратического отклонения от среднего значения по выборке из 5-6 параллельных опытов как для конденсированных веществ (рис. 1), так и ЦМ составляет $\pm(10-15)\%$ (рис. 6, 7). Очевидно, основной причиной является неравномерность температуры на поверхности материала, несмотря на равномерное распределение теплового потока излучения.

Действительно, в [6] визуальными наблюдениями и при измерении температуры поверхности пороха одновременно в нескольких точках установлено, что в процессе нагрева поверхность пороха превращается в бугристую из-за образования «пузырьков» продуктов разложения. И зажигание носит очаговый характер. Аналогичная картина может наблюдаться и при зажигании ЦМ. Кроме того, при зажигании древесины неравномерность нагрева дополнительно возникает из-за не постоянства коэффициентов отражения, поглощения и теплопроводности на поверхности образца материала.

1.2. Текстильные материалы

Выборочные результаты измерений температуры хлопкополиэфирной ткани (10% полиэфирных волокон) показаны на рис. 8-10.

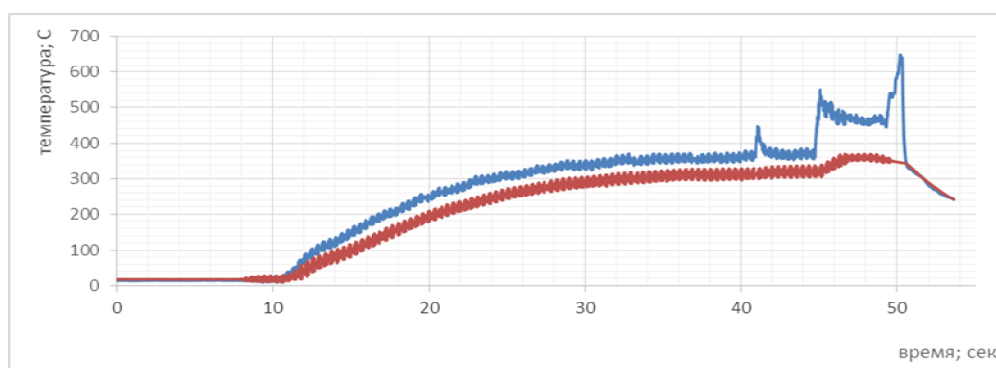


Рис. 8. Температура фронтальной (верхняя кривая) и тыльной (нижняя кривая) поверхностей текстильного материала при плотности теплового потока 20 кВт/м^2

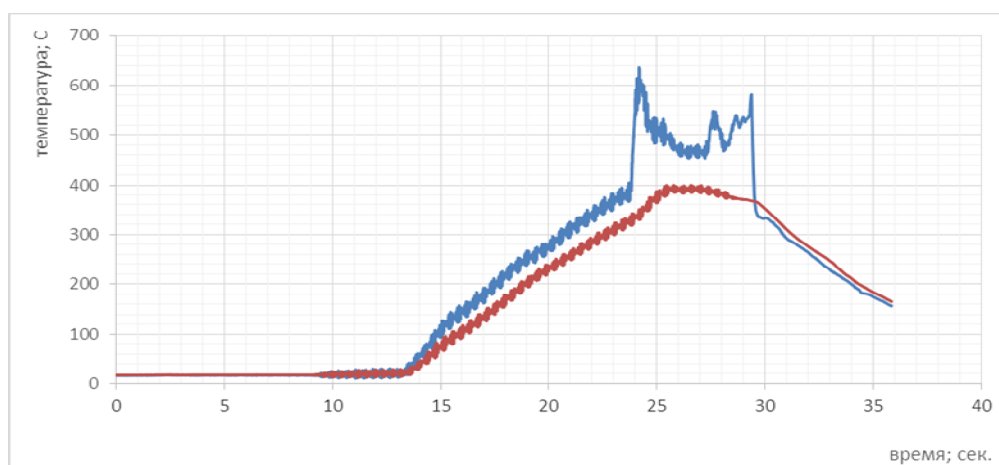


Рис. 9. Температура фронтальной (верхняя кривая) и тыльной (нижняя кривая) поверхностей текстильного материала при плотности теплового потока 30 кВт/м^2

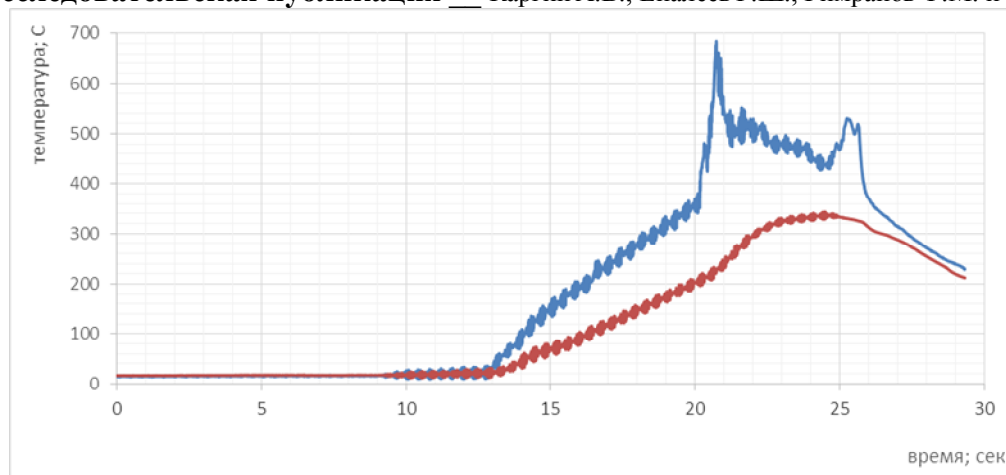


Рис. 10. Температура фронтальной (верхняя кривая) и тыльной (нижняя кривая) поверхностей текстильного материала при плотности теплового потока 40 кВт/м^2

Как видно из данных рис. 8-10, с увеличением плотности теплового потока разница температур между поверхностями возрастает, что связано с увеличением градиента температуры на фронтальной поверхности.

Практическая важность экспериментальных результатов по воспламенению текстильных материалов заключается в возможности их использования при идентификации параметров математической модели процесса теплопередачи и проверке адекватности моделей по значениям температуры на граничных поверхностях материала.

1.3. Бумага

Измерение температуры бумаги проводилось только на тыльной поверхности, так как толщина термопары становится сравнимой с толщиной бумаги. Результаты экспериментов представлены на рис. 11, 12.

Следует выделить оригинальный результат (рис. 11), в котором при отсутствии воспламенения после полного термического разложения бумаги и образования углеродистого остатка наступает стационарный режим с постоянной температурой поверхности.

Следовательно, наступает термодинамическое равновесие между поглощенной энергией теплового излучения и теплопотерями конвекцией и обратным излучением. Данный экспериментальный результат может быть использован для определения степени черноты поверхности после пиролиза материала и теплоемкости углеродистого остатка.

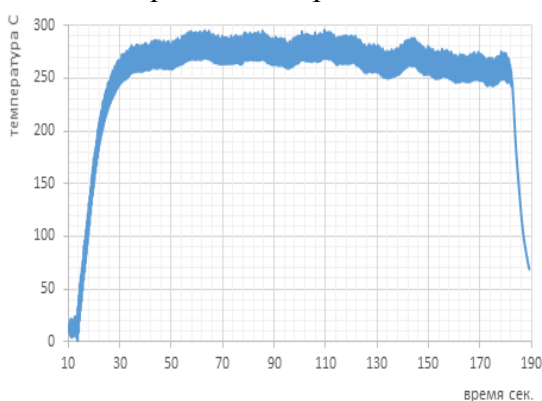


Рис. 11. Температура тыльной поверхности бумаги при плотности теплового потока 20 кВт/м^2

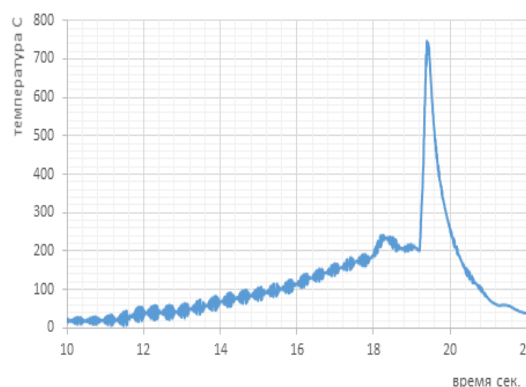


Рис. 12. Температура тыльной поверхности бумаги при плотности теплового потока 50 кВт/м^2

1.4. Лесные горючие материалы (ЛГМ)

Определение характеристик зажигания ЛГМ ограничилось только визуальным измерением времени задержки воспламенения, так как измерение температуры частиц ЛГМ из-за малых поперечных размеров не представляется возможным. Результаты экспериментов по

ЗАЖИГАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ: ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСПЛАМЕНЕНИЯ _ 17-24
зажигания хвойных иголок с разбросом 20% совпадают с данными по зажиганию хвоинок [12]
со ссылкой на [13]. Размеры и укладка хвойных иголок были аналогичны тем образцам,
которые использовались в работе [14]. Эксперименты проводились в цилиндрической кювете
из фиброцемента диаметром 40 мм и высотой 12 мм.

В экспериментах установлен интересный, ранее не опубликованный факт – время зажи-
гания хвоинок практически совпадает с временем воспламенения образцов сосны в том же
диапазоне плотности теплового потока излучения (рис. 11, 12 и таблица). Поэтому рассмот-
рение слоя ЛГМ как монолитного с плотностью древесины [12] можно считать правомерным.

Однако, как видно из таблица, сканированной из [12], расчетное время зажигания в разы
отличается от экспериментально определенного, особенно для плотностей 15-20 кВт/м². Такое
различие можно объяснить двумя причинами.

Таблица. Времена задержки воспламенения слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком

Тепловой поток, q_s , кВт/м ²	Время задержки воспламенения (расчет 1D), t_{ign} , с	Время задержки воспламенения (расчет 2D), t_{ign} , с	Время задержки воспламенения (эксперимент [13]), t_{ign} , с
15	96	99	Нет зажигания
20	59	62	197-207
25	31	33	93-100
30	24	26	40-42
35	20	21	27-30
40	18	18	18-26

Во-первых, уравнение энергии (1) [12, стр. 137] является элементарной моделью распрост-
ранения тепла для твердофазного теплового механизма зажигания однородных топлив [15], не
учитывающей фазовые превращения и эндотермические эффекты деструкции полимера.

Во-вторых, в теории теплового взрыва начало формироваться, но еще не получило
должного развития направление по зажиганию гетерогенных, полупрозрачных, пористых
систем с конденсированными продуктами реакций [16], к которым относятся ЦМ. В тепловой
теории зажигания продолжительность асимптотического процесса воспламенения определя-
ется различными приближенно-аналитическими методами. В основном методе разбиения на
стадии [17, 18], в одной из них пренебрегают химической реакцией и рассчитывают темпе-
ратурное поле для химически инертного тела, в другой – теплопроводностью. «Сшивка»
решений проводится по температуре поверхности.

В [7] впервые предложен критерий зажигания, в котором одновременно решаются два
уравнения энергии: для инертного нагрева и для уравнения с источниками, учитывающими
физико-химические превращения. Сравнение решений проводится по отношению скоростей
роста температуры поверхности. Адекватность критерия экспериментальным данным уста-
новлена при моделировании зажигания текстильных материалов.

Заключение

В данной статье обобщены экспериментальные результаты по характеристикам зажи-
гания целлюлозных материалов при воздействии теплового излучения. В последующих
публикациях будут представлены:

- результаты термического анализа стадии испарения ЦМ при высокоинтенсивном нагреве;
- математическая модель с объемными источниками поглощения теплового излучения,
испарения влаги, эндотермического процесса пиролиза ЦМ, экзотермической химической
реакции;
- алгоритм идентификации кинетических параметров процессов физико-химических превра-
щений и коэффициентов, характеризующих теплофизические и оптико-геометрические
свойства модели.

Выводы

1. Проведен анализ отечественных и зарубежных данных по характеристикам зажига-
ния конденсированных систем при воздействии теплового излучения в диапазоне плотности
теплового потока 20-200 кВт/м².

Полная исследовательская публикация __ Каргин А.В., Еналеев Р.Ш., Гимранов Ф.М. и Гасилов В.С.

2. Разработана методика автоматизированного эксперимента по контактному измерению температуры поверхности и времени воспламенения целлюлозных материалов – древесины, текстильных материалов, бумаги. Использование современных цифровых средств измерения позволило получить однозначные результаты по температуре и времени воспламенения целлюлозных материалов.
3. Получены экспериментальные зависимости характеристик зажигания целлюлозных материалов – древесины (береза, сосна, дуб), текстильных материалов (хлопкополиэфирная ткань, бязь, фланель), бумаги (ксероксная, ватман, оберточная) от плотности теплового потока излучения в диапазоне 20-50 кВт/м². Однозначность результатов по характеристикам зажигания позволяет их использовать для идентификации параметров и коэффициентов в твердофазных математических моделей процессов термического разложения и воспламенения.

Литература

- [1] ГОСТ 12.1.044-89. Система стандартов безопасности труда "Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов".
- [2] ISO 6940:2004 "Textile fabrics -- Burning behaviour -- Determination of ease of ignition of vertically oriented specimens".
- [3] ISO 6941:2003 "Textile fabrics – Burning behaviour – Measurement of flame spread properties of vertically oriented specimens".
- [4] Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М. 1996. 256с.
- [5] J. Urbas, W.J. Parker, and G.E. Luebbers. "Surface Temperature Measurements on Burning Materials Using an Infrared Pyrometer: Accounting for Spectral Emissivity and Reflection of External Radiation", Fire and Materials, 28: 33-53 (2004).
- [6] Михеев В.Ф., Ковальский А.А., Хлевной С.С. Зажигание баллиститного пороха световым излучением. *Физика горения и взрыва*. 1968. №1. С.3-9.
- [7] R.Sh. Enalejev. Modeling of the fabrics ignition. Proceedings of 4th Fire Behavior and Fuels Conference, July 1-4, 2013, St. Petersburg, Published by the International Association of Wildland Fire, Missoula, Montana, USA. 2014. P.394-410.
- [8] 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.
- [9] Куликов В.С., Мицко И.С., Сергеев Г.С., Шабалин И.Н. Исследование воспламеняемости древесины под влиянием внешнего потока излучения. *Вестник АН БССР, сер. Физико-энергетических наук*. 1983. №1. С.90-94.
- [10] ГОСТ Р 8.585 – 2001. Государственная система обеспечения единства измерений. ТЕРМОПАРЫ. Номинальные статические характеристики преобразования.
- [11] ГОСТ 12.1.044-89. Система стандартов безопасности труда "Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов".
- [12] Барановский Н.В., Тойчуев Р.М. Упрощенная математическая модель оценки тепловых режимов воздействия очага возгорания на слой почвы после стадии зажигания лесного горючего материала. *Бутлеровские сообщения*. 2013. Т.34. №5. С.138-145.
- [13] Касперов Г.И., Гоман П.И. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений. *Труды БГТУ. Сер. II Лесная и деревообрабатывающая промышленность*. Беларусь. 2010. Вып. XVIII. С.337-340.
- [14] Захаревич А.В., Барановский Н.В., Максимов В.И. Зажигание лесного горючего материала углеродистой нагретой до высоких температур частицей. *Бутлеровские сообщения*. 2012. Т.29. №2. С.102-108.
- [15] A.J. Merzhanov, A.E. Averson. The Present State of the Thermal Ignition Theory: An Invited Review. *Combustion and Flame*. 1971. Vol.16. P.89-124.
- [16] Мержанов А.Г., Барзыкин В.В., Абрамов В.Г. Теория теплового взрыва: от Н.Н. Семенова до наших дней. *Химическая физика*. 1996. Т.15. №6. С.3-66.
- [17] Аверсон А.Э. Теория зажигания. В кн.: Тепломассообмен в процессах горения. *Черноголовка*. 1980. С.16-36.
- [18] Виллюнов В.И. К тепловой теории зажигания. *Физика горения и взрыва*. 1966. №2. С.78-82.