

Р. Ш. Еналеев, И. В. Красина, В.С. Гасилов,
Ю. С. Чистов, О. А. Тучкова

ЗАЖИГАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ

Ключевые слова: пожар, моделирование, зажигание, прогнозирование.

Проведен анализ литературных данных по методам оценки пожароопасности древесины. Предложена новая модель для определения характеристик зажигания материалов на основе целлюлозы. Впервые представлены сравнительные результаты вычислительного эксперимента по зажиганию древесины при статических и динамических условиях нагрева. Разработан алгоритм прогнозирования опасных зон зажигания вокруг источника пожара.

Keywords: fire, modeling, ignition, prediction.

The analysis of the data of estimation methods on wood fire resistant is lead. A new model on determining of the ignition characteristics for cellulose based materials is recommended. For the first time the comparative results of numerical experiments on the wood ignition under static and dynamic conditions of heating are presented. An algorithm for predicting of dangerous areas around the source of fire ignition is developed.

1. Введение

Древесина является традиционным материалом в строительстве и самым распространенным природным полимерным композиционным горючим материалом.

Мировая пожарная статистика показывает, что последствия воздействия опасных факторов природных и техногенных пожаров на лесные и строительные горючие материалы представляют реальную опасность для современной цивилизации и являются дестабилизирующим фактором на нашей планете [1].

В настоящее время создание теоретических основ процессов воспламенения и горения древесины является наиболее актуальной проблемой оценки ее пожарной опасности. Фундаментальные разработки в этой области позволят прогнозировать опасные зоны вокруг природного или техногенного очагов пожара, в которых может произойти воспламенение и инициирование горения строительных материалов.

Для решения данной проблемы в [2] предложен системный подход. Одним из элементов системы являются полимерные горючие материалы на основе целлюлозы – древесина, текстильные материалы, бумага и т.д.

В литературе приводится огромный объем расчетных и экспериментальных данных по различным стадиям термоокислительной деструкции древесины при воздействии интенсивного нагрева тепловым излучением – испарению, пиролизу, экзотермическим химическим реакциям в твердой и газовой фазах.

В основном эти исследования выполнены при тепловых потоках от 20 до 80 кВт/м². Однако в реальных природных и техногенных пожарах, вызванных горением углеводородных и ракетных топлив, плотность теплового потока излучения может на один-два порядка превосходить упомянутый уровень.

В связи с этим, представляет теоретический и практический интерес применение математической модели [3] и инвариантного критерия [4] для определения кинетических параметров и

характеристик зажигания древесины и сопоставление результатов вычислительного эксперимента с опытными данными.

Целью данной работы является обоснование нового подхода в прогнозировании опасных зон зажигания древесины при воздействии теплового излучения наиболее опасного сценария горения углеводородов в виде огненного шара при статических и динамических условиях нагрева.

2. Анализ проблемы

Исследование закономерностей воспламенения и горения природных и синтетических полимеров и композиционных материалов на их основе имеет важное теоретическое значение для понимания сложных механизмов физико-химических процессов термической деструкции и практическое применение при создании пожаробезопасных материалов.

Наиболее распространенным природным полимером является целлюлоза. Очевидно, целлюлозные материалы (ЦМ) условно можно отнести к натуральным твердым топливам или горючим материалам в отличие от «искусственных» топлив – порохов, твердых ракетных топлив и других энергетических материалов.

Принципиальное отличие синтетического топлива от натурального состоит в том, что в нем окислитель (кислород) и горючее присутствует в одной молекуле или смешаны на молекулярном уровне, а в натуральном твердом топливе – поступает из окружающего пространства через пористую поверхность [5]. Но в момент зажигания, при незначительном выгорании твердого топлива и образовании углеродистого остатка, адсорбированный кислород присутствует не только на поверхности, но и во всем микропористом объеме углерода [6] и зажигание проходит в кинетической области.

2.1. Теоретические подходы

Теоретической основой процессов зажигания и горения ЦМ являются закономерности химического превращения полимера в конечные продукты. Без понимания механизмов таких превращений

невозможно решать практические задачи, связанные с проблемой пожароопасности полимеров [7, 8].

При исследовании термического разложения ЦМ основными методами являются термический анализ и высокоинтенсивный нагрев различными механизмами для экспериментального определения характеристик зажигания. Результаты таких работ способствуют созданию новых ЦМ, более термостабильных и огнестойких [9].

Важно отметить, что для целенаправленного воздействия на процесс воспламенения необходимо глубокое изучение кинетики протекающих при этом реакций [9]. Характерной особенностью горения растительных горючих материалов является образование твердого углеродистого остатка. Поэтому фронт горения предлагается разделять на две зоны – зону пламенного горения и зону тления [10].

В зоне пламенного горения горючий материал разлагается с образованием горючих газов (газификация). Горючие газы реагируют с кислородом воздуха. В этой зоне формируется факел пламени, в котором горение продуктов газификации протекает аналогично горению предварительно не перемешанных газов. В зоне тления догорают обугленный остаток с образованием золы.

Оценка опасности возгорания горючих материалов в нормативных документах [11], [12] представляется в виде экспериментальной зависимости времени воспламенения от плотности теплового потока облучения.

В теории теплового взрыва начало формироваться, но еще не получило должного развития направление по зажиганию гетерогенных пористых систем с конденсированными продуктами реакций, к которым относятся ЦМ [13].

2.2. Гетерогенное зажигание

Материалы на основе целлюлозы являются гетерогенными системами, при зажигании и горении которых образуются конденсированные продукты. Отличительной особенностью таких систем является сложность взаимодействия между горючим и окислителем [14].

Обращается внимание, что в процессе взаимодействия окислителя и горючего образуется нарастающий во времени слой продуктов, оказывающий сильное влияние на процесс воспламенения. В ЦМ таким слоем является пористый коксовый остаток.

В [15] приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований по гетерогенному зажиганию полупрозрачных полимерных материалов: полиметилметакрилата и композиционного материала на основе стеклоткани и эпоксифенольного связующего.

В начале нагрева полупрозрачный материал прогревается как инертное вещество, а затем при достижении определенной температуры на поверхности протекает интенсивная гетерогенная химическая реакция. Характерная температура зажигания выбирается по точке перегиба на экспериментальной кривой записи температуры поверхности.

В [15] опытным путем также установлено, что при гетерогенном зажигании полимерных материалов в момент начала термического разложения образующийся прококсированный слой достаточно тонок и не оказывает существенного влияния на процесс зажигания, т.е. не является диффузионным барьером для окислительного компонента.

Кроме образования коксового слоя в момент зажигания имеются и другие физико-химические процессы, сопутствующие воспламенению. К ним относятся, например, взаимное растворение реагентов, адсорбция окислителя на поверхности горючего, реакция взаимодействия продуктов термического разложения в конденсированной фазе между собой и исходным веществом или материалом, которые не учитываются при теоретическом анализе. В [14] предлагается учитывать эффект от этих процессов косвенно через кинетические законы.

Состояние анализируемой проблемы применительно к исследованию процессов зажигания ЦМ и их композитов мотивировало проведение анализа результатов экспериментальных и теоретических исследований, представленных в литературе.

3. Оценка пожарной опасности

Качественную картину процесса воспламенения ЦМ можно представить следующим образом [7].

При воздействии теплового потока излучения поверхность ЦМ нагревается, если теплоотвод от поверхности за счет теплопроводности и потери тепла конвекцией и обратного излучения меньше скорости нагрева.

При достижении температуры испарения, а далее пиролиза образуются летучие пары и газы. Образующаяся парогазовая смесь смешивается с окружающим воздухом. Если содержание этой смеси начинает превышать концентрационный предел воспламенения горючей смеси происходит ее воспламенение. Этот процесс может быть спонтанным или инициирован дополнительным источником зажигания. Таким «пилотным» источником зажигания могут быть небольшое пламя газовой горелки, электрическая искра или накаливаемая проволока.

Практически одновременно образуется нелетучие продукты в конденсированной фазе в виде углеродистого остатка. Данные по количественному сравнению времен газофазного и твердофазного воспламенения практически отсутствуют.

В [16] экспериментально установлено, что до плотности теплового потока излучения 30–40 кВт/м² разница во времени наступления начала пиролиза и воспламенения остается значимой. При плотности 50 кВт/м² и более эта разница становится не существенной. В данной работе в соответствии с тепловой теорией зажигания [18] принята твердофазная модель воспламенения.

3.1. Экспериментальные методы

При прогнозировании развития пожара наиболее важным параметром, определяемым

экспериментально, является скорость тепловыделения.

В России отсутствуют стандартизованные методы испытаний для измерения этого параметра. В ГПС МЧС РФ для определения характеристик тепловыделения полимерных материалов, используемых в строительстве, применяется стандартный проточный калориметр OSU, разработанный фирмой "Atlas" (США) [17].

В калориметре OSU образец древесины помещается в реакционную камеру. Под воздействием радиационного потока с интенсивностью 20, 35 и 52 кВт/м² от тепловой панели образец начинает разлагаться, образуя газобразные продукты термодеструкции материала, воспламеняются нижней и дожигаются верхними газовыми запальными горелками. Выделяющееся при этом тепло нагревает проточный воздух. По разнице температур, измеряемой дифференциальной термопарой, рассчитываются характеристики тепловыделения.

В качестве примера на рис. 1 представлены кривые изменения скорости тепловыделения при горении образцов ели при воздействии различных значений плотности радиационного теплового потока.

Как видно из рис.1, изменение скорости тепловыделения характеризуется ярко выраженной двухстадийностью процесса, связанной с двумя видами горения древесины – газо- и гетерофазным [17].

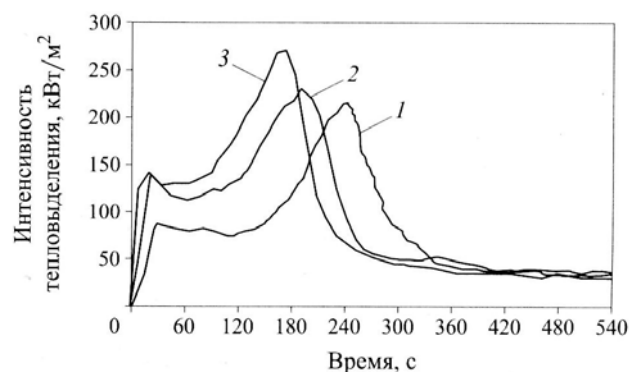


Рис. 1 - Изменение тепловыделения при горении образцов ели в зависимости от плотности внешнего теплового потока: 1 – 20 кВт/м²; 2 – 35 кВт/м²; 3 – 52 кВт/м²

В качестве основных характеристик тепловыделения используются следующие показатели:

- время задержки воспламенения;
- максимальная скорость тепловыделения и время от начала нагрева до пикового значения скорости;
- общее количество тепловыделения за заданное время;
- эффективная теплота сгорания.

Следует отметить, что время задержки воспламенения, измеряемое в методе проточного калориметра, существенно отличается от данных, полученных на установках лучистого нагрева отечественными и зарубежными исследователями.

Кроме того, отсутствие данных по температуре поверхности конденсированной фазы исключает возможность определения кинетических параметров зажигания древесины.

Очевидно, кинетику процесса зажигания материалов на основе целлюлозы можно исследовать только методом математического моделирования определения характеристик зажигания термического разложения при интенсивном нагреве излучением.

Таким образом, проточный калориметр дает экспериментальную информацию для сравнительной оценки пожарной опасности различных пород древесины. Однако для прогнозирования основных характеристик зажигания – времени задержки воспламенения и температуры поверхности необходимо построение адекватной математической модели.

3.2. Математическая модель

В тепловой теории зажигания [18] приводится элементарная модель по зажиганию гомогенных энергетических материалов. Момент зажигания фиксируется по выполнению критических условий, сформулированных Семеновым, Зельдовичем, Мержановым – Барзыкиным – Аверсоном, Ассовским и др. при решении уравнения Фурье в «инертной» постановке.

В тепловой теории Мержанова и Аверсона получена линейная зависимость между характеристиками зажигания в координатах логарифм от времени воспламенения – обратной температуры поверхности. Теоретически и экспериментально установлено, что для поверхностных механизмов нагрева при граничных условиях I, II, III рода линейные зависимости между характеристиками зажигания незначительно отличаются друг от друга.

Однако для объемного нагрева тепловым излучением, упомянутая зависимость существенно отличается от зависимости, полученной для других поверхностных механизмов нагрева, и имеет нелинейный характер.

В области пожарной безопасности тепловое излучение является основным поражающим фактором пожаров в нефтехимической технологии, специальной химии, аэрокосмической техники, атомной энергетики и т.д. Поэтому поиск новых подходов и критериев зажигания, адекватных реальным характеристикам зажигания, является важной прикладной задачей при прогнозировании воспламенения как энергетических веществ и материалов, так и горючих полимерных материалов.

В отличие от элементарной модели тепловой теории зажигания, переход к горючим полимерным материалам с физико-химическими превращениями и гетерофазным механизмом зажигания вызывает непреодолимые математические трудности. Сложность заключается не столько в физико-математической постановке, сколько в идентификации многочисленных переменных коэффициентов и кинетических параметров. Эти неизвестные переменные входят в правую часть уравнения Фурье, в котором появляется множество

объемных источников химической и нехимической природы.

По имеющимся данным в литературе отсутствуют сообщения по адекватным моделям и критериям зажигания горючих материалов в широком диапазоне изменения интенсивности нагрева и граничным условиям теплообмена с окружающей средой.

В предлагаемой модели имеются: шесть физико-химических объемных источников: эндотермические – испарение и пиролиз; экзотермические – в газовой фазе окисление газообразных продуктов пиролиза между собой и кислородом воздуха, в твердой фазе – углеродистым остатком после пиролиза и кислородом воздуха; один источник нехимической природы – объемное поглощение теплового излучения.

В сумме во всех выражениях для источников присутствует около 30 переменных коэффициентов и кинетических параметров. Для определения некоторых из них имеются стандартные методики, для других – литературные данные. При высокоинтенсивном нагреве полимерных материалов подавляющее большинство коэффициентов изменяются в результате их зависимостей от температуры. Данные по этим зависимостям практически отсутствуют. Поэтому в модели приняты интегральные значения характеристик. Но и по интегральным значениям сведения также крайне ограничены. Для определения интегральных значений коэффициентов и кинетических параметров предлагается метод идентификации переменных в вычислительном эксперименте. Таким образом, задача сводится к задаче управления. А более конкретно к обратной задаче уравнения теплопроводности с источниками. Постановка таких задач относится к некорректно поставленным задачам уравнений математической физики. Следовательно, даже для приближенных решений задач управления необходимо обосновать функционал качества управления, критерии оптимизации, управляющие функции, параметры управления и их ограничения и т.д. В литературе отсутствуют алгоритмы идентификации подобных многокритериальных многопараметрических задач управления. При математической постановке задачи на основании литературных данных изначально было принято, что кинетика всех объемных источников термоокислительной деструкции описывается аррениусовской зависимостью скорости каждой стадии от температуры. Тогда задача в общепринятой форме переменных формулируется следующим образом:

$$cp(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} - Q_1 - Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (1)$$

$$Q_i = L_i \frac{\partial \eta_i}{\partial \tau}; \quad \frac{\partial \eta_i}{\partial \tau} = k_i (1 - \eta_i) \exp\left(-\frac{E_i}{RT_i}\right); \quad i = \overline{1, 3} \quad (2)$$

$i=1$ – испарение; $i=2$ – пиролиз;

$i=3$ – термоокислительная реакция.

$$Q_4 = \epsilon \mu q_0 e^{-\mu x}; \quad (3)$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \omega_1 \eta_1 - \omega_2 \eta_2 - \omega_3 \eta_3) \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda_0 (1 - \omega_1 \eta_1 - \omega_2 \eta_2 - \omega_3 \eta_3) \quad (5)$$

Как отмечалось выше, в качестве управляющих переменных выбраны макрокинетические параметры термоокислительной деструкции материалов на основе целлюлозы.

Следовательно, в поставленной задаче идентифицируются параметры суммарной макрокинетики процессов испарения, пиролиза и химических реакций окисления продуктов пиролиза и углеродистого остатка. Сложность состоит в том, что теоретически при нагреве в любом диапазоне температур протекают все реакции, но с разной скоростью. Можно лишь говорить о превалирующей роли одной из них в каждой стадии.

Аналогичная постановка задачи приводится в [19], в которой в конденсированной фазе учитывается также только одна глобальная реакция с известными кинетическими параметрами.

В данной работе эти параметры идентифицируются по разработанному алгоритму. Алгоритм идентификации включает несколько этапов. Исходными данными являются только экспериментальные характеристики зажигания минимум в одной точке. Наиболее простым и эффективным методом определения кинетических параметров является линейный пиролиз вещества или материала под действием лучистого нагрева в широком диапазоне изменения плотности теплового потока излучения [20]. Измеряются температура поверхности по методике Зенина и Ковальского и линейная скорость пиролиза после выхода на стационарный режим. Можно получить дополнительную информацию и на нестационарной стадии нагрева по характеристикам зажигания.

Кроме экспериментальных методов, характеристики зажигания можно получить в вычислительном эксперименте по математической модели.

На первом этапе методом покоординатного спуска идентифицируются кинетические параметры – предэкспоненциальный множитель (предэкспонент) и энергия активации. В качестве функционала качества выбираются разность расчетных и экспериментальных значений температур и времени воспламенения в одной точке. Характеристики зажигания определяются по инвариантному критерию зажигания при численном решении модели. Все остальные коэффициенты и параметры ориентировочно принимаются по литературным данным.

Для древесины в качестве экспериментальной точки взяты характеристики зажигания при тепловом потоке 20 кВт/м². По данным [21] время зажигания составляет порядка 100 секунд, температура поверхности достигает значений 220 – 230 °С.

В [22] отмечается, что для выяснения механизма воспламенения и горения чрезвычайно важно уметь количественно оценивать и разделять вклад в макрокинетику суммарного процесса собственно химической и физической составляющих.

На втором этапе идентификации после построения зависимости между характеристиками зажигания возможно два исхода: линейная

зависимость получается нелинейной или расчетное значение энергии активации отличается от заданного. В первом случае корректируются переменные в модели и повторяется первый этап, во втором – также повторяется первый этап пока разница между последующим и предыдущим значениями энергии активации не будет меньше заданной точности.

Сопоставление опытных данных [23] и вычислительного эксперимента представлено на рис. 2.

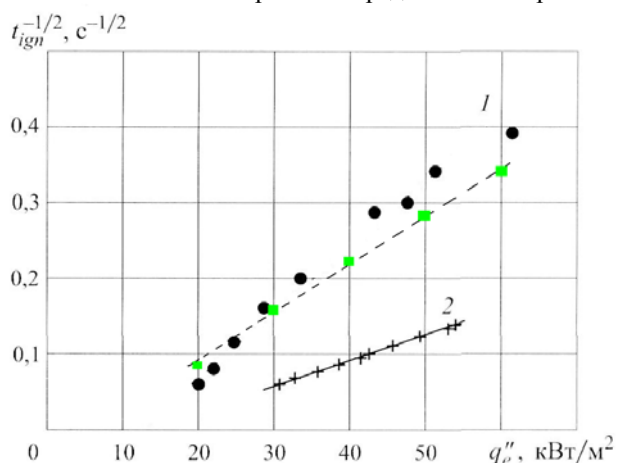


Рис. 2 – Экспериментальные данные по зависимости времени воспламенения образцов древесины сосны (1) и клена (2) от плотности внешнего радиационного теплового потока: ■ – расчет по модели

В данных рис. 2 обращает на себя внимание тот факт, что линейная зависимость обратного значения корня квадратного от времени воспламенения от плотности теплового потока по модельным расчетам и эксперименту с кленом имеет линейный характер. А опытные данные для сосны, рассчитанные по аппроксимационным формулам – нелинейный. Для объяснения полученных результатов очевидно нужно привлекать дополнительные исследования другими методами.

В отечественных нормативных документах существует два стандартных метода испытаний горючих материалов на воспламеняемость: от открытого пламени и теплового излучения, разработанных ВНИИПО МЧС.

Авторами проведены сравнительные испытания образцов древесины (сосна) на воспламеняемость от теплового излучения.

Сравнение проводилось для трех методов фиксации момента воспламенения: самовоспламенение, вынужденное воспламенение от микрорелки в лабораторных условиях по ГОСТ 30402-96 и натурных испытаний по результатам [24] и результатам вычислительного эксперимента по описанной выше модели. Результаты представлены в табл. 1.

Как видно из табличных данных, в диапазоне плотности теплового потока от 20 до 200 кВт/м² совпадение времени вынужденного загорания в газовой фазе и результатов вычислительного эксперимента загорания как в лабораторных, так и натурных испытаниях вполне удовлетворительное.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных по характеристикам загорания древесины (сосна сухая) в зависимости от плотности теплового потока излучения

Плотность теплового потока излучения, кВт/м ²	Эксперимент по ГОСТ 30402-96			Твёрдофазная тепловая модель зажигания	
	самово спламе нение	вынужденное воспламенение			
		лабор.	натурн. [28].		
	время, сек				τ, сек
20	не воспл.	138	172	143,5	225
30	не воспл.	43	-	41,8	248
40	26	26	-	21,2	260
50	14	11	12,9	13,1	268
100			3,3	3,38	280
150			1,6	1.7	289
200			0,96	1,13	295
418,7				0,42	311
1046				0,178	323
2093,4				0,064	342
4186				0.030	356

Обработка результатов вычислительного эксперимента позволила определить кинетические параметры процесса загорания древесины в широком диапазоне изменения плотности теплового потока излучения. Линейная зависимость между характеристиками загорания представлена на рис. 3 для статического нагрева.

3.3. Динамические режимы нагрева

В последнее время при решении прикладных задач в области пожарной безопасности большое внимание уделяется динамическим режимам загорания, когда плотность теплового потока излучения является явной функцией времени.

В реальных условиях динамические режимы наблюдаются при аварийном выбросе и горении сжиженных углеводородных газов из емкостей хранения или при их транспортировке в танкерах и трубопроводах. Плотность теплового потока может меняться также при движении объекта относительно источника излучения и т.д.

В тепловой теории загорания отмечается, что в некоторых работах при обработке экспериментальных данных используется способ усреднения теплового потока. Однако к таким усреднениям необходимо относиться весьма осторожно, особенно в тех случаях, когда данные используются для расчета кинетических констант [18].

В связи с изложенным, представляло практический интерес оценить влияние динамики нагрева на характеристики загорания. Выбраны четыре режима изменения плотности теплового потока во времени, как показано в начале таблицы 2.

Для каждого режима плотность падающего теплового потока изменялась в диапазоне от 20 до 4186 кВт/м², определялись характеристики загорания.

В момент зажигания рассчитывалось количество облучения, подведенное к образцу.

Таблица 2. Результаты вычислительного эксперимента по оценке динамики нагрева на характеристики зажигания древесины

Динамика нагрева			
I	II	III	IV

№ п/п	Динамика нагрева	q_0 , кВт/м ²	Характеристики зажигания		Количество облучения, кал/см ²
			τ_*	t_*	
	1	2	3	4	5
1	I	20	143,5	225,4	62
2	II		110	253	38
3	III		27	253	22
4	IV		66,7	264	30
1	I	30	41,8	248	30
2	II		34,3	271,6	20
3	III		13,8	258,4	16
4	IV		21	269	15,4
1	I	40	21,2	260	20
2	II		17	273	14
3	III		8	266	13
4	IV		11	275	10
1	I	50	13,1	268,3	15,7
2	II		10,5	277,4	11
3	III		5,8	260,5	10,8
4	IV		4,7	278	9
1	I	100	3,38	279,9	8
2	II		3	294	6,3
3	III		2	259	6
4	IV		2,1	287,5	5,6
1	I	150	1,7	289	6,3
2	II		1,55	303	5,1
3	III		не воспламенился		
4	IV		1,16	291	4,9
1	I	200	1,13	295	5,4
2	II		1,04	309	4,6
3	III		не воспламенился		
4	IV		0,788	296	4,4
1	I	419	0,42	311	3,9
2	II		0,4	325,8	3,8
3	III		0,318	281,6	3,8
4	IV		0,318	308	3,7
1	I	837	0,178	323	3,56
2	II		0,173	337	3,4
3	III		0,14	297	3,35
4	IV		0,142	316,3	3,3
1	I	2093	0,0635	342,5	3,17
2	II		0,0628	356	3,1
3	III		0,051	319,6	3,05
4	IV		0,053	331	3
1	I	4186	0,03	356	3
2	II		0,03	369,8	2,9
3	III		0,0242	334	2,9
4	IV		0,0256	342,7	2,8

Из табличных данных видно, что динамика нагрева существенно влияет на значения характеристик зажигания особенно при относительно низких значениях плотности теплового потока до 40 – 50 кВт/м², характерных для пожаров в помещении. При относительно высоких значениях – от 50 до 200 кВт/м², характерных для горения углеводородов, эта разница постепенно нивелируется. Дополнительная обработка результатов вычислительного эксперимента представлена на рис. 3 и 4.

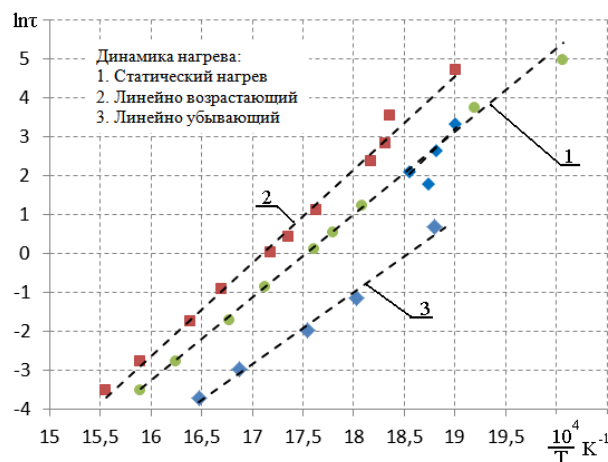


Рис. 3 - Влияние динамики нагрева на характеристики зажигания древесины

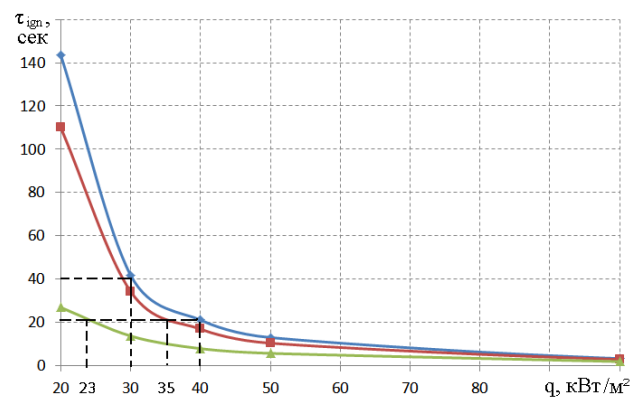


Рис. 4 - Зависимость времени воспламенения от плотности теплового потока излучения: ♦ – статический нагрев; ■ – линейно возрастающая функция; ▲ – линейно убывающая функция

Как видно из рис. 3, линейная зависимость между характеристиками зажигания сохраняется для всех режимов динамического нагрева. Исключение составляет только нагрев линейно убывающей функцией при низких температурах зажигания. Очевидно, в этом случае создается ситуация, когда уменьшающаяся во времени плотность теплового потока является не достаточной для резкого самоускорения экзотермической реакции.

Рис. 4 является графической интерпретацией табличных данных.

4. Прогнозирование зон воспламенения

Чрезвычайные ситуации с образованием высокоинтенсивных источников теплового излучения могут отличаться видом топлива и окислителя, их массами, интенсивностью и степенью смешения. Комбинация этих параметров определяет горение сжиженных углеводородных газов в виде огненного шара и пожаров разлива нефтепродуктов, факельного горения сжатых углеводородных газов при разгерметизации трубопроводов, горения ракетного топлива при аварийном выбросе, световое излучение ядерных взрывов. Наиболее опасным сценарием развития чрезвычайных ситуаций является крупномасштабные огненные шары.

В стандартных методах моделирования процесса горения газов в структуре огненного шара (ОШ) основывается на эмпирических зависимостях интегральных характеристик – эффективного диаметра ОШ D_s , времени его горения t_s и излучающей способности от массы аварийного выброса топлива. Наибольшее распространение получили формулы [25]:

$$D_s = 5,33M_0^{0,372}, t_s = 0,923M_0^{0,303} \quad (6)$$

$$D_s = 55\sqrt[3]{M}, \quad t_s = 3,8\sqrt[3]{M}, \quad (7)$$

где M_0 – масса топлива в кг, M – в тоннах.

Формулы (6,7) используются в ГОСТ [26].

Кроме того в [26] приводятся рабочие формулы для расчета плотности теплового потока излучения на различных расстояниях от теплового источника. По этим методикам оценивается в основном опасность поражения открытых участков кожного покрова человека. Методики прогнозирования загорания ЦМ в отечественных и зарубежных стандартах отсутствуют.

В связи с этим представляло важное практическое значение использовать разработанную модель и критерий загорания для прогнозирования границ загорания древесины для различных масс аварийного выброса углеводородного топлива как при статическом, так и динамическом режимах нагрева.

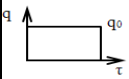
С этой целью результаты вычислительного эксперимента, представленного в таблице 2, обрабатывались в комплексе с применением гостированных методов расчета плотности теплового потока излучения для различных аварийных ситуаций. Результаты данной обработки обобщены в таблице 3.

Масса аварийного выброса топлива изменялась от 75 кг до 256000 кг, т.е. более, чем в 3000 раз. Выбраны два режима нагрева – статический и в виде линейно убывающей функции. В соответствии с табличными данными плотность теплового потока изменялась от 30 до 100 кВт/м². Данный диапазон имитирует и пожары в помещении, и горение углеводородов.

Алгоритм расчета границ опасных зон загорания древесины заключается в следующем. Из табличных данных выбираются плотность теплового потока и время загорания для статического нагрева. Для динамического нагрева рассчитывается среднее значение плотности за время от начала облучения до времени загорания. Затем предлагается ввести индекс облучения, равный произведению плотности теплового потока на корень квадратный из времени загорания

$$I = q_{cp} \sqrt{\tau}. \quad (8)$$

Таблица 3 - Прогнозирование границ зон загорания древесины при различной массе аварийного выброса сжиженного углеводородного топлива

Динамика нагрева	Плотность теплового потока, кВт/м²		Время загорания, сек	$q_{cp} \sqrt{\tau}$	Масса топлива, тонн	Расстояние до объекта, м
	q_0	q_{cp}				
	30	30	41,8	193	256	330
	40	40	21,2	184	37	160
	50	50	13,7	180	6,4	77
	70	70	6,5	179	0,62	26
	100	100	3,38	184	0,075	<11*
	30	48,5	13,8	180	256	250
	40	68	8	191	37	100
	50	78	5,8	188	6,4	48
	70	108,5	3,47	190	0,62	<22*
	100	139,3	2,05	196	0,075	<11*

*пожар-вспышка; объект находится внутри огненного шара и нагревается конвекцией и излучением

Как видно из табл. 3 среднее значение индекса облучения для обоих режимов нагрева равно 186,5. Максимальное отклонение от среднего значения составляет менее 5%. Из полученного результата следует два важных вывода:

- зависимость между характеристиками загорания в координатах $1/\sqrt{\tau} - q$ имеет линейный характер и идентична для обоих режимов нагрева;
- для динамического режима нагрева линейно убывающую функцию можно аппроксимировать средним значением плотности теплового потока.

Далее по времени загорания статического нагрева во внешнем итерационном процессе выбирается масса топлива, а во внутреннем – расстояние до объекта, на котором реализуется заданная плотность облучения. Та же процедура повторяется и для динамического нагрева.

Таким образом, аппроксимация динамической функцией статическим нагревом с сохранением общего количества подводимой энергии может привести к заниженному значению времени загорания. Как показали дальнейшие расчеты, обратная процедура: замена динамической функции

статическим нагревом дает практически одинаковые времена задержки воспламенения.

Разработанный алгоритм может найти применение в оценке пожарной опасности не только древесины, но и других горючих материалов на основе целлюлозы.

Выводы

Представлен критический анализ литературных данных по методам оценки пожарной опасности древесины.

Показана возможность применения модели и критерия зажигания полимерных горючих материалов для прогнозирования опасных зон зажигания древесины при пожарах в помещениях и горении углеводородных топлив.

Проведена сравнительная оценка характеристик зажигания древесины при статическом и динамическом режимах нагрева.

Литература

1. Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, П. Вагнер. *Человечество и Пожары*. Академия ГПС МЧС России, Москва, 2007. 121 с.
2. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.В. Красина, В.С. Гасилов, О.А. Тучкова. *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 8, 322 – 332 (2013).
3. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Ю.С. Чистов, А.Ф. Габидуллин. *Пожаровзрывобезопасность*, **21**, 8, 36 – 41 (2012).
4. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Г.М. Закиров, Ю. С. Чистов, А.Ф. Габидуллин. *Вестник Казанского технологического университета*, **21**, 185 – 193 (2011).
5. Д.А. Франк-Каменецкий. *Диффузия и теплопередача в химической кинетике*. Наука, Москва, 1966. 491 с.
6. *Основы практической теории горения*. Под ред. Померанцева В.В. Энергоиздат, Ленинград, 1986. 312 с.
7. Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков. *Пожаровзрывобезопасность*, **21**, 1, 19 – 33 (2012).
8. С. Мадорский. *Термическое разложение органических полимеров*. Мир, Москва, 1967. 328 с.
9. Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков. *Горение древесины и ее пожароопасные свойства*. Академия ГПС МЧС России, Москва, 2010. 262 с.
9. Э.В. Конев. *Термографическое исследование лесных горючих материалов*. Институт леса и древесины СО АН СССР, Красноярск, 1972, 103 – 118.
10. Федеральный закон РФ от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Принят ГД ФС РФ от 04.07.2008 г.
11. А.В. Самотаев. *Исследование времени воспламенения веществ и материалов при пожаре*. Москва, 1989, 137 – 147.
12. А.Г. Мержанов, В.В. Барзыкин, В.Г. Абрамов. *Химическая физика*, **15**, 6, 3 – 66.
13. В.П. Стовбун, В.В. Барзыкин, К.Г. Шкадинский. *Физика горения и взрыва*, **13**, 2, 147 – 155 (1977).
14. Г.Н. Исаков. *Физика горения и взрыва*, **15**, 5, 11 – 18 (1979).
15. J.L. Torero. *Heat and Mass Transfer in Fires: Scaling Laws and their Application*. Tangiers, Morocco, November 2005.
16. Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков, С.Л. Баработько, Е.Ю. Круглов. *Пожаровзрывобезопасность*, **20**, 7, 2 – 7 (2011).
17. A.J. Merzhanov, A.E. Averson. *The Present State of the Thermal Ignition Theory: An Invited Review*, **16**, 89 – 124 (1971).
18. Л.К. Гусаченко, В.Е. Зарко, А.Д. Рычков. *Физика горения и взрыва*, **48**, 1, 80 – 88 (2013).
19. Р.Ш. Гайнутдинов, Р.Ш. Еналеев, В.И. Аверко-Антонович. *Исследование линейного пиролиза материалов под действием мощного потока лучистой энергии*. Наука, Москва, 1972. 530 с.
20. И.М. Абдурагимов, А.С. Андросов, М. Бартак. *Физика горения и взрыва*, **1**, 10 – 13 (1986).
21. А.С. Штейнберг. *Быстрые реакции в энергоемких системах*. ФИЗМАТЛИТ, Москва, 2006. 208 с.
22. E. Mikkola, I.S. Wichman. *On the Thermal Ignition of Combustible Materials*, **14**, 87 – 96 (1989).
23. А.В. Самотаев. *Исследование времени воспламенения веществ и материалов при пожаре*. Москва, 1989, 137 – 147.
24. J. Moorhouse, M.J. Pritchard. *Thermal radiation hazards from large pool fires and fireballs - a literature review*, **71**, 397 – 428 (1982).
25. ГОСТ Р 12.3.047-98. *Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля*.

© Р. Ш. Еналеев – к.т.н., ст. науч. сотр. каф. плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов КНИТУ, firepredict@yandex.ru; И. В. Красина – д.т.н., зав. каф. технологии химических, натуральных волокон и изделий КНИТУ, irina_krasina@mail.ru; В. С. Гасилов – к.т.н., доц. каф. промышленной безопасности КНИТУ; Ю. С. Чистов – асс. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, yura-chistov@yandex.ru; О. А. Тучкова – к.т.н., ст. препод. каф. промышленной безопасности КНИТУ, touchkova-o-a@mail.ru.