

УДК 614.841; 662.312; 536.37

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ЗАЖИГАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**Еналеев Р.Ш., Красина И.В., Сабирзянова Р.Н.***Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казань, e-mail: ramfar@mail.ru*

Проведен сравнительный анализ отечественных и зарубежных методов оценки огне- и термозащитных свойств текстильных материалов. Сформулированы цель и задачи исследования по совершенствованию инструментальных и расчетных методов прогнозирования пожарной опасности текстильных материалов. Разработана модульная конструкция устройства для испытания материалов на воздействие открытого пламени и теплового излучения. Обоснована техника автоматизированного эксперимента для измерения термодинамических параметров процессов тепло- и массопереноса в покровном текстильном материале и пакете одежды при его интенсивном нагреве и термическом разложении. Предложен системный подход для физико-математического моделирования процессов в элементах системы «тепловой источник – текстильный материал – воздушный зазор – кожный покров биообъекта». Предложены математическая модель и новый универсальный критерий зажигания для прогнозирования времени задержки воспламенения и температуры поверхности в момент зажигания. Установлена адекватность модели и универсального критерия экспериментальным значениям характеристик зажигания пожароопасных материалов. Показана практическая значимость результатов исследования для прогнозирования зон возгорания материалов одежды вокруг опасных высокотемпературных источников в природных пожарах и техногенных авариях.

Ключевые слова: пожар, моделирование, методы испытания, горючие материалы**RISK OF FIRE IGNITION TEXTILE MATERIALS****Enaleev R.S., Krasina I.V., Sabirzyanova R.N.***Kazan national research technological University, Kazan, e-mail: ramfar@mail.ru*

The comparative analysis of domestic and foreign methods is conducted on the assessment of fire – and heat-resistant properties of textile fabrics. The purpose and the research tasks are formulated to improve the instrumental and calculation methods of fire hazard prediction for textile fabrics. The modular facility construction is developed to test fabrics on the exposure of open flame and thermal radiation. An automated experiment technique is proved to measure the thermodynamic parameters of heat and mass transfer in textile fabrics under intensive heating and their thermal decomposition. A systematic approach is offered for physical and mathematical modeling of processes in a «heat source – textile fabrics – air gap – skin of biological object» system. A mathematical model and a new universal ignition criterion to predict ignition time delay and a surface temperature at the ignition moment are proposed. It was established that the model and the universal criterion are adequate to the experimental data of ignition characteristics of flammable fabrics. The investigation results to predict fire hazard zones to clothing around high-temperature sources at natural fires and technogenic accidents are of considerable practical importance.

Keywords: fires, test methods, automated experiment, system approach, ignition, combustion retarder, modeling, predicting

В природных пожарах и техногенных авариях наибольшую опасность для объектов различной физико-химической и биологической природы представляет радиационно-конвективный нагрев. При его воздействии на горючие материалы может произойти их возгорание и образование новых очагов пожара. Наибольшую опасность для человека представляет воздействие радиационно-конвективного нагрева на открытые и защищенные одеждой участки кожного покрова человека.

Исследование закономерностей воспламенения и горения природных и синтетических полимеров и композиционных материалов на их основе имеют важное практическое значение при создании пожаробезопасных материалов.

В соответствии с федеральным законом № 123-РФ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1]

и нормативными документами [2, 3] оценка воспламеняемости горючих материалов проводится по экспериментальным данным.

Использование единых нормативов по пожарной безопасности текстильных материалов (ТМ) позволяет правильно оценивать свойства получаемых материалов и более ответственно подходить к выбору их в зависимости от степени потенциальной (в случае пожара) опасности.

Однако каждый метод позволяет оценивать влияние только некоторых пожароопасных факторов. Поэтому ни один из методов не может дать информацию об истинной пожароопасности полимерных материалов. Такая комплексная оценка может быть получена в натуральных испытаниях, или из анализа последствий реальных аварийных ситуаций [3], или методом математического моделирования [4].

В теории теплового зажигания [5] еще не получило должного развития направление

по зажиганию полупрозрачных гетерогенных пористых систем с физико-химическими превращениями и конденсированными продуктами реакций.

Расчетные методы прогнозирования времени и температуры зажигания ТМ при нестационарном одностороннем нагреве материала различными механизмами в нормативных документах и научно-технической литературе отсутствуют.

Зажигание текстильных полимерных материалов представляет собой чрезвычайно сложный нестационарный физико-химический процесс.

Однако для целенаправленного поиска ЗГ необходимо знание основных характеристик зажигания – времени воспламенения и температуры поверхности в момент зажигания как исходных материалов, так и после их модификации ЗГ. Расчетные методы прогнозирования времени и температуры зажигания ТПМ при нестационарном одностороннем нагреве материала различными механизмами в литературе и нормативных документах отсутствуют.

Без знания обеих характеристик воспламенения невозможно анализировать механизм зажигания и определять кинетические параметры процесса термического разложения. Стандартные методы предназначены для сравнительной оценки воспламеняемости различных материалов и влияния рецептур замедлителей горения.

Прогнозирование характеристик зажигания текстильных материалов возможно только по адекватным моделям твердофазного воспламенения.

Проверку адекватности моделей можно проводить на автоматизированных стендах для измерения термодинамических параметров процесса зажигания горючих материалов.

С целью обоснования расчетных методов прогнозирования в данной работе рассматривается применение наиболее распространенных стандартных методов, а также возможности технической модификации стандартных методов в части автоматизации эксперимента.

Показатели пожарной опасности

Согласно федеральному закону № 123-РФ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» в перечень показателей, необходимых для оценки и нормирования пожарной опасности текстильных и кожаных материалов, входят группы горючести, воспламеняемость, устойчивость к воздействию теплового потока, теплозащитная эффективность при воздействии открытого пламени, индекс распространения пламени.

В системе стандартов безопасности труда [6] пожароопасность материалов определяется показателями, выбор которых зависит от условий их применения. В данной работе выбраны те номенклатурные показатели, которые характеризуют пожарную опасность ТМ одежды в природных и техногенных пожарах. К ним относятся время и температура воспламенения, температура вспышки, температура тления, термозащита, индекс распространения пламени, кислородный индекс.

В работе [6] допускается использовать другие показатели, более детально и системно характеризующие пожароопасность веществ и материалов. В методах оценки воспламеняемости и распространения пламени – «легкость воспламенения» [7], в [8] – «скорость распространения пламени». В методах количественной оценки передачи тепла в пакете материалов [9] – «показатель передачи тепла» или «термозащита». В [10,11] – «коэффициент теплопередачи» и «индекс передачи теплового излучения». В методах оценки теплового поражения открытых и защищенных одеждой участков кожного покрова в многочисленных зарубежных стандартах применяются фундаментальные показатели – «пороговый импульс облучения» и «критическая температура основного слоя кожи» [12, 13, 14].

Ниже приводится характеристика основных показателей.

Группы горючести. Сущность экспериментальных методов определения горючести заключается в создании температурных условий, способствующих горению. По горючести вещества и материалы подразделяются на три группы: негорючие – не способные к горению в воздухе, трудногорючие – способные к горению в воздухе при воздействии источника зажигания, но не способные гореть после его удаления и горючие – способные возгораться при воздействии источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления.

Температура вспышки. Это температура, при которой происходит быстрое сгорание газопаровоздушной смеси над поверхностью горючего вещества, сопровождающееся кратковременным видимым свечением. Применяется для характеристики пожарной опасности жидкостей. Допускается использовать экспериментальные и расчетные значения температуры вспышки. Авторами экспериментально установлено, что данное явление наблюдается и при нестационарном нагреве излучением ТМ и древесины, но температура вспышки может значительно отличаться от стандартно определенной. Допускается использовать

экспериментальные и расчетные значения температуры вспышки.

Температура воспламенения. Это наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение. Воспламенение – пламенное горение вещества, инициированное источником зажигания и продолжающееся после его удаления.

Температура тления (беспламенное горение) – температура вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермической реакции окисления, заканчивающейся возникновением тления.

Индекс распространения пламени – условный безразмерный показатель, характеризующий способность веществ воспламеняться, распространять пламя по поверхности и выделять тепло.

Кислородный индекс – применяется для сравнительной оценки рецептур ЗГ. Суть указанного метода состоит в определении минимальной концентрации кислорода в кислородно-азотной смеси, при которой испытываемый материал способен воспламеняться и гореть.

Методы определения показателей

Использование единых нормативных показателей по пожарной безопасности текстильных материалов позволяет достоверно сравнивать и оценивать огне- и термозащитные свойства ТМ, получаемые в различных лабораториях.

Группы горючести. Определяется на приборе, состоящем из керамической реакционной камеры, газовой горелки и устройства для крепления и позиционирования образца в печи. Для измерения температуры газообразных продуктов горения используется термоэлектрический преобразователь с диаметром электродов 0,5 мм пара помещается.

Перед вводом образца в камеру термopара измеряет температуру продуктов горения газа в горелке (2000°C). В процессе испытания фиксируется время достижения температуры отходящих газообразных продуктов горения испытываемого материала до 2600°C. По значениям максимального приращения температуры $\Delta t_{\max} = 600^\circ\text{C}$ и потере массы материала $\Delta m = 60\%$ классифицируют горючесть материалы на:

трудногорючие – $\Delta t_{\max} < 600^\circ\text{C}$ и $\Delta m < 60\%$;

горючие – $\Delta t_{\max} \geq 600^\circ\text{C}$ или $\Delta m \geq 60\%$.

Горючие материалы подразделяют в зависимости от времени (τ) достижения t_{\max} на:

трудновоспламеняемые – $\tau > 4$ мин;

средней воспламеняемости – $0,5 \leq \tau \leq 4$ мин;

легковоспламеняемые – $\tau < 0,5$ мин.

Температура вспышки. Экспериментально определяется для жидкостей в открытом тигле в диапазоне температур до 360°C. За температуру вспышки при ее нагревании в открытом тигле принимают температуру, показываемую термометром при появлении пламени над частью или всей поверхностью жидкости.

Температура воспламенения. Метод экспериментального определения температуры воспламенения твердых веществ и материалов реализуется в диапазоне 25–600°C. Экспериментальный прибор представляет собой вертикальную электропечь с двумя коаксиально расположенными цилиндрами из кварцевого стека. Для нагрева цилиндры до 600°C применяются спиральные электронагреватели. Температуры воспламенения определяют методом последовательных приближений (метод итераций). В начальной стадии алгоритма метода реакционную камеру нагревают до начала термического разложения образца или до 300°C. Если при температуре испытания образец воспламенится, то испытание прекращают и фиксируют температуру воспламенения. Следующие испытания проводят с новым образцом при меньшей температуре. И таким образом определяют минимальную температуру образца, при которой за время выдержки в печи не более 20 мин образец воспламенится и будет гореть в течение более 5 с после удаления горелки.

Температура тления. Алгоритм определения температуры тления полностью аналогичен алгоритму определения температуры воспламенения. Разница состоит только в одном: испытания прекращают не после воспламенения образца, а после начала тления (свечения).

Индекс распространения пламени. Установка для определения индекса распространения пламени включает в себя следующие элементы. Электрическая нагревательная панель, состоящая из керамической плиты, в пазы которой уложена спираль из нержавеющей проволоки. Держатель образца в рамке устанавливается под углом 300° относительно радиационной панели. Боковая поверхность рамки имеет десять контрольных делений. Плотность теплового потока измеряют в первой контрольной точке и составляет 32 ± 3 кВт/м². Контролируется датчиком Гордона в стационарном режиме с погрешностью не более $\pm 8\%$. Считают, что радиационная панель выходит на стационарный режим, если показания датчика Гордона остаются неизменными в течение 15 мин. Испытание длится до момента прекращения

распространения пламени по поверхности образца. В процессе испытания определяют время прохождения всех контрольных точек рамки с образцом, максимальную температуру дымовых газов и время ее достижения. Индекс распространения пламени рассчитывают по экспериментальной формуле.

Таким образом, стандартные методы испытаний позволяют получать полезную информацию о показателях пожарной опасности ТМ в условиях равномерного нагрева образцов (группы горючести, температуры воспламенения, вспышки, тления).

Однако в природных и техногенных пожарах параметры одностороннего нестационарного радиационно-конвективного нагрева ТМ и пакетов одежды существенно отличаются от стандартных лабораторных условий.

Комплексная оценка пожарной опасности

Коллективом специалистов ВНИИПО МЧС России в дополнение к системе стандартов безопасности труда [6] предлагается комплексная оценка огнезащитной эффективности рабочей одежды [15]. Основными показателями в комплексном подходе за исключением устойчивости к прожигу расплавленной каплей и воздействию электрической дуги являются:

- воспламеняемость;
- устойчивость к воздействию лучистого теплового потока;
- устойчивость к непосредственному воздействию открытого пламени.

Для оценки воспламеняемости могут быть использованы стандарты [7, 8]. В них регламентируются условия испытаний вертикально ориентированных образцов на поверхностное зажигание и скорость распространения пламени. Оба стандарта распространяются на текстильные материалы, предназначенные для средств индивидуальной защиты человека.

Сущность метода определения легкости воспламенения заключается в оценке воздействия пламени газовой горелки на образец размером 80×80 мм или 200×80 мм в течение 5 с. Поверхностное зажигание считается состоявшимся, если пламя на пробе сохраняется более 5 с после удаления источника пламени. Если загорание произошло, то время воздействия пламени уменьшают на 1 с. Если загорание не произошло, то время воздействия пламени увеличивают на 1 с до времени 20 с. Если загорание не произошло после 20 с воздействия пламени, материал относят к группе негорючих. Каждый вид испытаний проводят на новой пробе до тех пор, пока не будет получено не менее пяти случаев загорания или его отсутствия.

Таким образом, критерии комплексной оценки пожарной опасности материалов одежды, применяемые в лабораторных методах испытаний, не заменимы для сравнительной оценки огне- и теплозащитных свойств ТМ. Кроме того, результаты испытаний дают первичную информацию о реакции материала на воздействие поражающих факторов пожара.

Но для прогнозирования поведения материала в реальных условиях, очевидно, необходимы математические модели процессов термического разложения и теплопередачи как в покровном слое, так и пакете материалов. В связи с исключительной сложностью высокотемпературных нестационарных процессов адекватность моделей и критериев теплового поражения может быть проверена только инструментальными методами.

Сущность метода определения способности распространения пламени на вертикально ориентированных пробах заключается в определении времени распространения пламени на определенное расстояние между маркировочными нитями.

Устойчивость материалов и пакетов материалов на воздействие источника теплового излучения предлагается проводить по стандартам [9, 10]. Методы испытаний применимы ко всем видам материалов. Плотность теплового потока выбирается в зависимости от области применения рабочих материалов и уровня защиты материалов повседневной одежды от поражающих факторов пожаров в чрезвычайных ситуациях.

Важно отметить, что прогнозирование зажигания наиболее эффективно по критериям, инвариантным к граничным условиям теплообмена между тепловым источником и покровным слоем. В граничных условиях задаются механизм нагрева (радиационный, конвективный или их комбинация) и интенсивность теплообмена.

С учетом рекомендаций [15] в части унификации отдельных методов испытаний в данной работе предлагается унифицировать и измерительные устройства различных методов испытаний. С этой целью разработан автоматизированный модуль для измерения термодинамических параметров процессов взаимодействия различных поражающих факторов пожаров на открытые и защищенные одеждой участки кожного покрова человека. Предлагаемый подход уменьшает ошибки измерения сравниваемых параметров и позволяет использовать единый программный вычислительный комплекс. Кроме того, автоматизация эксперимента позволяет определять динамику изменения термодинамических параметров и обосновывать инвариантные критерии зажигания и теплового поражения кожного покрова.

В отличие от элементарной модели тепловой теории зажигания [5], моделирование зажигания горючих полимерных материалов с физико-химическими превращениями вызывает непреодолимые математические трудности. Сложность заключается не столько в физико-математической постановке, сколько в идентификации многочисленных переменных коэффициентов и кинетических параметров.

В [14] впервые предложены модель и критерий зажигания текстильных материалов. Новый критерий зажигания определяется как отношение скорости роста температуры приповерхностного объема образца, в котором протекают все стадии физико-химических превращений, к скорости роста температуры поверхности химически инертного тела.

Результаты вычислительного эксперимента показали адекватность критерия экспериментальным данным по зажиганию текстильных материалов

Таким образом, унификация автоматизированных инструментальных методов и комплексный подход в оценке огнезащитных свойств текстильных материалов расширяют возможности нормативной базы в части разработки расчетных методов прогнозирования пожарной опасности горючих материалов.

Список литературы

1. Баратов А.Н., Константинова Н.Н., Молчалский И.С. Пожарная опасность текстильных материалов. – М., 2006. – 273 с.
2. Борхерт Р., Юбит В. Техника инфракрасного нагрева: пер. с нем. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 278 с.
3. Гайнутдинов Р.Ш., Еналеев Р.Ш., Аверко-Антонович В.И. Экспериментальные исследования процесса воспламенения древесины под действием теплового потока излучения // 6 Республиканская межвузовская конференция по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем: тезисы докладов. – Киев: Изд. Киевского университета, 1966. – 45 с.
4. Еналеев Р.Ш., Красина И.В., Гасилов В.С., Чистов Ю.С., Тучкова О.А. Зажигание древесины // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – т. 16, № 10. – С. 99–106.
5. Еналеев Р.Ш., Синаев К.И., Матеев В.А. и др. Экспериментальное исследование процесса зажигания конденсированных веществ при динамических условиях подвода лучистой энергии. В сб.: Физика горения и методы ее исследования. – Чебоксары: Изд. Чувашского государственного университета, 1972.
6. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Красина И.В., Гасилов В.С., Тучкова О.А. Системный подход в прогнозировании последствий опасных факторов пожара // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – т. 16, № 8. – С. 322–332.
7. Константинова Н.И. // Текст химия. – 1999. – № 1(16). – С. 41–44.
8. Кузнецов В.Т., Фильков А.И. Воспламенение различных видов древесины потоком лучистой энергии // ФГВ. – 2011. – Т.47, № 1. – С. 74–79.
9. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 671 с.
10. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М., 1996. – 256 с.

11. Рохлин Г.Н. Газоразрядные источники света. – М.: Энергия, 1966. – 210 с.

12. Филлин Л.Г., Михайлова Е.Д. Методы оценки воспламеняемости.

13. Enalejev R.Sh. 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, 2014, Missoula, Montana, USA. – P. 394–410.

14. Enalejev R.Sh. Mathematical model of the ignition of fuels. Book of abstracts of the 4-th Fire behavior and Fuels conference, St.Petersburg, 1–4 July 2013. – P. 77.

15. Merzhanov A.J., Averson A.E. The Present State of the Thermal Ignition Theory: An Invited Review // Combustion and Flame. – 1971. – Vol. 16. – P. 89–124.

References

1. Baratov A.N., Konstantinova N., Molchatsky I.S. Pozharnaya opasnost tekstilnykh materialov. M., 2006. 273 p.

2. Borchert R., Yubits V. Tekhnika infokrasnogo nagreva, Per. s nem. L.: Gosenergoizdat, 1963. 278 p.

3. Gainutdinov R.S., Enaleev R.S., Averkko-Antonovich V.I. Eksperimentalnye issledovaniya protsessa vosplameniya drevesiny pod deystviem teplovogo potoka izlycheniya. 6 Respublikanskaya mezhvuzovskaya konferentsiya po voprosam ispareniya, goreniiya i gazovoy dinamiki dispersnykh system. Tezisy dokladov. Izd. Kievskogo universiteta, 1966. 45 p.

4. Enaleev R.S., Krasina I.V., V. Gasilov, Chistov Yu.S., Tuchkova O.A. Zazhiganie drevesiny Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2013. T.16, no. 10. pp. 99–106.

5. Enaleev R. S., Sinaev K. I., Mateosov V.A. Eksperimentalnoe issledovanie protsessa zazhiganiya kondensirovannykh veschestv pri dinamicheskikh usloviakh podvoda uchistoy energii. V. sb. Fizika goreniiya i metody ee issledovaniya. Cheboksary: Izd. Chuvashskogo gosudarstvennogo universiteta, 1972.

6. Enaleev R.S., Telyakov A.S., Krasina I.V., Gasilov V., Tuchkova O.A. Systemny podkhod v prognozirovanii posledstviy opasnykh faktorov pozhara. 2013. T.16, no. 8. pp. 322–332.

7. Enalejev R.Sh. Modeling of the fabrics ignition // Proceedings of the 4th Fire Behavior and Fuels Conference, July 1–4, 2013, St. Petersburg, Published by the International Association of Wildland Fire, 2014, Missoula, Montana, USA, pp. 394–410.

8. Enalejev R.Sh. Mathematical model of the ignition of fuels. Book of abstracts of the 4-th Fire behavior and Fuels conference, St.Petersburg, 1-4 July 2013, pp. 77.

9. Konstantinov N. Text. khimiya, 1999, no. 1(16), pp. 41–44.

10. Kuznetsov V.T., Filkov A.I. Vosplameniye razlichnykh vidov drevesiny potokom luchistoy energii. 2011, CH, no. 1, pp. 74–79.

11. Marshall V. Osnovnye opasnosti khimicheskikh proizvodstv. M.: Mir, 1989. 671 p.

12. Merzhanov A.J., Averson A.E. The Present State of The Thermal Ignition Theory: An Invited Review // Combustion and Flame. 1971. Vol. 16. pp. 89–124.

13. Rokhlin G.N. Gazorazryadnye istochniki sveta. M.: Energiya, 1966. 210 p.

14. Safonov V.S., Odisharia G.A., Shiraev A.A. Tioriya i praktika analiza riska v gazovoy promyshlennosti. M., 1996, 256 p.

15. Filin L.G., Mikhailov E.D. Metody otsenki vosplamnyaemosti // Combustion and Flame. 1971. Vol. 16. pp. 89–124.

Рецензенты:

Сергеева Е.А., д.т.н., профессор, генеральный директор ООО «НаноПолимерКомпозит» г. Казань;

Вознесенский Э.Ф., д.т.н., профессор кафедры плазмохимических нанотехнологий высокомолекулярных материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань.

Работа поступила в редакцию 28.01.2015.