**Р. Ш. Еналеев, И. В. Красина, Р. Н. Сабирзянова,
А. Ф. Габидуллин**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПАКЕТА ОДЕЖДЫ

Ключевые слова: пожар, моделирование, методы испытания, горючие материалы

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.

Keywords: fire, simulation, test methods, combustible materials.

A comparative analysis of domestic and foreign methods of assessing fire and thermal properties of textile materials. The stated aim and objectives of the study on the improvement of instrumental and computational methods for the prediction of fire danger textile materials.

Введение

Анализ и прогнозирование чрезвычайных ситуаций (ЧС) с массовым поражением людей и разрушением материальных ценностей является актуальной социально-экономической проблемой. При оценке риска природных и техногенных катастроф в Федеральном законе РФ №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1] регламентируется использование методик, утвержденных руководством МЧС России [2,3]. Однако нормируемые показатели предельных состояний поражаемых объектов по этим методикам не в полном объеме коррелируются с критическими значениями поражающих факторов реальных пожаров.

Зарубежные стандарты [4,5] и отечественные аналоги, являющиеся их аутентичным переводом, предназначены для классификации горючести и сравнительной оценки воспламеняемости материалов покровного слоя пакета одежды. В качестве теплового источника используется микрогорелка специальной конструкции, формирующая пламя определенных пространственных размеров. В этих методах не регламентируется плотность теплового потока и время его воздействия. Без этих параметров невозможно прогнозировать пожарную опасность материалов для индивидуальной защитной одежды в реальных условиях воздействия поражающих факторов пожара.

Методы [6-9] предназначены в основном для оценки термозащитных свойств пакета с негорючими материалами покровного слоя из синтетических волокон (например, Nomex, Kelvar) при радиационно-конвективном нагреве на ограниченном участке поверхности пакета диаметром 40 мм.

В литературе имеются крайне ограниченные данные по методам комплексной оценки пожарной опасности пакета одежды с материалами покровного слоя до и после модификации замедлителями горения. В таких материалах при интенсивном нагреве могут протекать физико-химические превращения, сопровождаемые поглощением и выделением тепла и влияющие на термозащиту пакета.

В проблеме анализа пожарного риска [10] учитываются две компоненты. Одна из них – вероятность риска возникновения аварийных ситуаций, вторая – вероятность возникновения термических ожогов различной степени тяжести на открытых участках кожного покрова.

В фундаментальной работе [11] обобщены результаты экспериментальных данных институтов NASA по воспроизведению термических ожогов биообъектов в виде зависимости возникновения ожогов II степени с вероятностью 50% от времени экспозиции. Ближе к реальным условиям воздействия радиационно-конвективного нагрева получены результаты испытаний одежды на термоманекене [12].

Однако для прогнозирования числа пострадавших различной степени тяжести и проведения организационно-технических мероприятий по оказанию безотлагательной помощи пострадавшим необходима информация по различным степеням ожога с различной вероятностью.

Таким образом, совершенствование лабораторных методов прогнозирования комплексной оценки пожарной опасности в части времени задержки воспламенения материала покровного слоя и термозащиты пакета одежды при различных условиях теплообмена с окружающей средой является важной социально-экономической проблемой.

Состояние анализируемой проблемы мотивирует поиск новых подходов в прогнозировании тепловой защиты пакета одежды в чрезвычайных ситуациях

Анализ показателей пожарной опасности

Согласно техническому регламенту о требованиях пожарной безопасности [1] и системе стандартов безопасности труда [13] в перечень показателей, необходимых для оценки и нормирования пожарной опасности текстильных и кожевенных материалов входят: группы горючести, легкость воспламенения, индекс распространения пламени, время и температура воспламенения, температура вспышки, температура тления, устойчивость к воздействию теплового потока излучения, показатель передачи тепла, индекс

передачи теплового излучения или термозащита, коэффициент теплопередачи. Многочисленные показатели условно можно сгруппировать в две основные концепции: воспламеняемость и термозащита.

Воспламеняемость

Группы горючести [13]. 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.

Перед вводом образца в камеру термопара измеряет температуру продуктов горения газа в горелке (200°C). В процессе испытания фиксируется время достижения температуры отходящих газообразных продуктов горения испытуемого материала до 260°C. По значениям максимального приращение 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 $\Delta t_{\max}$ на:

трудновоспламеняемые – $\tau > 4$ мин;

средней воспламеняемости –

$0,5 \leq \tau \leq 4$ мин;

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

Для оценки воспламеняемости могут быть использованы стандарты [4,5]. В них регламентируются условия испытаний вертикально ориентированных образцов на *поверхностное зажигания 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 сек. Поверхностное зажигание считается состоявшимся, если пламя на пробе сохраняется более 5 сек после удаления источника пламени. Если загорание произошло, то время воздействия пламени уменьшают на 1 сек. Если загорание не произошло, то время воздействия пламени увеличивают на 1 сек до времени 20 сек. 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.

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

Температура вспышки [13].

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 [13]. 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 стекла. Для нагрева цилиндров до 600°C применяются спиральные электронагреватели. Температуру 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 [13]. 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).

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

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

Термозащита

Придание негорючести горючим материалам является необходимым, но недостаточным условием в проблеме тепловой защиты человека в чрезвычайных ситуациях. Степень теплового поражения зависит также и от процесса теплопередачи поглощенной тепловой энергии от покровного слоя через воздушные зазоры и внутренние слои пакета материалов к кожному покрову.

Устойчивость материалов и пакетов материалов на воздействие источника теплового излучения предлагается проводить по стандарту [6]. 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.

Количественными характеристиками эффективности тепловой защиты материалов являются два параметра [7-9]: параметр теплопередачи (*индекс передачи теплового излучения*) и *коэффициент теплопередачи*. Соответственно первый из них представляет собой время подъема температуры калориметра за тыльной поверхностью материала или пакета материалов на $(24,0 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$, второй – отношение плотности теплового потока, прошедшего через образец, к плотности теплового потока, падающего на образец.

Таким образом, критерии комплексной оценки пожарной опасности материалов одежды, применяемые в лабораторных методах испытаний, не заменимы для сравнительной оценки огне- и теплозащитных свойств материалов. Кроме того, результаты испытаний дают первичную информацию о реакции материала на воздействие поражающих факторов пожара [14].

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.

Важно отметить, что прогнозирование поражения элементов системы «тепловой источник – покровный слой – пакет материалов – кожный покров» 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.

Проблемные задачи прогнозирования

Сложность процессов взаимодействия высокоинтенсивных тепловых потоков с элементами системы «тепловой источник – материалы одежды – воздушные зазоры – кожный покров человека» мотивирует применение современных методов в решении различных аспектов проблемы. Наиболее перспективным является применение метода физико-математического моделирования и системного анализа.

Реализация системного подхода в области пожарной опасности возможна в результате применения инструментальных методов и теоретических моделей химической физики, вычислительной теплопередачи, информатики, медицины катастроф.

Модели и критерии зажигания

В тепловой теории зажигания конденсированных систем с использованием метода критического условия определяются основные

характеристики гомогенного зажигания синтетических топлив при поверхностном механизме нагрева без учета фазовых превращений в топливе [15]. В целлюлозных материалах и их композитах окислитель и горючее находятся в разных фазах. В литературе имеются крайне ограниченные сведения по математическим моделям и критериям гетерогенного зажигания тонких, полупрозрачных капиллярно-пористых материалов при импульсном нагреве тепловым излучением.

Теоретическое и экспериментальное обоснование критериев зажигания полимерных горючих материалов на основе целлюлозы повысит достоверность прогнозирования теплового поражения человека в чрезвычайных ситуациях на предприятиях нефтехимической отрасли.

В отличие от элементарной модели тепловой теории зажигания [15], моделирование зажигания горючих полимерных материалов с физико-химическим превращением вызывает непреодолимые математические трудности. Сложность заключается не столько в физико-математической постановке, сколько в идентификации многочисленных переменных коэффициентов и кинетических параметров.

В [16] впервые предложены модель и критерий зажигания текстильных материалов. Новый критерий зажигания определяется как отношение скорости роста температуры приповерхностного объема образца, в котором протекает все стадии физико-химических превращений, к скорости роста температуры поверхности химически инертного тела:

$$IC = \frac{T_{\text{поверхн}}(t) - T_{\text{инерт}}(t)}{T_{\text{инерт}}(t)} = \varphi(\tau) \approx \frac{dT_{\text{поверхн}}(t)}{dT_{\text{инерт}}(t)} \quad (1)$$

где $\frac{T_{\text{поверхн}}(t) - T_{\text{инерт}}(t)}{T_{\text{инерт}}(t)}$ – разностный аналог отношения скоростей.

Сравнение предлагаемого критерия проведено с известными критериями тепловой теории зажигания для поверхностных механизмов нагрева (нагрев нагретым блоком и поверхностным тепловым потоком). Наиболее близкие сравнительные значения получились с критерием критического условия Зельдовича [17] (разница составляет не более 2%) и Аверсона, Барзыкина, Мержанова [18]. Однако для объемного механизма нагрева излучением разница в характеристиках зажигания, определенных по сравниваемым критериям, получилась существенной.

Сопряженная постановка задач

В чрезвычайных ситуациях тепловое поражение человека может происходить от воздействия трех поражающих факторов: непосредственного воздействия открытого пламени и излучения на кожный покров человека, в результате процессов теплопередачи от материалов нагретой одежды на кожный покров человека и теплового поражения при зажигании покровного слоя. Очевидно, комплексная оценка пожарной

опасности должна проводиться с учетом всех поражающих факторов.

В зарубежных методиках для оценки теплового поражения биообъектов при статическом нагреве применяется два критерия [11,19]: пороговый импульс и критическая температура кожи на границе эпидермис-дерма.

При гармонизации отечественных и зарубежных методов с использованием пробит-функции и порогового импульса авторами установлено [20], что индекс облучения для ожогов второй степени с вероятностью 0,5 является константой

$$I = q^{4/3} \tau = 200 \quad (2)$$

где I – индекс облучения $\left[\left(\text{кВт}/\text{м}^2 \right)^{4/3} \cdot \text{с} \right]$,

$q \left[\text{кВт}/\text{м}^2 \right]$ – плотность постоянного теплового потока облучения, τ – время экспозиции, [с].

Практически важным свойством критерия (2) является его инвариантность ко времени воздействия постоянного теплового потока в диапазоне от 1 до 60 сек.

В [21] предложен новый инвариантный к скорости нагрева температурный критерий возникновения ожогов II степени на глубине 0,36 мм. от поверхности кожи.

В дополнение к стандартам [6-9], пробит – функции для различных степеней поражения [23] и инвариантный критерий критической температуры позволяют прогнозировать вероятность возникновения ожогов различной степени тяжести. Применение критериев поражения открытых и защищенных одеждой участков кожного покрова предоставляют возможность прогнозировать число пострадавших с различной степенью тяжести и в чрезвычайных ситуациях принимать адекватные меры по оказанию безотлагательной помощи.

Динамические режимы нагрева

Во всех упомянутых выше стандартных методах используются статические режимы нагрева от открытого пламени и теплового излучения, при которых плотность теплового потока остается постоянной. В реальных динамических режимах нагрева элементов системы «тепловой источник – материалы одежды – воздушные зазоры – кожный покров человека» плотность теплового потока является явной функцией времени.

В тепловой теории зажигания отмечается, что к замене динамического потока его средним (интегральным) значением следует относиться с большой осторожностью. И только после экспериментального и теоретического обоснования проведенной замены можно делать выводы о практическом применении данного подхода.

Нагрев имитатора кожи за пакетом одежды всегда монотонно повышается от начальной температуры. Поэтому в расчетных методах определения порогового импульса поражения необходимо учитывать динамику изменения плотности теплового потока.

При нагреве поверхности кожного покрова нагретым блоком с постоянной температурой тепловой поток от поверхности кожи вглубь тела меняется во времени пропорционально градиенту температуры на поверхности биообъекта. Очевидно, данной экспериментальной информацией можно воспользоваться для обоснования критериев теплового поражения при динамических режимах нагрева кожного покрова.

Таким образом, оценка пожарной опасности пакета одежды в динамических условиях нагрева остается одной из сложных задач прогнозирования.

Литература

1. 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.
2. ГОСТ Р 12.3.047-2012 "Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля".
3. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. – М. : ФГУ ВНИИПО, 2006. – 60 с.
4. ISO 6940:2004 "Textile fabrics -- Burning behaviour -- Determination of ease ignition of vertically oriented specimens".
5. ISO 6941:2003 "Textile fabrics — Burning behaviour — Measurement of flame spread properties".
6. ISO 6942:2003 "Textile fabrics — Burning behaviour — Evaluation of materials and material assemblies when exposed to a source of radiant heat".
7. ASTM Standard D 4108. Standard test method for thermal protective performance of material for clothing by open flame method. // American society for testing and materials. – Philadelphia, PA. 1994.
8. ISO 9151:1995. "Protective clothing against heat and flame: determination of heat transmission on exposure to flame".
9. ГОСТ Р 53264-2009. "Специальная защита пожарного. Методы испытаний"
10. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М., 1996, 256 с.
11. Stoll, A.M. Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation / A.M. Stoll, L.C. Greene // J. Appl. Physiol. 1959. Vol. 14. – P. 373.
12. ISO 13506:2000. "Protective clothing against heat and flame: test method for complete garments – Prediction of burn injury using instrumented manikin".
13. ГОСТ 12.1.044-89. "Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов".
14. Баратов А.Н., Константинова Н.Н., Молчадский И.С. Пожарная опасность текстильных материалов. М., 2006. – 273 с.
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.
16. 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.
17. Зельдович Я.Б. К теории зажигания // Доклады Академии наук СССР. – 1963. – Vol. 150, No.2. – P 283-285.
18. Аверсон А.Э., Барзыкин В.В., Мержанов А.Г. Приближенный метод решения задач тепловой теории зажигания // ДАН СССР, 1968, т.178, №1, С. 131-134.

19. Henriques, F. C. Studies of Thermal Injury. I. The Conduction of Heat to and Through Skin and the Temperature Attained Therein. A Theoretical and Experimental Investigation / F. C. Henriques, A. R. Moritz // *Am. J. Path.*, 1947. – P. 23 – 531.
20. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Красина И.В., Гасилов В.С., Тучкова О.А. Системный подход в прогнозировании последствий опасных факторов пожара // *Вестник Т.16, №8, 2013, с. 322-332.*
21. Еналеев, Р.Ш. Методы оценки теплового поражения людей в чрезвычайных ситуациях / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.М. Закиров Г.М. Закиров // *Вестник*

- Казанского технологического университета. – 2009. – № 3, ч.1. – С. 73 – 83.
22. Еналеев, Р.Ш. Прогнозирование санитарных потерь от воздействия тепло-вого излучения в чрезвычайных ситуациях / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, В.А., Г.М. Закиров, Ю.С. Чистов, А.М. Закиров // *Безопасность жизнедеятельности.* – 2011. – №1. – С. 36 – 41.
23. Enalejev R. Sh., Kachalkin W. A. Mathematical Sumulation of Heat and Mass Transfer Process in Skin Cover at Burn Injury. *Annals of the NewYork Academy of Science*, 1998. -Vol. 858. -P. 30-35.

© **Р. Ш. Еналеев** - к.т.н., доц., ст. науч. сотр. каф. плазмохимии и нанотехнологии высокомолекулярных соединений КНИТУ, firepredict@yandex.ru; **И. В. Красина** - д.т.н., проф., зав. каф. технологии химических, натуральных волокон и изделий КНИТУ, irina_krasina@mail.ru; **Р. Н. Сабирзянова** – асп. лаборант каф. плазмохимии и нанотехнологии высокомолекулярных соединений КНИТУ, ramfar@mail.ru; **А. Ф. Габидуллин** - соискатель, главный конструктор завода «Промметаллконструкции», г. Нижнекамск, gaf@jandex.ru.

© **R. S. Enalejev** - Ph.D., associate Professor, senior researcher of the Department of plasma chemistry and nanotechnology macromolecular compounds KNRTU, firepredict@yandex.ru; **I. W. Krasina** - doctor of technical Sciences, Professor, head of department Department of Technology chemical, natural fibers and products, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Kazan National Research Technological University, irina_krasina@mail.ru; **R.N. Sabirzyanova** - graduate, assistant of Department of Technology chemical, natural fibers and products, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education Kazan National Research Technological University, ramfar@mail.ru; **A.F. Gabidullin** - the applicant, the chief constrctor plant "Prommetallkonstruktsiya", Nizhnekamsk, gaf@jandex.ru.