

В.В. Белозеров, А.И. Голубов
(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: ntp-tsb@mail.ru)

ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ДИАГНОСТИКИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ

Аннотация. Проведён анализ научно-методических основ создания автоматизированной системы диагностики пожарной опасности жидких веществ и материалов, обращающихся в промышленном производстве, а также модели для регистрации.

Ключевые слова: автоматизированная система диагностики, алгоритм, модель, характеристики пожарной опасности.

V.V. Belozеров, A.I. Golubov

ABOUT AUTOMATED DIAGNOSTIC SYSTEM OF FIRE HAZARD OF COMBUSTIBLE LIQUIDS ON THE BASIS OF MULTIPARAMETER ASSESSMENT

Abstract. Analysis of scientific and methodical basis of creation automated diagnostic system of fire hazard liquids and materials circulating in the industry, as well as models for registration of the characteristics of fire hazardous.

Key words: automated diagnostic system, algorithm, model, characteristics of fire hazardous.

Статья поступила в редакцию 14 октября 2010 г.

В настоящее время для того, чтобы оценить пожарную опасность горючих жидкостей, необходимо учитывать большое количество теплофизических, калорических и термических свойств в широкой области изменений их параметров, а также разработать методы расчета этих параметров по молекулярным и структурным характеристикам. Современная база знаний по теплофизическим свойствам (ТФС) жидкостей, построенная на многочисленных экспериментальных данных, далека от завершения. Потребности промышленности в базе данных по ТФС с каждым годом возрастают. Отсутствие единой теории жидкого состояния не позволяет с приемлемой точностью спрогнозировать теплофизические свойства жидкостей.

При исследованиях теплофизических свойств новых соединений существенным является комплексный подход, позволяющий существенно сэкономить как материальные, так и временные ресурсы. В этом плане важным становится правильный выбор метода измерений параметров этих свойств, необходимых для адекватного описания поведения веществ, а также создание автоматизированной системы диагностики жидких веществ и материалов [1].

Методы исследования ТФС за последние годы претерпели существенные изменения: на место традиционных стационарных методов [3, 4], которые используются, в основном, при исследованиях свойств различных жидкостей в широкой области изменения параметров, включая околокритическую и сверхкритическую области, пришли нестационарные методы, позволяющие определять в ходе эксперимента комплекс калориметрических и термических свойств [5]. Такими нестационарными методами являются методы термического анализа (ТА), такие, как термогравиметрия, термодилатометрия, калориметрия, лазерная вспышка и другие, которые позволяют определить весь комплекс параметров термодинамических свойств, а также показатели пожарной опасности жидких веществ и материалов в экстремальных условиях эксплуатации: при предельных давлениях и температурах, в агрессивных средах [2].

Поэтому, чтобы учесть всю гамму термодинамических параметров посредством методов ТА, необходим инструментарий по прогнозированию значений отдельных параметров и определению обобщенной числовой функции, характеризующей пожарную опасность горючих жидкостей как интеграцию отдельных ее показателей. Этот инструментарий, являясь важным компонентом для системы диагностики, характеризуется моделью для регистрации изменений характеристик пожарной опасности и алгоритмом распознавания образов жидких веществ и материалов.

В общем случае, независимо от типа и количества параметров, описывающих "образ материала", распознавание осуществляется с помощью решающего правила, которое является алгоритмом, позволяющим по результатам измерений этих параметров (ситуаций), принять решение об идентификации состояний диагностируемого образца, непосредственно не наблюдаемых при измерениях (например, решение об отнесении к одному из классов, о предразрушающем состоянии и т.д.).

Алгоритм распознавания обычно состоит из двух этапов [6]:

- первый – выбирается совокупность измеряемых параметров (признаков) объекта $x = (x_1, \dots, x_n)$;

- второй – строится функция $\delta(x)$, отображающая множество X наборов x на множество A решений λ , принимаемых относительно искомым параметров y объектов.

Например, алгоритм линейного разделения образов в n -мерном евклидовом пространстве X , где $A = (1, 2, \dots, N)$ превращается в конечное множество номеров классов (образов), в которых каждый класс характеризуется заданным опорным вектором (эталоном) $\alpha_{yB} = (\alpha_{1y}, \dots, \alpha_{ny})$. Алгоритм относит объект $x = (x_1, \dots, x_n)$ к тому из классов λ , для которого максимально скалярное произведение

$$\sum_{i=1}^n x_i \alpha_{iy}.$$

Когда множество значений признаков непрерывно, то есть речь идет о пространстве изображений, алгоритм распознавания задают с помощью дискриминантных функций вида $f(x, y)$, каждая из которых указывает количественно

$$x \in$$

но степень сходства наборов X к признакам одного из классов γ . Алгоритм относит этот объект к классу λ , для которого сходство максимально: $f(x, \lambda) = \max f(x, \gamma)$. При этом разделяющие поверхности $\varphi(x, \lambda) = 0$ расчленяют множество X на непересекающиеся подмножества $X = \{x \mid \varphi(x, \lambda) > 0\}$, соответствующие различаемым классам: $\varphi(x, \lambda) > 0$, если объект, описываемый набором признаков x , относится к классу λ , и $\varphi(x, \lambda) \leq 0$ в противном случае. Частный случай разделяющей поверхности – гиперплоскость:

$$\varphi(x) = a_0 + \sum_{i=1}^n x_i \alpha_i,$$

где x_i – значение i -го признака изображения x и a_0, a_1, \dots, a_N – коэффициенты.

Статистические алгоритмы строятся на основе критериев риска распознавания – математического ожидания потерь от ошибок распознавания (например, убытков или числа фактических ошибок распознавания по эталону и т.д.). Риск распознавания сводится к вероятности ошибок при распознавании и в общем виде задается формулой:

$$r(\delta) = \int \sum_{j=1}^J L(j, k = \delta(x)) \cdot p(j) \cdot p(x|j) dx,$$

где X – пространство распознаваемых признаков (сигналов) x ;

$j = 1, \dots, J$ – номера истинных классов признаков (сигналов);

$k = 1, \dots, K$ – номера ответов алгоритма распознавания $\delta(x)$;

$L(j, k)$ – потеря при отнесении сигнала класса j , к классу k ;

$p(j)$ – априорные вероятности классов;

$p(x|j)$ – априорные плотности вероятностей сигналов каждого класса.

Если вероятностные характеристики сигналов и классов не известны, может быть использован так называемый эмпирический риск распознавания, представляющий собой средние потери при распознаваемой выборке сигналов x_t , классы j_t которых заданы ($t = 1, \dots, N$):

$$r_{\text{ЭМП}}(\delta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N L(j_t, k_t = \delta(x_t)).$$

Частным случаем эмпирического риска распознавания является частота ошибок для такой выборки. Поэтому существенное значение имеет выбор наиболее информативных параметров, несущих необходимую информацию о динамической локальной перестройке внутренней структуры жидких тел.

Рассмотрим теперь модель регистрации изменений пожароопасных характеристик горючих жидкостей. Начальная стадия процесса горения любого материала – воспламенение [8], в течение которой энергия, подводимая к нему от внутреннего или внешнего источника, приводит к резкому ускорению физико-химических реакций из-за прогрессивного накопления тепла (тепловое воспламенение) или активных промежуточных веществ (цепное воспламенение).

При тепловом воспламенении существуют два предельных режима [7]:

- самовоспламенение – когда подводимое тепло успевает равномерно распределиться по всему объему образца и самоускорение реакций начинается

в центре этого объема, где условия теплоотвода наилучшие, что приводит, как правило, к объемному горению;

- зажигание – когда подводимое тепло от внешнего источника не успевает равномерно распределиться по всему объему, что приводит к ускорению реакций в поверхностных слоях образца и к волне горения.

Самовоспламенение характерно для реакций с сильной зависимостью скорости горения от температуры и значительным тепловым эффектом. Выделяемое в ходе реакции тепло частично рассеивается в окружающую среду путем теплоотвода, частично остается в образце. Если при этом тепловыделение больше теплоотвода, то температура повышается лавинообразно, что приводит к очень быстрому химическому превращению всего исходного вещества.

Важнейшая характеристика самовоспламенения – время индукции ($t_{инд}$), в течение которого температура достигает больших значений, а скорость реакции становится максимальной. При самовоспламенении, когда скорость тепловыделения намного превосходит скорость теплоотвода (адиабатические условия), $t_{инд}$ минимально и самовоспламенение при равномерном распределении температуры в объеме реакции описывается уравнением Семёнова [8]:

$$e = \frac{Q \cdot V}{\alpha \cdot S} \cdot \frac{E_a}{RT^2} \cdot A^n \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right),$$

где Se – критерий Семёнова ($Se = 0,368$);

Q – теплота, подведенная к образцу;

V – текущий объём образца;

a – текущий коэффициент теплоотдачи образца;

S – текущая площадь поверхности образца;

E_a – энергия активации пиролиза образца;

R – газовая постоянная;

T – температура поверхности образца;

k – предэкспоненциальный множитель.

Если условия теплообмена между образцом и средой таковы, что при любой температуре теплоотвод меньше тепловыделения, то происходит самовоспламенение, что выражается критерием Семёнова – $Se = (0,368)$. То есть при $Se < 1/e$ самовоспламенения не происходит, а при $Se \geq 1/e$ реакции протекают с самоускорением и происходит самовоспламенение. При этом максимальный разогрев системы образец-среда [8]:

$$\Delta T = T_{то} - T_{кр} = R \cdot (T_{кр})^2,$$

где $T_{то}$ – температура, при которой тепловыделение равно теплоотводу;

$T_{кр}$ – критическая температура среды.

Теория Семёнова хорошо описывает тепловое самовоспламенение в жидкостях при перемешивании, а также в других конденсированных системах при слабом теплообмене с окружающей средой. Если теплообмен осуществляется лишь посредством теплопроводности, то критическое условие самовоспламенения определяется по уравнению Франк-Каменецкого [9]:

$$F_K = \frac{Q \cdot r^2}{\lambda} \cdot \frac{E_a}{RT^2} \cdot A^n \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right),$$

где F_k – критерий Франк-Каменецкого ($F_k = 2,00$);
 λ – коэффициент теплопроводности;
 r – характеристический размер.

Критическое значение F_k зависит от геометрической формы системы "образец-среда" и кинетических особенностей реакции (порядка реакции). Так в случае реакции нулевого порядка F_k равно 0,88 для плоского реактора, для бесконечного цилиндра – 2,00 и для сферы – 3,32 [9].

Если до некоторой температуры $T_{оч}$ нагрет не весь образец, а только его часть (очаг) с характерным размером $r_{оч}$, то возникает так называемое очаговое самовоспламенение. При этом значение F_k зависит от величины температурного напора очага [7]:

$$\Theta_{оч} = \frac{E_a}{RT^2}(T_{оч} - T_n),$$

где $\Theta_{оч}$ – величина температурного напора очага;
 $T_{оч}$ – температура очага;
 T_n – температура "холодной" части образца в начальный момент времени.

В жидкостях вследствие предвзрывного разогрева возникает свободная конвекция, которая увеличивает теплоотвод, приводя к увеличению $t_{инд}$. Так для сферического очага при реакции нулевого порядка

$$F_k \approx 12,1 (\ln \Theta_{оч})^{0,6}.$$

При зажигании различают три стадии процесса:

- в образце создается прогретый слой, благодаря теплу от внешнего источника, а тепловыделение вследствие внутренних физико-химических реакций является несущественным;

- определяющее значение приобретает тепловыделение, вследствие физико-химических реакций в образце, и происходит "срыв температуры", то есть прогрессивный саморазогрев прогретого слоя, а по моменту срыва температуры обычно фиксируют время задержки зажигания t_3 ;

- прогреваются соседние с прогретым слоем образца, вследствие тепловыделения в процессе физико-химических реакций, и формируется волна горения.

В этом случае указанные процессы описываются уравнением критической плотности теплового потока Зельдовича [5]:

$$\frac{Q}{S} > Ze \geq \sqrt{2 \lambda_B \cdot \frac{RT^2}{E_a} \cdot H \cdot k \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)},$$

где Ze – критерий Зельдовича (критическая плотность теплового потока);
 H – тепловой эффект реакций в газовой фазе;
 λ – теплопроводность газовой фазы.

Температура самовоспламенения ($T_{св}$), которая равна температуре воспламенения ($T_{вс}$), в отличие от указанного стандарта, определяется путем совместного решения системы уравнений Семёнова, Зельдовича и Франк-Каменецкого в точке воспламенения ($Se = 0,368$; $F = 2,00$; $Ze = Q/S$).

Таким образом, используя системный подход к проблеме создания автоматизированной системы диагностики пожарной опасности жидких горючих веществ и материалов, разработан инструментальный для определения многопа-

раметрической оценки пожарной опасности этих веществ и материалов. В рамках общесистемных решений разработана модель для регистрации характеристик пожарной опасности, а также алгоритм распознавания образов жидких веществ и материалов. Показан комплексный подход для исследования теплофизических свойств горючих жидкостей, позволяющий существенно сэкономить как материальные, так и временные ресурсы.

Литература

1. **Топольский Н.Г.** Основы автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности объектов. М.: МИПБ МВД России, 1997. 164 с.
2. **Белозёров В.В.** Автоматизированный комплекс электробаротермического анализа в определении физико-химических свойств материалов и их пожарной опасности // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – Вып. 3 (19). – 2008. – 18 с. - <http://ipb.mos.ru/ttb/2008-3>. – 0420800050/0026.
3. **Кириллин В.А., Шейндлин А.Е.** Исследование термодинамических свойств веществ. М.: Госэнергоиздат, 1963. 560 с.
4. **Филиппов Л.П.** Исследование теплопроводности жидкостей. М.: Изд-во МГУ, 1970. 239 с.
5. **Wood R.H.** Flow calorimetry and densitometry at high temperatures // *Thermochim. Acta.*, 1989, V.154, №1.
6. **Глушкова В.М.** Энциклопедия кибернетики, т.1, УСЭ, 1974. 401 с.
7. **Математическая** теория горения и взрыва / Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. М.: Наука, 1980. 479 с.
8. **Семёнов Н.Н.** Тепловая теория горения и взрывов // УФН. 1940. Т. 23, № 3, 251-292 с.
9. **Франк-Каменецкий Д.А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 492 с.