

опыта с коэффициентом корреляции  $R = 0,994$ . Но, следует отметить, что характер полученной зависимости существенно отличается от формулы (2). Так, при температурах меньше стандартной наблюдается более интенсивный рост  $E_{\min}$ , что можно объяснить ростом диффузных осложнений в готовой горючей смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по определению минимальной энергии зажигания / Под ред. Монахова В.Т. и др. – М.: ВНИИПО. – 1977. – 54 с.
2. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения, в 2 частях / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2004. – 1448 с.
3. Баратов А.Н. Пожарная безопасность. Справочник / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов, А.Я. Корольченко и др. – М.: Химия, 1987. – 272 с.
4. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ / В.Т. Монахов. – М.: Химия, 1979. – 424 с.
5. Трегубов Д.Г. Дослідження впливу енергії джерела запалення на концентраційні межі поширення полум'я / Д.Г. Трегубов, Я.В. Щетинін // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: АГЗУ, 2006. – Вып. 19. – С. 161-165. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/>.
6. Трегубов Д.Г. Дослідження залежності мінімальної енергії запалювання від температури / Д.Г.Трегубов // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ, 2007. – Вып.21. – С. 275-278. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol21>.
7. Тарахно Е.В. Розрахункове визначення мінімальної енергії запалювання при проведенні судових пожежно-технічних експертиз / Е.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, В.М. Сирих / Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ, 2007. – Вып. 22. – С. 190-193. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol22>.
8. Тарахно О.В. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. У 2-х частинах / О.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жернокльов та ін. – Х.: НУЦЗУ, 2010. – 822 с. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/Articles/tarahno/tarahno2010praktikum1.pdf>.
9. Kondo S. Experimental exploration of discrepancies in  $F$ -number correlation of flammability limits / S. Kondo, A. Takahashi, K. Tokuhashi // J. Hazard. Mater. – 2003. – Vol. 100. – № 1-3. – P. 27-36.
10. Шаршанов А.Я. Математическое моделирование разлета искр горючих материалов / А.Я. Шаршанов, А.А. Посник // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ, 2013. – Вып.34. – С. 275-278. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol34/>.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ХОДЕ ПОЖАРНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

*Трегубов Д.Г., Тарахно Е.В., Рогачук Д.Н., Национальный университет  
гражданской защиты Украины, г. Харьков, Украина*

Проведение пожарно-технической экспертизы связано с изучением обстоятельств возникновения горения для установления механизма и причины процесса зажигания. Составление и исследование соответствующих версий связано с анализом возможных источников зажигания для конкретного случая. В таком анализе на одной из стадий решается задача определения возможности зажигания горючих веществ и материалов от вероятного источника зажигания. Такое исследование связано с необходимостью определения минимальной энергии зажигания горючего вещества  $E_{\min}$  [1] и не только при нормальных условиях, но и при фактических условиях для определения реальной возможности зажигания горючей воздушной смеси. Основным фактором изменения условий внешней среды на возможность вынужденного зажигания является температура. Так, при увеличенных температурах в исходной горючей смеси значения  $E_{\min}$  логично уменьшаются, что соответствует увеличению степени пожарной опасности.

подавляющее большинство данных для значений  $E_{\min}$ , приведенных в справочниках [2], установлены для стандартных условий по методике [1]. Снижение  $E_{\min}$  при увеличенных температурах окружающей среды подтверждается экспериментальными данными [2], однако они известны для малого количества веществ. Т.е. справочные данные не всегда отображают фактическую возможность зажигания горючего вещества при конкретных температурных условиях.

Экспериментально  $E_{\min}$  определяют как условие, при котором существует 1% вероятности возникновения горения в случае действия на стехиометрическую горючую смесь электрического разряда некоторой мощности. Эта методика предусматривает, также, определение наиболее опасного электроразрядного зазора. Для определения фактической пожарной опасности источника зажигания сравнивают его энергию  $E_{из}$  на момент контакта с горючим веществом со значением  $E_{\min}$ , например при разлете искр [10].

Методики экспериментального определения  $E_{\min}$  и концентрационных пределов распространения пламени (КПРП) изложены А.М. Баратовым и В.Т. Монаховым [3, 4]. Но в этих работах не показана зависимость КПРП от значения  $E_{из}$ . Энергия насыщения  $E_{насыщ}$  процесса вынужденного зажигания вообще не учитывается как важный параметр, хотя также характеризует степень опасности, как вещества, так и источника зажигания. Не показано дополнительное сужение КПРП при температурах меньше стандартных, если энергия источника зажигания меньше энергии насыщения.

Нами проведены предварительные исследования в данных направлениях. В работе [5] установлено, что интенсивность сужения КПРП  $\Delta\Phi$  (относительно

справочных данных) для массива веществ зависит от степени "ненасыщенности" источника зажигания ( $0 < \Delta\Phi < 100$  % для  $E_{из} < E_{насыщ}$ ):

$$\begin{aligned} \text{якщо } E_{из} = 0,7 \text{ мДж:} & \quad \Delta\Phi = 61,72\ln(E_{мин}) + 115; (R = 0,95), \\ \text{якщо } E_{из} = 1,0 \text{ мДж:} & \quad \Delta\Phi = 56,35\ln(E_{мин}) + 88,6; (R = 0,98). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta\Phi = \frac{\Delta\varphi_{д} - \Delta\varphi_{ф}}{\Delta\varphi_{д}} \cdot 100$  – отношение разности справочных и

экспериментальных диапазонов взрывоопасности  $\Delta\varphi$  к  $\Delta\Phi$  по справочнику, %;

$\Delta\varphi$  – ширина области взрывоопасных концентраций, %.

Определена зависимость [6] изменения  $E_{мин}$  газообразного горючего вещества в диапазоне температур от фактической до температуры самовоспламенения  $T_{св}$ :

$$E_{мин} = E_{мин}^0 (1 - (T_{ф} - 298) / (T_{св} - 273)), \text{ мДж}, \quad (2)$$

где  $E_{мин}$ ,  $E_{мин}^0$  – минимальные энергии зажигания горючего вещества при данных и стандартных температурных условиях, мДж;

$T_{ф}$  – фактическая температура окружающей среды, для которой определяется минимальная энергия зажигания, К.

С физической точки зрения процесс зажигания связан с теплоемкостью среды, поэтому на основании зависимости объемной теплоемкости влажного воздуха от температуры установлена формула [7]:

$$E_{мин} = 0,242d_{кр}^3 (T_{св}^{0,12} - T_{ф}^{0,12}) 10^6, \text{ Дж}. \quad (3)$$

Но это выражение предусматривает знание величины критического зазора  $d_{кр}$ .

Учитывая изложенное выше, для определения влияния температуры среды на возможность возникновения горения под действием источника зажигания поставлена задача провести изучение процесса зажигания горючих паровоздушных смесей искровым разрядом при разных температурах.

Эксперимент был проведен по методике: в горизонтальной взрывной трубе размещали расчетное количество исследуемой жидкости для образования стехиометрической концентрации ( $\varphi_{стм}$ ) и создания в реакционном объеме наиболее взрывоопасных условий. Полноту испарения контролировали визуально, интенсификация испарения и усреднение концентраций проводили магнитной мешалкой. После каждого опыта продували трубу воздухом для удаления продуктов горения и образование чистой воздушной среды. Рассматривали действие электрического разряда энергоемкостью 0,7 мДж и 1 мДж на горючую смесь при разных концентрациях горючего вещества, температурах 288 и 298 К и нормальном атмосферном давлении.

Исследовали возможность зажигания ацетона, пентана, гексана, циклогексана, изопропилового спирта; полученные результаты и справочные данные сведены в табл. 1. Сравнивали характер изменения фактической  $E_{мин}$

для разных веществ относительно  $E_{\min}$  при стандартных условиях. Действие источника зажигания при этом рассматривали как компенсацию температуры среды до  $T_{\text{св}}$ . Можно принять, что при  $T_{\text{св}}$  для горючих веществ  $E_{\min}$  приближается к 0 мДж. Если считать температурную компенсацию единственным фактором влияния температуры на изменение  $E_{\min}$ , то зависимость должна иметь характер линейной, что отвечает характеру полученных ранее результатов [6] и по инструкции [1]. В то же время, между параметрами вынужденного зажигания и самовоспламенения ( $E_{\min}$  та  $T_{\text{св}}$ ) нет прямой связи. Так, для первых семи членов гомологического ряда алканов (для других алканов данные не приведены)  $E_{\min}$  имеет значение в близких пределах 0,22 – 0,28 мДж с минимумом для пентана [8]. Таким образом, характер изменения  $E_{\min}$  в гомологическом ряду алканов существенно отличается от соответствующего характера изменения  $T_{\text{св}}$  (максимум для метана). Это можно объяснить тем, что в гомологическом ряду с уменьшением  $T_{\text{св}}$  увеличивается и теплоемкость веществ.

Таблица 1. Параметры опасности горючих веществ и процесса зажигания

Вещество ( $T_{\text{всп}}/T_{\text{кип}}$ , К)	$E_{\text{дз}}$ , мДж	$\varphi_{\text{н}} - \varphi_{\text{в}}$ , (ширина КИРП), %		Сужение КИРП, %	$T_{\text{стм}}$ , К	$E_{\min}$ , мДж [2]
		по справочнику [2]	по эксперименту			
Ацетон (255/330)	1,0	2,7 - 13,0	3,3 - 9,8 (6,5)	37,0	261,6	0,41
	0,7	(10,3)	4,8 - 9,4 (4,6)	55,3		
Гексан (250/342)	1,0	1,24 - 7,5	1,3 - 6,4 (5,1)	18,6	255,6	0,25
	0,7	(6,26)	1,4 - 5,4 (4,0)	36,1		
Циклогексан (256/354)	1,0	1,3 - 7,8	1,3 - 7,7 (6,4)	0,2	257,8	0,22
	0,7	(6,5)	1,3 - 5,5 (4,2)	35,4		
Пентан (229/309)	1,0	1,47 - 7,7	1,3 - 7,7 (6,4)	-2,7	232,3	0,22
	0,7	(6,23)	1,7 - 7,0 (5,3)	15,0		
Изопропиловый спирт 287/355)	1,0	2,23 - 12,7	2,3 - 6,0 (3,7)	64,6	293,4	0,65
	0,7	(10,47)	3,0 - 5,2 (2,2)	88,4		

Для определения  $E_{\min}$  в эксперименте необходимо обеспечить испарение исследуемой жидкости в стехиометрической концентрации  $\varphi_{\text{стм}}$ . Все исследованные вещества по температуре вспышки  $T_{\text{всп}}$  относятся к классу постоянно опасных легковоспламеняющихся жидкостей, причем  $T_{\text{всп}}$  меньше температуры опыта, см. табл.1. Т.е., образование взрывоопасного пара возможно. Но для некоторых веществ температура опыта близка к  $T_{\text{всп}}$ . Температуру, при которой над поверхностью жидкости в закрытом пространстве образуется  $\varphi_{\text{стм}}$  насыщенной пары, назовем "стехиометрической"  $T_{\text{стм}}$ . Такая температура наиболее опасна для хранения жидкостей в закрытом пространстве; определить ее можно по формуле Антуана [8]; сравнивая полученные  $T_{\text{стм}}$ , см. табл. 1., с температурой проведения опыта, можно увидеть, что среди исследованных веществ только для изопропилового спирта будут осложнение в испарении до  $\varphi_{\text{стм}}$ . Т.е. он при температуре 288 К может образовать  $\varphi_{\text{стм}}$  пар только при наличии воздухообмена с помощью магнитной

мешалки (ветровая нагрузка может уменьшить температуру вспышки не больше чем на 35 °С [8]). Также, можно увидеть, что  $T_{всп}$  и  $T_{стм}$  отличаются незначительно.

Для определения степени изменения КППП за опытом необходимо обеспечить испарение исследуемой жидкости в серии опытов в последовательных концентрациях в диапазоне от нижнего до верхнего КППП. Если температура жидкости больше необходимой для образования требуемой концентрации пара, то достаточно ввести в рабочий объем рассчитанное количество жидкости, и полное испарение обеспечит необходимую концентрацию. Если температура меньше – концентрация насыщенного пара будет не более, отвечающей данной температуре.

Если при температуре 298 К зажигание произошло для всех испытанных веществ, то при 288 К – только для пентана. Зажигание пентана при действии источника зажигания мощностью 0,7 мДж и температуре 288 К произошло только при  $\varphi_{стм}$  пара. Поэтому можно принять, что в условиях опыта ( $T = 288$  К)  $E_{мин}$  пентана – 0,7 мДж. Т.е. сужение КППП при сниженных температурах происходит более интенсивно [6] чем по стандартной зависимости [8].

Существует два параметра, которые характеризуют ширину области КППП: F-фактор  $F = 1 - (\varphi_{н}/\varphi_{в})^{0,5}$  [9] и  $\Delta\varphi = (\varphi_{в} - \varphi_{н})$ . Нами использован фактор изменения КППП относительно справочных данных, рассчитываемый по формулам (1). Поскольку изменение  $\Delta\Phi$  при разных  $E_{из}$  имеет близкий характер, можно предложить общую формулу для условий  $\Delta\Phi > 0$  и  $E_{из} < E_{насыщ}$ :

$$\Delta\Phi = 89/E_{из}^{0,55} + 56\ln E_{мин}, \text{ Дж.} \quad (4)$$

Данная формула прогнозирует сужение КППП с  $R = 0,976$ . Из (4) можно получить ориентировочное значение для энергии насыщения (т.е.  $\Delta\Phi = 0$ ):

$$E_{насыщ} = (-89/56\ln E_{мин})^{1,818}, \text{ мДж.} \quad (5)$$

для исследованных веществ: ацетон – 2,86 мДж, гексан – 1,28 мДж, циклогексан та пентан – 1,09 мДж, изопропиловый спирт – 10,7 мДж (формула дает адекватные результаты расчета для  $E_{мин} < 1$  мДж).

Также, по результатам обработки экспериментальных и справочных результатов получена математическая зависимость, которая характеризует изменение  $E_{мин}$  газообразного горючего вещества при разных температурах:

$$E_{мин} = 15E_{мин}^{\circ} e^{-0,038(T\Phi-232)}, \text{ Дж, мДж,} \quad (6)$$

где  $E_{мин}^{\circ} - E_{мин}$  горючего вещества при стандартных условиях, мДж;

232 К – расчетная температура, при которой над поверхностью пентана образуется стехиометрическая концентрация насыщенного пара;

$T\Phi$  – фактическая температура окружающей среды, К.

Формула (6) прогнозирует изменение  $E_{мин}$  по сравнению с результатами