

Влияние источника тепла от воспламенения на расчетную кривую горения пенополиэтилена при пожаре в отсеке

М.В. Поклонская, А.А. Сеньченко, А.В. Палий, Чернега Ю.Г.

Донской государственный технический университет

Аннотация: В данной статье проанализировано поведение расчетной кривой пожара в соответствии с источником тепла воспламенения в отсеке. Индекс замедления, который является основным фактором, используемым для прогнозирования времени, необходимого для достижения максимальной скорости тепловыделения, уменьшался в зависимости от размера источника тепла воспламенения независимо от объема горючего пенополиэтилена.

Ключевые слова: кривая пожарного расчета, изоляция труб, источник тепла зажигания, индекс замедления, скорость тепловыделения.

Введение

Пожар распространяется, когда температура поверхности горючего материала увеличивается до значения, превышающего эталонную температуру, что вызывает химическую реакцию с окислителями, присутствующими поблизости. Кроме того, скорость распространения огня твердого материала увеличивается пропорционально площади поверхности в зависимости от тепловых условий окружающей среды и термодинамических свойств горючего материала. Таким образом, индекс скорости возгорания (FIGRA), который представляет собой отношение максимальной скорости тепловыделения ко времени достижения максимальной скорости тепловыделения, широко используется в пожарных технологиях для классификации класса огнестойкости в соответствии с его измеренными значениями. Однако, поскольку FIGRA ограничивается прогнозированием сценариев пожара на основе явлений пожара в наихудших случаях или анализом рисков, следует учитывать расчетные кривые пожара, которые включают изменяющуюся во времени скорость тепловыделения [1].

Описание исследования

На рис. 1 показана схема образца, сожженного в полузакрытом отсеке, и явление теплопередачи. Рассматриваемый образец был изготовлен с использованием огнестойкой плиты толщиной 25 мм. Как показано на рис. 1, когда горючее сжигается источником тепла воспламенения в локальной точке, общая скорость тепловыделения (Q_t) за счет конвекции (Q_{conv}) внутреннего набегающего потока и лучистого тепла (Q_{rad}) во внешних стенах и пламени следует соотношению, показанному в уравнении (1) [2].

$$Q_t(t) = Q_f(t) + Q_{ig}, \quad (1)$$

где t указывает время горения.

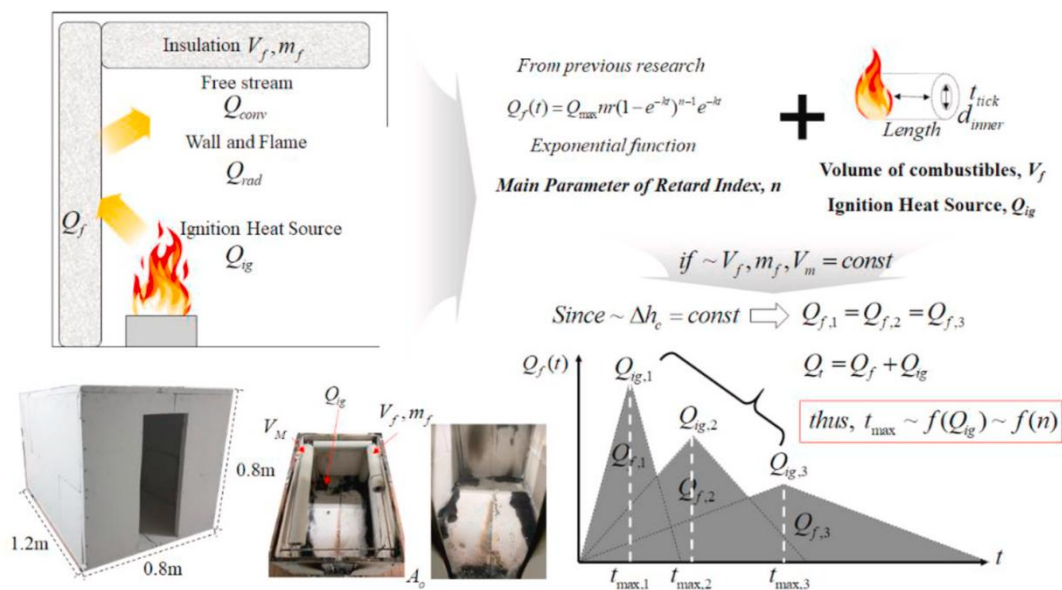


Рисунок 1 – Схема влияния источника тепла зажигания и индекса замедления на время, необходимое для достижения максимальной скорости тепловыделения.

Общая скорость тепловыделения (Q_t) и скорость тепловыделения горючего (Q_f) в уравнении (1) со временем изменяются в зависимости от площади поверхности горения (A). Теплота сгорания (Δh_c , кДж / кг), которая характеризуется термохимическими свойствами, представляет собой количество энергии, генерируемой при изменении единицы массы. Как

показано в уравнении (2), его значение постоянно в зависимости от состава материала.

$$Q_f(t) = \eta \dot{m}_f \Delta h_c, \quad (2)$$

где η , \dot{m}_f , а также Δh_c указывают эффективность сгорания, скорость уменьшения массы горючего и теплоту сгорания, соответственно.

Интеграл от скорости тепловыделения за все время сгорания ($Q_f(t)$) должен соответствовать закону сохранения энергии. Таким образом, максимальная скорость тепловыделения (Q_{max}) увеличивается по мере уменьшения времени сгорания горючего [3]. Когда геометрическая форма пространства отсека и массовый расход горючего не изменяются, можно предположить, что t_{max} имеет значительную корреляцию с теплотой сгорания источника тепла зажигания (Q_{ig}), как показано в уравнении (3).

$$Q_{max}, t_{max} \sim f(Q_{ig}), \quad (3)$$

где Q_{ig} - теплотворная способность источника тепла зажигания.

Ингасон [4,5] вывел модифицированное экспоненциальное уравнение (формула 4), чтобы представить явление изменяющейся скорости тепловыделения в течение периода горения, используя уравнение экспоненциальной модели Нумаджири и Фурукавы, Q_{max} , и общую генерируемую энергию (E_{tot}).

$$Q_f(t) = Q_{max} \times nr(l - e^{kt})^{n-1} \times e^{-kt}, \quad (4)$$

где n , r и k – индекс запаздывания, амплитудный коэффициент и коэффициент ширины волны соответственно. Когда $t = t_{max}$, $Q_f(t_{max}) = Q_{max}$; следовательно, r и k должны соответствовать уравнениям (5), (6).

$$k = Q_{max} / E_{tot} r, \quad (5)$$

$$r = (1 - 1/n)^{1-n} \quad (6)$$

где E_{tot} указывает общую теплотворную способность, создаваемую горючим в течение периода сгорания.

В уравнении 4, когда $t = t_{max}$, $dQ(t) / dt = 0$; как таковое, t_{max} можно получить с помощью уравнения (8).

$$n = e^{kt}, \quad (7)$$

$$t_{max} = \frac{\ln(n)}{k}, \quad (8)$$

Следовательно, как показано в правом нижнем углу рисунка 1, t_{max} также связано с уравнением (9), и это исследование направлено на получение значения n в соответствии с Q_{ig} с учетом горючего объема (V_f).

$$t_{max} \sim f(n) \sim f(Q_{ig}), \quad (9)$$

Для анализа индекса замедления (n) и расчетной кривой возгорания по уравнению 4 в соответствии с изменениями условий воспламенения и объема горючего вспененный полиэтилен был выбран в качестве горючего, а скорость тепловыделения была измерена с помощью конического калориметра.

На рис. 2 (а) сравнивается теоретическая скорость тепловыделения и результаты измерений пропановой горелки с помощью конического калориметра, использованного в этом исследовании [6,7,8]. Источником тепла зажигания можно управлять с помощью регулятора массового расхода (модель: TSC-145), как указано в таблице 1, имеющего диапазон измерений около 0–200 л / мин с точностью 1% от полного диапазона. Кроме того, для визуального подтверждения используются регулирующий клапан и расходомер плоского типа. Согласно расчету неопределенностей типа А в ходе повторных экспериментов, конусный калориметр, использованный в этом исследовании, показал надежность приблизительно $\pm 95\%$, когда коэффициент охвата был на уровне достоверности 1,95.

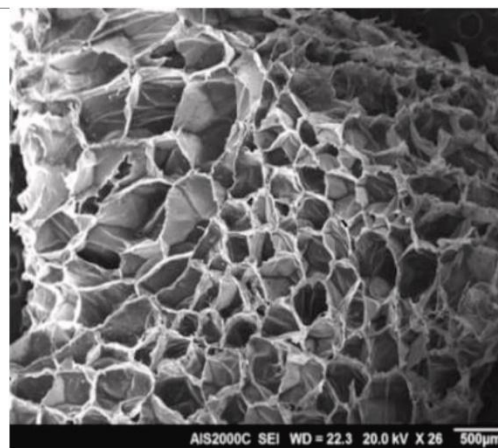
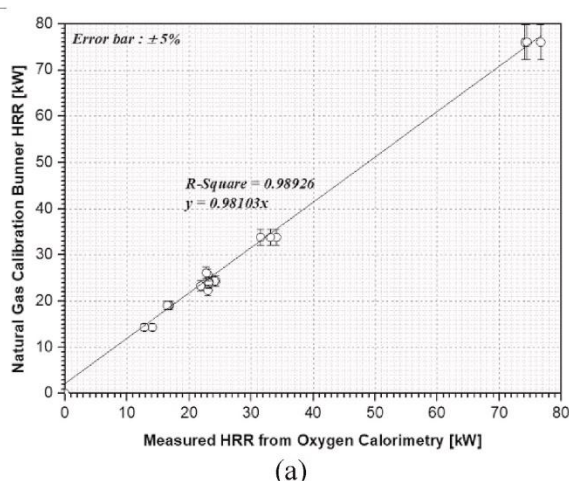


Рисунок 2 – а) результаты калибровки конического калориметра с пропановой горелкой;
(б) Изображение испытуемого образца пенополиэтилена, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии.

Таблица 1 – Технические характеристики экспериментальной установки и свойств материалов.

Аппарат	Технические характеристики	Материальная собственность	Значение
Термопара	Проволока типа К, диапазон: 200–1000 °С	Эталонная температура [К]	744
Система сбора данных	Напряжение: от 20 мВ до 100 В, 1–5 В F · S., 20 каналов, точность: ± 0,1%	Энергия активации [кДж / кмоль]	$1,19 \times 10^5$
Размер воздуховода и вентилятор	Длина: 5 м, диаметр: 0,2 м, мощность вентилятора: 3 л.с.	Предэкспоненциальный множитель [1 / с]	$1,05 \times 10^6$
Анализатор O ₂	Выход: 4–20 мА, диапазон: 0,7–1,2 бар, модель: ОХУМАТ 61	Теплота сгорания, [кДж / кг]	42660
Датчик давления	Выход: 0–10 В, диапазон: 1250 Па, модель: MS-311	Плотность [кг / м ³]	26 год
Регулятор массового расхода	Топливо: CH ₄ , C ₃ H ₈ , мощность: 0–5 В постоянного тока, диапазон: 200 л / мин, модель: TSC-145	Удельная теплоемкость [кДж / кг·С]	2.31
Передачик давления	Топливо: CH ₄ , C ₃ H ₈ , выход: 0–20 мА, диапазон: 0–20 бар, модель: PSC-EVAPG	Теплопроводность [Вт / мК]	0,0425

На рис. 2 (b) показана структура образца изоляции труб из вспененного полиэтилена, используемого в этом исследовании, наблюдаемая под растровым электронным микроскопом (модель: AIS200с, Seron Technologies Inc.), а в таблице 1 обобщены термохимические свойства и характеристики экспериментальных устройств [9,10].

Заключение

В этом исследовании анализировалась расчетная кривая возгорания горючего вспененного полиэтилена в соответствии с изменениями теплотворной способности источника тепла воспламенения. Для этой цели была изготовлена конструкция, размер которой составляет одну треть от размера образца углового помещения ISO 9705, и скорость тепловыделения была проанализирована в соответствии со временем горения горючего полиэтиленового пенопласта. Были получены следующие результаты.

Во-первых, при горючем объеме пенополиэтилена (V_f) 0,019 м³, когда теплотворная способность (Q_{ig}) источника тепла зажигания составляла 12,00 кВт, 15,98 кВт и 23,20 кВт, максимальная скорость тепловыделения (Q_{max}) была постоянной на уровне 209 ± 10 кВт, тогда как время, необходимое для достижения максимальной скорости тепловыделения (t_{max}), уменьшилось до 589 с, 203 с и 136 с соответственно. Это связано с тем, что, поскольку полная энергия (E_{tot}) сохраняется в одних и тех же условиях для различных горючих объемов, Q_{ig} является основным фактором индекса запаздывания (n), который определяет t_{max} расчетной пожарной кривой.

Во-вторых, расчетная кривая пожара была спрогнозирована на основе экспериментальных значений скорости тепловыделения в соответствии с Q_{ig} для значений V_f 0,019 м³ и 0,038 м³. Согласно результатам, n

экспоненциально уменьшалось (-1,3) с увеличением Q_{ig} . Однако по мере уменьшения Q_{ig} , значение n , необходимое для достижения t_{max} , быстро увеличивалось из-за k , который зависит от Q_{max} и E_{tot} . Следовательно, метод прогнозирования расчетной кривой возгорания, полученный в этом исследовании, считается полезным только в условиях, когда пожар быстро распространяется со значением t_{max} примерно 200 с и значением Q_{ig} 15 кВт или более. Ограничение представленного уравнения должно учитывать объем горючих веществ и тип материалов путем установления экспериментальных данных. Однако в предыдущих исследованиях не учитывались Q_{ig} , которые существенно влияют на t_{max} и скорость роста пожара, несмотря на то, что в расчетных кривых горения учитывались характеристики пространства отсека и условия воспламенения. Можно заметить, что корреляции между n (индекс запаздывания) и Q_{ig} с $\pm 5\%$ экспериментальных значений можно использовать для создания улучшенных расчетных моделей прогнозирования кривой горения.

Литература

1. En13823, Reaction to Fire Tests for Building Products-Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item, CEN, Brussels, 2002, P. 3.
2. Дерюгин В.В., Васильев В.Ф., Уляшева В.М.: Тепломассообмен. Учебное пособие. – 2021. – С. 12.
3. Цирельман Н.М. Теория и прикладные задачи тепломассопереноса. – 2019. – С. 81-88.
4. Шабаров А., Кислицын А., Григорьев Б., Михайлов П., Пульдас Л. Тепломассоперенос в нефтегазовых и строительных технологиях. – 2014. – С. 156-167.

5. Ingason H., Fire development in large tunnel fires, *Fire Saf. Sci.* 8 (2005) 1497–1508, doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-1497.
6. Li, H. Y. Ingason, The fire growth rate in a ventilated tunnel fire, *Fire Saf. Sci.* 10 (2011) 347, doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-347
7. Li, H. Y. Ingason, A new methodology of design fires for train carriages based on exponential curve method, *Fire Technol.* 52 (5) (2016) 1449–1464, doi.org/10.1007/s10694-015-0464-3.
8. Палий А.В. Исследование способов улучшения тепловых режимов теплонагруженных микроэлектронных устройств. Кандидатская диссертация. Таганрог, 2007. С. 140.
9. Палий А.В., Саенко А.В., Бесполудин В.В. Влияние формы выступа и его расположения на поверхности радиатора на температуру источника тепла. *Инженерный вестник Дона*, 2016, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3661
10. Гайдин Н.М., Поклонская М.В., Палий А.В. Исследование влияния конструктивных особенностей теплоотвода на эффективность охлаждения процессора // *Инженерный вестник Дона*, 2021, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7213.

References

1. En13823, Reaction to Fire Tests for Building Products-Building Products Excluding Floorings Exposed to the Thermal Attack by a Single Burning Item, CEN, Brussels, 2002, P. 3.
2. Deryugin, V. V., Vasil'ev V. F., V. M. Ulyasheva *Teplomassoobmen*. [Heat and Mass Transfer]. Uchebnoe posobie. 2021. P. 12.
3. Zibelman N. M. *Teoriya i prikladnye zadachi teplomassoperenosa* [Theory and applied problems of heat and mass transfer]. 2019. pp. 81-88.



4. Shabarov A. Kislitsyn A., Grigoriev Boris Mikhailov P., L. Teplomassoperenos v neftegazovyh i stroitel'nyh tekhnologiyah [Pulidas heat and mass transfer in the oil and gas and construction technologies]. 2014. pp. 156-167.
5. Ingason H., Fire development in large tunnel fires, Fire Saf. Sci. 8. 2005 1497–1508, doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-1497.
6. Li, H. Y. Ingason. The fire growth rate in a ventilated tunnel fire, Fire Saf. Sci. 10 (2011) 347, doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-347.
7. Li, H. Y. Ingason. A new methodology of design fires for train carriages based on exponential curve method, Fire Technol. 52 (5) (2016) 1449–1464, doi.org/10.1007/s10694-015-0464-3.
8. Palii A.V. Issledovaniye sposobov uluchsheniya teplovykh rezhimov teplonagruzhennykh mikroelektronnykh ustroystv. Kandidatskaya dissertatsiya. [Investigation of ways to improve the thermal conditions of heat-loaded microelectronic devices]. Taganrog, 2007, p. 140.
9. Palii A.V., Sayenko A.V., Bespoludin V.V.: Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/ archive/n2y2016/3661
10. Gaydin N.M., Poklonskaya M.V., Palii A.V.: Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7213