

О ПРОБЛЕМЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. Д. Кузнецов¹, Е. Ю. Колесников²

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

¹ *yura.kuz30@gmail.com, key3108@ya.ru*

В статье поднимается вопрос степени разработанности математического аппарата, используемого для оценки интенсивности теплового излучения при горении твердых горючих материалов. Итогом проведенного анализа литературы является вывод о необходимости агрегации существующих опытных данных и составлении на их основе универсальных эмпирических выражений.

Ключевые слова: пожарная безопасность, спринклерное пожаротушение, твердые горючие материалы.

Во многих исследованиях, изучающих спринклерное пожаротушение, изучение формирования аэрозоля и предсказание его конуса распыления осуществляются без рассмотрения взаимодействия с восходящими газообразными продуктами горения и непосредственно очагом пожара. Одним из ключевых параметров, характеризующих пожары, является интенсивность теплового излучения пламени. В то время как методики определения интенсивности теплового излучения для пожаров жидких и газообразных топлив хорошо известны и закреплены нормативно-правовыми актами РФ, вопрос оценки интенсивностей теплового излучения для пожаров твердых веществ все еще сохраняет свою актуальность.

Упоминание методики расчета интенсивности теплового излучения при горении твердых веществ присутствует лишь в СП 12.13130.2009 [1]. В рамках этого документа постулируется универсальность расчета интенсивности теплового излучения от пожаров проливов ЛВЖ, ГЖ, СУГ, СПГ и горения твердых материалов (включая горение пыли). Для этого используется формула (1):

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau \quad (1)$$

где q – интенсивность теплового излучения, падающего на объект-мишень, kBt/m^2

E_f - среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, kBt/m^2 ;

F_q – угловой коэффициент облученности;

τ – коэффициент пропускания атмосферы.

Несмотря на постулированную пунктом В.5.1 СП универсальность расчета по формуле (1) и определение величины параметра $E_f = 40 \text{ kBt/m}^2$ для всех твердых материалов, расчет прочих параметров не предусматривает возможность использования данной методики для оценки интенсивности теплового излучения при пожарах твердых материалов. Так, в пункте В. 5. 4. СП производится расчет высоты пламени, где фигурирует параметр «удельная скорость выгорания жидкости», что однозначно исключает применимость данного выражения для оценки высоты пламени при горении твердых материалов.

В иных нормативно-правовых актах, содержащих данную методику и опубликованных позже СП 12.13130.2009, и вовсе исключается возможность расчета интенсивности теплового излучения для пожаров твердых веществ: из текста документа исключаются их упоминания, как и упоминания величины среднеповерхностной плотности теплового излучения пламени для твердых веществ [2].

Впрочем, следует упомянуть, что существуют и альтернативные подходы к оценке величины интенсивности теплового излучения от пожаров твердых материалов [3]. В частности, приводится формула (2):

$$q = v_m \cdot [c_p \cdot (T_{\text{пл}} - T_0) + Q_{\text{пл}} + c_p^1 \cdot (T_{\text{k}} - T_{\text{пл}}) + Q_{\text{исп}} + Q_p + Q_{T.O}] \quad 2)$$

где q – интенсивность теплового излучения, поступающего от зоны пламени к поверхности твердого вещества, Bt/m^2 ;

v_m – массовая скорость выгорания, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{с})$;

c_p , c_p^1 - теплоемкость твердой фазы и расплава соответственно, $\text{kДж}/\text{кг}\cdot\text{K}$;

$Q_{\text{пл}}$, $Q_{\text{исп}}$, Q_p – теплота плавления, испарения и разложения соответственно, $\text{kДж}/\text{кг}$;

$Q_{T.O}$ – теплота, пошедшая на нагрев твердого остатка, $\text{kДж}/\text{кг}$;

T_{k} , $T_{\text{пл}}$ - температура кипения и плавления вещества соответственно, K ;

T_0 – начальная температура, K .

Многие из компонентов формулы (2) будут оказываться нулевыми в зависимости от природы твердого горючего вещества, поскольку для некоторых твердых материалов переход в газовую фазу протекает минуя

процесс плавления – через процесс разложения (это касается, например, древесины).

Использование формулы (2) сопряжено с рядом сложностей. Некоторые из ее компонентов можно без труда найти в различных справочных источниках – например массовую скорость выгорания [4], другие находят путем проведения экспериментов, результаты которых не так широко известны. Примером такого параметра можно считать удельную теплоту термического разложения [5].

Еще одним явным недостатком выражения (2) является отсутствие зависимости интенсивности теплового излучения от расстояния, на котором находится объект-мишень. Таким образом, данное выражение подходит для оценки интенсивности теплового излучения лишь на поверхности пламени.

Говоря о научных исследованиях, направленных на установление эмпирических корреляций для интенсивностей теплового излучения на основе экспериментальных данных, в большинстве своем они направлены на изучение различных вариаций пожаров пролива [6, 7].

Впрочем, существуют и малочисленные работы, изучающие интенсивность теплового излучения пожара твердых материалов. В исследовании [8] проведен анализ 112 полномасштабных экспериментов с пожарами твердых веществ различной природы. Результатом этого анализа стали следующие выводы:

1. Момент времени t_{max} , которому соответствует пиковая интенсивность теплового излучения, наступает раньше при увеличении пожарной нагрузки. С увеличением интенсивности работы вентиляции этот момент времени наступает позже.

2. На величину максимальной интенсивности теплового излучения оказывает влияние ряд факторов:

- а) пожарная нагрузка;
- б) вид облицовочных материалов;
- в) степень открытости пространства и геометрия помещения в целом, влияющие на приток воздуха к очагу пожара.

3. Целлюлозные виды топлива, такие как древесина, обычно медленно тлеют, в то время как углеводородные и жидкие/расплавленные виды топлива сгорают быстрее. Кроме того, увеличение плотности пожарной нагрузки приводит к более медленному снижению интенсивности теплового излучения. Полученные данные подчеркивают, что тип топлива является важным фактором, влияющим на скорость снижения интенсивности теплового излучения с течением времени, поскольку другие параметры дают противоречивые результаты, затрудняющие возможность делать окончательные выводы.

Впоследствии, результаты данной работы были обобщены ее авторами в эмпирическую корреляцию [9], позволяющую оценить интенсивность теплового излучения в момент перехода от локального пожара к воспламенению всех горючих поверхностей в помещении (flashover).

Таким образом, вопрос создания универсального выражения для оценки интенсивности теплового излучения, сопровождающего пожары твердых материалов так и остается нерешенным. Ни один из рассмотренных подходов не позволяет вычислить величину падающей на объект-мишень интенсивности теплового излучения, создаваемого пламенем пожара твердых горючих материалов. Искоренить рассмотренную концептуальную полноту можно за счет проведения собственных экспериментов или обобщения существующих в открытом доступе экспериментальных данных, которые позволяют построить эмпирические корреляции для расчета интенсивностей теплового излучения, зависящие, главным образом, от двух параметров: природы вещества и расстояния до объекта-мишени.

Библиографический список

1. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
2. Приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 26 июня 2024 г. № 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
3. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: краткий курс лекций по дисциплине для студентов для всех форм обучения для специальности 20.05.01 Пожарная безопасность / Сост.: В.А. Хрисониди; Филиал Майкоп. гос. технол. ун-т в пос. Яблоновском. Кафедра инженерных дисциплин и таможенного дела – Яблоновский: Изд. Филиала МГТУ в пос. Яблоновском, 2018. – 174 с.
4. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. – М: Академия ГПС МВД России, 2000, 118 с.
5. Микова Надежда Михайловна, Фетисова Ольга Юрьевна, Иванов Иван Петрович, Павленко Нина Ивановна, Чесноков Николай Васильевич. "Изучение термического воздействия на превращения древесины и коры осины" Химия растительного сырья, № 4, 2017, С. 53-64.
6. Xiaohan Guo, Mingnian Wang, Li Yu, Jianxun Huo, Guangbin Ni, Xin Chen, Zhenyu Zhou, Heat release rate prediction for high-altitude gasoline pool fires based on field tests of combustion characteristics, International Journal of Thermal Sciences, Volume 197, 2024, 108785, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108785>.
7. Qiong Liu, Kehong Li, Chao Yuan, Shengze Lin, Zhengyang Wang, Zhi Li, Weilin Xu, The study on calculation method of burning rates of discrete multiple fires, International Journal of Thermal Sciences, Volume 217, 2025, 110053, ISSN 1290-0729, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.110053>.
8. Mohammad Javad Moradi, Hamzeh Hajiloo, Meta-analysis of compartment fires: Exploring extensive experimental datasets with heat release rate in focus, Applied Thermal Engineering, Volume 266, 2025, 125733, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125733>.

9. Mohammad Javad Moradi, Hamzeh Hajiloo, Quantitative review of experimental tests and theoretical models of flashover occurrence in compartment fires, *Fire Safety Journal*, Volume 155, 2025, 104432, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2025.104432>.