

УДК 536.3:614.6

ЭКРАНИРОВАНИЕ ЛУЧИСТЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ВОДЯНЫМИ ЗАВЕСАМИ

Виноградов А.Г.*, к.ф.-м.н., доцент,

*Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля, Украина

Представлены расчеты коэффициента экранирования теплового излучения завесой из распыленной воды. Получены аналитические соотношения и построены графические зависимости коэффициента экранирования от параметров водяной завесы. В работе использованы ранее полученные соотношения для индикатрисы рассеяния теплового излучения на сферических каплях воды.

1. Введение

Тепловое излучение является одним из факторов опасности во время пожара. Защита от теплового излучения – это одна из актуальных проблем, которые требуют своего решения для повышения эффективности действий пожарной охраны. В качестве тепловых экранов для защиты личного состава и материальных ценностей от воздействия лучистых тепловых потоков возможно использование водяных завес. Формирование водяной завесы происходит при прохождении скоростной водяной струи через специальный насадок на пожарный ствол вследствие распыления воды на мелкие капли [1–3].

Теоретический анализ процесса экранирования лучистого теплового потока распыленной водой в приближении изотропного рассеяния выполнен в работе [4]. Анализ рассеяния теплового излучения сферическими каплями воды позволил уточнить распределение отраженного и преломленного излучения по углам рассеяния [5]. В данной работе учтены результаты работы [5] с целью усовершенствования расчета коэффициента экранирования, полученного в работе [4]. Численные расчеты и построение графических зависимостей выполнены с применением компьютерного пакета MathCAD. Для упрощения расчетов рассмотрена модель 1-кратного рассеяния на сферических каплях одинакового диаметра.

2. Постановка задачи

Задачей данной работы является решение проблем, не решенных в предыдущих публикациях: 1) анализ процесса экранирования лучистого теплового потока от компактного источника излучения водяной завесой с учетом индикатрисы 1-кратного рассеяния на сферических каплях воды; 2) численные расчеты и построение графических зависимостей коэффициента экранирования от параметров водяной завесы.

3. Анализ процесса экранирования теплового излучения водяной завесой

Рассмотрим поток теплового излучения от очага пожара A к определенному объекту B , который необходимо защитить (рисунок 1).

Энергетическая освещенность поверхности B при отсутствии теплового экранирования:

$$E_0 = \frac{J_0}{(d+l)^2}, \quad (1)$$

где J_0 – сила света очага пожара,
 d – расстояние от очага пожара до завесы,
 l – расстояние от завесы до объекта.

При наличии водяной завесы энергетическая освещенность поверхности B будет определяться двумя составляющими энергетического потока: 1) тепловое излучение, которое прошло через водяную завесу без рассеяния (энергетическая освещенность E_1); 2) излучение, рассеянное водяной завесой (энергетическая освещенность E_2).

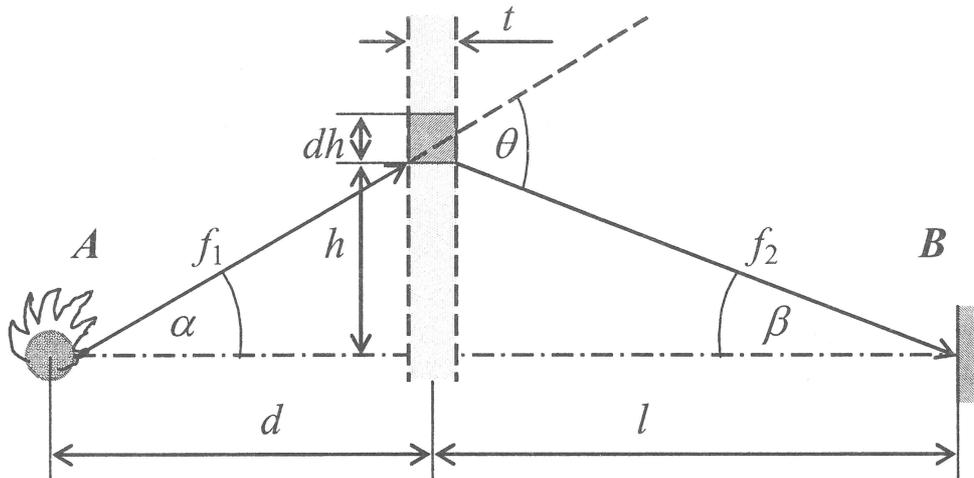


Рисунок 1 – Поток теплового излучения от очага пожара A к определенному объекту B

Первая составляющая – это доля от E_0 , определяемая сечением рассеяния капель:

$$E_1 = \frac{J_0}{(d+l)^2} \cdot (1 - m \cdot \pi r^2 t), \quad (2)$$

где m – концентрация капель в завесе,

r – радиус капель (считаем, что все капли являются одинаковыми),

t – толщина завесы.

Рассмотрим приближение 1-кратного рассеяния, при котором коэффициент рассеяния

$$k = m \cdot \pi r^2 t < 1. \quad (3)$$

Для определения второй составляющей (энергетической освещенности E_2) найдем освещенность поверхности объекта B излучением, рассеянным на каплях воды.

При условии 1-кратного рассеяния энергетическая сила рассеянного излучения от капли в направлении объекта B зависит от угла рассеяния лучей $\theta = \alpha + \beta$ (рисунок 1), где

$$\alpha = \arctan \frac{h}{d}, \quad \beta = \arctan \frac{h}{l}. \quad (4)$$

Излучение, рассеянное сферическими каплями воды, состоит из 2 компонент: отраженного и преломленного излучения. В работе [5] показано, что тепловой поток отраженной компоненты составляет лишь 6,6% от полного теплового потока, а потому в первом приближении им можно пренебречь. Пространственное распределение преломленной компоненты (93,4% от полного потока) определяется соотношением [5]:

$$J(\theta) = \frac{E \cdot n^2 \cdot r^2 \cdot T(\theta)}{4} \cdot \frac{\left(\cos \frac{\theta}{2} - n \right) \cdot \left(1 - n \cdot \cos \frac{\theta}{2} \right)}{\cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 + n^2 - 2n \cdot \cos \frac{\theta}{2} \right)^2}, \quad (5)$$

где $T(\theta)$ – функция зависимости коэффициента пропускания на поверхности капли от угла рассеяния,
 n – показатель преломления воды ($n = 1,33$),
 E – энергетическая освещенность капли:

$$E = \frac{J_0}{f_1^2} = \frac{J_0}{h^2 + d^2}, \quad (6)$$

где смысл обозначений понятен из рисунка 1.

Энергетическая освещенность объекта B излучением, рассеянным одной каплей:

$$E_2^K = \frac{J(\theta) \cdot \cos \beta}{f_2^2} = \frac{J(\theta) \cdot l}{(h^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (7)$$

Энергетическая освещенность объекта B излучением, рассеянным кольцевым слоем завесы шириной dh (рисунок 1):

$$dE_2 = E_2^K \cdot m \cdot 2\pi h t \cdot dh = \frac{J(\theta) \cdot l}{(h^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot m \cdot 2\pi h t \cdot dh, \quad (8)$$

или:

$$dE_2 = m \cdot 2\pi h t \cdot dh \cdot \frac{J_0 \cdot n^2 \cdot r^2 \cdot l \cdot T(\theta)}{4 \cdot (h^2 + d^2) \cdot (h^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{\left(\cos \frac{\theta}{2} - n\right) \cdot \left(1 - n \cdot \cos \frac{\theta}{2}\right)}{\cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 + n^2 - 2n \cdot \cos \frac{\theta}{2}\right)^2}.$$

Проинтегрируем по h в пределах от 0 до H (завеса радиусом H):

$$E_2 = \frac{J_0 \cdot m \cdot \pi r^2 \cdot t \cdot n^2 \cdot l}{2} \times \int_0^H \frac{\left(\cos \frac{\theta}{2} - n\right) \cdot \left(1 - n \cdot \cos \frac{\theta}{2}\right)}{\cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 + n^2 - 2n \cdot \cos \frac{\theta}{2}\right)^2} \cdot \frac{T(\theta) \cdot h \cdot dh}{\left(h^2 + d^2\right) \cdot \left(h^2 + l^2\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (9)$$

Определим коэффициент экранирования как отношение энергетических освещенностей при наличии водяной завесы и без нее:

$$\eta = \frac{E_1 + E_2}{E_0}. \quad (10)$$

Учитывая (1), (2) и (9), найдем:

$$\eta = 1 - m \cdot \pi r^2 t + \frac{m \cdot \pi r^2 \cdot t \cdot n^2 \cdot l \cdot (d + l)^2}{2} \times \int_0^H \frac{\left(\cos \frac{\theta}{2} - n\right) \cdot \left(1 - n \cdot \cos \frac{\theta}{2}\right)}{\cos \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 + n^2 - 2n \cdot \cos \frac{\theta}{2}\right)^2} \cdot \frac{T(\theta) \cdot h \cdot dh}{\left(h^2 + d^2\right) \cdot \left(h^2 + l^2\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (11)$$

4. Численные расчеты и графические зависимости

Построение графических зависимостей коэффициента экранирования от размера завесы (радиус H) согласно полученному выше соотношению (11) осуществлялось с применением пакета прикладных программ Mathcad 11. В качестве параметров для построения графиков задавались расстояния от очага пожара до завесы (параметр d) и от завесы до защищаемого объекта (параметр l). Коэффициент рассеяния для определенности был принят равным $k = m \cdot \pi r^2 t = 0,9$.

Полученные результаты представлены на рисунке 2, где кривой 1 (сплошная линия) представлена зависимость для значений параметров $d = 1$ м, $l = 1$ м; кривой 2 (пунктир) – для $d = 2$ м, $l = 2,5$ м; кривой 3 (штрихи) – для $d = 3$ м, $l = 4$ м. Интервал изменения аргумента во время вычислений составлял $0 < h < 3$ м.

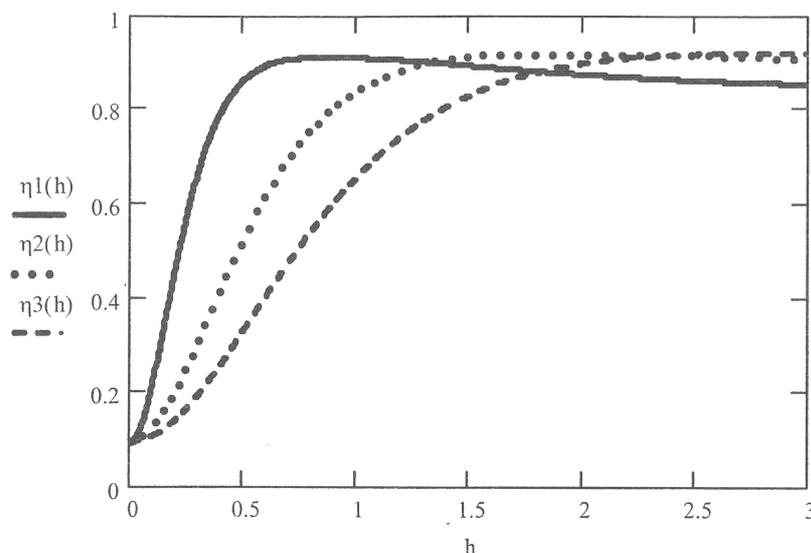


Рисунок 2

При сравнении данных результатов с полученными ранее в приближении изотропного рассеяния [4] обращает на себя внимание тот факт, что так же, как и в [4], экранирование является наиболее эффективным при минимальных размерах водяной завесы. При этом, в отличие от [4], при увеличении размеров завесы коэффициент экранирования приближается к 1, тогда как по расчетам в модели [4] он не превышал 0,5. Это можно объяснить отсутствием рассеяния в обратном направлении при 1-кратном рассеянии, тогда как при изотропном рассеянии для половины излучения проекция направления лучей на ось АВ изменяется на обратную.

5. Выводы

Экранирование лучистого теплового потока с помощью водяной завесы связано с отклонением теплового излучения от начального направления распространения вследствие его рассеяния каплями воды. Представленные в данной работе результаты расчетов и графические зависимости позволяют сделать практические выводы относительно количественных характеристик этого процесса:

1. В случае, когда доминирующим является 1-кратное рассеяние лучей (при условии $k = m \cdot \pi r^2 t < 1$), водяная завеса может быть эффективной лишь для компактного очага пожара.
2. Размер завесы должен быть минимально возможным для обеспечения достаточного размера тепловой «тени», созданной завесой, которая должна перекрыть защищаемый объект.

3. В случае большой по размеру водяной завесы коэффициент экранирования при 1-кратном рассеянии лучей близок к 1.

В случае многократного рассеяния экранирующее действие водяной завесы может быть рассчитано на основе характеристик 1-кратного рассеяния как следующий этап исследования в результате применения статистических методов анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов, А.Г. Екранування теплового випромінювання за допомогою водяної завіси / А.Г. Виноградов, Ю.Ю. Дендаренко // Пожежна безпека – 2001: матеріали конференції. – Львів, 2001. – С. 291–293.
2. Башкирцев, М.П. Основы пожарной теплофизики / М. П. Башкирцев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1984. – 200 с.
3. Теплопередача при пожаре / под ред. П. Блэкшира. – М.: Стройиздат, 1981. – 164 с.
4. Виноградов, А.Г. Екранування теплового випромінювання водяними завісами / А.Г. Виноградов // Промислова гідроліка і пневматика. – 2005. – № 3 (9). – С. 52–54.
5. Виноградов, А.Г. Розсіяння теплового випромінювання сферичними краплями води / А.Г. Виноградов // Вестн. Нац. техн. ун-та України «Киевский политехнический институт». Сер. «Машиностроение». – 2005. – № 47. – С. 51–54.

Поступила в редакцию 22 ноября 2006 г.