

ПОГЛОЩЕНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЯНОЙ СТРУЕ

Vynohradov A.

Fire Safety Academy named after Chernobyl Heroes, Cherkasy, Ukraine (e-mail: vin_ag@mail.ru)

ABSORPTION OF THE RADIANT HEAT FLUX IN THE SPRAYED WATER JET

Теоретически рассмотрен процесс прохождения через водяную завесу электромагнитного излучения ближнего инфракрасного диапазона, которое соответствует тепловому излучению абсолютно черного тела при типичных температурах очага пожара (800 К – 1800 К). Найдена функция регрессии для зависимости коэффициента пропускания сферической капли воды от диаметра капли и от температуры очага пожара. Выведена расчетная формула для коэффициента пропускания водяной завесы, выполнены соответствующие расчеты и построены графические зависимости данного коэффициента от параметров водяной завесы.

Ключевые слова: водяная завеса, поглощение излучения, коэффициент пропускания, численные расчеты.

Введение

Данная работа является логическим продолжением предыдущего исследования, представленного в работе [1] (статья готовится к опубликованию). Полученные в [1] результаты (численные расчеты коэффициента пропускания сферической каплей воды лучистого теплового потока) позволяют на их основе выполнить соответствующие расчеты для водяной завесы в целом.

Водяные завесы применяются как профилактическое противопожарное средство при необходимости создания препятствия на пути распространения возможного пожара в случае его возникновения в объектах и помещениях (вокзалы, театры, торговые залы и т.п.), где невозможно установить стационарные противопожарные стенки. Кроме противопожарной функции, водяная завеса должна выполнить также защитную функцию, снижая действие опасных факторов пожара на людей и материальные ценности (ослабление лучистого и конвективного тепловых потоков, осаждение дыма и вредных продуктов горения, охлаждение воздуха и твердых поверхностей). Водяные завесы получают как с помощью стационарных устройств (дренчерные системы, срабатывающие от датчиков пожарной сигнализации), так и с помощью пожарных стволов и насадок специальных конструкций, используемых подразделениями пожарной охраны во время тушения пожаров [2, 3].

В работе рассмотрена важнейшая из названных выше функций водяных завес – экранирование лучистого теплового потока. Для реализации данной функции с наибольшей эффективностью необходимо иметь соответствующие данные о том, какие параметры водяной завесы и в какой степени оказывают влияние на ее экранирующие свойства. Для принятия решения об использовании данного средства защиты необходимо также знать, способно ли оно в принципе обеспечить достаточно эффективное тепловое экранирование в условиях реальных пожаров. К сожалению, имеющиеся в литературе сведения на эту тему не позволяют дать однозначный ответ на этот вопрос. Поскольку проблема является весьма актуальной, такие исследования (экспериментальные и теоретические) были выполнены различными авторами (см., например, [4 – 8]), но к настоящему времени ответ на практические вопросы пока не найден. Представленные в названных работах результаты исследований носят, в основном, академический характер без их применения к конкретным параметрам реальных систем для создания водяных завес. В частности, расчеты коэффициентов пропускания, а также результаты их экспериментальных измерений представлены в виде спектральных зависимостей от длины волны излучения. Интегральные характеристики, на основе которых можно определить количественные параметры экранирования общего лучистого теплового потока, в упомянутых работах не определены.

Целью данной работы является создание математической модели на основе результатов работы [1], которая позволит выполнять расчеты параметров эффективности экранирования с помощью водяной завесы лучистого теплового потока от типичного очага пожара. Кроме того, расчетные формулы должны обеспечить возможность качественного анализа зависимости эффективности экранирования от параметров водяной завесы с целью их оптимизации. Чтобы избежать чрезмерного усложнения математической модели, в данной работе рассматриваются монодисперсные водяные завесы.

Постановка задачи

Используя ранее полученные результаты расчетов коэффициентов пропускания сферическими каплями воды теплового излучения, построить соответствующую математическую модель и выполнить количественные расчеты коэффициентов пропускания для монодисперсных распыленных водяных струй плоской формы (водяных завес). По результатам расчетов построить графические зависимости коэффициентов пропускания от основных параметров водяных завес, проанализировать эти зависимости и сделать выводы относительно возможных методов повышения эффективности экранирования с их помощью лучистых тепловых потоков. В качестве первичного излучения используется электромагнитное излучение ближнего инфракрасного диапазона, которое соответствует тепловому излучению абсолютно черного тела при типичных температурах очага пожара (800 К – 1800 К).

Взаимодействие излучения с водяной завесой

Параллельный пучок электромагнитного излучения, направленный на сферическую каплю, рассеивается ею различными способами [9]. Часть излучения, прошедшего вне контуров капли, отклоняется вследствие дифракции, другая часть, направленная на каплю, отражается от внешней поверхности, третья часть проходит насквозь, как сквозь линзу, испытывая два преломления и частично поглощаясь веществом (водой). Необходимо учитывать также ту часть излучения, которая при прохождении через водяную завесу не приближается ни к одной капле на расстояние, достаточное для взаимодействия с ней, и потому проходит через завесу свободно. Для прозрачных капель следует учитывать и компоненты с более сложными траекториями лучей внутри капли (преломление, одно или несколько внутренних отражений и выход наружу с еще одним преломлением). Но для поглощающих капель, рассматриваемых в данном случае, последними компонентами можно пренебречь, поскольку их относительная доля в общем энергетическом потоке близка к нулю.

В связи с этим, первичный энергетический поток \tilde{W}_1 излучения, падающего из некоторого источника (очага пожара) на водяную завесу, делится в результате взаимодействия с ней на несколько компонент (рис. 1):

$$\tilde{W}_1 = \tilde{W}_{tr} + \tilde{W}_{dif} + \tilde{W}_{refl} + \tilde{W}_{out} + \tilde{W}_{abs}, \quad (1)$$

где \tilde{W}_{tr} – энергетический поток, прошедший без взаимодействия с каплями; \tilde{W}_{dif} , \tilde{W}_{refl} , \tilde{W}_{out} – энергетические потоки, рассеянные каплями, соответственно, вследствие дифракции, отражения и преломления; \tilde{W}_{abs} – энергетический поток, поглощенный каплями. (Прим. Обозначения величин в данной работе соответствуют обозначениям в [1], при этом обозначение с «волной» над буквой соответствует некоторой величине для всей водяной завесы в целом, а без «волны» – той же самой величине для отдельной капли).

На рис. 1 схематически показаны лучи, соответствующие каждому из названных энергетических потоков, на примере их взаимодействия с одной из капель водяной завесы.

Следует иметь в виду, что дифракционная составляющая W_{dif} для крупных капель практически не

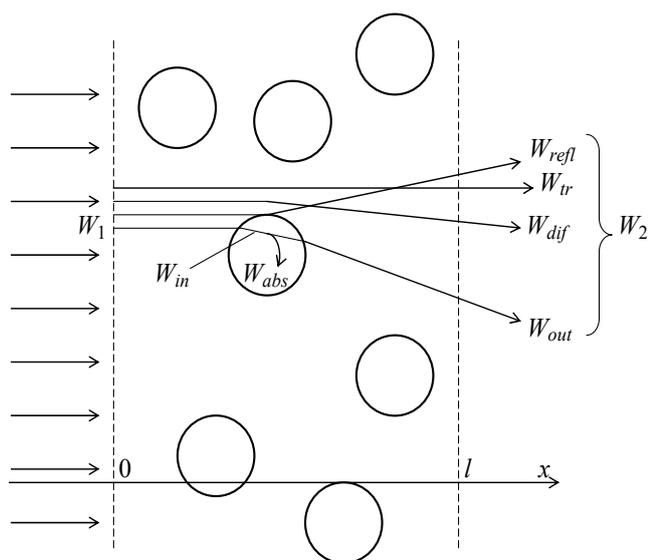


Рис. 1. Схема взаимодействия теплового излучения с водяной завесой

изменяет направление распространения лучей, а потому при расчете экранирующих свойств РВС ее можно учитывать в сумме с невзаимодействующей компонентой W_{tr} . Для примера на рис. 2 приведена индикатриса рассеяния дифракционной компоненты излучения для сферической частицы с соотношением d/λ около 20 (d – диаметр капли, λ – длина волны излучения) [9]. Для более крупных капель индикатриса является еще более узкой и, таким образом, капля практически не отклоняет это излучение от начального направления.

Отражение от внешней поверхности капель (поток W_{refl}) также не отклоняет лучи существенно от начального направления, поскольку индикатриса рассеяния за счет отражения также является сильно вытянутой вперед и весьма узкой (хотя и гораздо шире, чем дифракционная компонента). Ее расчет для показателя преломления воды $n = 1,33$ [9, 10] позволил определить, что ее ширина по уровню 0,5 от максимума равна $\pm 14^\circ$ (рис. 3).

Примерно то-же самое можно сказать об энергетическом потоке W_{out} (излучение, проходящее сквозь каплю), индикатриса рассеяния которого лишь немногим шире, а именно $\pm 22^\circ$ (рис. 4) [9, 10].

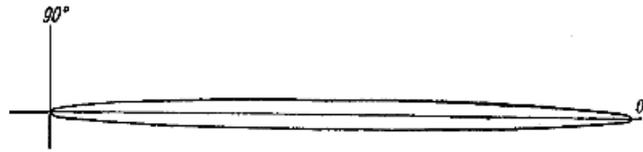


Рис. 2. Индикатриса дифракционного рассеяния излучения сферической частицей с $d/\lambda \approx 20$ [9]

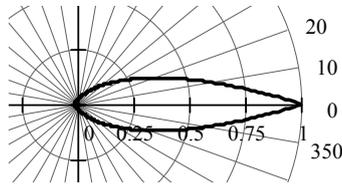


Рис. 3. Индикатриса рассеяния излучения сферической каплей за счет отражения [10]

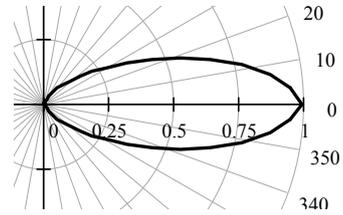


Рис. 4. Индикатриса рассеяния излучения прозрачной сферической каплей за счет преломления [10]

В случае многократного рассеяния излучения суммарная индикатриса отражения и преломления существенно расширяется, и некоторая часть излучения в этом случае рассеивается на угол более 90° . Это, безусловно, может повлиять на общий коэффициент экранирования водяной завесы, улучшив ее экранирующие свойства. Соответствующая численная оценка сделана в конце данной работы. Сначала сделаем расчет, исходя из условия, что кратность рассеяния излучения на каплях не превышает 1.

С учетом данного условия, при расчете коэффициента пропускания водяной завесы компоненты общего энергетического потока \tilde{W}_{refl} и \tilde{W}_{out} следует учитывать в составе излучения, проходящего сквозь завесу (они практически не содержат излучения с углами рассеяния больше 90°). Исходя из этого, коэффициент пропускания водяной завесы (отношение проходящего энергетического потока \tilde{W}_2 к падающему \tilde{W}_1) определяется следующим соотношением:

$$H = \frac{\tilde{W}_2}{\tilde{W}_1} = \frac{\tilde{W}_{tr} + \tilde{W}_{refl} + \tilde{W}_{out}}{\tilde{W}_1} = \frac{\tilde{W}_1 - \tilde{W}_{abs}}{\tilde{W}_1}. \quad (2)$$

Учитывая, что эффективные сечения потоков \tilde{W}_1 и \tilde{W}_2 равны друг другу (это, фактически, площадь водяной завесы S), для однородных по сечению потоков коэффициент пропускания водяной завесы можно представить через соответствующие интенсивности излучения:

$$H = \frac{\tilde{I}_2}{\tilde{I}_1} = \frac{\tilde{I}_{tr} + \tilde{I}_{refl} + \tilde{I}_{out}}{\tilde{I}_1}. \quad (3)$$

Для вывода общей формулы для коэффициента пропускания рассмотрим параллельный плоскости завесы тонкий слой толщиной dx , расположенный на глубине x (ось x перпендикулярна плоскости завесы (рис. 1)). Он содержит количество капель:

$$dN = n \cdot S \cdot dx.$$

где n – концентрация капель. Энергетический поток на этот слой равен:

$$\tilde{W}(x) = \tilde{I}(x) \cdot S.$$

где $\tilde{I}(x)$ – интенсивность излучения при координате x . При прохождении излучения через слой капли поглощают часть энергетического потока:

$$d\tilde{W}(x) = d\tilde{I}(x) \cdot S = -\tilde{I}(x) \cdot d\tilde{C}_{abs} = -\tilde{I}(x) \cdot C_{abs} \cdot dN = -\tilde{I}(x) \cdot C_{abs} \cdot n \cdot S \cdot dx, \quad (4)$$

где C_{abs} – сечение поглощения одной капли. Согласно [1], оно равно:

$$C_{abs} = 0,934 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot (1 - \eta), \quad (5)$$

где η – коэффициент пропускания капли.

Из (4) и (5) найдем:

$$\frac{d\tilde{I}(x)}{\tilde{I}(x)} = -0,934 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot n \cdot (1 - \eta) \cdot dx = -0,734 \cdot (1 - \eta) \cdot n \cdot d^2 \cdot dx.$$

После интегрирования от нуля до произвольной координаты x найдем:

$$\tilde{I}(x) = \tilde{I}_1 \cdot e^{-0,734 \cdot (1 - \eta) \cdot n \cdot d^2 \cdot x}. \quad (6)$$

Это соотношение соответствует закону Бугера-Ламберта-Бера [11, 12]

$$I = I_1 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (7)$$

с коэффициентом поглощения дисперсной среды:

$$\alpha = 0,734 \cdot (1 - \eta) \cdot n \cdot d^2. \quad (8)$$

Для $x = l$ (толщина завесы) из (6) получим:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_1 \cdot e^{-0,734 \cdot (1 - \eta) \cdot n \cdot d^2 \cdot l}. \quad (9)$$

Подставляя в (3), найдем коэффициент пропускания водяной завесы:

$$H = e^{-0,734 \cdot (1 - \eta) \cdot n \cdot d^2 \cdot l}. \quad (10)$$

Для определения H с помощью данной расчетной формулы необходимо задать численное значение коэффициента пропускания капли η . Для этого используем результаты расчетов η , полученные в работе [1].

Коэффициент пропускания сферической капли

В соответствии с [1], коэффициент пропускания капли η равен отношению энергетического потока излучения W_{out} , проходящего через объем капли и выходящего наружу, к энергетическому потоку излучения W_{in} , падающего на геометрический контур капли и проникающего в ее объем:

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}} = \frac{W_{out}}{W_{abs} + W_{out}}, \quad (11)$$

где W_{abs} – энергетический поток, поглощенный внутри капли. Выполненные в [1] расчеты η основаны на зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения в воде от длины волны, которая получена на основе экспериментальных измерений и не может быть представлена в виде аналитической зависимости. Вследствие этого расчеты η были выполнены методом численного интегрирования для отдельных фиксированных значений температуры очага пожара T и диаметра капель d . Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета η для различных значений T и d [1]

T, K $d, мм$	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
0,05	0,204	0,236	0,272	0,311	0,352	0,393	0,432	0,470	0,506	0,538	0,568	0,595
0,1	0,090	0,121	0,157	0,197	0,239	0,282	0,325	0,366	0,404	0,440	0,473	0,504
0,2	0,036	0,058	0,087	0,121	0,158	0,197	0,237	0,275	0,313	0,348	0,381	0,411
0,5	0,012	0,024	0,041	0,062	0,087	0,115	0,144	0,175	0,205	0,234	0,263	0,290
1	0,005	0,011	0,020	0,033	0,049	0,067	0,088	0,110	0,132	0,155	0,178	0,200

Табличная форма представления может быть использована для расчетов коэффициента пропускания водяной завесы в каждом конкретном случае, когда заданы соответствующие параметры расчета. Но она является неудобной для анализа зависимости экранирующих свойств водяной завесы от этих параметров с целью их оптимизации, поскольку в этом случае необходимо иметь функцию в аналитическом виде. В связи с этим, для данной зависимости необходимо найти соответствующую функцию аппроксимации.

С этой целью массив данных, представленный в табл. 1, был обработан с помощью пакета MathCAD, и для зависимостей $\eta(d)$ (для которых T является параметром) были определены функции регрессии в виде:

$$\eta = a \cdot d^b + c. \quad (12)$$

Для каждого значения T из представленных в табл. 1 были определены значения коэффициентов a , b и c (см. табл. 2). Графики полученных функций регрессии представлены на рис. 5 (линии), и здесь же представлены расчетные значения η из табл. 1 (точки). С целью упрощения расчетов значения температур были взяты с интервалом 200 К.

Таблица 2

Коэффициенты функций регрессии зависимостей $\eta(d)$ для различных значений T

T, K	a	b	c
800	0,000032	-0,90	-0,006
1000	0,00075	-0,614	-0,019
1200	0,012	-0,373	-0,090
1400	0,097	-0,209	-0,303
1600	0,657	-0,091	-1,076
1800	3,95	-0,027	-4,55

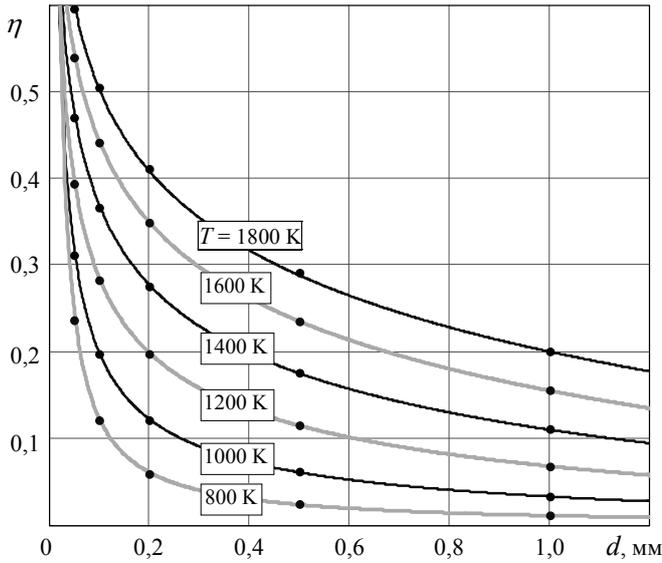


Рис. 5. Графики функций регрессии для расчетных значений коэффициента пропускания капли

В то же время, необходимо иметь в виду, что последовательное применение двух регрессионных обработок данных может привести к довольно сильному (до 30%) отклонению от исходного массива данных (табл.1). Но рассматриваемая модель не претендует на высокую точность результатов расчетов, учитывая изначально заложенные упрощения (источник излучения в виде абсолютно черного тела, монодисперсная однородная по концентрации завеса и т.д.). Главной задачей данной модели является обеспечение возможности оценочных расчетов и анализа основных зависимостей экранирующих свойств от ее параметров.

Таким образом, общая функция регрессии для коэффициента пропускания сферической капли воды в зависимости от диаметра и температуры $\eta(d, T)$ задана совокупностью уравнений (12) – (15).

Для расчета коэффициента пропускания водяной завесы H эту функцию необходимо подставить в полученную ранее расчетную формулу (10):

$$H = \exp\{-0,734 \cdot [1 - \eta(d, T)] \cdot n \cdot d^2 \cdot l\}. \quad (16)$$

Исходя из вида данной формулы, коэффициент H зависит от 4 параметров: диаметра d и концентрации n капель, толщины завесы l и температуры очага пожара T . При заданном расходе воды первые три параметра являются взаимозависимыми. Поэтому важным является вопрос о наиболее рациональных значениях этих величин с точки зрения практического применения водяных завес для теплового экранирования.

Зависимость коэффициента пропускания от параметров водяной завесы

Для определения взаимной зависимости параметров n , d и l запишем достаточно очевидное уравнение (сохранение объема воды):

$$Q = n \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot l \cdot h \cdot v, \quad (17)$$

Чтобы далее получить единую функцию регрессии для всех значений температуры, зависимость каждого из представленных в табл. 2 коэффициентов также была обработана подобным образом и для каждого коэффициента была найдена функция регрессии его зависимости от температуры. Эти функции представлены следующими формулами:

$$a = 0,85 \cdot \left(\frac{T}{1630} + 6 \cdot 10^{-3} \right)^{14,5}; \quad (13)$$

$$b = -4 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,2; \quad (14)$$

$$c = -2,5 \cdot 10^2 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot T - 5. \quad (15)$$

На рис. 6 представлены построенные по уравнениям (13) – (15) графики функций регрессии каждого из коэффициентов (линии) и их расчетные значения из табл. 2 (точки). Сравнение положений точек и графиков убеждает в том, что они достаточно близки для того, чтобы полученные функции можно было использовать для анализа соответствующих зависимостей.

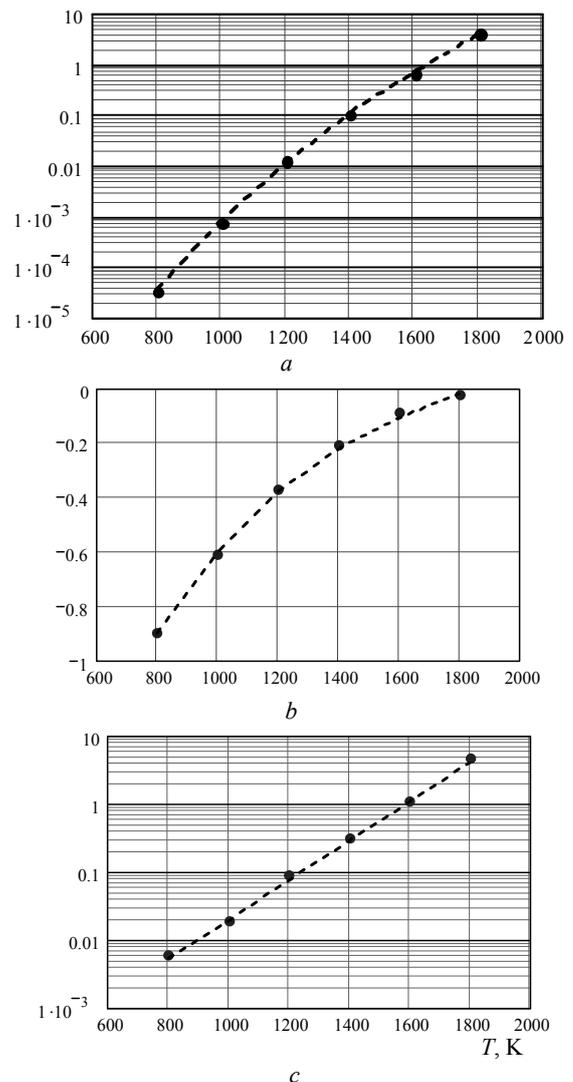


Рис. 6. Зависимости коэффициентов регрессии a , b и c от температуры

где Q – объемный расход воды, l и h – размеры некоторого сечения завесы (l – толщина, h – ширина), v – средняя скорость капель в этом сечении.

Принимая в качестве v установившуюся скорость падения капель в воздухе v_y , учтем приближенную теоретическую зависимость (на основе данных [13]):

$$v_y \approx K \cdot d, \quad (18)$$

где для интервала $0,2 \text{ мм} < d < 1 \text{ мм}$ $K \approx 4 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. С учетом (18), из (17) найдем:

$$n \approx \frac{6 \cdot Q}{\pi \cdot K \cdot d^4 \cdot l \cdot h}. \quad (19)$$

Подставляя это выражение в (16), получим:

$$H = \exp \left\{ -0,734 \cdot [1 - \eta(d, T)] \cdot \frac{6 \cdot Q}{\pi \cdot K \cdot d^2 \cdot h} \right\}, \quad (20)$$

или, после подстановки численных значений:

$$H \approx \exp \left\{ -3,5 \cdot 10^{-4} \cdot [1 - \eta(d, T)] \cdot \frac{Q}{d^2 \cdot h} \right\}, \quad (21)$$

Результаты количественных расчетов по формуле (21) с использованием найденной выше функции $\eta(d, T)$ (см. (12) – (15)) представлены на рис. 7 в виде графических зависимостей $H(d)$ и $H(Q)$ для заданных типичных значений других параметров.

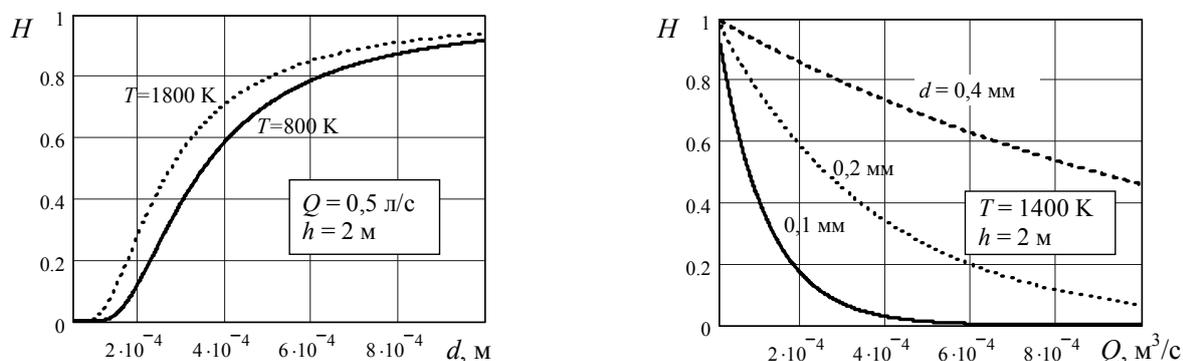


Рис. 7. Графики зависимостей коэффициента пропускания водяной завесы от диаметра капель (слева) и расхода воды (справа) для указанных на рисунке значений параметров

Наиболее важным результатом, полученным при анализе данных графиков и вида функции (21), является сильная зависимость коэффициента пропускания от среднего диаметра капель (от степени дисперсности распыла струи). С уменьшением d коэффициент пропускания H быстро уменьшается (эффективность экранирования возрастает). Как следует из вида формулы (21), эта тенденция отчасти компенсируется возрастанием коэффициента пропускания капли η , но лишь в небольшой степени.

Из представленных на рис. 7 графиков, в частности, следует, что типичные для дренчерных установок режимы крупнокапельного распыла ($d \sim 0,5 - 1 \text{ мм}$) являются малоэффективными для решения задач теплового экранирования (тепловой поток уменьшается не более чем на 25%). В то же время, уменьшение среднего диаметра капель до $0,2 \text{ мм}$ и ниже позволяет получить многократное ослабление лучистого теплового потока при сравнительно небольшом расходе воды.

Температура очага пожара, как следует из представленных графиков, очень слабо влияет на общий коэффициент пропускания водяной завесы, несмотря на то, что ее влияние на коэффициент пропускания отдельной капли является достаточно сильным (см. рис. 5). Таким образом, коэффициент пропускания завесы от формы спектра первичного излучения зависит в малой степени. Это позволяет сделать вывод о том, что упрощение данной модели, выразившееся в использовании в качестве источника излучения абсолютно черного тела, не привело к существенному искажению полученных результатов по сравнению с экранированием излучения реальных пожаров.

Расчетные формулы (16) и (21) получены для условия, когда все рассеянное излучение направлено вперед, и процесс рассеяния не влияет на коэффициент экранирования. Это справедливо для 1-2-кратного рассеяния, при котором, как отмечено выше, вследствие острой направленности индикатрис рассеяния не происходит сильного отклонения лучей от начального направления. Но для рассеяний большей кратности становится возможным отклонение лучей на углы более 90° , что приведет к уменьшению коэффициента пропускания водяной завесы.

Таким образом, выполненные выше расчеты, по сути, устанавливают верхний предел для коэффициента пропускания, тогда как для реальных завес он должен быть несколько ниже вследствие влияния процесса рассеяния лучей на каплях воды. Этот эффект должен проявляться в том случае, когда толщина завесы существенно (на порядок или более) превышает среднюю длину свободного пробега луча θ внутри водяной завесы.

Для оценки средней длины свободного пробега луча воспользуемся известной формулой $\theta = 1/n C_{sca}$, где $C_{sca} = \pi d^2/4$ – сечение рассеяния капли. Подставляя (19), получим:

$$\theta = \frac{2 \cdot K \cdot d^2 \cdot l \cdot h}{3 \cdot Q} \quad (22)$$

Тогда для параметров рис. 7 при $l = 1$ м получим для различных значений среднего диаметра капель следующие величины средней длины свободного пробега луча (22) и соответствующие им концентрации капель (19) (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета средней длины свободного пробега луча и концентрации капель для различных значений диаметра капель

d , мм	0,1	0,2	0,4
θ , м	0,1	0,4	1,7
n , м ⁻³	$1,2 \cdot 10^9$	$7,5 \cdot 10^7$	$4,7 \cdot 10^6$

Итак, в данном случае условие $l \gg \theta$ выполняется для $d < 0,1$ мм. Таким образом, для заданных типичных параметров существенное влияние процесса рассеяния излучения на каплях на коэффициент пропускания завесы имеет место для среднего диаметра капель ниже 0,1 мм. Это необходимо учесть, если понадобится создание более точной математической модели данного процесса.

Выводы

Выполнено математическое моделирование процесса прохождения теплового электромагнитного излучения от очага пожара через распыленную водяную струю плоской формы (водяную завесу). В основу модели положены полученные ранее результаты расчетов спектров пропускания сферическими каплями воды теплового излучения от абсолютно черного тела. С этой целью выполнена статистическая обработка полученного ранее массива данных (зависимость коэффициента пропускания сферической капли от ее диаметра и от температуры источника излучения) и найдена соответствующая функция регрессии. Выведена расчетная формула для коэффициента пропускания водяной завесы, выполнены соответствующие расчеты и построены графические зависимости данного коэффициента от параметров водяной завесы.

На основании полученных численных результатов и графических зависимостей сделан вывод о необходимости применения мелкодисперсного распыления воды для получения заметного эффекта теплового экранирования. Верхним пределом среднего диаметра капель для типичных систем создания водяных завес следует считать 0,2 – 0,25 мм.

Дальнейшим развитием работы будет усовершенствование данной модели с целью анализа теплового экранирования водяными завесами с более сложным характером движения капель. Кроме того, необходимо учесть влияние процессов рассеяния излучения на каплях на общий коэффициент пропускания водяной завесы.

Анотація. Теоретично розглянутий процес проходження через водяну завісу електромагнітного випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону, яке відповідає тепловому випромінюванню абсолютно чорного тіла при типових температурах осередку пожежі (800 К – 1800 К). Знайдена функція регресії для залежності коефіцієнта пропускання сферичної краплі води від діаметру краплі і від температури осередку пожежі. Виведена розрахункова формула для коефіцієнта пропускання водяної завіси, виконані відповідні розрахунки і побудовані графічні залежності цього коефіцієнта від параметрів водяної завіси.

Ключові слова: водяна завіса, поглинання випромінювання, коефіцієнт пропускання, чисельні розрахунки.

Abstract. Purpose. Performance of calculations which will allow to draw the quantitative conclusions on effectiveness of shielding by means of water curtains of thermal radiation from the typical seat of fire. Results of the calculations should give information on influence of parameters of radiation and droplets on the factor of shielding.

Methodology. Function of regression for dependence of a transmittance of water spherical droplet on its diameter and on temperature of the seat of fire is found. On the basis of this function the mathematical model of passing through a water curtain of an electromagnetic radiation of a near infra-red range which corresponds to thermal radiation of absolutely black body at typical temperatures of the seat of fire (800 K – 1800 K) is constructed.

Findings. Calculated formula for a transmittance through a water curtain of a radiant heat flux; graphic dependences of a transmittance from parameters of a water curtain.

Application of results. Optimization of the radiant heat flux attenuation by means of a water spray curtain during a fire suppression.

Keywords: water curtain, radiation absorption, transmittance, numerical calculations.

1. *Виноградов А.Г.* Поглощение лучистого теплового потока в сферической капле воды / А.Г. Виноградов // Тезисы докладов XVII Международной научно-технической конференции «Гидроаэромеханика в инженерной практике – 2012». – Киев-Черкассы, 2012. – с. 17.
2. *Жаров А.* Дренчерные завесы: теория и практика [Электронный ресурс] / А. Жаров, А. Зархин, М. Митрофанова // БДИ, 2006. – № 5 (68). – с. 24-28. – Режим доступа к журн.: <http://mx1.algoritm.org/arch/?id=22&a=547>
3. *Цариченко С.Г.* Проблемы использования тонкораспыленной воды в автоматических установках пожаротушения [Электронный ресурс] / С.Г. Цариченко // Алгоритм безопасности, 2005. – № 5. – С. 28-30. – Режим доступа к журн.: http://www.algoritm.org/arch/05_5/05_5_12.pdf
4. *Yang W.* The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression / W. Yang, T. Parker, H. Ladouceur, R. Kee // Fire Safety J., 2004. – Volume 39. – pp. 41–66.
5. *Buchlin J.-M.* Thermal shielding by water spray curtain [Электронный ресурс] / J.-M. Buchlin // J. Loss Prev. Process Industries, 2005. – vol. 18. – no. 4-6. – pp. 423–432. – Режим доступа к журн.: <http://www.iitk.ac.in/che/jpg/papersb/full%20papers/B-%2071.pdf>
6. *Boulet P.* Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source [Электронный ресурс] / P. Boulet, A. Collin, G. Parent // Fire Safety J., 2006. – 41(1). – pp. 15–30. – Режим доступа к журн.: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/11/37/28/PDF/Boulet2006.pdf>
7. *Collin A.* Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield / A. Collin, S. Lechene, P. Boulet, G. Parent // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2010. – Volume 57. – pp. 537-553.
8. *Benbrik A.* Contribution to Fire Protection of the LNG Storage Tank Using Water Curtain / A. Benbrik, M. Cherifi, S. Meftah, M.S. Khelifi, K. Sahnoune // Int. J. of Thermal & Environmental Engineering, 2011. – Volume 2. – No. 2. – pp. 91-98.
9. *Шифрин К.С.* Рассеяние света в мутной среде / К.С. Шифрин. – М.: Гостехиздат, 1951. – 288 с.
10. *Виноградов А.Г.* Розсіяння теплового випромінювання сферичними краплями води / А.Г. Виноградов // Вестник Национального технического университета Украины «Київський політехнічний інститут», сер. Машиностроение. – 2005. – №47. – с. 51-54.
11. *Борен К.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
12. *Райст П.* Аэрозоли. Введение в теорию / П. Райст. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
13. *Виноградов А.Г.* Математичне моделювання вільного падіння сферичної водяної краплі в повітряному середовищі / А.Г. Виноградов, Є.О. Гаєв // Пожежна безпека: теорія і практика: Збірник наукових праць. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – № 9. – с. 22-32.

REFERENCES

1. *Vinogradov A.G.* Pogloshhenie luchistogo teplovogo potoka v sfericheskoy kaple vody (Absorption of a radiant thermal stream in a spherical water droplet), Tezisy dokladov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Gidraeromehanika v inzhenernoj praktike – 2012». Kyiv-Cherkassy, 2012. p. 17.
2. *Zharov A., Zarhin A., Mitrofanova M.* Drencher curtains: theory and practice), BDI, 2006, no 5 (68), pp. 24-28. Method of access to the magazine: <http://mx1.algoritm.org/arch/?id=22&a=547>
3. *Carichenko S.G.* Problemy ispol'zovaniya tonkoraspylennoj vody v avtomaticheskikh ustanovkakh pozharotusheniya (Problems of use of the finely sprayed water in automatic installations of a firefighting). Algoritm bezopasnosti, 2005, no 5, pp. 28-30. Method of access to the magazine: http://www.algoritm.org/arch/05_5/05_5_12.pdf
4. *Yang W., Parker T., Ladouceur H. D., Kee R. J.* The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression. Fire Safety Journal, Volume 39, Issue 1, February 2004, pp. 41–66.
5. *Buchlin J.-M.* Thermal shielding by water spray curtain, J. Loss Prev. Process Industries, 2005, vol. 18, no. 4-6, pp. 423–432. Method of access to the magazine: <http://www.iitk.ac.in/che/jpg/papersb/full%20papers/B-%2071.pdf>
6. *Boulet P., Collin A., Parent G.* Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source. Fire Safety J., 2006, 41(1), pp. 15–30. Method of access to the magazine: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/11/37/28/PDF/Boulet2006.pdf>
7. *Collin A., Lechene S., Boulet P., Parent G.* Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2010, vol. 57, pp. 537-553.
8. *Benbrik A., Cherifi M., Meftah S., Khelifi M.S., Sahnoune K.* Contribution to Fire Protection of the LNG Storage Tank Using Water Curtain. Int. J. of Thermal & Environmental Engineering, 2011, Volume 2, No. 2, pp. 91-98.
9. *Shifrin K.S.* Rassejanie sveta v mutnoj srede (Light scattering in a turbid medium). Moscow: Gostehizdat, 1951, 288 p.
10. *Vynogradov A.G.* Rozsijannja teplovogo vyprominjuvannja sferychnymy krapljamy vody (Scattering of thermal radiation by spherical water droplets), Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”, 2005, no 47, pp. 51-54.
11. *Bohren, C.F. & Huffman, D.R.* Absorption and scattering of light by small particles. New York, NY: John Wiley & Sons, 1983, 530 p.
12. *Reist P.C.* Introduction to Aerosol Science. New York: Macmillan, 1984, 299 p.
13. *Vynogradov A.G., Gajev Je.O.* Matematychno modeljuvannja vil'nogo padinnja sferychnoi' vodjanoi' krapli v povitrjanomu seredovyshhi (Mathematical model operation of free fall of a spherical water droplet in the air environment), Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka: Zbirnyk naukovykh prac'. Cherkasy: APB im. Geroi'v Chornobylya, 2011, no.9, pp. 22-32.