

А.Г. Виноградов, канд. физ.-мат. наук

Академия пожарной безопасности им. Героев Чернобыля, Черкассы, Украина

ПОГЛОЩЕНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В СФЕРИЧЕСКОЙ КАПЛЕ ВОДЫ

ABSORPTION OF THE RADIANT HEAT FLUX IN THE SPHERICAL WATER DROPLET

Введение

Вопросы, связанные с использованием распыленных водяных струй (РВС) в качестве тепловых экранов в зоне пожара, с течением времени приобретают все большую актуальность. Распыленная вода различной степени дисперсности стала более доступной и популярной, что связано и с новыми техническими возможностями, с возросшими экологическими требованиями, с прогрессом в тактике тушения пожаров. Все большее распространение получают дренчерные водяные завесы как средство предотвращения распространения пожара, а также обеспечения безопасных условий для эвакуации людей из горящих помещений [1]. РВС получают также и с помощью пожарных стволов и насадок специальных конструкций, а также разнообразных автоматических установок, которые используют как для тушения пожаров, так и для защиты от тепловых потоков (теплого экранирования) [2, 3].

В связи с этим возникают вопросы об эффективности данного средства в качестве теплового экрана, о целесообразности его использования в тех или иных ситуациях, о пределах его возможностей и, наконец, о выборе наиболее оптимальных режимов его эксплуатации. К сожалению, имеющиеся в литературе сведения на эту тему являются довольно скудными и зачастую противоречивыми [4–6]. В частности, практически отсутствует достоверная информация как экспериментального, так и теоретического характера о коэффициенте экранирования лучистого теплового потока с помощью распыленной воды. Неосвоенным остается и вопрос об относительной роли процессов рассеяния и поглощения теплового излучения каплями воды в общем процессе теплового экранирования.

Целью данной работы является выполнение расчетов, которые позволят сделать количественные выводы о процессе поглощения в сферических каплях воды инфракрасного излучения от типичного очага пожара. Кроме того, результаты расчетов должны дать качественную информацию о влиянии параметров излучения и капель на коэффициент экранирования теплового излучения с помощью РВС.

Постановка задачи

Необходимо выполнить расчеты спектральных распределений интенсивности излучения, прошедшего через каплю, для различных температур источника теплового излучения и для различных размеров капли. Также

необходимо рассчитать зависимости интегральных тепловых потоков прошедшего излучения от указанных параметров с целью определения коэффициента экранирования. В качестве первичного излучения используется электромагнитное излучение ближнего инфракрасного диапазона, которое соответствует тепловому излучению абсолютно черного тела при типичных температурах очага пожара (700–1800 °К).

Взаимодействие излучения с каплей

При прохождении электромагнитной волны через однородное вещество она постепенно затухает при увеличении пройденного пути x (закон Бугера–Ламберта–Бера) [7, 8]:

$$I = I_1 \cdot e^{-\alpha_\lambda x}, \quad (1)$$

где I — текущая интенсивность, Bm/m^2 , I_1 — начальное значение интенсивности, α_λ — коэффициент поглощения, m^{-1} , зависимый от длины волны λ .

Оптические свойства вещества (включая его способность поглощать электромагнитное излучение) определяются его комплексным показателем преломления $m = n + ik$, где n — показатель преломления, k — показатель поглощения, каждый из которых имеет сложную зависимость от длины волны.

Коэффициент поглощения α_λ связан с показателем поглощения k соотношением [7]:

$$\alpha_\lambda = 4\pi k / \lambda. \quad (2)$$

В данной работе для получения достаточно подробной зависимости α_λ от длины волны была использована зависимость $k(\lambda)$, представленная в [9] в табличном виде. На основании этих данных с помощью формулы (2) была получена таблица значений α_λ . Соответствующий график представлен на рисунке 1, где значения α_λ вдоль вертикальной оси отложены в логарифмическом масштабе.

Из данной зависимости следует, что в весьма узком интервале длин волн (от 0,5 мкм до 3 мкм) зависимость коэффициента поглощения от длины волны является очень сильной, изменение его величины на этом интервале достигает почти 8 порядков. Вследствие этого излучение поглощается водой избирательно, в зависимости от его длины волны.

При прохождении электромагнитной волны через дисперсную среду (каковой, в частности, является вода, распыленная в воздухе) вместо соотношения (1) следу-

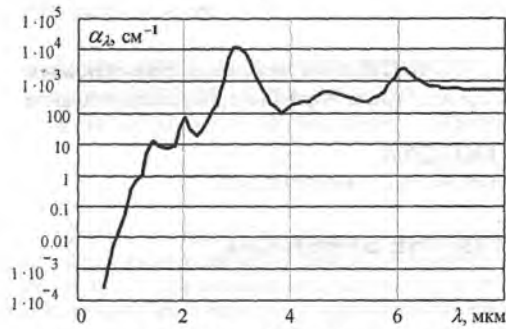


Рисунок 1 — Схема взаимодействия теплового излучения с каплей воды

ет применять подобную формулу [7, 8, 10]

$$I = I_1 \cdot e^{-\alpha_{ext} x}, \quad (3)$$

где α_{ext} — коэффициент экстинкции, m^{-1} ,

$$\alpha_{ext} = N(C_{abs} + C_{sca}) = N C_{ext}, \quad (4)$$

где N — счетная концентрация капель (количество капель в единице объема), m^{-3} , C_{abs} , C_{sca} и C_{ext} — эффективные сечения, соответственно, поглощения, рассеяния и экстинкции для отдельной капли.

Энергетический поток излучения, взаимодействующего с каплей, делится в результате этого взаимодействия на несколько компонент (рисунок 2)

$$W_1 = W_{dif} + W_{refl} + W_{out} + W_{abs}, \quad (5)$$

где W_{dif} , W_{refl} , W_{out} — энергетические потоки, рассеянные, соответственно, вследствие дифракции, отражения и преломления, а W_{abs} — энергетический поток, поглощенный каплей. Следует иметь в виду, что дифракционная составляющая W_{dif} для крупных капель практически не изменяет направление распространения лучей [11, 12], а потому при расчете экранирующих свойств РВС ее можно не учитывать.

Каждый энергетический поток W связан с соответствующей интенсивностью излучения I соотношением $W = IC$, где C — эффективное сечение данного потока. Сечение рассеяния C_{sca} можно представить как сумму сечений, которые соответствуют рассеяниям вследствие дифракции, отражения и преломления,

$$C_{sca} = C_{dif} + C_{refl} + C_{out}.$$

Известно, что для больших капель диаметром $d \gg \lambda$ [10–12]:

$$C_{ext} = 2\pi d^2/4, \quad C_{dif} = \pi d^2/4.$$

Таким образом,

$$C_{abs} + C_{refl} + C_{out} = \pi d^2/4. \quad (6)$$

Расчет в приближении геометрической оптики для сферических капель позволил найти [12]

$$C_{refl} = 0,066\pi d^2/4. \quad (7)$$

В итоге получим:

$$C_{abs} + C_{out} = 0,934\pi d^2/4. \quad (8)$$

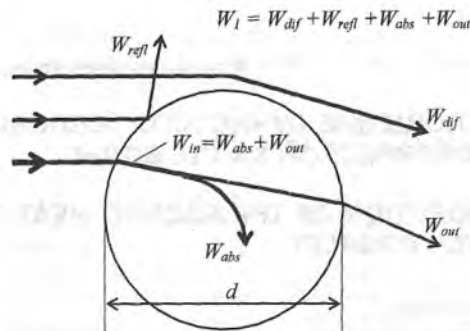


Рисунок 2 — Схема взаимодействия теплового излучения с каплей воды

Это соотношение соответствует излучению W_{in} , входящему внутрь капли, где часть его энергии W_{abs} поглощается водой, превращаясь в тепловую энергию, а другая часть W_{out} выходит наружу, добавляясь к рассеянному излучению (рисунок 2).

Расчет спектра, проходящего через каплю теплового излучения

Для определения W_{out} рассмотрим затухание излучения при его распространении внутри капли через воду как через непрерывную среду. В этом случае используем закон Бугера–Ламберта–Бера для непрерывной среды в виде (1), где длина пути в воде x по порядку величины соответствует диаметру капли d . Исходя из условия $d \gg \lambda$ для типичных параметров РВС и теплового излучения ($d > 50$ мкм, $\lambda \sim 3$ мкм), в данной работе использовалось приближение геометрической оптики.

Вследствие сильной зависимости коэффициента поглощения α_λ от длины волны (рисунок 1) различные спектральные составляющие излучения поглощаются в разной степени, т.е. капля воды действует как фильтр, частично пропуская одни части спектра и почти полностью поглощая другие. Это приводит к необходимости выполнять расчеты отдельно для каждой длины волны и получать результат в виде спектрального распределения излучения, прошедшего определенный путь в избирательно поглощающей среде (воде). Длина пути зависит как от размера капли, так и от траектории каждого луча внутри капли, которая, в свою очередь, зависит от угла падения луча на поверхность капли и от показателя преломления воды. Показатель преломления n также зависит от длины волны. В связи с этим точный расчет спектральных распределений становится очень сложным.

Чтобы чрезмерно не усложнять расчеты, в данной работе используется приближение, в котором для всех траекторий лучей внутри капли принято одинаковое значение длины пути. Элементарный расчет на основе геометрической оптики позволяет найти, что для различных траекторий длина пути x изменяется в пределах от 0,66- d

(для скользящего падения лучей) до d (для нормального падения). При этом наиболее коротким траекториям, близким к $0,66 d$, соответствуют лучи с минимальной интенсивностью вследствие высокого коэффициента отражения на поверхности капель именно для этих лучей. Основной вклад в энергетический поток излучения, прошедшего внутрь капли, дают лучи, длина пути которых внутри капли близка к d . Поэтому, принимая для расчета поглощения излучения длину пути $x \approx d$, мы не сделаем большой ошибки.

Спектральное распределение интенсивности первичного излучения для расчетов принято равным таковому для абсолютно черного тела (планковский спектр):

$$I_{1\lambda} = I_{10} \cdot \lambda^{-5} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^{-1} \quad (9)$$

Таким образом, учтена зависимость спектра первичного излучения от температуры его источника (температуры очага пожара).

Расчеты выполнялись в спектральном интервале $0,5 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 8 \text{ мкм}$, что позволило учесть более 90% интегрального теплового потока для типичных температур пожара. Дискретность расчетов по длинам волн составляла $0,1 \text{ мкм}$ (76 расчетных точек на один спектр).

Интенсивность каждой спектральной компоненты, прошедшей через каплю и вышедшей наружу, рассчитывалась по формуле закона Бугера–Ламберта–Бера (1), принимая, в соответствии с указанным выше приближением, длину пути $x = d$

$$I_{out\lambda} = I_{in\lambda} \cdot e^{-\alpha_{\lambda} d} \quad (10)$$

В (10) через $I_{in\lambda}$ обозначена величина $0,934 \cdot I_{1\lambda}$ (входящее внутрь капли первичное излучение), в соответствии с (8).

Графики, представленные на рисунке 3, демонстрируют зависимость спектра проходящего излучения I_{out} от температуры источника (левая часть рисунка 3) и от размера капель (правая часть). Графики спектральных распределений $I_{out\lambda}$, а также $I_{in\lambda}$ нормированы на максимум соответствующего планковского спектра $I_{in\lambda max}$. Приведенные здесь же графики α_{λ} (аналог рисунка 1, но в линейном масштабе) представлены в произвольных единицах; их масштаб выбран, исходя из наибольшей наглядности.

Представленные спектры $I_{in\lambda}$ полностью совпадают с соответствующими спектрами $I_{1\lambda}$ (спектрами излучения абсолютно черного тела), т.к. умножение на постоянный коэффициент $0,934$ не влияет на их форму.

Анализируя данные расчетов и полученные на их основе графики, можно сделать следующие качественные выводы:

1) Вследствие специфического характера зависимости коэффициента поглощения воды от длины волны наименее эффективно экранируется коротковолновая часть спектра теплового излучения. По этой причине при повышении температуры очага пожара (при смещении максимума спектра излучения в сторону коротких волн) коэффициент экранирования теплового потока должен ухудшаться.

2) При повышении температуры, наряду со смещением максимума, происходит уменьшение ширины планковского спектра за счет снижения относительного уровня длинноволновой части спектра, что также ухудшает коэффициент экранирования.

3) Изменение длины пути (диаметра капель d) существенно влияет не только на коэффициент экранирования, но и на спектр проходящего излучения. При уменьшении d в спектре появляются более длинноволновые компоненты, привязанные по длине волны к минимумам в зависимости от коэффициента поглощения.

Расчет коэффициента пропускания теплового излучения каплей воды

Коэффициентом пропускания капли η будем считать отношение 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 (рисунк 2),

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

В некоторых случаях целесообразно использование величины, обратной коэффициенту пропускания, которую будем называть коэффициентом экранирования (он определяет, во сколько раз внутри капли ослабляется проходящий через нее энергетический поток),

$$\delta = 1/\eta \quad (12)$$

Напишем энергетические потоки через соответствующие интенсивности и сечения, учитывая (8),

$$W_{in} = W_{abs} + W_{out} = I_{1\lambda} \cdot (C_{abs} + C_{out}) = I_{1\lambda} \cdot 0,934 \cdot \pi d^2 / 4 = (I_{abs} + I_{out}) \pi d^2 / 4, \quad (13)$$

где I_{abs} и I_{out} — интенсивности, соответствующие индексам, усредненные по сечению $\pi d^2 / 4$.

В данном соотношении не учтено рассеяние лучей за счет преломления в капле. Хотя для каждой капли после рассеяния сечение потока меняется вследствие расходимости пучка, учитывать это явление для большого количества капель (для всей РВС) нет необходимости, поскольку общее количество энергии, рассеянной в правое полупространство (в геометрии рисунка 2), от перераспределения направления лучей не зависит. Здесь учтено, что при рассеянии на сферической капле воды преобладает малоугловое рассеяние, т.е. рассеянием на углы, превышающие 90° , в первом приближении можно пренебречь [12].

С учетом (13) из (11) получим формулу для коэффициента пропускания капли через эффективные сечения

$$\eta = \frac{4 \cdot C_{out}}{0,934 \cdot \pi d^2} = 1 - \frac{4 \cdot C_{abs}}{0,934 \cdot \pi d^2}, \quad (14)$$

или через средние интенсивности излучения

$$\eta = \frac{I_{out}}{0,934 \cdot I_1} = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (15)$$

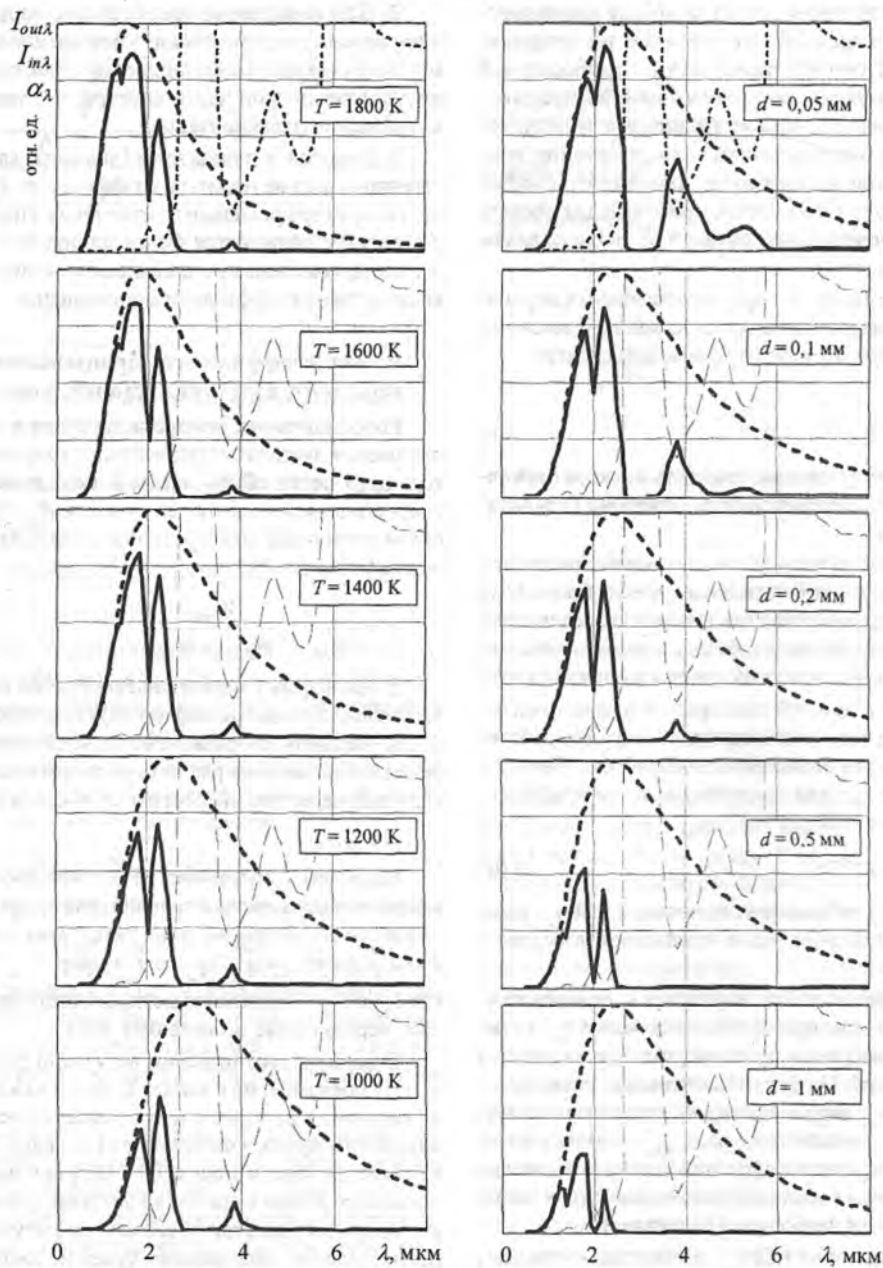


Рисунок 3 — Спектральные распределения входящего излучения I_{in} (толстый пунктир), проходящего излучения I_{out} (сплошная линия), коэффициента поглощения воды (тонкий пунктир); слева — распределения для различных температур при $d = 0,2$ мм; справа — распределения для различных диаметров капель при $T = 1200$ К.

Интенсивность проходящего излучения I_{out} может быть рассчитана с помощью интегрирования соответствующего спектра по всем длинам волн. Учитывая, что реальные расчеты выполнялись в указанном выше ограниченном интервале длин волн $0,5 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 8 \text{ мкм}$ (который является достаточным для оценочных расчетов), интегрирование следует ограничить именно этим интервалом. Таким образом, интегральная интенсивность проходящего излучения

$$I_{out} \approx \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_{out\lambda} d\lambda, \quad (16)$$

где $\lambda_{min} = 0,5 \text{ мкм}$, $\lambda_{max} = 8 \text{ мкм}$. Аналогично, средняя интегральная интенсивность для падающего на каплю и проникающего внутрь излучения

$$I_{in} = I_{abs} + I_{out} = 0,934 \cdot I_1 = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_{in\lambda} d\lambda. \quad (17)$$

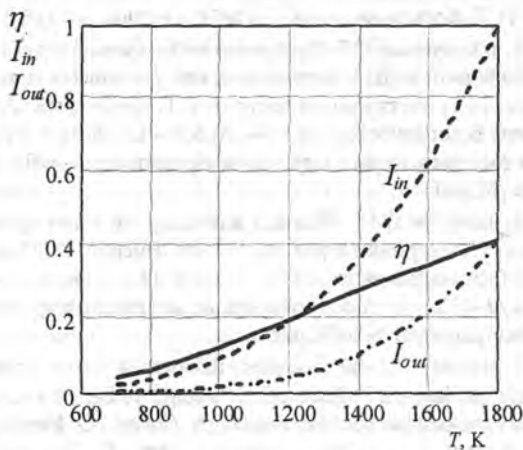


Рисунок 4 — Графики зависимостей $I_{out}(T)$, $I_{in}(T)$ и $\eta(T)$ для $d = 0,2$ мм

Таким образом, при данной методике вычисления коэффициент пропускания равен отношению площадей под сплошной кривой (спектр I_{out}) и под пунктирной кривой (спектр I_{in}) на соответствующем графике рисунка 3.

Численное интегрирование по формулам (16) и (17) было выполнено для спектров, соответствующих следующим значениям параметров:

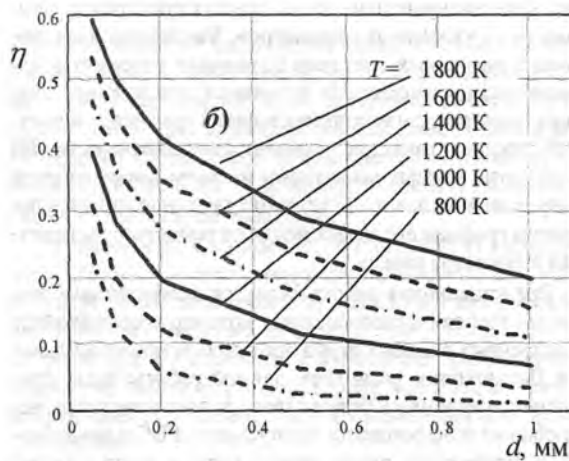
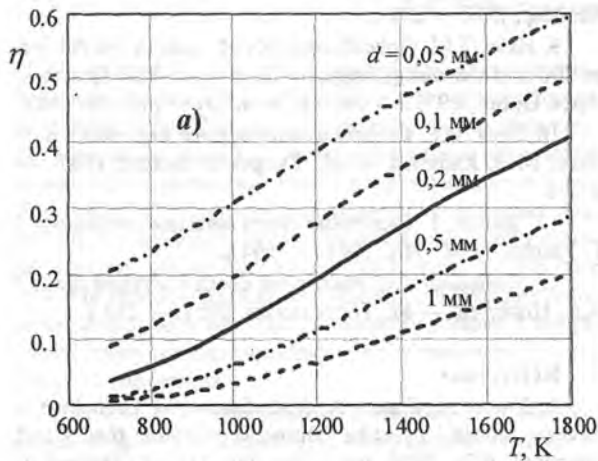


Рисунок 5 — Графики зависимостей $\eta(T)$ для различных значений диаметра капли (а) и $\eta(d)$ для различных значений температуры очага пожара (б)

- температура в интервале (700–1800) К с шагом 100 К;
- диаметры капель 0,05 мм; 0,1 мм; 0,2 мм; 0,5 мм; 1 мм.

По результатам интегрирования были построены графики зависимостей $I_{out}(T)$, $I_{in}(T)$ и $\eta(T)$ для всех значений диаметров капель. На рисунке 4 показаны примеры таких графиков для $d = 0,2$ мм. Графики $I_{out}(T)$ (штрихпунктир) и $I_{in}(T)$ (пунктир) нормированы на максимальное значение (при $T = 1800$ °К) зависимости $I_{in}(T)$. График зависимости $\eta(T)$ (сплошная линия) получен вычислением по формуле (15) через соответствующие значения $I_{out}(T)$, $I_{in}(T)$.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют зависимости коэффициента пропускания η от температуры очага пожара T и от диаметра капель d . В таблице 1 и на рисунке 5 представлены значения η , полученные в результате численного интегрирования для приведенных выше значений T и d .

Показанные на рисунке 5 количественные зависимости подтверждают качественные выводы, сделанные выше на основании вида расчетных спектров проходящего сквозь каплю излучения (рисунок 3). В частности, коэффициент пропускания существенно увеличивается (т.е. эффективность экранирования ухудшается) при повышении температуры очага пожара.

Таблица 1

T, K d, mm	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

Следует иметь в виду, что полученные расчетные значения коэффициента пропускания лучистого теплового потока являются величинами, полученными для отдельной капли, но не для всей РВС. Это коэффициент пропускания энергетического потока сечением $\pi d^2/4$, падающего на сферическую каплю и проходящего через нее с соответствующим ослаблением вследствие поглощения излучения в водной среде.

Если же говорить о коэффициенте пропускания РВС, то необходимо учесть энергетический поток через всю область пространства, занятую РВС, в том числе и ту его часть, которая проходит через это пространство свободно, не взаимодействуя с каплями. Кроме того, для концентрированных РВС необходимо учесть также кратные взаимодействия, когда часть потока последовательно проходит через две, три или более капель. Для выполнения таких расчетов, кроме найденных и заданных выше величин η , d и T , необходимо задать также пространственное распределение концентрации капель и учесть статистически случайный характер их пространственного положения.

Выводы

Выполнены расчеты спектров пропускания сферическими каплями воды теплового электромагнитного излучения от абсолютно черного тела. Получены спектры для температур источника в интервале (700–1800) К и диаметров капель в интервале (0,05–1) мм. Исследованы качественные изменения данных спектров в зависимости от указанных параметров. Численное интегрирование расчетных спектров позволило рассчитать интенсивности проходящего излучения для каждого значения температуры источника и диаметра капель и построить соответствующие графические зависимости. На основе этих данных выполнены расчеты коэффициента пропускания теплового излучения отдельной каплей и построены графики его зависимости от температуры источника и диаметра капель.

Представленная работа является необходимым этапом для теоретического анализа экранирующих свойств распыленных водяных струй противопожарного назначения. Дальнейшим развитием данной работы будет применение полученных результатов для выполнения расчетов общего коэффициента пропускания РВС в зависимости от параметров распыленной воды и очага пожара. Кроме того, необходимо выполнить представленные выше расчеты в более строгой постановке (учет длины и интенсивности различных траекторий лучей внутри капли, учет зависимости коэффициента преломления от длины волны и др.).

Литература

1. 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>
2. Оросители водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / Л.М. Мешман, С.Г. Царичен-

ко, В.А. Былинкин, В.В. Алешин, Р.Ю. Губин; под общ. ред. Н.П. Копылова. — М.: ВНИИПО, 2002. — 315 с.

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. 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. — <http://www.iitk.ac.in/che/jpg/papersb/full%20papers/B-%2071.pdf>

5. 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. <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/11/37/28/PDF/Boulet2006.pdf>

6. 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.

7. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. — М.: Мир, 1986. — 664 с.

8. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию / П. Райст. — М.: Мир, 1987. — 280 с.

9. Hale, G.M. Optical constants of water in the 200 nm to 200 mm wavelength region / G.M. Hale, M.P. Querry // Appl. Optics, 1973. — vol. 12. — no. 3. — pp. 555–563.

10. Зуев, В.Е. Оптика атмосферного аэрозоля / В.Е. Зуев, М.В. Кабанов. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 255 с.

11. Хюлст, Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Хюлст. — М.: ИЛ, 1961. — 564 с.

12. Шифрин, К.С. Рассеяние света в мутной среде / К.С. Шифрин. — М.: Гостехиздат, 1951. — 288 с.

References

1. Zharov, A., Zarhin, A., Mitrofanova, M. Drenchery zavesy: teorija i praktika (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>
2. Orositeli vodjanyh i pennyh avtomaticheskikh ustanovok pozharotushenija (Sprinklers of water and foamy automatic installations of a firefighting) Meshman L.M., Carichenko S.G., Bylinkin V.A., Aleshin V.V., Gubin R.Ju.; pod red. N.P. Kopylova, Moscow: VNIPO, 2002, 315 p.
3. Carichenko, S.G. Problemy ispol'zovanija tonkoraspylennoj vody v avtomaticheskikh ustanovkah pozharotushenija (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. 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>

5. 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/Boulet_2006.pdf

6. 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.

7. Bohren, C.F. & Huffman, D.R. *Absorption and scattering of light by small particles*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1983, 530 p.

8. Reist, P.C. *Introduction to Aerosol Science*. New York: Macmillan, 1984, 299 p.

9. Hale, G.M., Querry, M.P. Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region. *Appl. Optics*, 1973, vol. 12, no. 3, pp. 555-563.

10. Zuev, V.E., Kabanov, M.V. *Optika atmosfernogo aerozolia (Optics of an atmospheric aerosol)*. — L.: Gidrometeoizdat, 1987. — 255 p.

11. Hulst, H.C. *Light scattering by small particles*. New York, John Wiley & Sons, 1957, 470 p.

12. Shifrin, K.S. *Rassejanie sveta v mutnoj srede (Light scattering in a turbid medium)*. M.: Gostehizdat, 1951. — 288 p.

Надійшла 14.03.2013 року

УДК 536.3: 5.34:614.838.441

**ПОГЛИНАННЯ ПРОМЕНИСТОГО
ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ В СФЕРИЧНІЙ
КРАПЛІ ВОДИ**

А.Г. Виноградов

Представлено результати розрахунків спектрів пропускання сферичною краплею води електромагнітного випромінювання ближнього інфрачервоного діапазону, яке відповідає тепловому випромінюванню абсолютно чорного тіла при типових температурах осередку пожежі (700–1800 °К). Виконано розрахунки спектральних розподілів інтенсивності випромінювання, яке пройшло через краплю, для різних температур пожежі і для різних розмірів краплі. Розраховано залежності інтегрального теплового потоку прохідного випромінювання і коефіцієнта пропускання променистого теплового потоку від вказаних параметрів.

Ключові слова: крапля води, поглинання випромінювання, коефіцієнт пропускання, чисельні розрахунки.

UDK 536.3: 5.34:614.838.441

**ABSORPTION OF THE RADIANT HEAT FLUX
IN THE SPHERICAL WATER DROPLET**

A.G. Vynogradov

Performance of calculations which will allow to draw the quantitative conclusions on absorption process in spherical water droplets of an infrared 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 screening of thermal radiation by means of the sprayed water jet.

Methodology. Calculations of absorption in a spherical water droplet of an electromagnetic radiation of a near infrared range which corresponds to a blackbody thermal radiation at typical temperatures of a fire site (700 K–1800 K) are presented. Calculations of spectral distribution laws of intensity of radiation, passing through a droplet, for various temperatures of a fire and for the various sizes of a droplet are executed.

Findings. Dependences of integral heat fluxes of passing radiation and transmittance of a radiant heat flux for the various temperatures of a fire and for the various sizes of a droplet are calculated.

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

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