

УДК 536.3:535.34:614.838.441

Виноградов А.Г., к. ф.-м. н., доц.

Академия пожарной безопасности им. Героев Чернобыля, г. Черкассы, Украина

## РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРОПУСКАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ КАПЕЛЬ ВОДЫ ДЛЯ ТИПОВЫХ СПЕКТРОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ

Vinogradov A.

Fire Safety Academy named after Chernobyl Heroes, Cherkasy, Ukraine (vin\_ag@mail.ru)

### CALCULATION OF TRANSMITTANCES OF SPHERICAL WATER DROPLETS FOR THE TYPICAL SPECTRA OF FIRE THERMAL RADIATION

*Для расчета процесса экранирования теплового излучения очага пожара с помощью водяной завесы применяется ранее разработанная математическая модель. С этой целью в данной работе разработана методика расчетов коэффициента пропускания сферической капли воды для основных типов спектров теплового излучения пожаров. Эти спектры представлены в виде линейной комбинации двух основных компонент: 1) спектр абсолютно черного тела; 2) молекулярные полосы газообразных продуктов горения. В результате расчетов найдено, что коэффициент пропускания капель уменьшается при увеличении вклада молекулярных полос в спектр излучения пожара.*

*Ключевые слова:* водяная завеса, коэффициент пропускания, спектр излучения пожара.

#### Введение

Одним из наиболее опасных факторов пожара является его тепловое излучение. Действие теплового излучения на окружающую среду проявляется в воспламенении окружающих горючих материалов и возникновении новых очагов пожара, способствуя, таким образом, быстрому распространению зоны пожара. Кроме того, интенсивное тепловое излучение может угрожать здоровью и жизни людей, а также может быть причиной значительного материального ущерба в зоне пожара.

Среди имеющихся средств защиты от теплового излучения следует особо выделить водяные завесы (распыленные водяные струи), которые используются для ослабления лучистого теплового потока. Их существенными преимуществами перед другими средствами являются простота их создания, оперативность реагирования в случае возникновения пожара, экологическая безопасность, возможность их создания практически в любом месте.

В то же время, следует отметить отсутствие опубликованных в научной литературе практических расчетных методов, позволяющих определить оптимальные параметры водяных завес (диаметр и концентрацию капель, толщину завесы и др.) для решения задачи теплового экранирования в том или ином случае. Отсутствуют также практические методы расчета экранирующих свойств водяных завес при заданных технических параметрах. Безусловно, это является одним из факторов, препятствующих более широкому внедрению в практику этого перспективного противопожарного средства.

Следует отметить, что тема взаимодействия теплового излучения с распыленной водой является достаточно популярной среди исследователей, и в последние 20-25 лет на эту тему опубликовано большое количество научных работ (см., напр., [1-8]). Однако они, как правило, имеют академический характер и не могут быть использованы для практических расчетов.

Решить указанную задачу позволяет недавно опубликованная математическая модель процесса экранирования водяной завесой лучистого теплового потока [9-12]. На ее основе получены расчетные формулы для интегрального коэффициента пропускания теплового излучения в зависимости от параметров водяной завесы. Однако данная модель разработана только для двух частных случаев относительно исходного спектра теплового излучения: 1) монохроматическое излучение; 2) излучение абсолютно черного тела.

Согласно литературным данным [13-21], второй из названных частных случаев реализуется при некоторых типах пожаров и, следовательно, указанная математическая модель может быть использована для расчета их теплового экранирования водяными завесами. Однако для пожаров других типов, со спектрами теплового излучения, отличающимися от спектра абсолютно черного тела, эта модель требует соответствующей доработки. Таким образом, необходимо предварительно на основе литературных данных выполнить общий анализ и определить основные типы спектров теплового излучения пожаров, задать их

формальные признаки и математические формулы для их моделирования. Далее на основе математической модели необходимо разработать соответствующие расчетные методики и выполнить численные расчеты.

#### Постановка задачи

На основе ранее разработанной математической модели процесса экранирования водяной завесой лучистого теплового потока создать расчетные методики и выполнить численные расчеты для основных типов спектров теплового излучения пожаров.

#### Основные типы спектров теплового излучения пожаров

Основными источниками теплового излучения при пожаре являются пламя, горячие твердые поверхности и частицы дыма. Спектральный состав излучения пожара представляет собой суперпозицию спектров излучения этих компонент и зависит от их относительного вклада в общий спектр [13].

Излучение от горячих твердых поверхностей или от частиц сажи в горячем слое дыма имеет спектр, близкий к спектру абсолютно черного тела (АЧТ). Спектральная светимость АЧТ дается выражением:

$$M_{b,\nu} = \frac{2\pi hc_0 \nu^3}{\exp\left(\frac{hc_0 \nu}{k_B T}\right) - 1}; \quad (1)$$

где  $\nu$  – волновое число (обратная длина волны),  $h$  – постоянная Планка,  $c_0$  – скорость света в вакууме,  $k_B$  – постоянная Больцмана. Выражение для спектральной светимости АЧТ как функции длины волны  $\lambda$ :

$$M_{b,\lambda} = \frac{2\pi hc_0}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{hc_0}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right)}. \quad (2)$$

Полный спектр излучения из пламени или из горячих дымовых газов в очаге пожара содержит также молекулярные полосы. Молекулярная полоса – это относительно узкий интервал длин волн (волновых чисел), в котором излучают молекулы определенного типа. Наибольший вклад в спектр теплового излучения пожаров дают молекулярные полосы углекислого газа и воды. Самые сильные полосы  $\text{CO}_2$  расположены при 4,4 мкм ( $2300 \text{ см}^{-1}$ ) и 2,7 мкм ( $3700 \text{ см}^{-1}$ ) [14, 15], тогда как наиболее сильные полосы  $\text{H}_2\text{O}$  – при 2,8 мкм ( $3600 \text{ см}^{-1}$ ), 2,5 мкм ( $3800 \text{ см}^{-1}$ ), 1,9 мкм ( $5300 \text{ см}^{-1}$ ) [14, 16]. Полосы  $\text{H}_2\text{O}$  при 2,8 мкм и 2,5 мкм часто видны как одна полоса при 2,7 мкм, из-за ограниченного спектрального разрешения при измерениях. Накладываясь на соответствующую полосу  $\text{CO}_2$ , они дают общий пик в спектре. Существуют и другие полосы, как, например, полоса  $\text{H}_2\text{O}$  6,3 мкм ( $1600 \text{ см}^{-1}$ ), но они являются слабыми и дают малый вклад в общее излучение [15]. Излучение от гомоядерных молекул, таких как  $\text{O}_2$  или  $\text{N}_2$ , является очень слабым, из-за их недостаточных электрических дипольных моментов, и не оказывает существенного влияния на общее излучение [13].

Для чистого пламени в присутствии достаточного количества кислорода доминируют молекулярные полосы, а излучение АЧТ пренебрежимо мало из-за малого количества сажи. Пример такого спектра (зависимость спектральной светимости  $M_\nu$  от волнового числа  $\nu$ ) измерен в работе [16] и представлен на рис. 1.

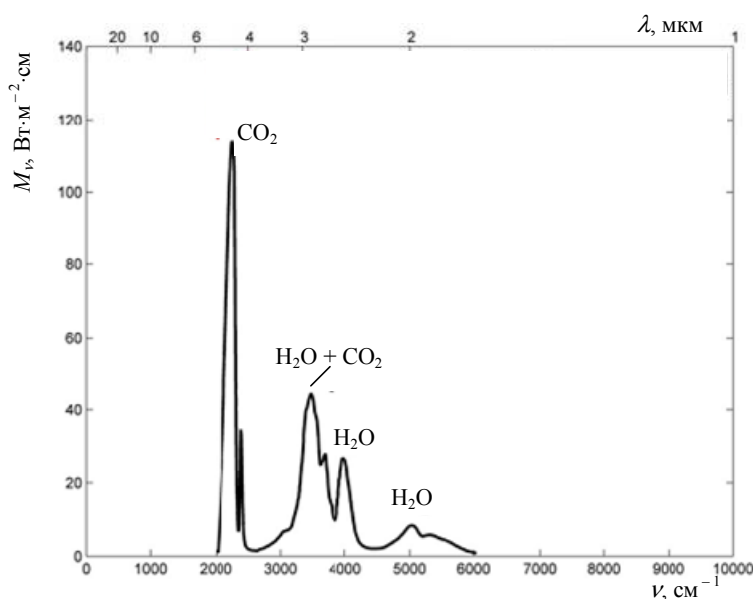


Рис. 1. Спектр излучения пламени при стехиометрическом горении метана

Здесь показан спектр стехиометрического пламени метан/воздух при давлении 2 бар. Можно видеть, что излучение пламени соответствует молекулярным полосам  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , тогда как излучение АЧТ практически отсутствует. Это связано с отсутствием сажи в пламени, что свидетельствует о поступлении достаточного количества кислорода во все зоны факела огня и полном сгорании метана.

Для получения спектров излучения пламени такого типа, с богатыми спектральными структурами молекулярных групп и незначительным вкладом от излучения АЧТ, необходимо горение хорошо перемешанной стехиометрической смеси горючего вещества и окислителя (кислорода). На практике этот вид пожара встречается достаточно редко.

Гораздо чаще спектр излучения пожара содержит и спектр АЧТ, и молекулярные полосы в определенном количественном соотношении, которое зависит от горючего вещества, от условий его горения (недостаток или избыток кислорода), а также существенно изменяется в различных зонах очага пожара. Примеры таких спектров представлены на рис. 2. Спектр излучения пламени на рис. 2,а получен при горении полиметилметакрилата (оргстекло) [18]. Он состоит из двух основных вкладов: 1) спектр АЧТ при температуре около 684 К; 2) молекулярная полоса  $\text{CO}_2$  при  $\nu = 2300 \text{ см}^{-1}$ . Кроме того, незначительное влияние на общий вид спектра оказывают группы молекулярных полос  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  при  $\sim 1600 \text{ см}^{-1}$  и  $\sim 3700 \text{ см}^{-1}$ . Попытка авторов [18] увязать общий вид спектра с излучением АЧТ при 1105 К представляется нелогичной.

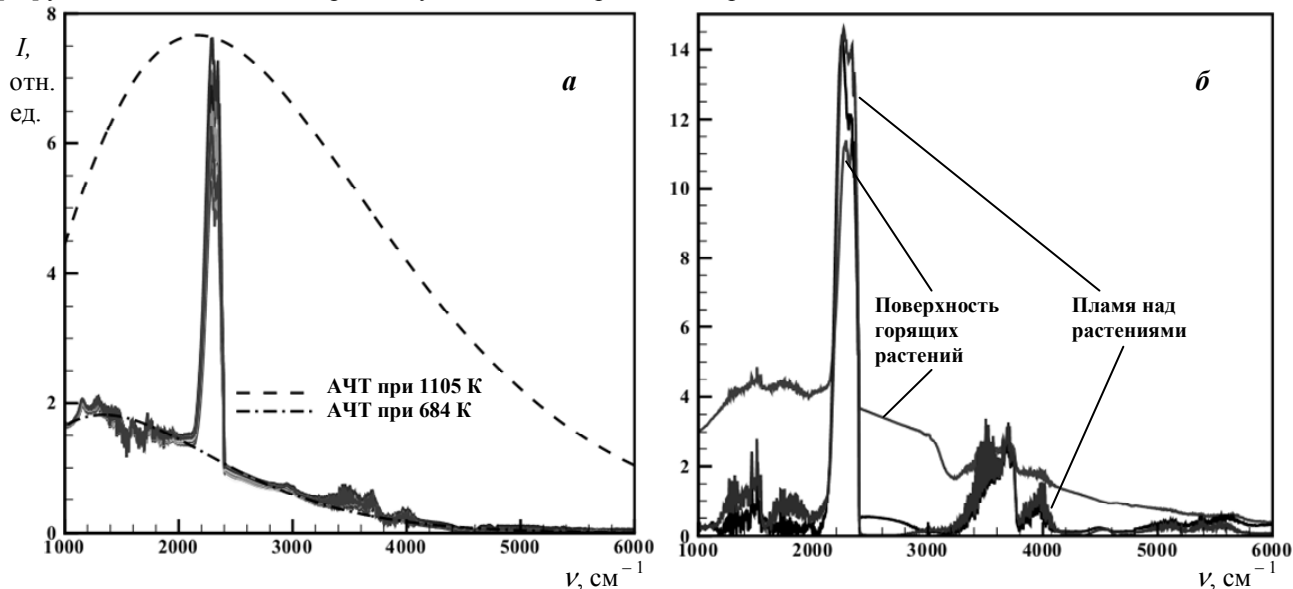


Рис. 2. Типичные спектры излучения очага пожара при наличии вкладов излучения АЧТ и молекулярных полос: а) спектр горения полиметилметакрилата; б) спектры разных зон при горении растительного топлива

На рис. 2,б представлены результаты исследования, в котором измерение спектров излучения производилось не от всего очага пожара, а локально от разных его зон. В данном случае исследовалось излучение горения растительного топлива (виноградной лозы) [19]. Оказалось, что поверхность горящих растений излучает, как АЧТ с небольшим вкладом упомянутых выше молекулярных полос. В то же время, спектр пламени над горящими растениями практически не содержит излучения АЧТ, а состоит из молекулярных полос.

Исследования спектров излучения коптящего пламени некоторых горючих жидкостей показали, что наличие частиц сажи в дымовых газах увеличивает вклад спектра АЧТ в общем спектре пламени (см., напр., [20, 21]). Форма спектра определяется температурой пламени, а относительный вклад излучения АЧТ зависит от толщины слоя дымовых газов и концентрации сажи.

Таким образом, анализ литературных данных по спектрам излучения различных пожаров позволяет сделать следующие выводы:

1. В большинстве случаев форму этих спектров можно определить как сумму двух основных компонент: 1) спектр излучения АЧТ; 2) молекулярные полосы газообразных продуктов горения.
2. Существенное влияние на форму спектра излучения могут оказывать две молекулярные полосы, расположенные при длинах волн 4,4 мкм ( $\text{CO}_2$ ) и 2,7 мкм ( $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ ).

Следует учесть, что газы, являющиеся источниками данных молекулярных полос, т.е.  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , не только содержатся в продуктах горения, но и являются компонентами обычного атмосферного воздуха. При обычной температуре они не излучают, а наоборот, поглощают излучение при тех же, указанных выше, длинах волн. Поэтому при распространении теплового излучения от пожара на большие расстояния (десятки метров) пики, обусловленные молекулярными полосами  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , поглощаются в атмосфере и уменьшаются по величине. При достаточно больших расстояниях на общем фоне спектра АЧТ вместо пиков при этих же длинах волн могут образоваться впадины, глубина которых увеличивается с ростом расстояния [13]. В дальнейшем будем считать, что расстояния от пожара не настолько велики, чтобы существенно влиять на вид спектра излучения.

На основе представленного анализа для большинства пожаров можно предложить 3 типовых спектра излучения, которые могут быть использованы для математического моделирования пожаров:

1. Спектр АЧТ (излучение поверхности горящего твердого топлива и частиц сажи).
2. Комбинация спектра АЧТ и молекулярных полос (горение жидкого топлива, коптящее пламя).
3. Молекулярные полосы (чистое углеводородное пламя).

На основе данной классификации спектр излучения любого пожара (зависимость спектральной светимости  $M_\lambda$  от длины волны  $\lambda$ ) можно представить в виде:

$$M_\lambda = (1 - \psi) \cdot M_{b,\lambda} + \psi \cdot M_{m,\lambda}, \quad (3)$$

где  $\psi$  – весовой коэффициент, определяющий соотношение вкладов  $M_{b,\lambda}$  (спектр АЧТ) и  $M_{m,\lambda}$  (молекулярные полосы). При  $\psi = 0$  получим типовой спектр 1, при  $0 < \psi < 1$  – типовой спектр 2, при  $\psi = 1$  – типовой спектр 3.

Для расчетов  $M_{b,\lambda}$  используем соотношение (2) при соответствующей температуре  $T$ :

$$M_{b,\lambda} = \frac{M_{b0}}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{hc_0}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right)}, \quad (4)$$

где  $M_{b0}$  – нормирующий коэффициент, определенный из условия нормировки:

$$\int_0^\infty M_{b,\lambda} d\lambda = 1.$$

Согласно рекомендациям работы [13], основанным на данных анализа ряда опубликованных экспериментальных исследований пожаров, для спектров АЧТ типичными являются следующие значения температуры: 1) для излучения поверхности горящего твердого топлива  $T_1 = 700$  К; 2) для излучения частиц сажи в горячих дымовых газах  $T_2 = 1200$  К. Понятно, что эти значения температуры являются ориентировочными и для разных условий горения могут изменяться весьма существенно.

Для расчетов вклада  $M_{m,\lambda}$  (молекулярные полосы) в [13] предлагается использовать две основные молекулярные полосы, расположенные при длинах волн 4,4 мкм ( $\text{CO}_2$ ) и 2,7 мкм ( $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ ), в виде линейной комбинации лоренцианов с соотношением интенсивностей 25:1:

$$M_{m,\lambda} = M_{m0} \left( \frac{(\Delta\lambda_1)^2}{(\lambda - \lambda_{01})^2 + (\Delta\lambda_1)^2} + \frac{0,04 \cdot (\Delta\lambda_2)^2}{(\lambda - \lambda_{02})^2 + (\Delta\lambda_2)^2} \right), \quad (5)$$

где  $\lambda_{01} = 4,4$  мкм и  $\lambda_{02} = 2,7$  мкм – положение центров полос;  $\Delta\lambda_{01} = 0,14$  мкм и  $\Delta\lambda_{02} = 0,22$  мкм – полуширина на полувисоте каждой из полос;  $M_{m0}$  – нормирующий коэффициент, определенный из условия нормировки:

$$\int_0^\infty M_{m,\lambda} d\lambda = 1.$$

На рис. 3 представлены типовые спектры, рассчитанные по формулам (3) – (5) для разных значений параметра  $\psi$ .

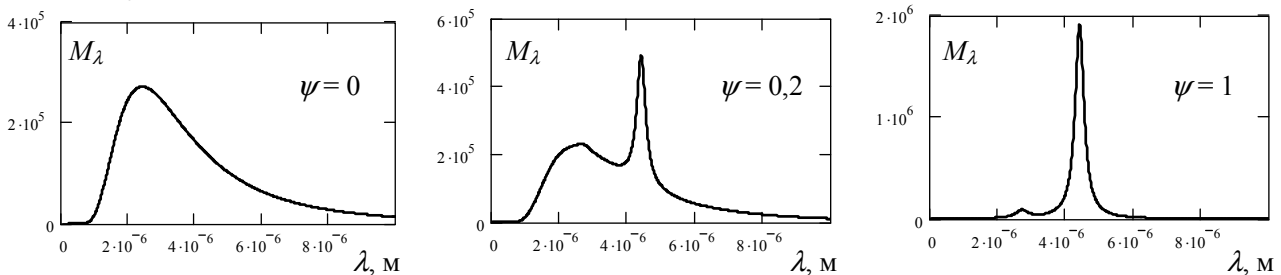


Рис. 3. Типовые модельные спектры излучения пожаров для разных значений коэффициента  $\psi$

Таким образом, поставленную в данной работе задачу можно конкретизировать следующим образом. Используя для задания спектров излучения соотношения (3) – (5), необходимо исследовать влияние величины параметра  $\psi$  на коэффициент пропускания сферических капель воды для теплового излучения пожаров.

#### Расчет коэффициента пропускания сферических капель воды

Воспользуемся математической моделью [9], в которой получена расчетная формула для коэффициента пропускания монодисперсной водяной завесы с диаметром капель  $D$ :

$$H = \exp \left[ -0,934 \cdot (1 - \eta) \cdot n_0 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot l \right], \quad (6)$$

где  $n_0$  – счетная концентрация капель,  $\text{м}^{-3}$ ;  $l$  – толщина завесы, м;  $\eta$  – коэффициент пропускания сферической капли воды.

$$\eta = \frac{W_{out}}{W_{in}}; \quad (7)$$

где  $W_{in}$  и  $W_{out}$  – соответственно входящий в каплю и выходящий из нее интегральные потоки теплового излучения. Они рассчитываются интегрированием спектральных потоков по всем длинам волн:

$$W_{in} = \int_0^{\infty} W_{in,\lambda} d\lambda, \quad (8)$$

$$W_{out} = \int_0^{\infty} W_{out,\lambda} d\lambda. \quad (9)$$

Входящий спектральный поток (т.е. поток для некоторой длины волны  $\lambda$ ) прямо пропорционален спектральной светимости очага пожара:

$$W_{in,\lambda} = K \cdot M_{\lambda}, \quad (10)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии процесса.

Выходящий спектральный поток определяется по формуле [10]:

$$W_{out,\lambda} = W_{in,\lambda} \cdot e^{-0,84\alpha_{\lambda} \cdot D}, \quad (11)$$

где  $\alpha_{\lambda}$  – коэффициент поглощения воды, имеющий сложную зависимость от длины волны излучения.

Таким образом, коэффициент пропускания капли рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{\int_0^{\infty} M_{\lambda} \cdot e^{-0,84\alpha_{\lambda} \cdot D} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda}. \quad (12)$$

На рис. 4 представлен конкретный пример, соответствующий значениям параметров:  $\psi = 0,2$ ;  $D = 0,1$  мм;  $T = 1200$  К. В соответствии с (12), коэффициент пропускания капли равен отношению площади под кривой  $W_{out,\lambda}$  (заштрихованная площадь) к площади под кривой  $W_{in,\lambda}$ . Спектры нормированы на высоту наибольшего максимума. На рис. 4 также представлена зависимость от длины волны коэффициента поглощения воды  $\alpha_{\lambda}$  (в произвольном масштабе).

Можно увидеть, что пик молекулярной полосы  $\text{CO}_2$  при  $\lambda = 4,4$  мкм почти совпадает с одним из пиков коэффициента поглощения воды, вследствие чего он поглощается в капле гораздо сильнее, чем коротковолновая часть спектра АЧТ. Это является причиной того, что излучение от пламени со спектром молекулярных полос водяная завеса экранирует намного эффективнее, чем излучение со спектром АЧТ.

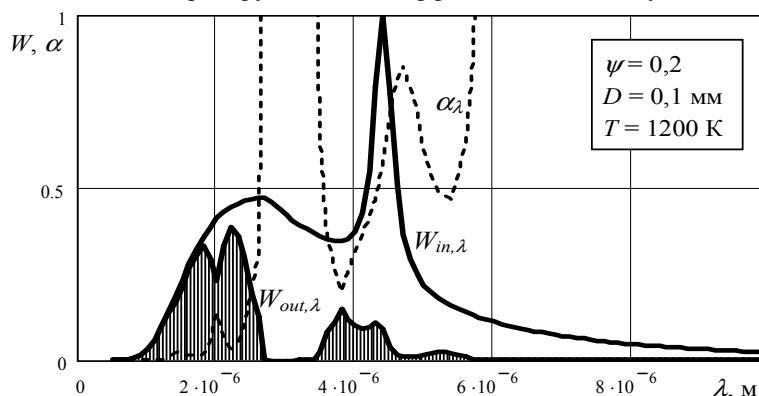


Рис. 4. Расчетные спектры входящего и выходящего излучений для заданных параметров

Подобные расчеты были выполнены для разных сочетаний параметров  $\psi$  и  $D$  при  $T = 1200$  К (в соответствии с рекомендациями [13]). Интервал интегрирования был ограничен пределами  $0 < \lambda < 10$  мкм, что не повлияло существенно на результаты расчетов. На рис. 5 представлены спектры излучения пожаров, для которых выполнялись расчеты коэффициентов пропускания капель. Они рассчитаны с помощью соотношений (3) – (5) и соответствуют следующим значениям параметра  $\psi$ : 0; 0,25; 0,5; 1.

Рассчитанные графики зависимостей коэффициента пропускания капель от их диаметра для заданных значений параметра  $\psi$  представлены на рис. 6.

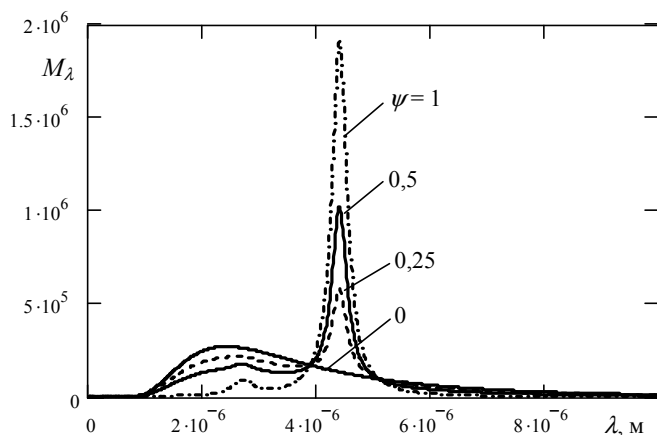


Рис. 5. Спектры излучения для разных значений параметра  $\psi$

излучения, следует считать верхним пределом для данного коэффициента. Для реального спектра пожара, в присутствии молекулярных полос излучения и при той же температуре фонового спектра АЧТ, коэффициент пропускания капли будет иметь меньшее значение.

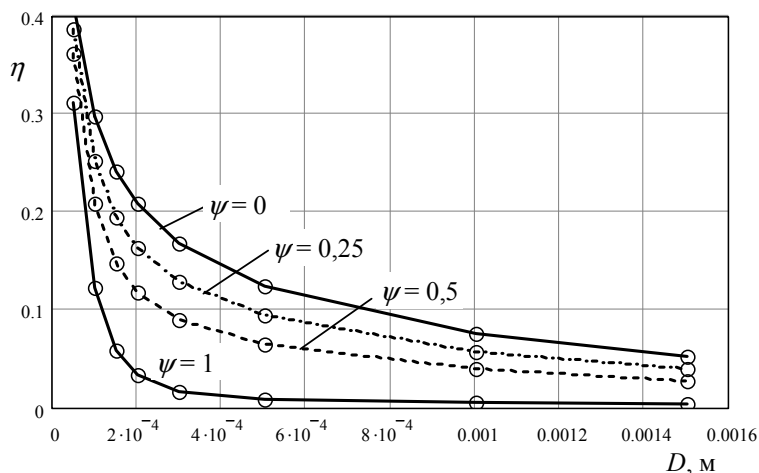


Рис. 6. Зависимости  $\eta(D)$  для разных значений  $\psi$

### Выводы

На основе анализа литературных данных сделан вывод о том, что в большинстве случаев спектры излучения пожаров можно рассматривать как сумму двух основных компонент: 1) спектр абсолютно черного тела; 2) молекулярные полосы газообразных продуктов горения. Из всех молекулярных полос наиболее весомый вклад в эти спектры дают молекулярные полосы углекислого газа и паров воды, расположенные при длинах волн 4,4 мкм и 2,7 мкм.

Для математического моделирования пожаров предложены 3 типовых спектра излучения. Формула (3) для их задания представляет собой линейную комбинацию двух основных компонент, относительный вклад которых задается параметром  $\psi$ .

Расчет коэффициента пропускания сферических капель воды для теплового излучения пожаров выполнен с помощью ранее разработанной математической модели. Получены расчетные графики зависимостей этого коэффициента от диаметра капель для определенных значений параметра  $\psi$ . В результате расчетов найдено, что при возрастании  $\psi$  коэффициент пропускания капель уменьшается. Это связано с тем, что для длины волны 4,4 мкм, соответствующей основной молекулярной полосе излучения пожаров, коэффициент поглощения воды значительно больше, чем для коротковолновой части спектрального интервала, соответствующего излучению абсолютно черного тела при типичных температурах пожаров.

Для экспериментальной проверки полученных результатов предлагается измерить и сравнить коэффициенты пропускания водяной завесы для излучения пламени горения углеводородов (напр., метан или природный газ) для двух случаев: при недостатке кислорода (копящее пламя) и при его избытке (полное сгорание без образования сажи). Во втором случае, очевидно, температура пламени будет выше, чем в первом. Согласно данным работы [9], коэффициент пропускания водяной завесы возрастает для излучения АЧТ с более

высокой температурой. Но, поскольку в спектре пламени при избытке кислорода практически отсутствует излучение АЧТ, а доминируют молекулярные полосы излучения (т.е.  $\psi \approx 1$ ), то коэффициент пропускания завесы должен быть ниже, чем для коптящего пламени. Таким образом, по результатам данного эксперимента можно осуществить проверку разработанной в данной работе методики расчетов.

**Анотація.** Для розрахунку процесу екранування теплового випромінювання осередку пожежі за допомогою водяної завіси застосовується раніше розроблена математична модель. Із цією метою в даній роботі розроблена методика розрахунків коефіцієнту пропускання сферичної краплі води для основних типів спектрів теплового випромінювання пожежі. Ці спектри представлені у вигляді лінійної комбінації двох основних компонент: 1) спектр абсолютно чорного тіла; 2) молекулярні смуги газоподібних продуктів горіння. В результаті розрахунків знайдено, що коефіцієнт пропускання крапель зменшується при збільшенні вкладу молекулярних смуг у спектр випромінювання пожежі.

**Ключові слова:** водяна завіса, коефіцієнт пропускання, спектр випромінювання пожежі.

**Abstract. Purpose.** Development of calculated techniques for thermal radiation shielding by a water curtain and performing numerical calculations of a transmittance of water droplet for the main types of spectra of a fire thermal radiation.

**Methodology.** According to literary data, in most cases the fire radiation spectra can be considered as the sum of two principal components: 1) black body emission spectrum; 2) molecular emission bands of gaseous products of combustion. For mathematical model operation these spectra are presented in the form of the linear combination of these components, in which the relative contribution of molecular emission bands is set by the  $\psi$  parameter. The transmittance of a spherical water droplet for such thermal radiation is calculated by means of earlier developed mathematical model.

**Findings.** Graphic dependences of a transmittance of water droplet from its diameter for the  $\psi$  parameter defined values corresponding to different types of fires are received. As a result of calculations it is found that the droplet transmittance decreases at  $\psi$  increase.

**Application of results.** Determination of optimum parameters of water spray curtain for of the thermal radiation attenuation during fire suppression

**Keywords:** water curtain, transmittance, fire radiation spectra.

#### Библиографический список использованной литературы

1. Ravigururajan T.S. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets / T.S. Ravigururajan, M.R. Beltan // Fire Safety J., 1989. – Vol. 15. – P. 171–181.
2. Coppalle A. Fire protection: water curtains/ A. Coppalle, D. Nedelka, B. Bauer // Fire Safety J., 1993. – Vol. 20. – P. 241–55.
3. 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. – Vol. 39. – P. 41–66.
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. – P. 423–432. – URL: <http://www.iitk.ac.in/che/jpg/papersb/full%20papers/B-%2071.pdf>
5. Collin A. On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method / A. Collin, P. Boulet, D. Lacroix, G. Jeandel // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2005. – Vol. 92. – P. 85–110.
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). – P. 15–30. – URL: <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. – P. 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. – P. 91-98.
9. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 7. – С. 73–82.
10. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами. Часть 2 / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 4.
11. Виноградов А.Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22.
12. Виноградов А.Г. Поглощение лучистого теплового потока в распыленной водяной струе / А.Г. Виноградов // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», сер. Машинобудування. – 2012. – №65. – С. 145-152.
13. Försth M. Absorption of heat radiation in liquid droplets / M. Försth, K. Möller // SP Report 2011:75. Boras SE: Fire Technology, SP Technical Research Institute of Sweden. – 57 p. – URL: <http://www.v2.sp.se/publ/ViewDocument.aspx?RapportId=13090>
14. Modest M.F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest. – Academic Press, 2003. – 822 p.
15. Buckius R.O. Infrared Flame Radiation / R.O. Buckius, C.L. Tien // International Journal of Heat and Mass Transfer, 1977. – vol. 20, no. 2. – P. 93-106.
16. Hertzberg M. The infrared radiance and the optical detection of fires and explosions / M. Hertzberg, C.D. Litton, W.F. Donaldson, D. Burgess // Symposium (International) on Combustion, 1975. – vol. 15, no. 1. – P. 137-144.
17. Parent G. Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire / G. Parent, Z. Acem, S. Lechène, P. Boulet // International Journal of Thermal Sciences, 2010. – vol. 49. – P. 555-562.

18. Parent G. Radiative flux emitted by a burning PMMA slab / G. Parent, Z. Acem, A. Collin, R. Berfroi, P. Boulet, Y. Pizzo, P. Mindykowski, A. Kaiss, B. Porterie // Journal of Physics: Conference Series, 2012. – vol. 395. – P. 012153. – URL: [http://iopscience.iop.org/1742-6596/395/1/012153/pdf/1742-6596\\_395\\_1\\_012153.pdf](http://iopscience.iop.org/1742-6596/395/1/012153/pdf/1742-6596_395_1_012153.pdf)
19. Parent G. Radiative properties in the frame of forest fires / G. Parent, Z. Acem, A. Collin, P. Boulet // Proc. 6th International Symposium on Radiative Transfer, 2010. – URL: <http://perso.ensem.inpl-nancy.fr/Anthony.Collin/Conferences/Conference2010A.pdf>
20. Hägglund B. The heat radiation from petroleum fires / B. Hägglund, L.E. Persson // FOA Report, C20126-D6 (A3), Forsvarets Forskningsanstalt, Stockholm, 1976.
21. Klassen M. Structure and radiation properties of pool fires / M. Klassen, J.P. Gore // NIST, 1994. – NIST-GCR-94-651. – 153p.
22. 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. – P. 555–563.

## References

1. Ravigururajan T.S., Beltan M.R. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets. Fire Safety J., 1989, vol. 15, pp. 171–181.
2. Coppalle A., Nedelka D., Bauer B. Fire protection: water curtains. Fire Safety J., 1993, vol. 20, pp. 241–55.
3. 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.
4. Buchlin J.-M. Thermal shielding by water spray curtain, J. Loss Prev. Process Industries, 2005, vol. 18, no. 4-6, pp. 423–432, available at: <http://www.iitk.ac.in/che/jpg/papersb/full%20papers/B-%2071.pdf>
5. Collin A., Boulet P., Lacroix D., Jeandel G. On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2005, vol. 92, pp. 85–110.
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, available at: <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. Vinogradov A.G. Pogloshhenie teplovogo izlucheniya vodnyami zavesami (Thermal radiation absorption by water curtains), Pozharovzryvobezopasnost' - Fire and explosion safety, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 73–82.
10. Vinogradov A.G. Pogloshhenie teplovogo izlucheniya vodnyami zavesami. Chast' 2 (Thermal radiation absorption by water curtains. Part 2), Pozharovzryvobezopasnost' - Fire and explosion safety, 2013, vol. 22, no. 4.
11. Vinogradov A.G. Jekranirovanie teplovogo izlucheniya polidispersnymi vodnyami zavesami (Heat radiation shielding by the polydisperse water curtains), Pozharovzryvobezopasnost' - Fire and explosion safety, 2013, vol. 22.
12. Vinogradov A.G. Pogloshhenie luchistogo teplovogo potoka v raspylennoj vodjanoj strue (Absorption of the radiant heat flux in the sprayed water jet) Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraïni «Kiïvs'kij politehničnij institut», ser. Mashinobuduvannja – Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, 2012, no. 65, pp. 145–152.
13. Försth M., Möller K. Absorption of heat radiation in liquid droplets. SP Report 2011:75. Borås SE: Fire Technology, SP Technical Research Institute of Sweden, 57 p., available at: [http://www-v2.sp.se/publ/ViewDocument.aspx?RapportId=13090](http://www.v2.sp.se/publ/ViewDocument.aspx?RapportId=13090)
14. Modest M.F. Radiative Heat Transfer. Academic Press, 2003, 822 p.
15. Buckius R.O., Tien C.L. Infrared Flame Radiation. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1977, vol. 20, no.2, pp.93–106.
16. Hertzberg M., Litton C.D., Donaldson W.F., Burgess D. The infrared radiance and the optical detection of fires and explosions. Symposium (International) on Combustion, 1975, vol. 15, no. 1, pp. 137–144.
17. Parent G., Acem Z., Lechène S., Boulet P. Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire. International Journal of Thermal Sciences, 2010, vol. 49, pp. 555–562.
18. Parent G., Acem Z., Collin A., Berfroi R., Boulet P., Pizzo Y., Mindykowski P., Kaiss A., Porterie B. Radiative flux emitted by a burning PMMA slab. Journal of Physics: Conference Series, 2012, vol. 395, p. 012153, available at: [http://iopscience.iop.org/1742-6596/395/1/012153/pdf/1742-6596\\_395\\_1\\_012153.pdf](http://iopscience.iop.org/1742-6596/395/1/012153/pdf/1742-6596_395_1_012153.pdf)
19. Parent G., Acem Z., Collin A., Boulet P. Radiative properties in the frame of forest fires. Proc. 6th International Symposium on Radiative Transfer, 2010, available at: <http://perso.ensem.inpl-nancy.fr/Anthony.Collin/Conferences/Conference2010A.pdf>
20. Hägglund B., Persson L.E. The heat radiation from petroleum fires. FOA Report, C20126-D6 (A3), Forsvarets Forskningsanstalt, Stockholm, 1976.
21. Klassen M., Gore J.P. Structure and radiation properties of pool fires. NIST, 1994, NIST-GCR-94-651, 153 p.
22. Hale G.M., Querry M.P. Optical constants of water in the 200 nm to 200 mm wavelength region. Appl. Optics, 1973, vol. 12, no. 3, pp. 555–563.