

## РАСЧЕТ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ВОДЯНОЙ ЗАВЕСЫ

*Виконано теоретичний аналіз впливу параметрів функції розподілу крапель за розміром на спектр пропускання водяної завіси. Як приклад розглянуто водяні завіси з логарифмічно нормальним розподілом крапель за розміром. Досліджено можливість замінити полідисперсну водяну завісу її монодисперсним аналогом з еквівалентними екрануючими властивостями. Розраховано формули для мінімального рівня коефіцієнта пропускання водяної завіси і для діаметру крапель еквівалентної монодисперсної завіси. Визначено функції апроксимації з метою спрощення розрахункових формул та виконано порівняльні розрахунки для точних і спрощених формул. Розроблено методику розрахунку коефіцієнта пропускання завіси для випромінювання абсолютно чорного тіла.*

*According to results of the executed calculations, the transmittance of thermal radiation strongly increases in process of increase in width of this distribution function. Possibility of replacement of an polydisperse water curtain by its monodisperse analog with the equivalent shielding properties is investigated, and the calculated formula for droplet diameter is derived. Use of the equivalent monodisperse curtain allows significant simplifying a calculation procedure of polydisperse curtain shielding properties. Calculation of polydisperse curtain transmittance for the black body radiation allowed defining its dependence on temperature and width of droplet size distribution function.*

### Введение

В последние годы исследованиям экранирующих свойств водяных завес уделяется большое внимание, что связано с практическим интересом к ним со стороны работников пожарной охраны и строительных организаций. В данной работе рассмотрены некоторые проблемы, связанные с их расчетом.

С целью упрощения расчетов большинство разработанных к настоящему времени математических моделей теплового экранирования рассматривают монодисперсные водяные завесы [1–5]. В то же время известно, что реальные дренчерные оросители и другие источники в большинстве случаев создают распыленные водяные струи с весьма широким распределением капель по размерам [3, 6–8]. Таким образом, возникает вопрос относительно адекватности результатов применения существующих математических моделей для расчета процессов теплового экранирования.

Размер капель очевидным образом влияет на экранирующие свойства водяной завесы. Кроме того, от размера капель зависит их концентрация, которая также влияет на эти свойства [9]. Но для полидисперсной водяной завесы эта зависимость является весьма сложной, и выводы, сделанные на основе математических моделей для монодисперсных завес, могут в данном случае оказаться несостоятельными.

Необходимо исследовать вопрос о влиянии разброса капель по размерам на результат расчета коэффициента пропускания водяной завесы для теплового излучения. В частности, необходимо ответить на вопрос, возможна ли замена реальной распыленной струи ее модель-

ным монодисперсным аналогом, в котором диаметр капль равен его некоторому эквивалентному значению. Если это допустимо, то нужно определить это значение диаметра капль, эквивалентное по отношению к экранирующим свойствам завесы.

В работах [1–5, 8] отсутствует теоретически обоснованный критерий выбора такого эквивалентного диаметра для полидисперсной завесы. В некоторых из них нет необходимости в обосновании такого выбора, поскольку в них отсутствует сравнение с экспериментом [1, 2, 4]. В других работах в качестве эквивалентного принимается средний диаметр Саутера  $D_{32}$ . При этом аргументация такого выбора либо отсутствует [5, 8], либо в качестве таковой принимается близость расчетных и экспериментальных спектров пропускания водяной завесы [3]. Но в последнем случае отсутствует обоснование легитимности такого сравнения, когда пространственно однородная по концентрации капль модельная завеса сравнивается с очевидно неоднородной экспериментальной. При этом по разнице относительного уровня спектров около 2–3% сделан выбор между несколькими возможными вариантами эквивалентного диаметра [3], не учитывая, что неизбежная экспериментальная погрешность может в несколько раз превышать эту величину.

Монодисперсная водяная завеса существенно проще для теоретического анализа по сравнению с полидисперсной. Поэтому замена полидисперсной завесы на эквивалентную ей по экранирующим свойствам монодисперсную должна привести к существенному упрощению расчетных формул. Но при этом необходимо исследовать вопрос, изменится ли при этом общий вид спектра пропускания и насколько сильно.

Помимо исследования спектров пропускания водяной завесы (т.е. зависимостей от длины волны коэффициента пропускания монохроматического излучения) большой практический интерес имеет также исследование коэффициента пропускания для немонохроматического излучения. Это позволяет приблизить рассматриваемую проблему к реальным задачам, возникающим при тушении пожаров. Достаточно удобным для исследования, и в то же время достаточно близким по спектру излучения к некоторым видам пожаров является излучение абсолютно черного тела.

**Постановка задачи**

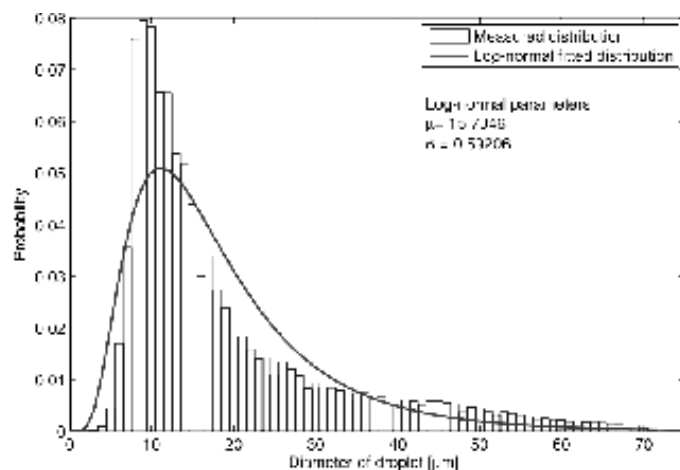
Для заданного удельного содержания воды в полидисперсной водяной завесе: 1) выполнить теоретический анализ влияния параметров функции распределения капель по размерам на величину коэффициента пропускания водяной завесы; 2) определить диаметр капель монодисперсной завесы, эквивалентной по экранирующим свойствам данной полидисперсной завесе; 3) сравнить спектры пропускания полидисперсной и эквивалентной монодисперсной завесы; 4) выполнить расчет зависимости коэффициента пропускания полидисперсной водяной завесы для излучения абсолютно черного тела от его температуры.

**Математическая модель полидисперсной водяной завесы**

Для достижения цели настоящей работы необходима аналитическая функция распределения, близкая к реальным распределениям капель, форму которой можно изменять с помощью численных параметров. В данном случае основным механизмом формирования капель является дробление в распылительном устройстве сплошного потока воды и последующие процессы дробления и коагуляции капель. Согласно теоретическим расчетам [10], в результате этих процессов устанавливается распределение капель по размерам, описываемое функцией логнормального (логарифмически нормального) распределения. Данная функция достаточно часто используется для аппроксимации результатов экспериментальных измерений реальных распределений по размерам капель распыленных водяных струй [8, 11, 12]. Пример такой аппроксимации показан на рисунке 1 [12]. Другими функциями распределения, которые наиболее часто используются с этой целью, являются функция Розин–Раммлера, функция Накаяма–Танасава и другие [13].

Следует учесть, что не существует аналитической функции распределения, которая при любых условиях идеально соответствует реальным распыленным струям. Кроме того, эту степень соответствия сложно определить из-за сложности экспериментов такого типа, что приводит к большой погрешности измерений. Об этом свидетельствует, например, форма построенной на рисунке 1 экспериментальной гистограммы. Но в данной работе важно не подобрать наиболее точную аппроксимацию для реального распределения капель, а определить, как разброс их размеров относительно средней вели-

ны влияет на экранирующие свойства распыленной струи.



*Рисунок 1 — Распределение капель распыленной струи по диаметрам: гистограмма — эксперимент, кривая — аппроксимация функцией логнормального распределения (по данным [12])*

С этой целью можно использовать любую из названных выше функций распределения. В данной работе использована функция логнормального распределения [14]

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \cdot \left(\ln \frac{D}{\mu}\right)^2\right], \quad (1)$$

где  $D$  — диаметр капель;  $\mu$  — медиана (параметр масштаба),  $\sigma$  — параметр формы, который определяет ширину функции распределения. Для решения поставленных задач необходимо исследовать влияние параметра  $\sigma$  на экранирующие свойства водяной завесы.

Средний диаметр капель (математическое ожидание) распределения (1) определяется соотношением

$$D_{av} = \mu \cdot e^{\frac{\sigma^2}{2}}. \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи будем рассматривать полидисперсную водяную завесу как совокупность монодисперсных завес, каждой из которых соответствует одно значение из дискретного спектра диаметров капель, соответствующего заданному распределению  $f(D)$ . Весь диапазон значений диаметров капель представлен в виде ряда дискретных величин с шагом  $D$ :  $D_i = i \cdot D$ , где индекс  $i$  принимает целочисленные значения. С уменьшением  $D$  точность и адекватность расчета возрастают. Коэффициент пропускания полидисперсной завесы в целом равен произведению коэффициентов пропускания ее монодисперсных компонент

$$H_\lambda = \prod_{i=1}^{i_{max}} H_{\lambda i}. \quad (3)$$

Воспользуемся математической моделью [15,16], в которой получена расчетная формула для коэффициента пропускания монодисперсной водяной завесы для монохроматического излучения с длиной волны

$$H_\lambda = \exp\left[-0,934 \cdot \left(1 - e^{-0,84\alpha_\lambda \cdot D}\right) \cdot n_0 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot l\right]. \quad (4)$$

где  $n_0$  — счетная концентрация капель монодисперсной завесы,  $m_3$ ,  $l$  — толщина завесы,  $m$ ,  $\alpha_\lambda$  — коэффициент поглощения воды при длине волны  $\lambda$ ,  $m^{-1}$ .

Используя (4), для монодисперсной компоненты с диаметром капель  $D_i$  получим

$$H_{\lambda i} = \exp\left[-0,934 \cdot \left(1 - e^{-0,84\alpha_\lambda \cdot D_i}\right) \cdot n_i \cdot \frac{\pi D_i^2}{4} \cdot l\right], \quad (5)$$

где концентрация капель  $n_i = n_\sigma \cdot f(D_i) \cdot \Delta D$ . (6)

В данном случае  $n_\sigma$  — это общая концентрация капель (количество капель всех диаметров в единице объема водяной завесы)  $n_\sigma = \sum_{i=1}^{\infty} n_i$ .

$$n_\sigma = \sum_{i=1}^{\infty} n_i$$

Учитывая постановку задачи, необходимо определить величину  $n$  для заданной величины объемной доли воды  $w_{vv}$  (суммарного объема капель в единице объема завесы):  $n_\sigma = \frac{w_{vv}}{V_{av}}$ , (7)

$$n_\sigma = \frac{w_{vv}}{V_{av}}, \quad (7)$$

где  $V_{av}$  — средний объем капли для данного распределения  $V_{av} = \frac{\pi D_{3,0}^3}{6}$ , (8)

$$V_{av} = \frac{\pi D_{3,0}^3}{6}, \quad (8)$$

где  $D_{3,0}$  — диаметр капель данного распределения, средневзвешенный по их объемам (индекс 3,0 соответствует общепринятой системе обозначений средневзвешенных величин для статистических ансамблей частиц). Для определения  $D_{3,0}$  используем начальный момент третьего порядка  $\mu_3$  данной функции распределения:

$$D_{3,0} = \sqrt[3]{\mu_3} = \sqrt[3]{\mu^3 \cdot e^{\frac{9}{2}\sigma^2}} = \mu \cdot e^{\frac{3}{2}\sigma^2} = D_{av} \cdot e^{\sigma^2}. \quad (9)$$

Таким образом, задавая в качестве начальных параметров  $w_{vv}$ ,  $l$ ,  $D_{av}$  и  $\sigma$ , можно выполнить расчет всех остальных характеристик водяной завесы. Для проверки данной методики расчета компонентной концентрации капель  $n_i$  согласно (6) был выполнен численный расчет величины

$$w_{vv} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} n_i \cdot \frac{\pi D_i^3}{6}.$$

При достаточно больших величинах  $i_{\max}$  было получено совпадение расчетного значения данной величины с заданным параметром  $w_{vv}$  при любых комбинациях модельных параметров, что подтверждает правильность данной методики.

Весьма интересным и симптоматичным является поведение общей концентрации капель при изменении ширины функции распределения. Подставляя (9) в (8) и (7), найдем

$$n_\sigma = \frac{6 w_{vv}}{\pi D_{av}^3} \cdot e^{-3\sigma^2}. \quad (10)$$

На основе данного соотношения можно сделать вывод, что при фиксированных значениях среднего диаметра капель и содержания воды в завесе общее количество капель резко уменьшается при расширении функции распределения размеров капель (т.е. при увеличении параметра  $\sigma$ ). Для примера на рисунке 2 построена расчетная зависимость  $n_\sigma(\sigma)$  для типичных значений  $D_{av} = 0,1$  мм и  $w_{vv} = 10^{-4}$ .

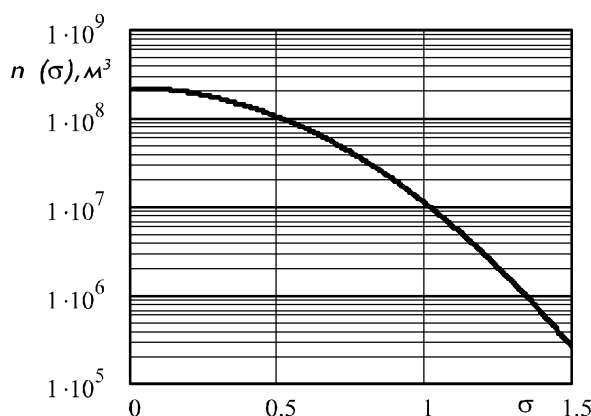


Рисунок 2 — Зависимость  $n(\sigma)$

Причина такого поведения общей концентрации капель заключается, очевидно, в следующем. Расширение функции распределения приводит к возрастанию доли крупных капель в объеме водяной завесы. Даже небольшое количество крупных капель вследствие их большого объема содержит значительную часть общего количества воды. Вследствие этого, с увеличением при том же удельном содержании воды в завесе уменьшается общее количество капель. Как будет показано ниже, это приводит также и к уменьшению геометрического коэффициента экранирования (отношения суммарной площади сечения капель к площади завесы), который напрямую связан с коэффициентом пропускания водяной завесы.

Впрочем, характер зависимости  $n_\sigma(\sigma)$  может быть совершенно другим, если при изменении считать постоянной величиной не среднеарифметическое значение диаметра  $D_{av}$ , а какой-либо другой параметр. Например, при постоянной величине среднеобъемного диаметра капель  $D_{3,0}$  получим, что  $n_\sigma$  остается постоянной при изменении  $\sigma$ . Если же зафиксировать средний диаметр Сатурера  $D_{3,2}$ , то  $n_\sigma$  при увеличении  $\sigma$  будет возрастать. Вопрос о том, какой из названных средних диаметров является “более важным”, зависит от исследуемого явления или процесса. В данном случае все расчетные формулы написаны через среднеарифметический диаметр  $D_{av}$ , но при необходимости можно осуществить преобразование любой формулы на основе существующих взаимозависимостей между средними величинами.

Используя (1), (5), (6), (10), для компоненты завесы с диаметром капель  $D_i$  получим

$$H_{\lambda i} = \exp \left[ -0,934 \cdot \left( 1 - e^{-0,84 \alpha_{\lambda} \cdot D_i} \right) \cdot \frac{3 w_{vv} \cdot l \cdot \Delta D \cdot D_i}{2 \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D_{av}^3} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left( \ln \frac{D_i + \sigma^2}{D_{av} + \sigma^2} \right)^2 - 3\sigma^2} \right] \quad (11)$$

Подставляя (11) в (3), найдем

$$H_{\lambda} = \prod_{i=1}^{i_{\max}} \exp \left[ -0,934 \cdot \left( 1 - e^{-0,84 \alpha_{\lambda} \cdot D_i} \right) \cdot \frac{3 w_{vv} \cdot l \cdot \Delta D \cdot D_i}{2 \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D_{av}^3} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left( \ln \frac{D_i + \sigma^2}{D_{av} + \sigma^2} \right)^2 - 3\sigma^2} \right] \quad (12)$$

На рисунке 3 представлены спектры пропускания (зависимости  $H(\lambda)$ ), расчет которых выполнен для следующих значений параметров:

- объемная доля воды  $w_{vv} = 10^{-4}$ ;
- толщина водяной завесы  $l = 0,2$  м;
- математическое ожидание распределения  $f(D)$  (средний диаметр капель)  $D_{av} = 50$  мкм.

На рисунке 3 представлены 4 расчетных спектра, один из которых (для  $\sigma = 0$ ) получен с помощью расчетной формулы (4), а три других — с помощью формулы (12). Они соответствуют различным значениям параметра  $\sigma$ , указанным на рисунке. Параметр  $\sigma$  определяет ширину распределения  $f(D)$  и приблизительно равен отношению среднеквадратичного отклонения к среднему диаметру капель  $D_{av}$ . Для большей наглядности в правой части рисунка 3 представлены графики распределений  $f(D)$ , соответствующих каждому значению  $\sigma$ . Для расчета спектров пропускания использованы данные работы [17], на основе которых выполнен расчет значений  $\alpha_{\lambda}$  для каждой длины волны.

Расчеты, результаты которых аналогичны представленным на рисунке 3, были выполнены для широкого диапазона значений указанных выше параметров. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) при увеличении ширины функции распределения капель коэффициент пропускания водяной завесы возрастает (экранирующие свойства ухудшаются);
- 2) при уменьшении среднего диаметра капель  $D_{av}$  коэффициент пропускания уменьшается;
- 3) влияние ширины функции распределения на величину коэффициента пропускания становится существенным при  $\sigma > 0,1$  (т.е. когда полуширина функции распределения превышает  $0,1 \cdot D_{av}$ ). При  $\sigma < 0,1$  спектры пропускания полидисперсной и монодисперсной завес практически совпадают.

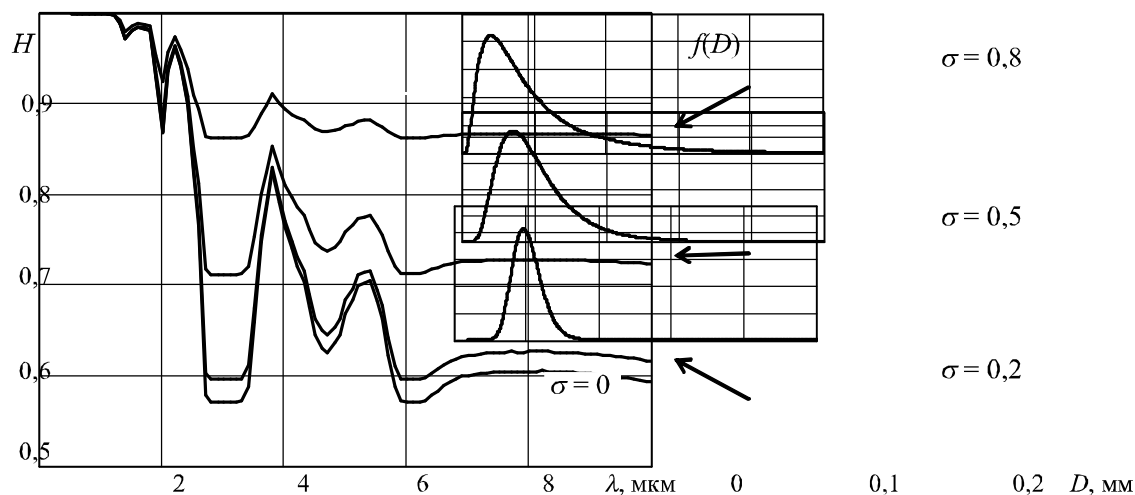


Рисунок 3 — Влияние ширины функции распределения капель по диаметрам на спектр пропускания водяной завесы

**Определение параметров эквивалентной монодисперсной завесы**

Весьма важным с практической точки зрения является вопрос о количественной взаимосвязи между коэффициентом пропускания водяной завесы  $H_\lambda$  и параметром формы  $\sigma$ . Для установления такой взаимосвязи каждому из спектров пропускания необходимо поставить в соответствие количественный параметр, который характеризует его смещение вверх или вниз относительно других спектров (рисунок 3). Нетрудно заметить, что форма каждого из спектров характеризуется некоторым минимальным уровнем, на котором находятся все наиболее интенсивные локальные минимумы спектра. Его происхождение связано с экспоненциальным членом в круглых скобках в выражении (12). При тех длинах волн, при которых коэффициент поглощения воды  $\alpha_\lambda$  достигает достаточно больших величин, данный экспоненциальный член становится почти равным нулю, а выражение в круглых скобках — единице. Дальнейшее увеличение  $\alpha_\lambda$  уже не влияет на форму спектра, т.е. он достигает некоторого минимального уровня, величина которого, исходя из вышесказанного, равна

$$H_{\min}(\sigma) = \prod_{i=1}^{i_{\max}} \exp \left[ -0,934 \cdot \frac{3 w_{vv} \cdot l \cdot \Delta D \cdot D_i}{2 \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D_{av}^3} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left( \ln \frac{D_i}{D_{av}} + \frac{\sigma^2}{2} \right)^2 - 3\sigma^2} \right].$$

С физической точки зрения, эта формула определяет коэффициент пропускания водяной завесы для полностью поглощающих капель. Из данного выражения можно определить, что минимальный уровень каждого спектра зависит от параметров  $w_{vv}$ ,  $l$ ,  $D_{av}$  и  $s$ . Формула (13) позволяет выполнить точный расчет  $H_{\min}$  и получить соответствующие данные в виде таблиц и графиков. К сожалению, она непригодна для практических расчетов вследствие ее чрезмерной сложности.

В связи с этим, необходимо найти функцию аппроксимации, которая позволит выполнить расчет величины  $H_{\min}$ , а также проанализировать ее зависимость от названных параметров.

Для  $\sigma = 0$  (монодисперсная завеса) расчет спектра пропускания производится по формуле (4), из которой для минимального уровня спектра найдем (в данном случае  $D = D_{av}$ )

$$H_{\min}(0) = \exp \left( -0,934 \cdot n_0 \cdot \frac{\pi D_{av}^2}{4} \cdot l \right). \quad (14)$$

Здесь под знаком экспоненты в скобках — упомянутый выше геометрический коэффициент экранирования. Соответствующая ему величина — в квадратных скобках в (13). В случае полного поглощения излучения каплями, которому соответствуют эти формулы, именно геометрический фактор (удельная площадь перекрытия каплями потока излучения) определяет экранирующие свойства завесы.

С учетом (10) при условии  $\sigma = 0$  перепишем (14) через объемную долю воды:

$$H_{\min}(0) = \exp \left( -1,4 \cdot \frac{w_{vv}}{D_{av}} \cdot l \right). \quad (15)$$

Исследуем возможность замены реальной полидисперсной завесы эквивалентной ей модельной монодисперсной завесой с таким же коэффициентом пропускания теплового излучения.

С этой целью воспользуемся расчетными формулами для минимальных уровней коэффициента пропускания этих завес (13) и (15). Приравнявая эти два выражения, получим условие равенства их коэффициентов пропускания:

$$H_{\min,eq}(0) = H_{\min}(\sigma), \quad (16)$$

или

$$\exp \left( -1,4 \cdot \frac{w_{vv}}{D_{eq}} \cdot l \right) = \prod_{i=1}^{i_{\max}} \exp \left[ -0,934 \cdot \frac{3 w_{vv} \cdot l \cdot \Delta D \cdot D_i}{2 \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D_{av}^3} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left( \ln \frac{D_i}{D_{av}} + \frac{\sigma^2}{2} \right)^2 - 3\sigma^2} \right].$$

Отсюда диаметр капель эквивалентной монодисперсной завесы

$$D_{eq} = -1,4 \cdot w_{vv} \cdot l \cdot \left\{ \ln \prod_{i=1}^{i_{\max}} \exp \left[ -0,934 \cdot \frac{3 w_{vv} \cdot l \cdot \Delta D \cdot D_i}{2 \sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot D_{av}^3} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left( \ln \frac{D_i}{D_{av}} + \frac{\sigma^2}{2} \right)^2 - 3\sigma^2} \right] \right\}. \quad (17)$$

Поскольку формула (17) является чрезмерно сложной, была выполнена статистическая обработка полученных с ее помощью расчетных данных и предложена функция аппроксимации

$$D_{eq} = D_{av} \cdot e^{2,33 \cdot \sigma^{2,33}}. \quad (18)$$

Концентрацию капель эквивалентной монодисперсной завесы найдем через заданную объемную долю воды  $w_{vv}$  и объем капли  $V_{eq}$

$$n_{eq} = \frac{w_{vv}}{V_{eq}} = \frac{6 w_{vv}}{\pi D_{eq}^3} = \frac{6 w_{vv}}{\pi D_{av}^3} \cdot e^{-7 \cdot \sigma^{2,33}}. \quad (19)$$

Для расчета среднего диаметра Саутера  $D_{3,2}$ , который применялся в качестве эквивалентного диаметра капель в некоторых работах [3, 5, 8], в случае логнормального распределения получим

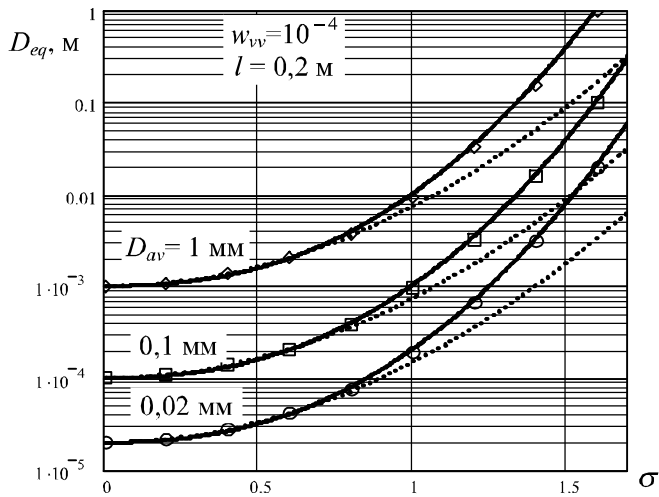


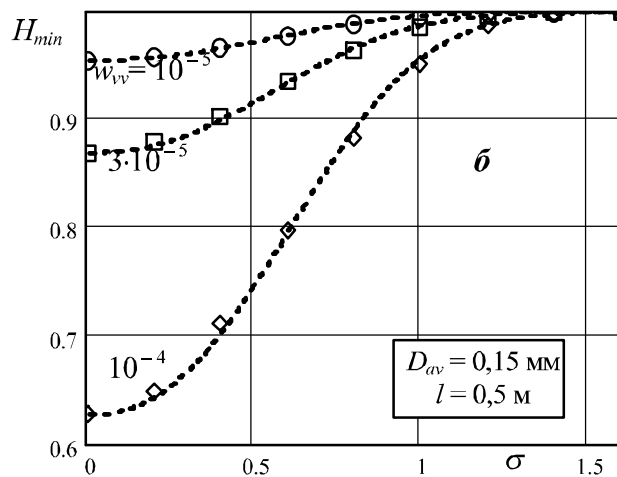
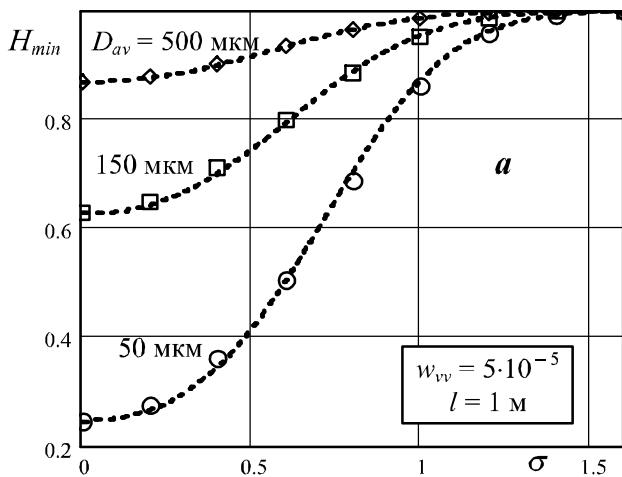
Рисунок 4 — Графики функции аппроксимации  $D_{eq}(\sigma)$ : расчет по формулам (17) (точки), (18) (сплошные линии) и (20) (пунктир)

$$D_{3,2} = \frac{\mu_3}{\mu_2} = \frac{\mu^3 \cdot e^{\frac{9}{2}\sigma^2}}{\mu^2 \cdot e^{2\sigma^2}} = \mu \cdot e^{\frac{5}{2}\sigma^2} = D_{av} \cdot e^{2\sigma^2}, \quad (20)$$

где  $\mu_2$  и  $\mu_3$  — начальные моменты 2-го и 3-го порядков.

Для сравнения результатов расчета зависимости  $D_{eq}(\sigma)$  по формулам (17) и (18) на рисунке 4 представлены соответствующие графики. Значения параметров расчета указаны на рисунке. Были выполнены расчеты и для других значений  $D_{av}$ ,  $w_{vv}$  и  $l$ , которые также показали хорошее взаимное соответствие.

Показанные на этом же рисунке результаты расчета по формуле (20) среднего диаметра Саутера  $D_{3,2}$  свидетельствуют о его значительном несоответствии точным расчетным данным при  $\sigma > 1$ .



(23)

Рисунок 5 — Зависимости  $H_{min}(\sigma)$ : точки — расчет по формуле (13); пунктир — функция аппроксимации (21)

Хорошее совпадение графиков функций (17) и (18) в широком диапазоне значений параметров водяных завес позволяет использовать функцию аппроксимации (18) для упрощения практических расчетов, связанных с полидисперсными водяными завесами. Подставляя в (15) вместо  $D_{av}$  выражение (18), получим функцию аппроксимации для величины  $H_{min}$ , которая позволяет выполнять ее приближенный расчет с помощью формулы, упрощенной по сравнению с (13),

$$H_{min}(\sigma) = \exp\left(-1,4 \cdot \frac{w_{vv} \cdot l}{D_{av}} \cdot e^{-2,33\sigma^{2,33}}\right). \quad (21)$$

На рисунке 5 показано сравнение результатов расчетов, выполненных с помощью точной формулы (13) и функции аппроксимации (21). Показанные два семейства графиков соответствуют различным сочетаниям параметров, которые указаны на рисунках. По форме графиков можно судить о характере зависимости величины  $H_{min}$  от  $\sigma$  и от других параметров водяной завесы. Кроме того, по графикам можно сделать вывод о степени соответствия функции аппроксимации (21) точным расчетным данным.

Характер зависимостей, графики которых показаны на рисунке 5, позволяет сделать вывод, что ширина функции распределения по размерам капель водяной завесы является одной из ее важнейших характеристик. При этом параметр  $\sigma$  влияет на экранирующие свойства завесы довольно слабо, пока его величина не превышает значений  $\sim 0,3$ . При превышении параметром  $\sigma$  этого значения коэффициент пропускания завесы быстро увеличивается, и при достижении значения  $\sigma \sim 1$  или выше тепловое экранирование становится неэффективным при любых значениях других параметров, соответствующих типичным режимам водяных завес.

Формальная замена реальной полидисперсной водяной завесы ее монодисперсным аналогом с эквивалентным диаметром капель  $D_{eq}$  позволяет существенно упр-

ростить процедуру расчета спектров пропускания теплового излучения.

Преобразуем расчетную формулу для коэффициента пропускания (4). Представим концентрацию капель через объемную долю воды  $w_{vv}$ :

$$n_0 = \frac{6 w_{vv}}{\pi D^3}.$$

После подстановки в (4) и замены  $D \rightarrow D_{eq}$  получим

$$H_\lambda = \exp \left[ -0,934 \cdot \left( 1 - e^{-0,84 \cdot \alpha_\lambda \cdot D_{eq}} \right) \cdot \frac{3 w_{vv}}{2 D_{eq}} \cdot l \right], \quad (22)$$

или

$$H_\lambda = \exp \left[ -1,4 \cdot \left( 1 - e^{-0,84 \cdot \alpha_\lambda \cdot D_{av} \cdot e^{2,33 \cdot \sigma^{2,33}}} \right) \cdot \frac{w_{vv} \cdot l}{D_{av}} \cdot e^{-2,33 \cdot \sigma^{2,33}} \right] \quad (23)$$

Формула (23) может использоваться для приближенного расчета спектров пропускания. Для примера на рисунке 6 представлен сравнительный результат расчета спектров, ранее показанных на рисунке 3. Спектры, рассчитанные по точной формуле (12) (сплошная линия) и по приближенной формуле (23) (пунктир), достаточно близки по уровню и по форме. Разница уровней не превышает 3%. Следует отметить сглаживание особенностей спектров вследствие их расчета по приближенной формуле, которое особенно заметно при больших значениях  $\sigma$ .

Таким образом, упрощенная формула (23) позволяет выполнить расчет спектров пропускания с точностью около 3% от их минимального уровня. Но вследствие упомянутого эффекта сглаживания она не может применяться в случае исследования тонкой структуры спектров.

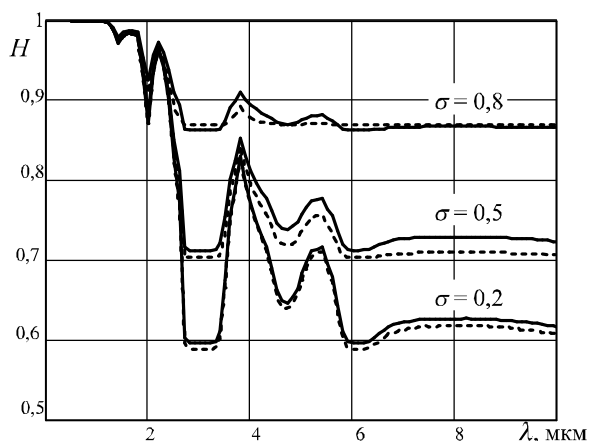


Рисунок 6 — Спектры пропускания водяной завесы, рассчитанные по точной формуле (12) (сплошная линия) и по приближенной формуле (22) (пунктир)

### Коэффициент пропускания водяной завесы для излучения абсолютно черного тела

Все представленные выше результаты получены для взаимодействия с водяной завесой монохроматического излучения. Они позволили выполнить необходимый в данном случае анализ экранирующих свойств полидисперсной завесы, а также получить расчетные формулы для эквивалентной монодисперсной завесы. Однако при практическом использовании водяных завес для экранирования тепловых потоков в зоне пожара излучение не является монохроматическим и характеризуется некоторым непрерывным спектром в определенном интервале длин волн инфракрасного диапазона. Форма спектра и спектральный интервал зависят от вещества очага пожара и его температуры. Простейшим способом учета этой температурной зависимости является моделирование очага пожара излучением абсолютно черного тела. В этом случае спектральное распределение интенсивности излучения, падающего на водяную завесу (планковский спектр)

$$I_\lambda = I_0 \lambda^{-5} (e^{hc/(\lambda kT)} - 1)^{-1},$$

где  $I_0$  — нормирующий коэффициент,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света в вакууме,  $k$  — постоянная Больцмана.

Расчет коэффициента пропускания полидисперсной водяной завесы для монохроматического излучения производится с помощью формулы (12), при выводе которой использована формула (5), определяющая коэффициент пропускания монодисперсной завесы. Для некохроматического излучения вместо формулы (5) необходимо использовать более общую формулу (4), которая содержит коэффициент пропускания сферической капли воды  $\eta$ . Повторяя те же математические процедуры, что и при выводе формулы (12), получим для некохроматического излучения

$$H_b = \prod_{i=1}^{i_{\max}} \exp \left\{ -0,559 \cdot [1 - \eta_b(D_i, T)] \cdot \frac{w_{vv} \cdot l \cdot \Delta D \cdot D_i}{\sigma \cdot D_{av}^3} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \left( \ln \frac{D_i}{D_{av}} + \frac{\sigma^2}{2} \right)^2 - 3 \cdot \sigma^2} \right\} \quad (24)$$

Коэффициент пропускания сферической капли воды для излучения абсолютно черного тела  $\eta_b$  зависит от диаметра капли  $D$  и от температуры тела  $T$ . В [16] для его приближенного расчета получена функция аппроксимации:

$$\eta_b(D, T) = A \cdot D^B + C, \quad (25)$$

где коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$  зависят от температуры:

$$A = 1,25 \cdot 10^{-35} \cdot (T - 207,6)^{11,02}, \quad (26)$$

$$B = -2,329 + 1,6362 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,0519 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 1,386 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 5 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 0,651 \cdot 10^{-16} \cdot T^5, \quad (27)$$

$$C = -9,59 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,002495 \cdot T}. \quad (28)$$

Используем эквивалентную монодисперсную водяную завесу с целью упрощения процедуры расчетов. Выполним операции, подобные тем, что были сделаны при выводе приближенной формулы (23), для данного случая получим

$$H_b = \exp \left\{ -1,4 \cdot \left[ 1 - \eta_b \left( D_{av} \cdot e^{2,33 \cdot \sigma^{2,33}}, T \right) \right] \cdot \frac{w_{vy} \cdot l}{D_{av}} \cdot e^{-2,33 \cdot \sigma^{2,33}} \right\} \quad (29)$$

Для проверки соответствия результатов расчетов, полученных с помощью точной (24) и приближенной (29) формул, на рисунке 7 представлена серия графиков, полученных для типичных значений параметров водяных завес. Их сравнение позволяет сделать вывод, что погрешность, связанная с применением приближенной формулы (29), не превышает 3-4% от величины  $H_b$ .

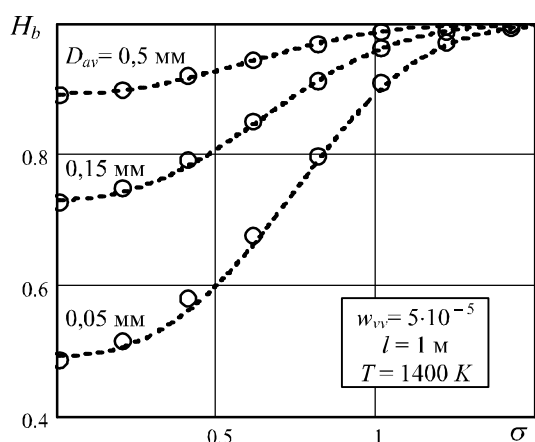


Рисунок 7 — Расчет зависимостей  $H_b(\sigma)$ : точки — по формуле (24); пунктир — по формуле (29)

Графики рисунка 7 получены для параметров, соответствующих графикам рисунка 5, а, и подобны им по форме, но отличаются численными характеристиками. Это связано с тем, что величина  $H_b$ , как и  $H_{min}$ , определяется геометрическими характеристиками водяной завесы (размеры и концентрация капель, толщина завесы). Но капли при расчете  $H_{min}$  являются непроницаемыми для излучения, а при расчете  $H_b$  — полупрозрачными, вследствие чего расчетные величины  $H_b$  превышают соответствующие им величины  $H_{min}$ .

При заданной функции распределения капель по их размерам коэффициент пропускания капель (и завесы в целом) зависит от спектрального состава излучения, т.е. от температуры его источника  $T$ . Для исследования этой зависимости были выполнены расчеты графиков  $H_b(\sigma)$  для разных  $T$  (рисунок 8) и  $H_b(T)$  для разных  $\sigma$  (рисунок 9). Они позволяют оценить численные величины коэффициентов пропускания водяной завесы для разных сочетаний ее параметров.

Поведение расчетных зависимостей, представленных на рисунках 8 и 9, дает возможность увидеть, насколько существенным является влияние температуры модель-

ного очага пожара на коэффициент пропускания завесы. При повышении данной температуры коэффициент пропускания возрастает, и этот эффект наиболее сильно проявляется при малых  $\sigma$ . При возрастании  $\sigma$  коэффициент пропускания увеличивается и становится менее зависимым от температуры очага пожара.

### Выводы

Теоретически рассмотрен процесс прохождения монохроматического электромагнитного теплового излучения через полидисперсную распыленную водяную струю (водяную завесу).

Выполнен теоретический анализ влияния параметров функции распределения капель по размерам на спектр пропускания водяной завесы. В качестве примера рассмотрены водяные завесы с логарифмически нормальным распределением капель по размерам.

Исследована возможность замены полидисперсной водяной завесы ее монодисперсным аналогом с эквивалентными экранирующими свойствами. Выведены расчетные формулы для геометрического коэффициента пропускания водяной завесы, для диаметра капель эквивалентной монодисперсной завесы, для коэффициента пропускания излучения абсолютно черного тела.

Найдены функции аппроксимации с целью упрощения расчетных формул и выполнены сравнительные расчеты для точных и упрощенных формул.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) при увеличении ширины функции распределения капель (параметра  $\sigma$ ) коэффициент пропускания водяной завесы возрастает (экранирующие свойства ухудшаются);
- 2) параметр  $\sigma$  влияет на экранирующие свойства завесы довольно слабо, пока его величина не превышает значений  $\sim 0,3$ ; при превышении параметром  $\sigma$  этого значения коэффициент пропускания завесы быстро увеличивается, и при достижении значения  $\sigma \sim 1$  или выше тепловое экранирование становится неэффективным при любых значениях других параметров, соответствующих типичным режимам водяных завес;
- 3) в качестве диаметра капель эквивалентной по экранирующим свойствам монодисперсной завесы при  $s < 1$  можно принимать средний диаметр Саутера  $D_{3,2}$ ; при  $s > 1$  необходимо использовать формулу (18), полученную в данной работе;
- 4) при замене реальной полидисперсной водяной завесы эквивалентной ей по экранирующим свойствам монодисперсной завесой происходит искажение формы (сглаживание особенностей) спектра пропускания завесы;
- 5) коэффициент пропускания полидисперсной водяной завесы для излучения абсолютно черного тела зависит от температуры тела (возрастает с увеличением температуры); данная зависимость ослабевает при увеличении параметра  $s$ .

Поскольку рассмотрена только одна (логарифмически нормальная) функция распределения капель по раз-



мерам, в дальньому необхідно досліджувати також водяні завеси з іншими функціями розподілу. Крім того, для отримання практичних висновків необхідно розробити відповідну методику розрахунків і розглянути взаємодію з полідисперсними водяними завесами також реального поліхроматичного випромінювання, що відрізняється від спектра абсолютно чорного тіла і близького до випромінювання типового осередку пожежі.

### Література

1. Ravigururajan, T.S. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets / T.S. Ravigururajan, M.R. Beltran // 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—255.
3. 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—10.
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. 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.
6. Parent, G. Experimental investigation of radiation transmission through a water spray / G. Parent, P. Boulet, S. Gauthier, J. Blaise, A. Collin // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2006. — Vol. 97, No. 1. — P. 126—141.
7. Dembele, S. Experimental study of water sprays for the attenuation of fire thermal radiation / S. Dembele, J.X. Wen, J.F. Sacadura // ASME J. Heat Transfer, 2001. — Vol. 123, No. 3. — P. 534—543.
8. Godoy W.F. Efficient Transmission Calculations for Polydisperse Water Sprays Using Spectral Scaling / W.F. Godoy, P.E. DesJardin // J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2007. — Vol. 108. — P. 440—453.
9. Виноградов, А.Г. Теоретический анализ пространственного распределения концентрации капель водяной завесы / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. — 2010. — т. 19. — №1 — С. 45—49.
10. Колмогоров, А.Н. О логарифмически нормальном законе распределения частиц при дроблении / А.Н. Колмогоров // Док. АН СССР, 1941. — Т. 31. — № 2. — С.99 —101.

### 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. 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.
4. Yang W., Parker T., Ladouceur H., Kee R. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression. Fire Safety J., 2004, vol. 39, pp. 41-66.
5. 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, vol. 2, no. 2, pp. 91-98.
6. Parent G., Boulet P., Gauthier S., Blaise J., Collin A. Experimental investigation of radiation transmission through a water spray. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2006, vol. 97, no. 1, pp. 126-141.
7. Dembele S., Wen J.X., Sacadura J.F. Experimental study of water sprays for the attenuation of fire thermal radiation. ASME J. Heat Transfer, 2001, vol. 123, no. 3, pp. 534-543.
8. Godoy W.F., DesJardin P.E. Efficient Transmission Calculations for Polydisperse Water Sprays Using Spectral Scaling. J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2007, vol. 108, pp. 440 - 453.
9. Vinogradov A.G. Teoreticheskij analiz prostranstvennogo raspredelenija koncentracii kapel' vodjanoj zavesy [Theoretical analysis of spatial distributing of droplet concentration of water curtain]. Pozharovzryvobezopasnost' - Fire and explosion safety, 2010, vol. 19, no. 1, pp. 45-49.
10. Kolmogorov A.N. O logarifmicheski normal'nom zakone raspredelenija chastic pri droblenii [About logarithmic normal distribution law of particles at subdivision]. Doklady AN SSSR - Reports of Academy of Sciences of the USSR, 1941, vol. 31, no. 2, pp. 99 - 101.
11. Husted B.P., Petersson P., Lund I., Holmstedt G. Comparison of PIV and PDA droplet velocity measurement techniques on two high-pressure water mist nozzles. Fire Safety J., 2009, vol. 44, no. 8. pp. 1030-1045.
12. Husted B.P. Experimental measurement of water mist systems and implications for modeling in CFD. Doctoral Thesis: Sweden, Lund University, 2007, 133 p. Available at: [http://www.dbi-net.dk/media/Doctoral\\_thesis\\_Bjarne\\_Paulsen\\_Husted\\_Main\\_Part.pdf](http://www.dbi-net.dk/media/Doctoral_thesis_Bjarne_Paulsen_Husted_Main_Part.pdf)
13. Pimentel R.G. Measurement and prediction of droplet size distribution in sprays. Canada, Quebec, Universit? Laval, 2006, 305 p. Available at: <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/23623/23623.pdf>
14. Vadzinskij R.N. Spravochnik po verojatnostnym raspredelenijam [Handbook of probability distributions]. St.-Petersburg: Nauka, 2001, 295 p.
15. Vinogradov A.G. Pogloshhenie teplovogo izlučenja vodjanyimi zavesami [Thermal radiation absorption by

water curtains]. Pozharovzryvobezopasnost' - Fire and explosion safety, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 73-82.

16. Vinogradov A.G. Pogloshhenie teplovogo izlucheniya vodjanyimi zavesami. Chast' 2 [Thermal radiation absorption by water curtains. Part 2]. Pozharovzryvobezopasnost' - Fire and explosion safety, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 72-84.

17. 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.

УДК 536.3: 535.34:614.838.441

## **РАСЧЕТ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ ВОДЯНОЙ ЗАВЕСЫ**

**А.Г. Виноградов**

Виконано теоретичний аналіз впливу параметрів функції розподілу крапель за розмірами на спектр пропускання водяної завіси. Як приклад розглянуті водяні завіси з логарифмічно нормальним розподілом крапель за розмірами. Досліджено можливість заміни полідисперсної водяної завіси її монодисперсним аналогом з еквівалентними екрануючими властивостями. Виведено розрахункові формули для мінімального рівня коефіцієнту пропускання водяної завіси та для діаметру крапель еквівалентної монодисперсної завіси. Знайдено функції апроксимації з метою спрощення розрахункових формул та виконано порівняльні розрахунки для точних та спрощених формул. Розроблено методику розрахунків коефіцієнту пропускання завіси для випромінювання абсолютно чорного тіла.

Ключові слова: полідисперсна водяна завіса, екранування теплового випромінювання, коефіцієнт пропускання.

УДК 536.3: 535.34:614.838.441

## **CALCULATIONS OF THERMAL RADIATION TRANSMISSION SPECTRA FOR POLYDISPERSE WATER CURTAINS**

**A.G. Vinogradov**

Modification of calculated techniques for transmission spectra of polydisperse water curtains with account of droplet size distribution for thermal radiation of near infrared region of 1–10 mm.

The mathematical model of monodisperse water curtain earlier developed on the basis of a geometrical optics approximation is put in a basis of the work. The technique developed in this paper allows taking account of droplet size distribution of a water curtain. As an example water curtain with logarithmic normal distribution function of droplet sizes have been considered.

According to results of the executed calculations, the transmittance of thermal radiation strongly increases in process of increase in width of this distribution function. Possibility of replacement of an polydisperse water curtain by its monodisperse analog with the equivalent shielding properties is investigated, and the calculated formula for droplet diameter is derived.

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

Keywords: polydisperse water curtain; thermal radiation shielding; transmittance.

*Надійшла 4.04.2013 року*