

Расчет конструктивных параметров противопожарных водяных завес

А. Г. Виноградов

Черкасский национальный университет им. Богдана Хмельницкого, г. Черкассы, Украина

Received: 01 November 2019 / Accepted: 24 November 2019

Аннотация. Работа направлена на практическое применение ранее полученных результатов математического моделирования противопожарных водяных завес. Водяная завеса – это струя распыленной воды, предназначенная для защиты людей и материальных ценностей от теплового излучения пожара. Найденные в результате математического моделирования расчетные формулы позволяют рассчитать параметры защиты от теплового излучения при помощи водяной завесы и их зависимость от конструктивных параметров технологического оборудования. Согласно полученным формулам, коэффициент пропускания теплового излучения зависит от распределения капель водяной завесы по размерам, удельного содержания воды, толщины завесы и спектральных характеристик теплового излучения. Полный набор расчетных формул, полученных в работе, позволяет определить интегральный коэффициент пропускания водяной завесы заданной конструкции или, наоборот, для заданного коэффициента пропускания рассчитать конструктивные параметры защитной системы, предназначенной для создания водяной завесы. Соответственно, представлены два расчетных метода, каждый из которых сопровождается типичным конкретным примером численных расчетов. Расчетные формулы достаточно просты, поэтому расчеты можно выполнять на инженерном калькуляторе или с использованием пакетов компьютерной математики. После выполнения достаточного количества апробаций и практических применений представленные методики могут быть использованы для создания нормативного документа – стандартного метода проектирования противопожарных водяных завес.

Ключевые слова: противопожарная водяная завеса; тепловое излучение; методика расчета.

Введение

Одним из наиболее опасных факторов, сопровождающих естественные и техногенные пожары, является тепловое излучение. Типичным значением интенсивности теплового облучения в зоне пожара является 20 – 40 кВт/м², но в некоторых случаях она может достигать 80 кВт/м² [1–4]. Если учесть, что уже интенсивность облучения 12 кВт/м² практически мгновенно причиняет ожог на незащищенной поверхности кожи человека, то становится ясно, насколько большую опасность несет этот фактор. Именно поэтому существует проблема обеспечения защиты от теплового излучения спасателей во время тушения пожаров и путей эвакуации в местах массового пребывания людей (торгово-развлекательные центры, вокзалы, гостиницы, больницы, театры и т.п.). Кроме того, эффективные средства защиты требуются в тех случаях, когда тепловое излучение может быть причиной значительного материального ущерба: повреждения и выхода из строя технологического оборудования, разрушения и возгорания различных материалов, возникновения новых очагов пожара.

Известным средством защиты от теплового излучения являются водяные завесы, т.е. соответствующим образом расположенные струи распыленной воды (СРВ). Их преимуществами перед другими средствами защиты являются: 1) быстрая реакция в случае внезапного возникновения опасности; 2) возможность монтажа в любом месте без образования дополнительных препятствий для деятельности учреждения; 3) органичное сочетание с системами автоматического водяного пожаротушения; 4) экологическая безопасность. Благодаря этим преимуществам, дренчерные системы для создания водяных завес получили широкое применение на предприятиях и в учреждениях с целью выполнения требований пожарной безопасности [5–10].

Схема теплового экранирования с помощью водяной завесы представлена на рис. 1. Интенсивность (плотность мощности) теплового излучения I_1 от очага пожара после прохождения через СРВ уменьшается до некоторой величины I_2 . Основным параметром водяной завесы, характеризующим ее способность экранировать тепловое излучение, является коэффициент пропускания:

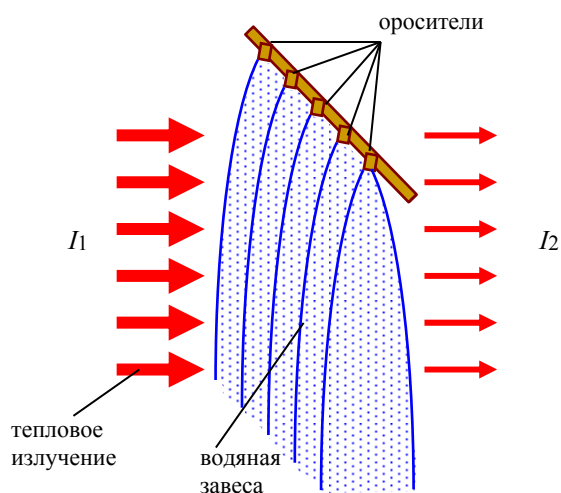


Рис. 1. Схема водяной завесы

$$H = \frac{I_2}{I_1}. \quad (1)$$

Существует реальная потребность разработки и сооружения защитных систем типа водяных завес. Но главной проблемой на пути ее реализации является отсутствие методов расчета таких систем с целью их проектирования. Анализ существующей нормативной документации свидетельствует о том, что до сих пор отсутствуют сертифицированные методики расчета экранирующих свойств водяных завес. Вследствие этого при их проектировании, как правило, используется ошибочная расчетная методика, в основе которой лежит не расчет ослабления теплового излучения, а гидравлический расчет сети водоснабжения [11, 12]. В этой методике распыленная вода рассматривается не как средство защиты от теплового излучения, а как огнетушащее средство. Основным конечным параметром, который обеспечивается в результате такого проектирования,

является интенсивность орошения водой поверхности, на которую направлен СРВ. Такой параметр, как размер капель, в этой методике не представлен, откуда следует нелепый вывод: безразлично, как обеспечить данную интенсивность орошения – сплошной струей, крупнокапельной или водяным туманом. Еще один нонсенс данной методики: в ней вообще не рассматривается тепловое излучение, а, следовательно, не обсуждаются и указанные выше параметры H , I_1 , I_2 .

Такой подход к расчетам свойств водяных завес противоречит их назначению. Водяная завеса – это защитное средство, и она не предназначена для тушения пожара. Поэтому в основу расчета защитных свойств водяной завесы должен быть положен расчет ослабления теплового излучения. Именно такую функцию выполняют водяные завесы при возникновении пожара, что подтверждается примерами, описанными в литературных источниках (например, [5–10]).

Анализ последних исследований и публикаций

Отсутствие расчетных методик для конструирования и определения оптимальных режимов работы защитных водяных завес еще до недавнего времени было обусловлено недостаточной разработкой теоретической базы процессов, связанных с их функционированием. В последние годы ситуация изменилась благодаря разработке полномасштабной математической модели формирования водяных завес и их взаимодействия с тепловым излучением пожаров [13, 14]. На основе этой модели найдена формула для расчета коэффициента пропускания водяной завесы для теплового излучения:

$$H = \exp \left[-1,4 \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{l_{eq}}{D_{eq}} \right], \quad (2)$$

где D_{eq} – эквивалентный диаметр капель водяной завесы, м;
 η – коэффициент пропускания отдельной капли диаметром D_{eq} ;
 l_{eq} – толщина эквивалентного слоя воды, м.

Формула (2) представляет весьма сложную зависимость коэффициента пропускания H от большого количества технических параметров, поскольку три величины в правой части являются функциями от этих параметров. В работах [13–15] определены методики расчета каждой из этих величин и зависимости коэффициента пропускания H от конструктивных параметров защитной системы и режима ее работы. В основе математической модели лежат расчеты оптических свойств сферических капель воды [16, 17], гидродинамические расчеты формирования струй распыленной воды [18–20], анализ функции распределения размеров капель распыленной струи [21]. Подтверждена достоверность этих расчетов путем их сравнения с результатами экспериментальных исследований [14, 22].

К сожалению, в Украине и на всем постсоветском пространстве данному направлению исследований не уделяется должного внимания. Исключением является лишь серия статей Домбровского Л.А. (Россия), посвященных теоретическим расчетам процессов распространения теплового излучения через дисперсные среды (см., напр., [23, 24]). В дальнем зарубежье, напротив, за последние 30 лет опубликованы сотни научных статей на данную тему, наиболее известными из которых являются [25–34]. Однако все они являются экспериментальными либо теоретическими исследованиями фундаментального характера, без дальнейшего приложения полученных результатов для решения практических проблем пожарной безопасности. Кроме того, среди опубликованных на эту тему работ практически все теоретические расчеты выполнены с применением

компьютерных расчетных пакетов, предусматривающих построение сеточных моделей и дискретизацию численных данных. На основе таких результатов невозможно разработать пригодную для практических целей расчетную методику для проектирования противопожарных водяных завес.

После создания математической модели [13, 14] следующим шагом должно стать внедрение полученных результатов в практическую деятельность. Разработчики технологического оборудования и спасатели должны получить четкие и понятные методики расчета конструктивных параметров противопожарных водяных завес и определения оптимальных режимов их работы в зависимости от конкретных условий прогнозируемого или реального пожара. Эти методики, после соответствующей апробации, должны быть оформлены и утверждены в виде нормативных документов.

Постановка задачи

Работа посвящена разработке методик расчета противопожарных водяных завес как теоретической основы процессов их проектирования, производства и эксплуатации. Необходимо разработать расчетные методики двух основных типов:

- 1) Расчет коэффициента пропускания водяной завесы на основе предварительно заданных конструктивных параметров защитной системы (задача анализа);
- 2) Расчет конструктивных параметров защитной системы на основе предварительно заданных характеристик теплового экранирования водяной завесой (задача синтеза).

Основные расчетные формулы

Параметрами, которые непосредственно может менять или учитывать при расчетах разработчик или пользователь оборудования водяной завесы, являются:

- d_0 – диаметр выходного отверстия оросителя, м;
- p – давление воды в оросителе, Па;
- K – коэффициент производительности оросителя, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{Па}^{1/2})$;
- Δz – расстояние между оросителями, м;
- x – расстояние по вертикали от линейки оросителей до рабочего участка СРВ, м;
- φ_0 – угол раскрытия веерной СРВ оросителя, рад;
- C_0 – коэффициент дисперсности оросителя;
- μ_j – коэффициент расхода оросителя;
- N – количество оросителей;
- T_f – эффективная температура источника излучения, К;
- ψ – коэффициент формы спектра теплового излучения;
- μ – медиана (параметр масштаба) функции распределения капель по диаметрам, м;
- σ – параметр формы функции распределения капель по диаметрам.

Наиболее универсальной расчетной формулой для определения коэффициента пропускания водяной завесы является указанная выше формула (2). Каждая из трех величин в ее правой части, то есть η , l_{eq} и D_{eq} , являются сложными функциями от перечисленных параметров. Для их расчета применяются следующие соотношения [13–15]:

– коэффициент пропускания капли:

$$\eta(\psi, D_{eq}, T_f) = (1 - \psi) \cdot \eta_b(D_{eq}, T_f) + \psi \cdot \eta_m(D_{eq}), \quad (3)$$

где

$$\eta_m(D_{eq}) = 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot D_{eq}^{-1,45} - 1 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

$$\eta_b(D_{eq}, T_f) = A \cdot D_{eq}^B + C, \quad (5)$$

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

$$B = -2,329 + 1,6362 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,0519 \cdot 10^{-6} \cdot T_f^2 - 1,386 \cdot 10^{-9} \cdot T_f^3 + 5 \cdot 10^{-13} \cdot T_f^4 - 0,651 \cdot 10^{-16} \cdot T_f^5, \quad (7)$$

$$C = -9,59 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,002495 \cdot T_f}. \quad (8)$$

– толщина эквивалентного слоя воды:

$$l_{eq} = \frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1,68 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot d_0^2}} - 1 + \frac{1200 \cdot D_{eq} \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x}{\rho_w \cdot u_0 \cdot d_0^2} \right)}, \quad (9)$$

– эквивалентный диаметр капель СРВ:

$$D_{eq} = C_0 \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_w}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d_0}{\mu_j} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot p^{-\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

где u_0 – начальная скорость капель, м/с;

ρ_a – плотность воздуха, кг/м³;

ρ_w – плотность воды, кг/м³;

σ_w – поверхностное натяжение воды, Н/м.

Формула (10) получена с помощью аппроксимации статистического распределения капель СРВ по диаметрам функцией логарифмически нормального распределения. Это распределение хорошо согласуется с результатами значительного количества экспериментальных исследований [14]. Параметры C_0 и σ определяются для каждого типа оросителей в результате экспериментальных измерений. По литературным данным, усреднение значений этих параметров по большому количеству разных типов щелевых оросителей позволяет определить следующие средние величины: $C_0 = 2,5$ и $\sigma = 0,5$. При отсутствии возможности экспериментального определения данных параметров для конкретного типа оросителей можно получить грубую оценку величины D_{eq} по формуле (10) подстановкой указанных средних величин. При их применении погрешность в определении D_{eq} не превысит 30% [35].

Для ориентировочного определения наиболее приемлемых параметров оросителей во время конструирования водяных завес полезной может быть вычислительная номограмма, построенная с помощью формулы (10) для величин $C_0 = 2,5$; $\sigma = 0,5$; $\mu_j = 0,7$ (рис. 2).

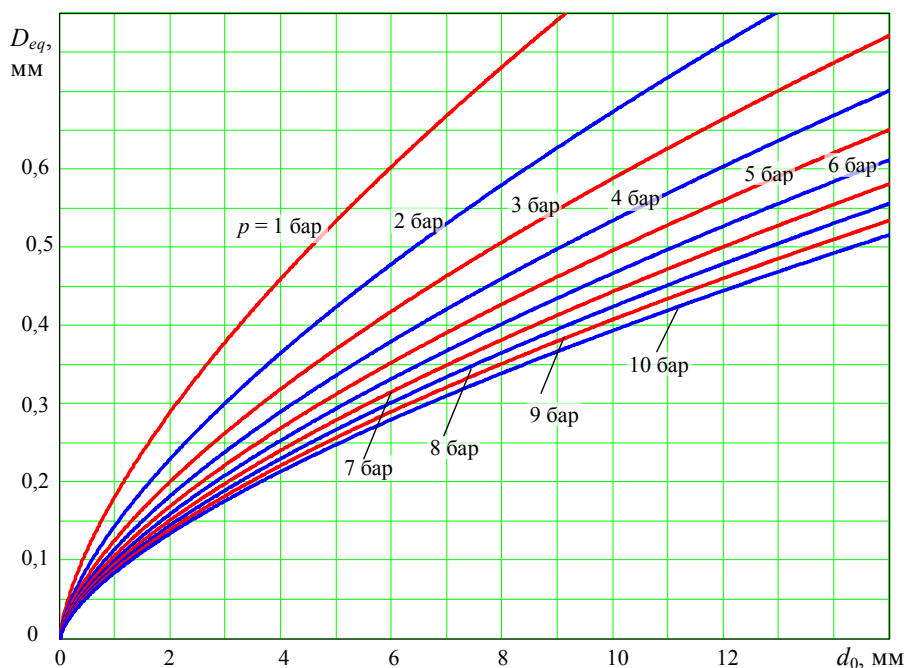


Рис. 2. Вычислительная номограмма для определения эквивалентного диаметра капель D_{eq} в зависимости от диаметра выходного отверстия оросителя d_0 и давления воды в оросителе p

Если на основе экспериментальных измерений для оросителя найдены параметры μ_1 и σ функции распределения капель по диаметрам для некоторой величины давления p_1 , отличающейся от рабочего давления p , необходимо выполнить перерасчет параметра μ для рабочего давления и далее определить рабочее значение эквивалентного диаметра капель D_{eq} . В работе [14] найдено, что для реальных режимов водяных завес эквивалентный диаметр капель СРВ приблизительно равняется среднему диаметру Саутера, то есть $D_{eq} \approx D_{32}$. Учитывая (10) и свойства логарифмически нормального распределения, найдем:

$$\mu = \mu_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (11)$$

$$C_0 = \mu_1 \cdot e^{3\sigma^2} \cdot \left(\frac{\sigma_w}{2} \right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_j}{d_0} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot p_1^{\frac{1}{3}}, \quad (12)$$

$$D_{eq} = \mu_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot e^{\frac{5}{2} \cdot \sigma^2}. \quad (13)$$

В случае, если $D_{eq} \lesssim 0,2$ мм, скоростью седиментации капель относительно воздуха под действием силы тяжести можно пренебречь и для расчетов толщины эквивалентного слоя воды применять упрощенную формулу [14]:

$$l_{eq} = \frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1,68 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot d_0^2}} - 1 \right)}. \quad (14)$$

Расход воды оросителя Q_{noz} определяется по известной формуле:

$$Q_{noz} = K \cdot \sqrt{p}. \quad (15)$$

Значение коэффициента K (K -фактор) должно указываться в паспорте на каждый ороситель. Согласно требованиям стандарта Украины [36], гармонизованного с европейскими нормами EN 12259-1, размерность этого параметра – $[K] = \text{л}/(\text{мин} \cdot \text{бар}^{1/2})$. Таким образом, используются размерности $[Q_{noz}] = \text{л}/\text{мин}$; $[p] = \text{бар}$. В случае использования единиц СИ $[K_{SI}] = \text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{Па}^{1/2})$ необходимо вводить соответствующий коэффициент пересчета:

$$K_{SI} = 5,27 \cdot 10^{-8} \cdot K. \quad (16)$$

В некоторых случаях в паспортах оросителей приведены не K -факторы, а коэффициенты производительности K_n с размерностью $[K_n] = \text{л}/(\text{с} \cdot \text{МПа}^{1/2})$, то есть для расхода воды и давления используются, соответственно, единицы измерения $[Q_{noz}] = \text{л}/\text{с}$; $[p] = \text{МПа}$. В этом случае для расчета расхода воды применяется формула

$$Q_{noz} = 10 \cdot K_n \cdot \sqrt{p}, \quad (17)$$

а для пересчета коэффициента K_n к единицам СИ используется соотношение:

$$K_{SI} = 10^{-5} \cdot K_n. \quad (18)$$

Соотношение (15) можно получить теоретически из уравнения Бернулли в виде:

$$Q_{noz} = \mu_j \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}} = K_{SI} \cdot \sqrt{p}, \quad (19)$$

откуда получим соотношение для расчета коэффициента расхода оросителя на основе его паспортных данных:

$$\mu_j = \frac{4 \cdot \sqrt{\rho_w} \cdot K_{SI}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_0^2}. \quad (20)$$

В дальнейшем применим приведенные формулы для выполнения поставленной задачи работы. Сначала рассмотрим первую из указанных в задаче расчетных методик.

Расчет коэффициента пропускания водяной завесы на основе заданных конструктивных параметров защитной системы (задача анализа)

В этой задаче необходимо определить потенциальные возможности экранирования лучистых тепловых потоков для уже существующей защитной системы (водяной завесы). На практике необходимость решения такой задачи может возникнуть в случае проверки эффективности защитной системы, при проектировании

которой использовалась ошибочная расчетная методика на основе [11, 12], получившая ранее широкое распространение.

Необходимые для выполнения расчетов параметры (d_0 , p , K , Δz , x , φ_0 , N) могут быть заданы в техническом паспорте оборудования или определены непосредственными измерениями на установке, предназначенной для создания водяной завесы.

Эквивалентный диаметр каплей СРВ D_{eq} может быть найден в результате довольно сложных экспериментальных измерений. При отсутствии возможности выполнить такой эксперимент и при отсутствии в паспортах оросителей информации о D_{eq} и σ (как правило, ситуация именно такова) единой возможностью для выполнения расчетов является использование (10) с приближенными значениями параметров $C_0 = 2,5$ и $\sigma = 0,5$.

Эффективная температура источника излучения T_f является усредненным параметром, поскольку тепловое излучение из разных зон источника может иметь разную эффективную температуру. Кроме того, в случае пожара эта температура зависит от горючего вещества и от условий его горения (интенсивности газообмена, состава газовой среды и т.п.). Например, типичным значением эффективной температуры пламени и дымовых газов при горении нефтепродуктов является 1200 К. В целом, для обеспечения системного подхода к решению данного вопроса необходимо выполнить анализ литературных данных и, при необходимости, провести дополнительные экспериментальные измерения, на основе которых составить таблицу типичных значений эффективных температур для основных видов горючих веществ. Это должны быть температуры, определенные по спектральным характеристикам излучения.

Аналогичную таблицу необходимо создать также и для коэффициента формы спектра ψ , определяющего относительный вклад молекулярных полос в спектр излучения пламени [37]. Значение $\psi = 0$ соответствует спектру излучения абсолютно черного тела (АЧТ), $\psi = 1$ соответствует спектру молекулярных полос (например, чистое углеводородное пламя). В реальных спектрах в большинстве случаев присутствуют оба компонента, относительный вклад которых определяется коэффициентом ψ . Необходимо выполнить анализ спектров разных типов горючих веществ с целью их классификации по признаку формы спектра и расчетной величины ψ .

После составления таблиц величин T_f и ψ для разных типов пожаров отпадет необходимость измерения этих параметров, потому что их величины можно будет брать из этих таблиц на основе информации о характере горения. Зависимости коэффициента пропускания H от параметров T_f и ψ являются довольно слабыми [14, 15], вследствие чего погрешность в определении T_f на 100 – 200 К или в определении ψ на 0,2 ÷ 0,3 не приведет к большой погрешности при расчете H .

После постановки задачи, то есть присвоения численного значения каждому из названных параметров, расчеты проводятся по следующему алгоритму.

1. Если задан тип оросителя (заданы величины d_0 и K), но отсутствует информация о параметрах D_{eq} и σ , а также о распределении каплей СРВ по диаметрам, необходимо выполнить расчет коэффициента расхода оросителя по формуле (20):

$$\mu_j = \frac{4 \cdot \sqrt{\rho_w} \cdot K_{SI}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_0^2},$$

где коэффициент K_{SI} можно пересчитать по паспортным данным (см. (16) и (18)).

2. Для расчета D_{eq} можно использовать оценочную формулу (10):

$$D_{eq} = C_0 \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_w}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d_0}{\mu_j}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot p^{-\frac{1}{3}},$$

где заданы средние (по литературным данным) значения $C_0 = 2,5$; $\sigma = 0,5$. В этом случае погрешность в определении D_{eq} может достигать 30%. Для ее уменьшения при использовании данной формулы можно выполнить дополнительные экспериментальные исследования для уточнения, прежде всего, величины параметра дисперсности C_0 для каждого типа оросителя (по формуле (12)). Но, при наличии данных эксперимента о статистическом распределении каплей по размерам, проще всего – вычислить средний диаметр Саутера D_{32} и воспользоваться уже упомянутым соотношением

$$D_{eq} \approx D_{32}. \quad (21)$$

3. Выполнить расчеты коэффициента пропускания капли для излучения АЧТ с помощью функций аппроксимации (3) – (8):

$$\eta(\psi, D_{eq}, T_f) = (1 - \psi) \cdot \eta_b(D_{eq}, T_f) + \psi \cdot \eta_m(D_{eq}),$$

$$\eta_m(D_{eq}) = 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot D_{eq}^{-1,45} - 1 \cdot 10^{-3},$$

$$\eta_b(D_{eq}, T_f) = A \cdot D_{eq}^B + C,$$

где

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

$$B = -2,329 + 1,6362 \cdot 10^{-3} \cdot T_f + 1,0519 \cdot 10^{-6} \cdot T_f^2 -$$

$$-1,386 \cdot 10^{-9} \cdot T_f^3 + 5 \cdot 10^{-13} \cdot T_f^4 - 0,651 \cdot 10^{-16} \cdot T_f^5,$$

$$C = -9,59 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,002495 \cdot T_f}.$$

4. Определить начальную скорость капель с помощью формулы:

$$u_0 = \mu_j \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}}. \quad (22)$$

5. Толщину эквивалентного слоя воды водяной завесы получим по формуле (9):

$$l_{eq} = \frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1 + \frac{300 \cdot D_{eq} \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x}{\rho_w \cdot u_0 \cdot b_0^2} \right)}.$$

Если найденное значение $D_{eq} \lesssim 0,2$ мм, для расчетов l_{eq} можно применять упрощенную формулу (14).

6. Выполнить расчет расхода воды на один ороситель с помощью формулы:

$$Q_{noz} = K_{SI} \cdot \sqrt{p}. \quad (23)$$

7. Выполнить расчет расхода воды на всю водяную завесу:

$$Q = N \cdot Q_{noz}. \quad (24)$$

8. Выполнить расчет коэффициента пропуска водяной завесы с помощью формулы (2):

$$H = \exp \left[-1,4 \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{l_{eq}}{D_{eq}} \right].$$

Пример расчета

Постановка задачи:

Водяная завеса создана линейкой щелевых оросителей типа ЗВН-8 с конструктивными параметрами: $p = 6$ бар; $\Delta z = 0,4$ м; $N = 10$; $x = 5$ м. Источник теплового излучения характеризуется параметрами: $T_f = 1200$ К; $\psi = 0,4$. Определить коэффициент пропуска водяной завесы, эквивалентный диаметр капель и расход воды.

Расчеты.

В постановке задачи отсутствует информация о параметрах d_0 , φ_0 и D_{eq} . В техническом паспорте оросителя ЗВН-8 найдем параметры:

$$d_0 = 8 \text{ мм} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

ширина завесы одиночного оросителя ЗВН-8, согласно паспорту, равняется 1 м при высоте 0,17 м, откуда:

$$\varphi_0 = 2 \cdot \arctg(0,5/0,17) = 2,5 \text{ рад}.$$

1. В техническом паспорте оросителя ЗВН-8 задан коэффициент производительности: $K = 0,19$ л/(с · МПа^{1/2}). Для перехода к единицам СИ воспользуемся соотношением (18) и получим:

$$K_{SI} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Па}^{1/2}).$$

После расчета по формуле (20) найдем коэффициент расхода оросителя:

$$\mu_j = 0,85.$$

2. Из-за отсутствия в паспорте оросителя информации о размерах капель СРВ, для оценки D_{eq} воспользуемся формулой (10). Принимая $C_0 = 2,5$, $\sigma = 0,5$, в результате получим:

$$D_{eq} \approx 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,38 \text{ мм.}$$

3. С помощью формул (5) – (8) выполним расчеты коэффициентов аппроксимации и коэффициента пропускания капли для излучения АЧТ:

$$A = 0,013;$$

$$B = -0,371;$$

$$C = -0,095;$$

$$\eta_b(D_{eq}, T_f) = 0,15.$$

4. С помощью формулы (4) выполним расчет коэффициента пропускания капли для молекулярных полос излучения пожара:

$$\eta_m(D_{eq}) = 0,015.$$

5. По формуле (3) выполним расчет полного коэффициента пропускания капли:

$$\eta(\psi, D_{eq}, T_f) = 0,1.$$

6. Начальную скорость капель найдем с помощью формулы (22):

$$u_0 = 30 \text{ м/с.}$$

7. Толщину эквивалентного слоя водяной завесы получим с помощью формулы (9):

$$l_{eq} = 5,38 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

8. С помощью формулы (23) выполним расчет расхода воды на один ороситель:

$$Q_{noz} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 1,5 \text{ л/с.}$$

9. Расход воды на всю водяную завесу (из (24)):

$$Q = 10 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с} = 15 \text{ л/с.}$$

10. Коэффициент пропускания водяной завесы найдем с помощью формулы (2):

$$H = 0,17.$$

Выводы по данной задаче по результатам расчетов:

- 1) водяная завеса обеспечивает примерно 6-кратное ослабление теплового излучения;
- 2) большой средний размер капель (почти 0,4 мм) и их высокая начальная скорость (30 м/с) обеспечивают высокую стойкость формы водяной завесы к внешним влияниям (ветер, воздушные потоки);
- 3) система водоснабжения должна обеспечить довольно большой расход воды (15 л/с) на достаточный период времени;
- 4) необходимо учесть возможный вред от большого количества воды, налитой в процессе работы водяной завесы (свыше 50 м³ за 1 час).

Расчет конструктивных параметров защитной системы на основе заданных характеристик теплового экранирования (задача синтеза)

В этом случае необходимо выполнить задачу конструирования технологической системы для создания водяной завесы с заданными эксплуатационными характеристиками. Такими характеристиками являются:

1. Геометрические размеры проема или оборудования, которые необходимо защитить водяной завесой: высота h , ширина Z_c , расстояние от линейки оросителей до рабочего участка завесы x .
2. Предельный уровень интенсивности теплового излучения, допустимый для участка пространства, который защищается завесой, $I_{2\max}$.
3. Характеристики источника теплового излучения: интенсивность излучения, которое падает на водяную завесу I_1 ; эффективная температура T_f и коэффициент формы спектра ψ теплового излучения.
4. Характеристика объекта, который защищается: помещение или открытое пространство; наличие воздушных потоков; наличие материальных ценностей, которым вода может причинить вред.
5. В некоторых случаях задается ограничение по максимальному расходу воды Q_{\max} .

В результате расчетов необходимо определить:

1. Конструктивные параметры и режим работы оросителя:
 - диаметр выходного отверстия d_0 ;
 - коэффициент производительности K ;

- угол раскрытия веерной СРВ φ_0 ;
- рабочее давление p .
- 2. Эквивалентный диаметр каплей оросителя D_{eq} .
- 3. Расстояние между оросителями Δz .
- 4. Количество оросителей N .
- 5. Расход воды на водяную завесу Q .

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. На основе формулы (1) определить максимальный коэффициент пропускания водяной завесы:

$$H_{\max} = 0,8 \cdot \frac{I_{2\max}}{I_1}. \quad (25)$$

Коэффициент 0,8 связан с установлением определенного запаса надежности и учетом возможных отклонений условий функционирования реальной водяной завесы от идеальных (влияние на форму и параметры завесы воздушных потоков, технологических отклонений в сети водоснабжения и т.п.).

2. Задать эквивалентный диаметр каплей оросителя в пределах 0,1 – 0,4 мм, исходя из поставленных задач и условий, в которых будет эксплуатироваться водяная завеса.

В случае небольшой по вертикали завесы $h \sim (1 \div 2)$ м и при отсутствии сильных воздушных потоков нужно выбирать диаметр каплей ближе к нижней границе указанного интервала, т.е. $D_{eq} \approx 0,1 \div 0,15$ мм. Это позволит обеспечить высокую эффективность теплового экранирования при минимальном расходе воды.

В случае завесы большого размера $h > 5$ м, а также при наличии сильных воздушных потоков (открытая площадка) средний размер каплей должен быть увеличен до $D_{eq} \approx 0,3 \div 0,4$ мм, чтобы обеспечить устойчивость формы СРВ к внешним воздушным потокам.

3. На основе заданного в п. 2 эквивалентного диаметра каплей выбрать тип оросителя, способный обеспечить СРВ с каплями такого размера. При отсутствии в паспортах оросителей данных относительно размеров каплей воспользоваться вычислительной номограммой (рис. 2) для оценки необходимого диаметра исходного отверстия оросителя d_0 и осуществить выбор типа оросителя по этому параметру.

4. По паспортным данным оросителя определить его конструктивные параметры d_0 , K и φ_0 , после чего выполнить расчет коэффициента расхода оросителя по формуле (20):

$$\mu_j = \frac{4 \cdot \sqrt{\rho_w} \cdot K_{SI}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_0^2},$$

где коэффициент производительности K_{SI} пересчитать по паспортным данным (см. (16), (18)).

5. С помощью вычислительной номограммы (рис. 2), а также исходя из паспортных данных оросителя выбрать рабочее давление воды p , при котором размер каплей соответствует необходимому.

6. С помощью формул (3) – (8) определить коэффициент пропускания капли $\eta(\psi, D_{eq}, T_f)$.

7. Из формулы для коэффициента пропускания водяной завесы (2) определить минимальное значение толщины эквивалентного слоя воды в завесе:

$$l_{eq \min} = - \frac{D_{eq} \cdot \ln H_{\max}}{1,4 \cdot [1 - \eta(\psi, D_{eq}, T_f)]}. \quad (26)$$

8. Из формулы для толщины эквивалентного слоя воды (14) определить необходимое расстояние между оросителями:

$$\Delta z = \frac{0,2 \cdot d_0^2 \cdot \varphi_0}{l_{eq \min} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}} \cdot \left(\frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot l_{eq \min}} + 2 \right), \quad (27)$$

9. Определить необходимое количество оросителей, исходя из необходимой ширины водяной завесы:

$$N = \frac{Z_c}{\Delta z}. \quad (28)$$

10. Выполнить расчет расхода воды на один ороситель с помощью формулы (23):

$$Q_{noz} = K_{SI} \cdot \sqrt{p}.$$

11. Выполнить расчет расхода воды на всю водяную завесу (24):

$$Q = N \cdot Q_{noz}.$$

12. Выполнить стандартный расчет системы водоснабжения для данных величин расхода воды Q и ее давления p [11, 35].

Пример расчета

Постановка задачи: Выполнить расчет конструктивных параметров дренчерной системы, предназначенной для создания в технологическом проеме цеха по производству полиграфической продукции защитной водяной завесы со следующими параметрами:

$$h = 3 \text{ м};$$

$$Z_c = 5 \text{ м};$$

$$x = 2 \text{ м};$$

$$I_{2\max} = 4 \text{ кВт/м}^2;$$

$$I_1 = 10 \text{ кВт/м}^2;$$

$$T_f = 1200 \text{ К};$$

$$\psi = 0,3.$$

Расчеты.

1. По формуле (25) определим максимальный коэффициент пропускания водяной завесы:

$$H_{\max} = 0,8 \cdot \frac{4}{10} = 0,32.$$

2. Исходя из размеров водяной завесы и характера защищаемого объекта, примем эквивалентный диаметр капель оросителя в пределах $0,15 \div 0,2$ мм.

3. В технических паспортах оросителей отсутствует информация о размерах капель распыленной струи. С помощью вычислительной номограммы (рис. 2) по заданному интервалу эквивалентных диаметров капель принимаем ориентировочный диаметр выходного отверстия оросителя равным 3 мм.

4. Среди серийных оросителей для водяных завес такой диаметр выходного отверстия имеет ороситель ЗВН-3, для которого:

$$d_0 = 3 \text{ мм}; \varphi_0 = 160^\circ = 2,8 \text{ рад.}$$

По паспортным данным этого оросителя его коэффициент производительности: $K = 0,023$. В результате перехода к единицам СИ (см. (18)) получим:

$$K_{SI} = 2,3 \cdot 10^{-7}.$$

5. Выполним расчеты коэффициента расхода оросителя по формуле (20):

$$\mu_j = 0,73.$$

6. Для ориентировочной оценки D_{eq} воспользуемся формулой (10). Принимая $C_0 = 2,5$, $\sigma = 0,5$, $p = 10^6$ Па, в результате расчетов получим:

$$D_{eq} \approx 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,19 \text{ мм.}$$

7. Подставляя величины T_f , ψ и D_{eq} в формулы (3) – (8), найдем коэффициент пропускания капли:

$$A = 0,013;$$

$$B = -0,371;$$

$$C = -0,095;$$

$$\eta_b(D_{eq}, T_f) = 0,22.$$

$$\eta_m(D_{eq}) = 0,04.$$

$$\eta(\psi, D_{eq}, T_f) = 0,17.$$

8. В результате расчета по формуле (26) найдем минимальную толщину эквивалентного слоя водяной завесы:

$$l_{eq \min} = 1,85 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

9. По формуле (27) определим необходимую величину расстояния между оросителями:

$$\Delta z = 0,2 \text{ м.}$$

10. По формуле (28) найдем необходимое количество оросителей:

$$N = 5/0,2 = 25 \text{ шт.}$$

11. С помощью формулы (23) выполним расчет расхода воды на один ороситель:

$$Q_{noz} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с} = 0,23 \text{ л/с.}$$

12. Расход воды на всю водяную завесу (по формуле (24)):

$$Q = 25 \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 5,7 \text{ л/с.}$$

13. Далее необходимо выполнить стандартный расчет системы водоснабжения для данных величин расхода воды Q и ее давления p [11, 35].

Выводы по данной задаче по результатам расчетов:

- 1) выполнить поставленную задачу возможно с помощью применения оросителей ЗВН-3 в количестве 25 шт.;
- 2) для обеспечения заданных параметров система водоснабжения должна обеспечить давление 10 бар и расход воды 5,7 л/с на продолжительный период времени;
- 3) если существует необходимость уменьшить общий расход воды при сохранении параметров теплового экранирования, этого можно достичь с помощью уменьшения размера капель за счет уменьшения диаметра выходного отверстия оросителей.

Выводы

Представлены методики расчета противопожарных водяных завес с целью их проектирования, производства и эксплуатации. Согласно существующим потребностям, представлены расчетные методики двух типов:

- 1) Расчет коэффициента пропускания водяной завесы на основе предварительно заданных конструктивных параметров защитной системы (задача анализа);
- 2) Расчет конструктивных параметров защитной системы на основе предварительно заданных характеристик теплового экранирования водяной завесой (задача синтеза).

Для каждой из расчетных методик представлен типичный пример численных расчетов.

Для разработки указанных методик использована ранее разработанная математическая модель экранирования теплового излучения пожаров водяными завесами. Расчетные формулы содержат лишь операции элементарной математики, и вычисления могут быть выполнены с помощью инженерного калькулятора. Этого удалось достичь благодаря использованию найденных в математической модели функций аппроксимации, которые позволили исключить из процесса расчета большие массивы данных и сложные операции численного интегрирования.

Наиболее рациональным является выполнение расчетов с помощью пакетов компьютерной математики (Mathcad, Matlab и т.п.). Целесообразным является создание с помощью одного из таких пакетов расчетного файла, который должен содержать полный набор приведенных выше расчетных формул. При таком условии для выполнения расчетов защитной системы типа водяной завесы достаточно ввести в компьютер начальные параметры для того, чтобы получить результаты расчета практически мгновенно. В дальнейшем такая вычислительная система позволит легко осуществлять корректирование начальных параметров для получения нужного результата.

Для внедрения расчетных методик в практику целесообразным было бы предварительное проведение лабораторных и полигонных испытаний и экспериментальных исследований с целью апробации расчетных формул и уточнения некоторых параметров, связанных, прежде всего, с функциями распределения капель по размерам для конкретных типов оросителей. После выполнения достаточного количества апробаций и практических применений представленные методики могут быть использованы для создания нормативного документа – стандартной методики проектирования противопожарных водяных завес.

Следует отметить, что, несмотря на выполненные в математической модели упрощения расчетных формул и вычислительных процедур, они все еще продолжают оставаться намного более сложными, по сравнению с традиционной (ошибочной) расчетной методикой [11, 12]. Учитывая это, в дальнейшем планируется выполнить более существенное упрощение расчетных формул для грубых расчетов в тех случаях, когда не требуется высокая точность результатов расчета.

References

1. King A.R. The efficiency of rural firefighters / A.R. King // Commonwealth Scientific And Industrial Research Organization, Chemical Research Laboratories, Technical Paper. – 1966. – No. 4. – 12 p.
2. McCarter R.J. Radiative and Convective Energy from Wood Crib Fires / R.J. McCarter, A. Broido // Pyrodynamics. – 1965. – Vol. 2, No 1. – P. 65–85.
3. Shokri M. Radiation from large pool fires / M. Shokri, C.L. Beyler // J. Fire Protection Engineering. – 1989. – Vol. 1. – P. 141–150.
4. Ufuah E. Flame Radiation Characteristics of Open Hydrocarbon Pool Fires / E. Ufuah, C.G. Bailey // Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2011. – Vol. III. – P. 1952–1958.
5. Жаров А. Дренчерные завесы: теория и практика [Электронный ресурс] / А. Жаров, А. Зархин, М. Митрофанова // БДИ. – 2006. – № 5 (68). – С. 24–28.
6. Собещанський Д.І. Водяні завіси в системах забезпечення протипожежного захисту об'єктів різного призначення / Д.І. Собещанський, Г.О. Анохін, Л.А. Склизкова // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2010. – № 2 (22). – С. 148–153.

7. Противопожарная водяная завеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bikoms.ru/dictionary/p/protivopozharnaja-vodjanaja-zavesa/>
8. Gant S.E. CFD Modeling of Water Spray Barriers / S.E. Gant. – Health and Safety Laboratory, UK, Report HSL/2006/79.– 35 p.
9. Meroney R.N. CFD modeling of water spray interaction with dense gas plumes / R.N. Meroney // *Atmospheric Environment*. – 2012. – Vol. 54. – P. 706–713.
10. Cong B.H. Review of modeling fire suppression by water sprays by computational fluid dynamics / B.H. Cong, G.X. Liao, W.K. Chow // *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*. – 2005. – Vol. 7, No. 2. – P. 35–56.
11. Мешман Л. М. Проектирование водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / Л. М. Мешман, С. Г. Цариченко и др.; под общ. ред. Н. П. Копылова. – М.: ВНИИПО МЧС РФ, 2002. – 413 с.
12. Порядок проектирования дренчерных завес с использованием оросителей марки «ЗВН» производства ЗАО «ПО «Спецавтоматика» [Электронный ресурс] / Информационный портал Орбита-Союз / Пожаротушение / Дренчерные завесы. – 2009. – Режим доступа: <http://os-info.ru/pojarotuschenie/drenchernye-zavesy.html>
13. Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2014. – Т. 23, № 1. – С. 45–57.
14. Виноградов А.Г. Развитие научных основ систем защиты работников от мощных тепловых излучений водяными завесами // Дисс. на соиск. уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.26.01 – «Охрана труда» / Виноградов Анатолий Григорьевич. – Черкассы, 2017. – 355 с.
15. Виноградов А.Г. Взаимосвязь параметров противопожарных водяных завес с эффективностью экранирования теплового излучения / А.Г. Виноградов., О.М. Яхно, В.А. Дуношкин // *Науковий вісник УкрНДПБ*. – 2015. – № 1 (31). – С. 36–45.
16. Виноградов А.Г. Розсіяння теплового випромінювання сферичними краплями води / А.Г. Виноградов // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Сер. машинобудування*. – 2005. – №47. – С. 51–54.
17. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами / А.Г. Виноградов // *Пожаровзрывобезопасность*. – 2012. – Т. 21, № 7. – С. 77–86.
18. Виноградов А.Г. Розрахунок векторного поля швидкостей крапель водяної завіси / А.Г. Виноградов // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – 2008. – №2 (49). Частина 2 – С. 42–44.
19. 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. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2012.65.33942>
20. Виноградов А.Г. Расчет параметров противопожарных струй распыленной воды / А.Г. Виноградов., О.М. Яхно // *Прикладна гідромеханіка*. – 2015. – Т.17. – № 4. – С. 3–13.
21. Виноградов А.Г. Расчет спектров пропускания теплового излучения для полидисперсной водяной завесы / А.Г. Виноградов // *Промислова гідравліка і пневматика*. – 2013. – № 2 (40). – С. 11–20.
22. Виноградов А.Г. Экспериментальное исследование экранирования теплового излучения распыленной водой / А.Г. Виноградов, С.Ю. Огурцов, В.А. Дуношкин, В.С. Бенедюк, Е.А. Линчевский // *Науковий вісник УкрНДПБ*. – 2014. – № 2 (30). – С. 99–108.
23. Dombrovsky L.A. Absorption of thermal radiation in large semi-transparent particles at arbitrary illumination of the polydisperse system / L.A. Dombrovsky // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – Vol. 47. – P. 5511–5522.
24. Dombrovsky L.A. A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists / L.A. Dombrovsky, S. Dembele, J.X. Wen // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 96. – P. 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.028>
25. 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. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(89\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(89)90002-7)
26. Coppalle A. Fire protection: water curtains / A. Coppalle, D. Nedelka, B. Bauer // *Fire Safety J.* – 1993. – Vol. 20. – P. 241–255. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(93\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0379-7112(93)90046-S)
27. 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.
28. Buchlin J.-M. Thermal shielding by water spray curtain / J.-M. Buchlin // *J. Loss Prev. Process Industries*. – 2005. – Vol. 18, No. 4–6. – P. 423–432.
29. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.07.014>
30. Boulet P. Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source / P. Boulet, A. Collin, G. Parent // *Fire Safety J.* – 2006. – Vol. 41, No. 1. – P. 15–30.
31. Hostikka S. Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays / S. Hostikka, K. McGrattan // *Fire Safety Journal*. – 2006. – Vol. 41. – P. 76–86.
32. 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.
33. 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. – Vol. 57. – P. 537–553.
34. Parent G. Radiative shielding effect due to different water sprays used in a real scale application / G. Parent, R. Morlon, Z. Acem, P. Fromy, E. Blanchard, P. Boulet // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2016. – Vol. 105. – P. 174–181.

35. Виноградов А.Г. Эквивалентный диаметр капель струй распыленной воды и его зависимость от технических параметров / А.Г. Виноградов., О.М. Яхно // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія машинобудування. – 2016. – № 1 (76). – С. 39–45.
36. ДСТУ EN 12259-1:2008. Стационарні системи пожежогасіння. Елементи спринклерних і водорозпилювальних систем. Частина 1. Спринклери (EN 12259-1:1999, IDT).
37. Виноградов А.Г. Учет спектрального состава теплового излучения при расчете коэффициента пропускания капли воды / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва (Россия), 2013. – Т. 22, № 9. – С. 64–73.

Розрахунок конструктивних параметрів протипожежних водяних завіс

А. Г. Виноградов

Анотація. Робота спрямована на практичне застосування раніше отриманих результатів математичного моделювання протипожежних водяних завіс. Водяна завіса – це струмінь розпиленої води, призначений для захисту людей і матеріальних цінностей від теплового випромінювання пожежі. Знайдені в результаті математичного моделювання розрахункові формули дозволяють розрахувати параметри захисту від теплового випромінювання за допомогою водяної завіси та їх залежність від конструктивних параметрів технологічного обладнання. Згідно з отриманими формулами, коефіцієнт пропускання теплового випромінювання залежить від розподілу крапель водяної завіси за розмірами, питомого вмісту води, товщини завіси і спектральних характеристик теплового випромінювання. Повний набір розрахункових формул, отриманих у роботі, дозволяє визначити інтегральний коефіцієнт пропускання водяної завіси заданої конструкції або, навпаки, для заданого коефіцієнта пропускання дозволяє розрахувати конструктивні параметри захисної системи, призначеної для створення водяної завіси. Відповідно, представлені два методи розрахунку з відповідними алгоритмами, кожен із яких супроводжується типовим конкретним прикладом чисельних розрахунків. Розрахункові формули є досить простими, тому розрахунки можна виконати на інженерному калькуляторі або з використанням пакетів комп'ютерної математики. Після виконання достатньої кількості перевірок і практичних застосувань представлені методики можуть бути використані для створення нормативного документа – стандартного методу проектування протипожежних водяних завіс.

Ключові слова: протипожежна водяна завіса; теплове випромінювання; методика розрахунку.

Calculation of design parameters of fire-fighting water curtains

A. G. Vynogradov

Purpose. The work is aimed at the practical application of previously obtained results of mathematical modeling of fire water curtains. Such water curtains are the jets of sprayed water intended to protect people and material values from the thermal radiation of fires.

Approach. Calculated formulas found as a result of mathematical modeling allow calculating the parameters of fire thermal radiation shielding by means of a water curtain and their dependence on the design parameters of technological equipment. In particular, these formulae are used to calculate the transmission coefficients of water curtains for thermal radiation of the near-infrared region of the spectrum (wavelength 1-10 microns). According to the formulas obtained, the coefficient of transmission of the water curtain depends on the distribution of droplets in size, specific water content, thickness of the curtain, and spectral characteristics of thermal radiation.

Findings. The complete set of calculated formulas obtained in the work allows determining the integral transmission coefficient of the water curtain or, conversely, for the predetermined transmission coefficient allows to calculate the design parameters of the protective system designed to create a water curtain. Accordingly, two calculation methods with corresponding algorithms of calculations are presented, each of which is followed by a typical concrete example of numerical calculations. The calculation formulas are simple enough, so the calculations can be done on the engineering calculator or using the computer mathematics packages. After performing a sufficient number of approximations and practical applications, the presented techniques can be used to create a standard design method for fire water curtains.

Keywords: fire-fighting water curtain; thermal radiation; calculation method.

References

1. King, A.R. (1966), “The efficiency of rural firefighters”, *Commonwealth Scientific And Industrial Research Organization, Chemical Research Laboratories, Technical Paper*, no. 4, 12 p.
2. McCarter, R.J. and Broido, A. (1965), “Radiative and Convective Energy from Wood Crib Fires”, *Pyrodynamics*, vol. 2, no. 1, pp. 65–85.
3. Shokri, M. and Beyler, C.L. (1989), “Radiation from large pool fires”, *J. Fire Protection Engineering*, vol. 1, pp. 141–150.
4. Ufuah, E. and Bailey, C.G. (2011), “Flame Radiation Characteristics of Open Hydrocarbon Pool Fires”, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. III, pp. 1952–1958.
5. Zharov, A., Zarhin, A. and Mitrofanova, M. (2006), “Drencher curtains: theory and practice” *BDI*, vol. 68, no. 5, pp. 24–28.
6. Sobeshhans'kyj, D.I., Anohin, G.O. and Sklyzkova, L.A. (2010), “Water curtains in systems of ensuring fire-prevention protection of objects of different function”, *Naukovyj visnyk UkrNDIPB*, vol. 22, no. 2, pp. 148–153.
7. “Fire-fighting water curtain” [Protivopozharnaja vodjanaja zavesa], available at: <http://www.bikoms.ru/dictionary/p/protivopozharnaja-vodjanaja-zavesa/>
8. Gant, S.E. (2006), “CFD Modeling of Water Spray Barriers”, *Health and Safety Laboratory, UK, Report HSL/2006/79*, 35 p.

9. Meroney, R.N. (2012), "CFD modeling of water spray interaction with dense gas plumes", *Atmospheric Environment*, vol. 54, pp. 706–713.
10. Cong, B.H., Liao, G.X. and Chow, W.K. (2005), "Review of modeling fire suppression by water sprays by computational fluid dynamics", *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, vol. 7, no. 2, pp. 35–56.
11. Meshman, L.M. et al. (2002), "Projection of water and foamy automatic installations of a firefighting" [Proektirovanie vodjanyh i pennyh avtomaticheskikh ustanovok pozharotushenija], ed. by N.P. Kopylov, Moscow: VNIPO, 413 p.
12. "The procedure for designing deluge curtains using sprinklers of the brand "ZVN" produced by ZAO «Special Automation»" [Porjadok proektirovanija drenchernyh zaves s ispol'zovaniem orositelej marki «ZVN» proizvodstva ZAO «PO «Specavtomatika»], *Informacionnyj portal Orbita-Sojuz / Pozharotushenie / Drenchernye zavesy*, available at: <http://os-info.ru/pojarotuschenie/drenchernye-zavesy.html>
13. Vinogradov, A.G. (2014), "Calculation method of water curtain shielding properties" [Metodika rascheta jekranirujushchih svojstv vodjanyh zaves], *Pozharovzryvobezopasnost'*, vol. 23, no. 1, pp. 45–57.
14. Vinogradov, A.G. (2017), "Development of the scientific foundations of systems for protecting workers from powerful thermal radiation with water curtains" [Razvitie nauchnyh osnov sistem zashhity rabotnikov ot moshhnyh teplovyh izluchenij vodjanyimi zavesami], *Doctoral dissertation*, Cherkasy.
15. Vinogradov, A.G., Yakhno, O.M. and Dunjushkin V.A. (2015), "Interrelation of fire water curtains parameters with their heat radiation shielding effectiveness" [Vzaimosvjaz' parametrov protivopozharnyh vodjanyh zaves s jeffektivnost'ju jekranirovanija teplovogo izluchenija], *Naukovyj visnyk UkrNDIPB*, no. 1(31), pp. 36–45.
16. Vynogradov, A.G. (2005), "Scattering of thermal radiation by spherical drops of water" [Rozsijannja teplovogo vyprominjuvannja sferychnymy krapljamy vody], *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta «Kievskij politehničeskij institute»*, *Seriya mashinostroenie*, no. 47, pp. 51–54.
17. Vinogradov, A.G. (2012), "Absorption of thermal radiation by water curtains" [Pogloshhenie teplovogo izluchenija vodjanyimi zavesami], *Pozharovzryvobezopasnost'*, vol. 21, no. 7, pp. 77–86.
18. Vynogradov, A.G. (2008), "Calculation of vector velocity field of water curtain droplets" [Rozrahunok vektornogo polja shvydkostej krapel' vodjanoi' zavyis], *Visnyk Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehničeskogo universytetu*, no. 2(49), part 2, pp. 42–44.
19. Vinogradov, A.G. (2012), "Absorption of radiant heat flux in a sprayed water stream" [Pogloshhenie luchistogo teplovogo potoka v raspylenoj vodjanoi' strue], *Visnyk Nacional'nogo tehničeskogo universytetu Ukrainy «Kyiv's'kij politehničeskij instytut»*, *serija Mashynobuduvannja*, no. 65, pp. 145–152.
20. Vinogradov, A.G. and Yakhno, O.M. (2015), "Calculation of the parameters of spray fire water jets" [Raschet parametrov protivopozharnyh struj raspylenoj vody], *Prykladna gidromehanika*, vol. 17, no. 4, pp. 3–13.
21. Vinogradov, A.G. (2013), "Calculation of thermal radiation transmission spectra for a polydisperse water curtain" [Raschet spektrov propuskannja teplovogo izluchenija dlja polidispersnoj vodjanoi' zavyis], *Promyslova gidravlika i pnevmatika*, no. 2(40), pp. 11–20.
22. Vinogradov, A.G., Ogurcov, C.Ju., Dunjushkin, V.A., Benedjuk, V.S. and Linchevskij, E.A. (2014), "An experimental study of the shielding of thermal radiation by atomized water" [Jeksperimental'noe issledovanie jekranirovanija teplovogo izluchenija raspylenoj vodoj], *Naukovyj visnyk UkrNDIPB*, no. 2(30), pp. 99–108.
23. Dombrovsky, L.A. (2004), "Absorption of thermal radiation in large semi-transparent particles at arbitrary illumination of the polydisperse system", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 5511–5522.
24. Dombrovsky, L.A. (2016), "A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 96, pp. 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.028>
25. Ravigururajan, T.S. and Beltran M.R. (1989), "A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets", *Fire Safety J.*, vol. 15, pp. 171–181. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(89\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(89)90002-7)
26. Coppalle, A., Nedelka, D. and Bauer, B. (1993), "Fire protection: water curtains", *Fire Safety J.*, vol. 20, pp. 241–255. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(93\)90046-S](https://doi.org/10.1016/0379-7112(93)90046-S)
27. Dembele, S., Wen, J.X. and Sacadura, J.F. (2001), "Experimental study of water sprays for the attenuation of fire thermal radiation", *ASME J. Heat Transfer*, vol. 123, no. 3, pp. 534–543.
28. Buchlin, J., (2005), "Thermal shielding by water spray curtain", *J. Loss Prev. Process Industries*, vol. 18, no. 4–6, pp. 423–432.
29. Collin, A., Boulet, P., Lacroix, D. and Jeandel G. (2005) "On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 92, pp. 85 – 110. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.07.014>
30. Boulet, P., Collin, A. and Parent, G. (2006), "Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source", *Fire Safety J.*, vol. 41, no. 1, pp. 15–30.
31. Hostikka, S. and McGrattan, K. (2006), "Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays", *Fire Safety Journal*, vol. 41, pp. 76–86.
32. Parent, G., Boulet, P., Gauthier, S., Blaise, J. and Collin, A. (2006), "Experimental investigation of radiation transmission through a water spray", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 97, no. 1, pp. 126–141.
33. Collin, A., Lechene, S., Boulet, P. and Parent, G. (2010), "Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 57, pp. 537–553.
34. Parent, G., Morlon, R., Acem, Z., Fromy, P., Blanchard, E. and Boulet P. (2016), "Radiative shielding effect due to different water sprays used in a real scale application", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 105, pp. 174–181.
35. Vinogradov, A.G. and Yakhno, O.M. (2016), "Equivalent diameter of droplets of sprayed water jets and its dependence on technical parameters", *Journal of Mechanical Engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»*, vol. 76, no. 1, pp. 39–45.
36. The state standard of Ukraine "DSTU EN 12259-1:2008, Stacionarni systemy pozhezhogasinnja. Elementy sprynklernyh i vodorozpyljuval'nyh system. Chastyna 1. Sprynklery (EN 12259-1: 1999, IDT)" [DSTU EN 12259-1:2008, Stationary fire extinguishing systems. Elements of sprinkler and water spray systems. Part 1. Sprinklers (EN 12259-1:1999, IDT)], Kiev, Ukraine.
37. Vinogradov, A.G. (2013), "Uchet spektral'nogo sostava teplovogo izluchenija pri raschete koeficienta propuskannja kapli vody" [Accounting of thermal radiation spectral distribution at calculation of water droplet transmittance], *Pozharovzryvobezopasnost'*, vol. 22, no. 9, pp. 64 – 73.