

УДК 532.529.5:614.838.441

А.Г. Виноградов, канд. физ.-мат. наук, О.М. Яхно, д-р техн. наук, В.А.Дунюшкин, канд. техн. наук

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС С ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ЭКРАНИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На основе ранее разработанной математической модели экранирования водяными завесами теплового излучения пожаров представлен набор формул для расчета их технических параметров. Графики, построенные с помощью расчетных формул, позволили проанализировать взаимные зависимости между параметрами и их влияние на эффективность экранирования теплового излучения.

Ключевые слова: водяная завеса, технические параметры, методика расчетов.

A. Vinogradov, Cand. of Sc.(Physics), O. Yakhno, Doctor of Sc.(Eng.), V. Dunyushkin, Cand. of Sc. (Eng.)

RELATIONSHIP OF FIRE WATER CURTAIN PARAMETERS WITH ITS SHIELDING EFFECTIVENESS OF THERMAL RADIATION

On the basis of earlier developed mathematical model of fire heat radiation shielding by water curtains there are presented a set of the formulae for calculation of technical parameters. The plots constructed by means of the calculation formulas have allowed analyzing interdependences between parameters and their influence on the efficiency of heat radiation shielding.

Keywords: water curtain, technical parameters, calculation method.

Несмотря на увеличившийся спрос на применение противопожарных водяных завес и возрастающие масштабы проектируемых систем такого типа, адекватные методики для их расчета в Украине и странах СНГ отсутствуют. Полноценные экспериментальные исследования свойств водяных завес не проводятся [1-3]. За неимением надлежащих нормативных документов, проектировщики вынуждены использовать для конструкторских расчетов защитных водяных завес методики, имеющие другое назначение. Как правило, это методики для расчета автоматических систем пожаротушения с использованием струй распыленной воды (СРВ) [4 - 8]. Однако в этих методиках расчета отсутствуют параметры, которые фактически определяют защитные свойства СРВ: коэффициент экранирования теплового излучения, диаметр капель и их концентрация. В технических паспортах дренчерных оросителей эти параметры также отсутствуют.

Предложенный в данной работе научный подход основан на разработанной в последние годы математической модели, которая позволяет получить расчетные формулы для определения экранирующих свойств дренчерных водяных завес [9 - 14]. Это создает научную базу для разработки и внедрения в строительные нормы и стандарты методик, связанных с применением СРВ в качестве защитных противопожарных систем.

Основным параметром, определяющим способность водяной завесы экранировать тепловое излучение очага пожара, является ее коэффициент пропускания H – это отношение интенсивности I_2 прошедшего излучения к интенсивности I_1 падающего на завесу излучения:

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

Параметрами, которые непосредственно может изменять или учитывать при расчете, являются:

- 1) давление воды p ;
- 2) конструктивные параметры оросителя:
 - диаметр выходного отверстия d_0 ;
 - коэффициент расхода μ_s ;
 - K -фактор;
 - угол раскрытия веерной СРВ φ_0 ;
 - коэффициент дисперсности C_0 ;
- 3) конструктивные параметры дренажной системы (линейки оросителей):
 - расстояние между оросителями Δz ;
 - расстояние от линейки оросителей до рабочего участка СРВ x ;
- 4) параметры функции распределения капель по диаметрам:
 - медиана (параметр масштаба) μ ;
 - параметр формы σ ;
- 5) спектральные характеристики теплового излучения пожара:
 - эффективная температура очага пожара T_f ;
 - коэффициент формы спектра ψ .

Наиболее универсальной расчетной формулой для определения коэффициента пропускания водяной завесы является следующая [13]:

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

Каждая из трех величин в правой части соотношения (2), т.е. η , l_{eq} и D_{eq} , представляет собой сложную функцию от технических и физических параметров, влияющих на результат расчета величины H :

- коэффициент пропускания капли:

$$\eta(\psi, D_{eq}, T_f) = (1 - \psi) \cdot \eta(0, D_{eq}, T_f) + \psi \cdot \eta(1, D_{eq}), \quad (3)$$

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

$$\eta(0, D_{eq}, T_f) = A \cdot D_{eq}^B + C, \quad (5)$$

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

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

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

- 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:

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

где ρ_a – плотность воздуха, ρ_w – плотность воды, σ_w – поверхностное натяжение воды.

В формуле (10) расчет выполняется исходя из гипотезы о том, что распределение капель СРВ по размерам соответствует логнормальной функции.

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

$$Q_{noz} = K \cdot \sqrt{p}. \quad (11)$$

Значение коэффициента K (K -фактор) должно указываться в паспорте на каждый ороситель. В соответствии с требованиями стандарта Украины [16], гармонизированного с европейскими нормами EN 12259-1, размерность этого параметра – $[K] = \text{л}/(\text{мин} \cdot \sqrt{\text{бар}})$. Таким образом, используются размерности $[Q_{noz}] = \text{л}/\text{мин}$; $[p] = \text{бар}$. В случае использования единиц СИ необходимо вводить соответствующий коэффициент пересчета:

$$K_{СИ} = 5,27 \cdot 10^{-8} \cdot K, \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \sqrt{\text{Па}}) \quad (12)$$

Соотношение (11) можно получить теоретически из уравнения Вейсбаха в виде:

$$Q_{noz} = \sqrt{\frac{1}{\zeta}} \cdot S_{noz} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}} = \mu_s \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}} = K_{СИ} \cdot \sqrt{p}, \quad (13)$$

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

$$\mu_s = \frac{4 \cdot \sqrt{\rho_w} \cdot K_{СИ}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_0^2}. \quad (14)$$

При турбулентном режиме течения, характерном для оросителей, формирующих водяные завесы, значения коэффициента расхода μ_s могут находиться в диапазоне от 0,65 («отверстие в тонкой стенке») до 0,95 («конический сходящийся насадок») [15].

Сложность при выполнении расчетов заключается в том, что в реальной ситуации, как правило, не все параметры из представленного выше перечня являются известными. В частности, в технических паспортах оросителей не принято указывать параметры, связанные с размерами капель (C_0 , μ , σ). Кроме того, неизвестными являются параметры излучения пожара (T_f и ψ).

Учитывая невысокие требования к точности определения коэффициента пропускания H (в большинстве случаев достаточно обеспечить относительную погрешность 20 – 30%), для определения названных выше неизвестных параметров, при отсутствии возможности их измерения, можно применить их оценку по косвенным параметрам или по литературным данным. Например, известно, что величина коэффициента дисперсности для разных типов оросителей находится в пределах $1,74 < C_0 < 3,21$ [17], а параметр формы функции распределения капель по диаметрам находится в пределах $0,4 < \sigma < 0,7$. Спектральные характеристики излучения пожара T_f и ψ зависят от горючего вещества и условий горения, а потому после определения типа пожара можно указать типичные значения этих величин.

Для разработки эффективной методики расчета необходимо проанализировать характер зависимости коэффициента пропускания H от каждого из параметров, когда остальные параметры принимают некоторые фиксированные значения. С этой целью на основе формул (2) – (14) получены разнообразные графические зависимости. При этом базовый режим завесы задан следующими (достаточно типичными) значениями параметров:

- $p = 4 \text{ бар} = 4 \cdot 10^5 \text{ Па};$
 - $d_0 = 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
 - $\mu_s = 0,95;$
 - $\Delta z = 0,5 \text{ м};$
 - $x = 3 \text{ м};$
 - $\varphi_0 = 2,5 \text{ рад};$
 - $\sigma = 0,5;$
 - $C_0 = 2,5;$
 - $T_f = 1200 \text{ К};$
 - $\psi = 0,2.$
- (15)

Наибольший интерес представляют зависимости параметров водяной завесы от давления воды p и диаметра выходного отверстия оросителя d_0 при известном значении коэффициента расхода μ_s .

Изменение параметров p и d_0 – это два основных способа влияния на свойства водяной завесы, поэтому им уделено особое внимание.

Результаты расчета представлены на рис. 1 и 2 в виде графических зависимостей коэффициента пропускания завесы, эквивалентного диаметра капель, толщины эквивалентного слоя воды, расхода воды одного оросителя. Все остальные параметры, кроме p и d_0 , соответствуют базовому режиму, заданному условиями (15).

Анализ представленных на рис. 1 и 2 зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Коэффициент пропускания водяной завесы уменьшается при возрастании давления p и диаметра выходного отверстия оросителя d_0 (рис. 1,а и 2,а).
2. При фиксированном давлении меньшим коэффициентом пропускания обладает водяная завеса с большим размером капель. Это связано с тем, что при увеличении d_0 возрастает не только размер капель, но и толщина эквивалентного слоя воды.
3. Отрицательным последствием при увеличении d_0 является резкое возрастание расхода воды (рис. 1,б и 2,б). В некоторых случаях возможный ущерб от пролитой воды может быть сравним с ущербом от пожара. В других случаях этот ущерб является минимальным, а увеличение среднего размера капель является позитивным свойством, т.к. в этом случае СРВ является более устойчивой к воздушным потокам.

Другие параметры, кроме p и d_0 , также влияют на конечный результат, и поэтому необходимо проанализировать характер зависимости коэффициента пропускания водяной завесы от каждой из этих величин (рис. 3).

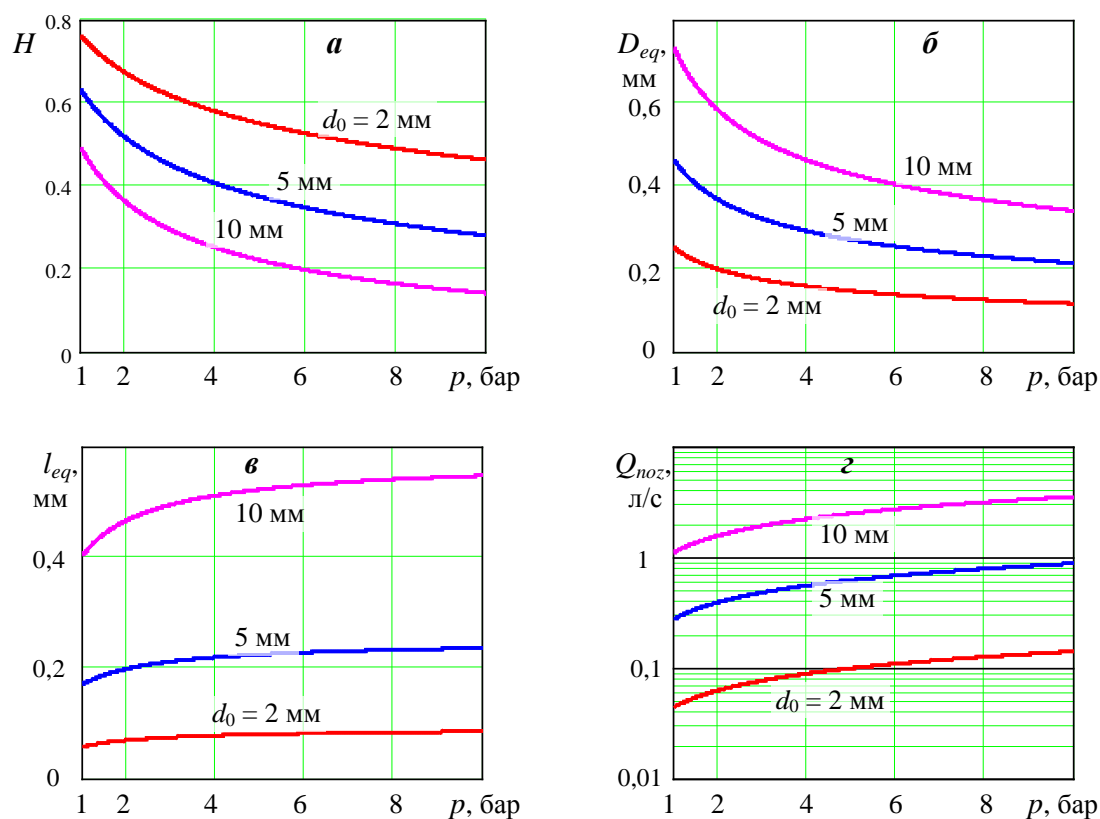


Рисунок 1 – Зависимость от давления воды: а) коэффициента пропускания завесы; б) эквивалентного диаметра капель; в) толщины эквивалентного слоя воды; г) расхода воды

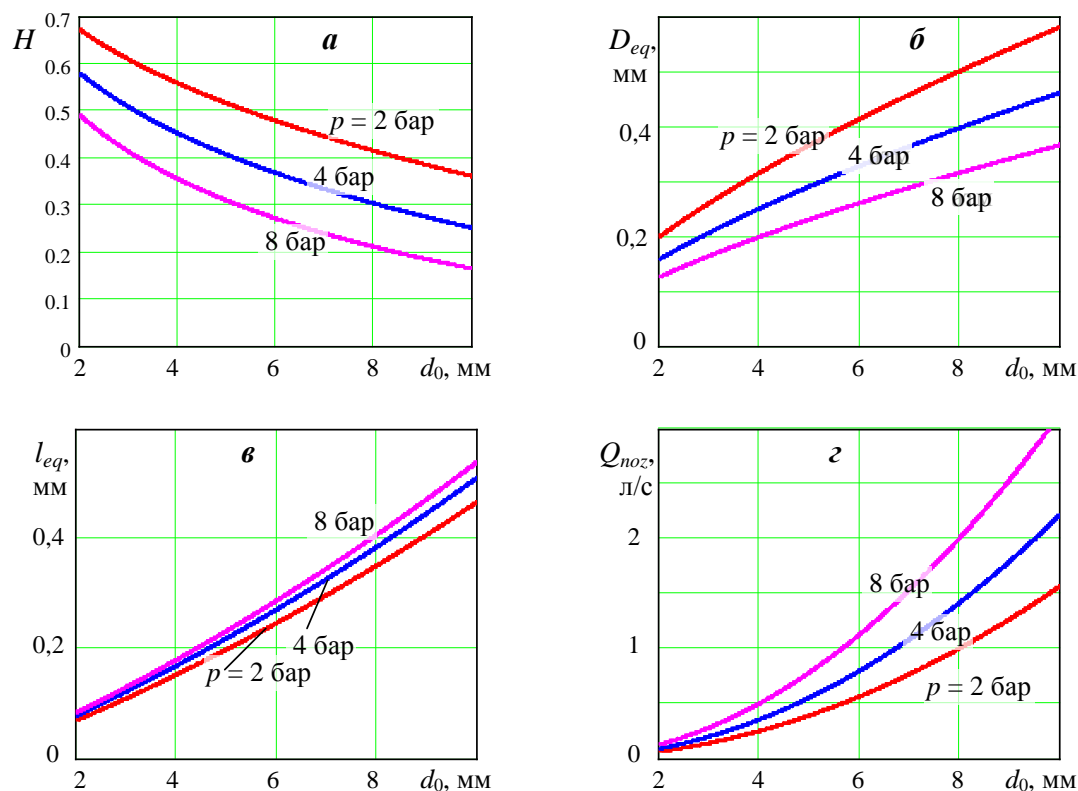


Рисунок 2 – Зависимость от диаметра выходного отверстия: а) коэффициента пропускания завесы; б) эквивалентного диаметра капель; в) толщины эквивалентного слоя воды; г) расхода воды оросителя

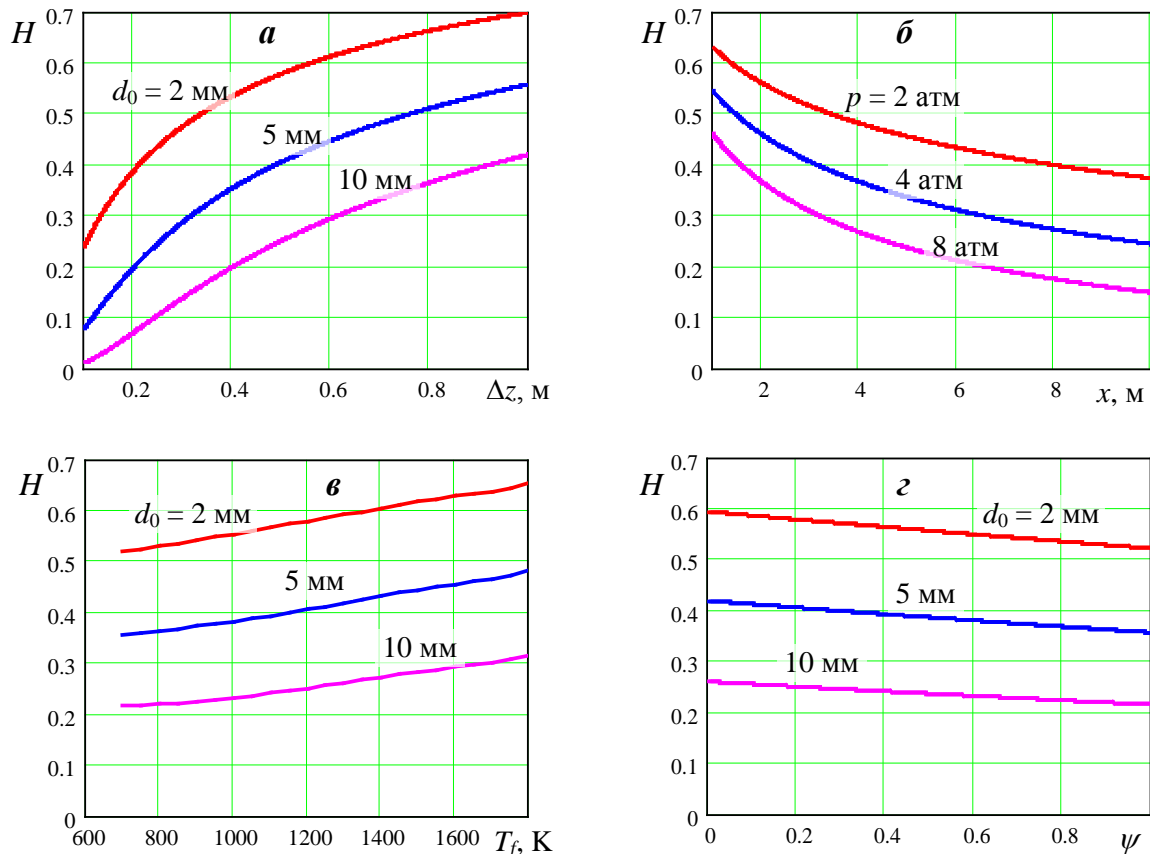


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента пропускания завесы от: а) расстояния между оросителями; б) расстояния от оросителей до рабочего участка СРВ; в) температуры очага пожара; г) коэффициента формы спектра

Анализ графических зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

1. Зависимость коэффициента пропускания H от расстояния между оросителями Δz (рис. 3,а) свидетельствует о простом и очевидном способе улучшения экранирующих свойств завесы – с помощью увеличения количества оросителей.
2. Изменение коэффициента пропускания завесы по вертикали (вдоль координаты x) (рис. 3,б) свидетельствует о том, что нижняя часть завесы экранирует тепловое излучение значительно лучше, по сравнению с верхней. Это можно объяснить замедлением скорости движения капель и возрастанием их концентрации в нижней части завесы.
3. Зависимости коэффициента пропускания H от эффективной температуры пожара (рис. 3,в) и от коэффициента формы спектра (рис. 3,г) являются весьма слабыми, вследствие чего ошибка в определении T_f на 100 – 200 К или в определении ψ на 0,2 – 0,3 не приведет к большой ошибке при расчете H . Поэтому при разработке стандартной расчетной методики достаточно ограничиться составлением общей справочной таблицы типичных величин T_f и ψ в зависимости от горючего вещества и условий горения, которая, на основе информации о характере пожара, позволит определять эти величины примерно с такой точностью.

При проектировании дренчерной системы может возникнуть закономерный вопрос: при каких технологических параметрах водяная завеса будет наиболее эффективной, если задать фиксированный расход воды? В каком случае одно и то же количество воды обеспечит лучшее качество теплового экранирования – при мелко- или крупнодисперсном распылении?

Из соотношения (13) следует, что $Q_{noz} = \text{const}$ при условии $d_0^4 \cdot p = \text{const}$.

Взаимная зависимость параметров d_0 и p (при $Q_{noz} = \text{const}$) позволяет получить зависимости всех других величин (диаметр капель, коэффициент пропускания и др.) от

одного из них (например, от диаметра выходного отверстия) для конкретных заданных параметров Δz , x , φ_0 , T_f , ψ и для каждого фиксированного значения Q_{noz} . Ниже с этой целью найдены соответствующие математические соотношения.

Из (13) найдем:

$$p = \frac{8 \cdot \rho_w \cdot Q_{noz}^2}{\mu_s^2 \cdot \pi^2 \cdot d_0^4}. \quad (16)$$

Подставляя это выражение в формулу (10), получим эквивалентный диаметр капель СРВ в зависимости от диаметра выходного отверстия:

$$D_{eq} = C_0 \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot \sigma_w}{16 \cdot \rho_w} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Q_{noz}^{-\frac{2}{3}} \cdot d_0^2. \quad (17)$$

Скорость струи (начальная скорость капель):

$$u_0 = \frac{4 \cdot Q_{noz}}{\pi \cdot d_0^2}. \quad (18)$$

Совместно с формулами (2) – (9), полученные соотношения позволяют (при фиксированном Q_{noz}) представить все расчетные величины в зависимости от одной переменной величины (диаметра отверстия d_0) и построить соответствующие графики. Пример расчета для трех значений Q_{noz} представлен на рис. 4.

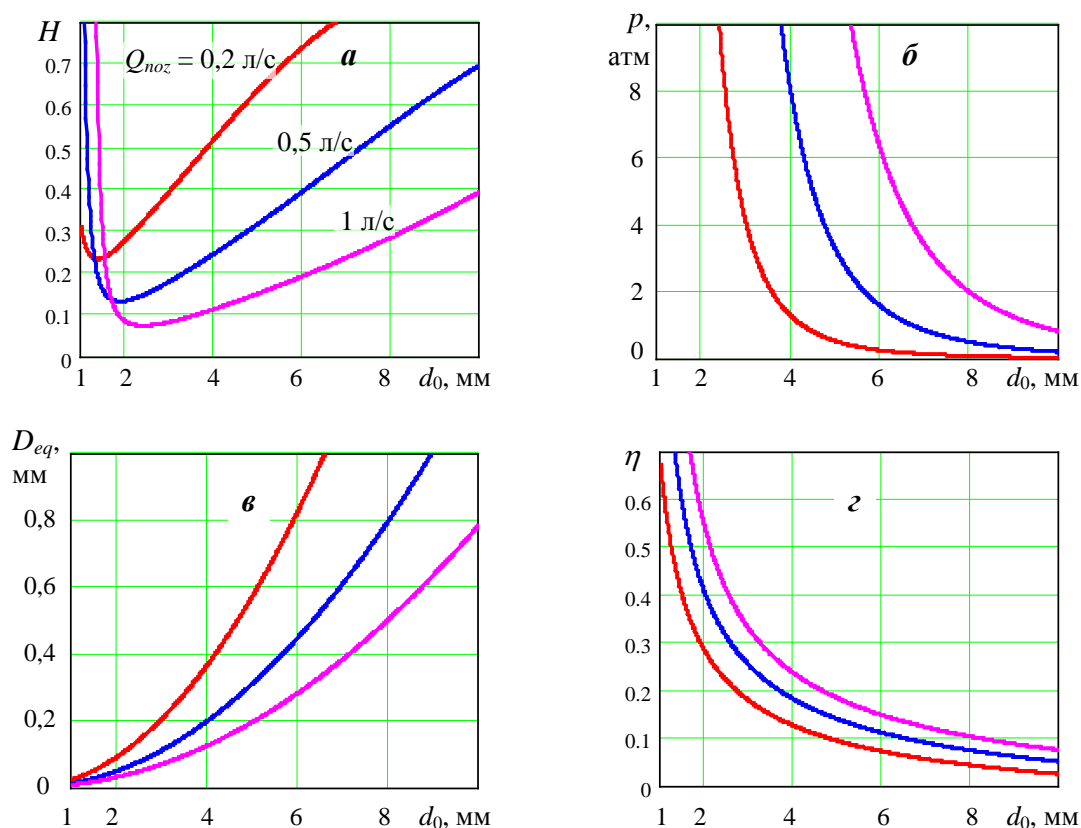


Рисунок 4 – Зависимости от диаметра отверстия оросителя (для заданных $Q_{noz} = \text{const}$):
а) коэффициента пропускания водяной завесы; б) давления воды;
в) эквивалентного диаметра капель; г) коэффициента пропускания капли

Левая часть графика зависимости $H(d_0)$ (рис. 4,а), имеющего минимум, резко уходит вверх. Это обусловлено тем, что при малых d_0 размер капель уменьшается, они становятся практически «прозрачными» для теплового излучения и не выполняют экранирующую функцию (т.е. $\eta \rightarrow 1$). Об этом свидетельствует зависимость $\eta(d_0)$ (рис. 4,з).

На основе графиков рис. 4 ответ на поставленный выше вопрос заключается в следующем. При $Q_{noz} = \text{const}$ качество теплового экранирования улучшается (т.е. коэффициент пропускания уменьшается) при уменьшении диаметра отверстия оросителя d_0 (рис. 4,а). Поскольку при этом уменьшается и размер капель (рис. 4,в), то мелкодисперсная завеса является более эффективным тепловым экраном, по сравнению с крупнодисперсной.

Сочетание на рис. 4 графических зависимостей наиболее важных технологических параметров водяной завесы (H , Q_{noz} , D_{eq} , d_0 , p) позволяет использовать их для оперативного анализа различных режимов и выбора среди них оптимального для той или иной конкретной ситуации. На основе этого метода может быть разработана вычислительная номограмма, позволяющая осуществлять приближенный расчет параметров водяной завесы.

Таким образом, соотношения (2) – (14) представляют набор расчетных формул, достаточный для выполнения технологического расчета параметров противопожарных водяных завес. Они могут быть положены в основу стандартных расчетных методик с целью широкого внедрения в практику при разработке и эксплуатации соответствующих противопожарных систем. Следует, однако, учесть, что в случае использования технологических систем другого типа, с использованием, например, одиночных оросителей (а не линейки оросителей) или многослойных водяных завес, для расчета толщины эквивалентного слоя применяется не формула (9), а формула, соответствующая данной системе. Например, в работе [18] с этой целью использована формула для конусной СРВ.

Выводы

На основе ранее разработанной математической модели экранирования водяными завесами теплового излучения пожаров представлен набор формул для расчета технических параметров. Выполнены расчеты и построены графики функциональных зависимостей между параметрами водяных завес, которые могут представлять практический интерес. На основе анализа этих графиков сделаны следующие выводы:

- 1) коэффициент пропускания водяной завесы уменьшается при возрастании давления воды в оросителе и диаметра выходного отверстия оросителя;
- 2) коэффициент пропускания водяной завесы уменьшается при уменьшении расстояния между оросителями и увеличении расстояния от линейки оросителей до рабочего участка СРВ;
- 3) спектральные характеристики теплового излучения очага пожара (эффективная температура и коэффициент формы спектра) слабо влияют на коэффициент пропускания водяной завесы, что снижает требования к точности их задания при использовании в расчетных формулах;
- 4) при фиксированном расходе воды мелкодисперсная водяная завеса является более эффективным тепловым экраном, по сравнению с крупнодисперсной.

Перспективы дальнейшей работы в данном направлении связаны с необходимостью выполнения комплекса экспериментальных исследований с целью проверки адекватности математической модели, а также определения реальных численных коэффициентов основных расчетных формул. Также планируется разработка вычислительной номограммы для оперативного определения основных параметров водяной завесы на основе графических зависимостей между этими параметрами при условии постоянства расхода воды.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жаров А. Дренчерные завесы: теория и практика / А. Жаров, А. Зархин, М. Митрофанова // БДИ. – 2006 . – № 5 (68). – С. 24-28. Режим доступа к журн.: <http://mx1.algoritm.org/arch/?id=22&a=547>
2. 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.
3. Противопожарные занавесы и завесы. – Режим доступа к журн.: <http://тсб-про.рф/protivopozharnie-zanavesi-i-zavesi.html>
4. 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.
5. Мешман Л. М. Оросители водяных и пенных автоматических установок пожаротушения: Учебно-методическое пособие / Л. М. Мешман, С. Г. Цариченко и др.; под общ. ред. Н. П. Копылова. – М.: ВНИИПО МЧС РФ, 2002. – 315 с.
6. Протипожежна техніка. Установки водяного пожежогасіння автоматичні. Зрошувачі для водяних завіс. Загальні технічні вимоги та методи випробовувань: ДСТУ 5027:2008. – [Чинний від 2010-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 28 с. – (Національний стандарт України).
7. Установки водяного и пенного пожаротушения автоматические. Оросители. Общие технические требования. Методы испытаний: ГОСТ Р 51043-2002. – [Введен в действие 2003-07-01]. – М.: Госстандарт России, 2003. – 30 с.
8. Причальные комплексы для перегрузки нефти и нефтепродуктов. Противопожарная защита. Нормы проектирования: ВСН 12-87. – [Введен в действие 1987-06-01]. – Минморфлота СССР. – 17 с. – (Ведомственные строительные нормы).
9. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва (Россия), 2012. – Т. 21, № 7. – с. 77-86.
10. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами. Часть 2 / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва (Россия), 2013. – Т. 22, № 4. – с. 72-84.
11. Виноградов А.Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва (Россия), 2013. – Т. 22, № 6. – с. 74-84.
12. 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.
13. Виноградов А.Г. Методика розрахунків параметрів водяних завіс на основі теорії затоплених струменів / А.Г. Виноградов // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2013. – № 2 (28). – с. 127-139.
14. Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва (Россия), 2014. – Т. 23, № 1. – с. 45-56.
15. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления, - 2-е изд. перераб. и доп. М., Недра, 1982. - 224 с.

16. ДСТУ EN 12259-1:2008 Стационарні системи пожежогасіння. Елементи спринклерних і водорозпилювальних систем. Частина 1. Спринклери (EN 12259-1:1999, IDT)
17. Dundas P.H. Technical Report Optimization of Sprinkler Fire Protection the Scaling of Sprinkler Discharge: Prediction of Drop Size / Dundas P.H. – Factory Mutual Research Corporation No. 18792 RC73-T-40, Norwood, MA, 1974.
18. Виноградов А.Г. Экспериментальное исследование экранирования теплового излучения распыленной водой / А.Г. Виноградов., С.Ю. Огурцов, В.А. Дунюшкин, В.С. Бенедюк, Е.А. Линчевский // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2014. – № 2 (30). – с. 99-108.

