

УДК 532.529.5:614.838.441

А.Г. Виноградов, канд. физ.-мат. наук, С.Ю. Огурцов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., В.А. Дунюшкин канд. техн. наук, ст. науч. сотр., В.С. Бенедюк, Е.А. Линчевский, канд. техн. наук

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ

Создано экспериментальное оборудование, при помощи которого проведены исследования по определению эффективности экранирования теплового излучения при его прохождении через струю распыленной воды. В качестве источника излучения использовалась прямоугольная панель, нагретая до высокой температуры. Распыленная струя в форме конуса создавалась с помощью форсунки. Интерпретация результатов эксперимента выполнена на основе математической модели экранирования теплового излучения пожаров водяными завесами. Удовлетворительная сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований позволила сделать вывод о правильности предположений, положенных в основу данной математической модели.

Ключевые слова: распыленная вода, тепловое излучение, защита от пожаров.

A. Vinogradov, Cand. of Sc.(Physics), S. Ogurtsov, Cand. of Sc. (Eng), Sen. St. Sc., V. Duniyushkin, Cand. of Sc. (Eng), Sen. St. Sc., V. Benedyuk, E. Linchevskiy, Cand. of Sc. (Eng)

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL RADIATION SHIELDING BY SPRAYED WATER

Designed experimental equipment whereby conducted studies to determine the effectiveness of shielding thermal radiation during its passage through a jet of atomized water. The spray in the form of a cone was created by means of a nozzle. Interpretation of the experimental results is executed on the basis of mathematical model of fire thermal radiation shielding by water curtains. The good consent of results of the theory and experiment allowed to draw a conclusion on a validity of the prerequisites which are been the basis for the mathematical model.

Keywords: sprayed water, thermal radiation, fire-fighting protection.

Струи распыленной воды (СРВ) широко используются во время тушения пожаров не только для борьбы с огнем, но и для защиты от теплового излучения. Системы для создания водяных завес достаточно часто применяются также в качестве профилактических средств на пожароопасных объектах, особенно в местах массового пребывания людей. Однако, несмотря на увеличившийся спрос на противопожарные системы такого типа и возрастающие масштабы их проектирования, адекватные методики для их расчета в Украине и странах СНГ отсутствуют. Не проводятся также полноценные экспериментальные исследования их свойств [1, 2, 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 СРВ [4 - 8]. При расчете таких систем учитываются их геометрические размеры, общий и удельный расход воды, интенсивность орошения. Исходя из этого, выбирается тип оросителей, рассчитываются их количество, пространственное положение, параметры трубопровода и давление подачи воды [4, 8]. Однако в методиках расчета отсутствуют параметры, которые фактически определяют защитные свойства СРВ: коэффициент экранирования теплового излучения, диаметр капель

и их концентрация в пространстве. В технических паспортах дренчерных оросителей эти параметры также отсутствуют.

Отсутствие стандартных расчетных методик, предназначенных для проектирования и эксплуатации противопожарных водяных завес, является существенным препятствием для их широкого внедрения, повышения их эффективности и надежности. Для разработки и внедрения таких методик может быть использована новая математическая модель, основы которой опубликованы в работах [9 - 14]. Она позволяет получить расчетные формулы для определения экранирующих свойств дренчерных водяных завес. Для верификации этой математической модели необходимо выполнить соответствующие экспериментальные измерения и сравнить полученные результаты с расчетными данными. На решение данной задачи и направлена эта работа.

Основным параметром, определяющим способность водяной завесы экранировать тепловое излучение очага пожара, является ее коэффициент пропускания H , т.е. 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 разработчик или пользователь оборудования для создания водяной завесы, являются:

- 1) давление воды p , Па;
- 2) конструктивные параметры оросителя:
 - диаметр выходного отверстия d_0 , м;
 - угол раскрытия СРВ φ_0 , рад;
 - коэффициент производительности K , $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \sqrt{\text{Па}})$;
 - коэффициент дисперсности C_0 ;
 - расстояние от оросителя до рабочего участка СРВ x , м;
- 3) параметры функции распределения капель по диаметрам:
 - медиана (параметр масштаба) μ , м;
 - параметр формы σ ;
- 4) эффективная температура очага пожара T_f , К.

Коэффициент пропускания водяной завесы может быть найден аналитически с помощью формулы [13]:

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

где η – коэффициент пропускания капли диаметром D_{eq} ; l_s – толщина эквивалентного слоя воды, м; D_{eq} – эквивалентный диаметр капель СРВ, м. Каждая из этих трех величин представляет собой сложную функцию технических и физических параметров. Для их определения могут быть использованы соотношения, найденные в [9 - 14]:

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

$$\eta = A \cdot D_{eq}^B + C, \quad (4)$$

$$A = 1,25 \cdot 10^{-35} \cdot (T_f - 207,6)^{1,02}, \quad (5)$$

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

$$C = -9,59 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,002495 \cdot T_f}. \quad (7)$$

где σ_w – поверхностное натяжение воды, Н/м.

Соотношения (4) – (7) для расчета коэффициента пропускания капли получены, исходя из предположения, что источником теплового излучения является абсолютно черное тело при некоторой эффективной температуре T_f , К.

Для расчета величины l_s необходимо учесть конструктивные особенности источника СРВ и ее форму. Например, в случае конусной осесимметричной СРВ расчетная формула имеет следующий вид:

$$l_s = 1,24 \cdot d_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}}. \quad (8)$$

где ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; ρ_w – плотность воды, кг/м³.

Расход воды оросителя определяется по известной эмпирической формуле:

$$Q = K \cdot \sqrt{p}. \quad (9)$$

Для круглого отверстия диаметром d_0 эта формула может быть получена теоретически из закона Бернулли:

$$Q = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}}. \quad (10)$$

Сравнивая (9) и (10), получим приближенную формулу связи между K и d_0 :

$$K \approx \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_w}}. \quad (11)$$

Целью данной работы является экспериментальная проверка аналитических соотношений (2) – (8). Для ее достижения необходимо измерить коэффициент пропускания H и сравнить его величину с результатом теоретического расчета. В данной работе сравниваются экспериментальная и теоретическая зависимости H от давления воды.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Горизонтально направленный лучистый тепловой поток создавался радиационной панелью размером 420 мм х 430 мм, мощность нагрева которой регулировалась с помощью блока питания в пределах до 11 кВт. Температура панели достигала 800°C. Измерение плотности теплового потока производилось датчиком типа РАП-12М, расположенным на расстоянии 600 мм от радиационной панели. Высота установки датчика теплового потока (h_q) составляла 530 мм, распылителя (h_n) – 590 мм.

Для экранирования теплового потока в пространстве между радиационной панелью и датчиком создавалась СРВ конусной осесимметричной формы, направленная вертикально вниз. Для создания СРВ в качестве распылителя использовалась форсунка Danfoss 1,65-S-45° [15]. Угол раскрытия конической струи зависел от давления и изменялся в пределах от 60° до 90°.

Определение угла раскрытия СРВ проводилось путем обработки цифровых фотографий конуса распыла, сделанных в условиях дополнительной подсветки, программным обеспечением для анализа и обработки изображений ImageJ. Программное обеспечение с открытым исходным кодом написано на языке Java сотрудниками National Institutes of Health США.

ImageJ нашло широкое применение при проведении научных исследований связанных с анализом изображений, в астрономии, медицине, географии и т.д, в качестве альтернативы проприетарному ПО [16].

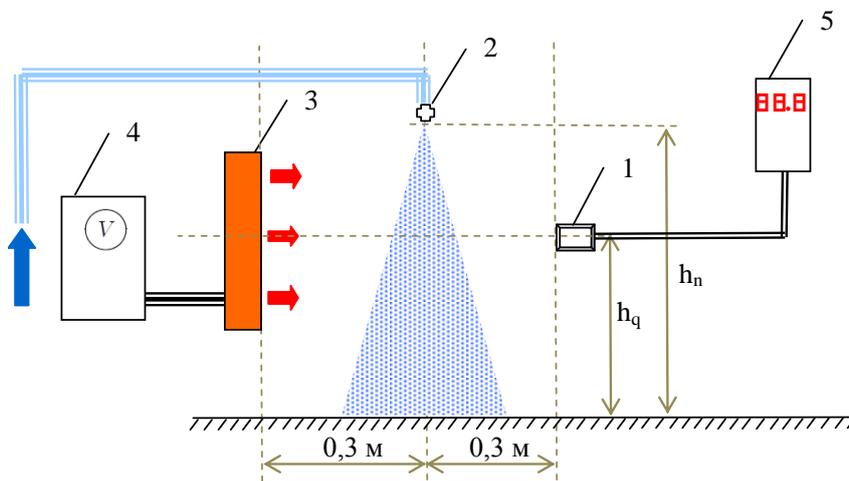


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – датчик теплового потока; 2 – распылитель; 3 – радиационная панель; 4 – блок питания радиационной панели; 5 – блок индикации датчика теплового потока.

Для исследования гидродинамических свойств СРВ были выполнены измерения зависимости расхода воды распылителя от давления, а также определено распределение капель СРВ по размерам и его зависимость от давления воды.

Для определения расходных характеристик распылителя осуществлялось улавливание СРВ в мерную емкость с последующим взвешиванием на протяжении фиксированных интервалов времени, при условии постоянного давления воды перед форсункой. Результаты таких измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость расхода воды распылителем от давления

Давление p , бар	2	4	6	8	10
Расход Q , мл/с	0,68	1	1,2	1,39	1,54

По данным табл. 1 методом наименьших квадратов найдена функция аппроксимации в виде формулы (9) и определен коэффициент производительности распылителя $K = 1,55 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \sqrt{\text{Па}}) = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ л}/(\text{с} \cdot \sqrt{\text{МПа}})$. На рис. 2 представлены данные из табл. 1 и функция аппроксимации.

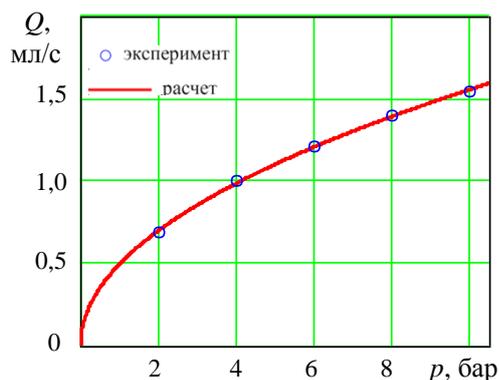


Рисунок 2 – Расходная характеристика распылителя

На основе найденного значения K можно из формулы (11) приближенно определить диаметр выходного отверстия распылителя $d_0 \approx 0,21$ мм. Данное значение является ориентировочным, т.к. формула (11) верна только для простейшей геометрии отверстия. В форсунке Danfoss 1,65-S-45° перед отверстием установлен завихритель потока [15], который влияет на величину K .

Для измерения распределения капель по размерам применялся метод оптической микроскопии с использованием цифрового микроскопа (рис.3) путем фотографирования капель зафиксированных в улавливающей среде.

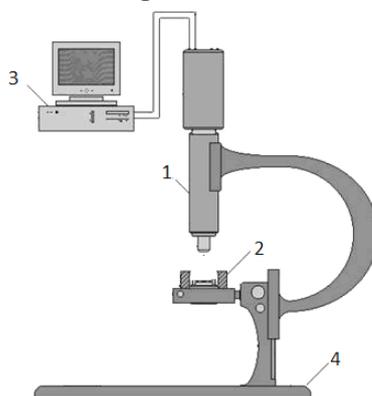


Рисунок 3 – Схема оборудования для оптической микроскопии

1- цифровой микроскоп; 2- емкость с улавливающей средой; 3- компьютер; 4- станина.

Последующая обработка цифровых изображений проводилась средствами MATLAB, а именно пакета Image Processing Toolbox с использованием технологий компьютерного зрения, в частности фильтра Канни [17]. Пример такой обработки изображений представлен на рис. 4.

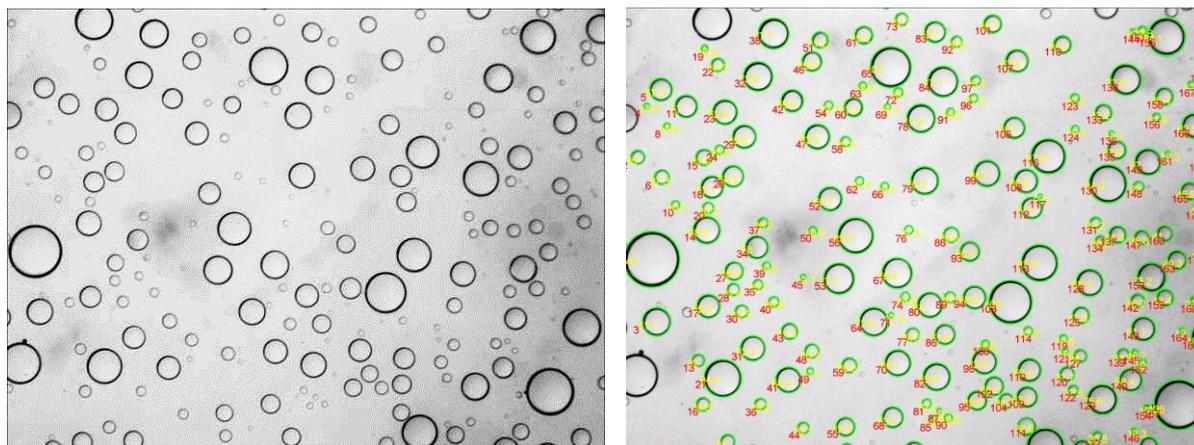


Рисунок 4 – Пример обработки изображения капель СРВ с использованием технологий компьютерного зрения.

Полученный по результатам обработки изображений массив, содержащий зафиксированные радиусы капель обрабатывался согласно требованиям CEN/TS 14972 [18] с использованием программного обеспечения "Анализ дисперсности распыления водных огнетушащих веществ" вер. 2.0, разработанного в среде объектно-ориентированного программирования Delphi 7.0.

Представленное программное обеспечение (рис. 5) выполняло сортировку капель по классам, вычисление значений основных показателей распыления: среднего арифметического диаметра, диаметра Саутера, значений $Dv_{0.1}$, $Dv_{0.5}$, $Dv_{0.9}$.

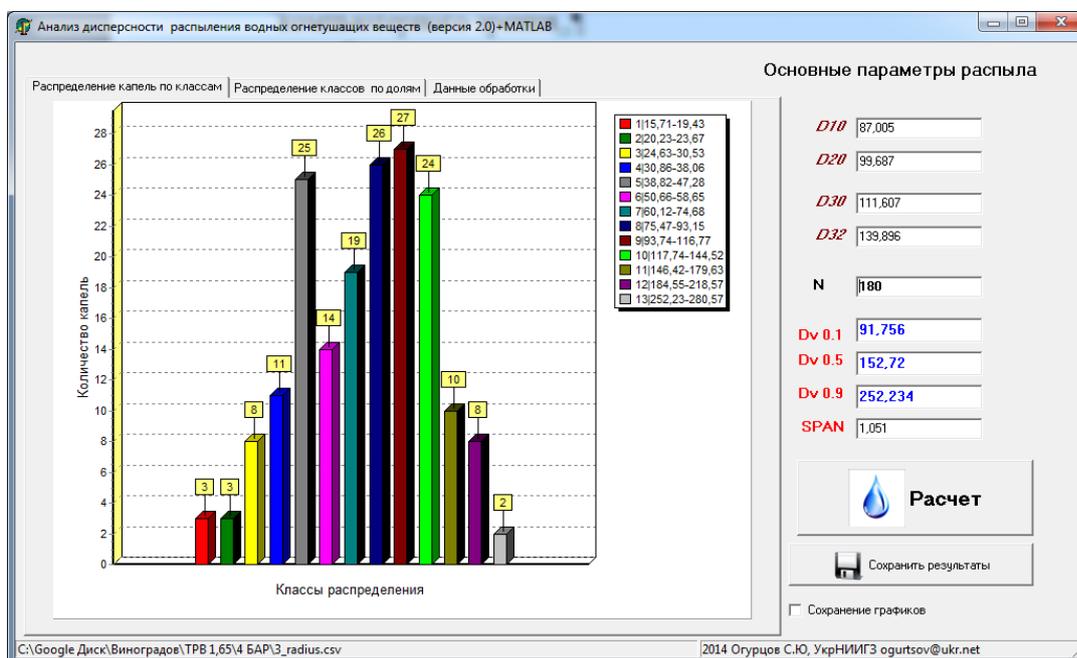


Рисунок 5 – Рабочее окно программного обеспечения "Анализ дисперсности распыления водных огнетушащих веществ"

Полученные данные характерных диаметров, а также отсортированный массив сохранялись в файл формата *.csv, что позволяло проводить дальнейшую обработку и обобщение данных средствами табличного процессора Microsoft Excel 2003.

Экспериментальные данные измерения размеров капель представлены в табл. 2. Здесь использованы результаты расчета среднего диаметра Саутера D_{32} , т.к. эта величина, согласно

[11], практично совпадає з еквівалентним діаметром крапель СРВ. При кожному тиску води в распылителе вимірювання виконувалися декілька раз.

Таблиця 2 – Результати розрахунку середнього діаметра Саутера СРВ для різних тисків води

Давлення p , бар	2	4	6	8	10
D_{32} , мкм	214	137	100	88	84
	186	133	94	92	90
	230	140	92	87	79
	196	122	95	78	93
	-	-	111	82	-
	-	-	113	-	-

При інтерпретації даних табл. 2 необхідно урахувати важливу особливість конструкції форсунки Danfoss 1,65-S-45°. В її технічному описанні [15] вказано, що тиск води в області вихідного отвору відрізняється від вхідного тиску на 1,6 бар. Отже, для розрахунку еквівалентного діаметра крапель СРВ формулу (3) необхідно застосовувати в наступному вигляді:

$$D_{eq} = C_0 \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_w}{2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot d_0^{\frac{2}{3}} \cdot (p - \Delta p)^{-\frac{1}{3}}, \quad (12)$$

де $\Delta p = 1,6$ бар. Параметр форми σ , визначений за даними статистики розподілу крапель за розмірами з порівняння середніх діаметрів $D_{v,0,5}$ і D_{32} , орієнтовно знаходиться в межах $0,4 \div 0,5$. Коефіцієнт дисперсності визначається за даними експерименту, і в даному випадку його значення прийнято рівним $C_0 = 7,0$.

На рис. 6 представлено порівняння експериментальних даних визначення величини D_{32} з табл. 2 (точки) і розрахунок величини D_{eq} за формулою (12) (лінія). Враховуючи хороше співпадіння даних (відхилення між теоретичними і експериментальними значеннями не перевищило 15%), далі формула (12) застосовувалася для визначення D_{eq} при розрахунку коефіцієнта пропускання СРВ.

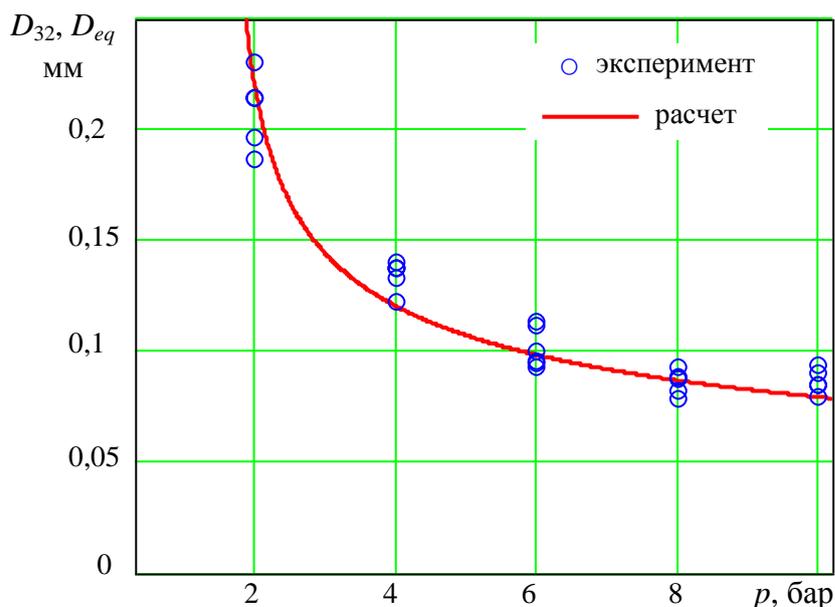


Рисунок 6 – Порівняння розрахункових і експериментальних даних при визначенні еквівалентного діаметра крапель СРВ

Результаты измерения экранирующих свойств СРВ представлены в табл. 3. При каждой величине давления воды измерялась интенсивность I_1 теплового излучения при отсутствии СРВ и интенсивность I_2 при включенной СРВ. Для каждого давления был выполнен расчет коэффициента пропускания H по формуле (1). Относительная погрешность измерения датчиком типа РАП-12М величин I_1 и I_2 , согласно паспортным данным, равна 5%. Таким образом, абсолютная погрешность определения величины H :

$$\Delta H = 0,05\sqrt{2} \cdot \left(\frac{I_2}{I_1}\right) \cdot H .$$

Таблица 3 – Измерение коэффициента пропускания СРВ в зависимости от давления

p , бар	2	4	6	8	10
I_1 , кВт/м ²	4,16	3,81	3,99	4,01	3,93
I_2 , кВт/м ²	4,09	3,56	3,61	3,58	3,45
H	0,983	0,934	0,905	0,893	0,878
ΔH	0,068	0,062	0,058	0,056	0,054

Математический расчет коэффициента пропускания СРВ производился с помощью расчетных формул (2), (4) – (8), (12) для следующих значений параметров: $d_0 = 2,1 \cdot 10^{-4}$ м; $\sigma = 0,4$; $C_0 = 7,0$; $T_f = 1073$ К.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных представлено на рис. 7.

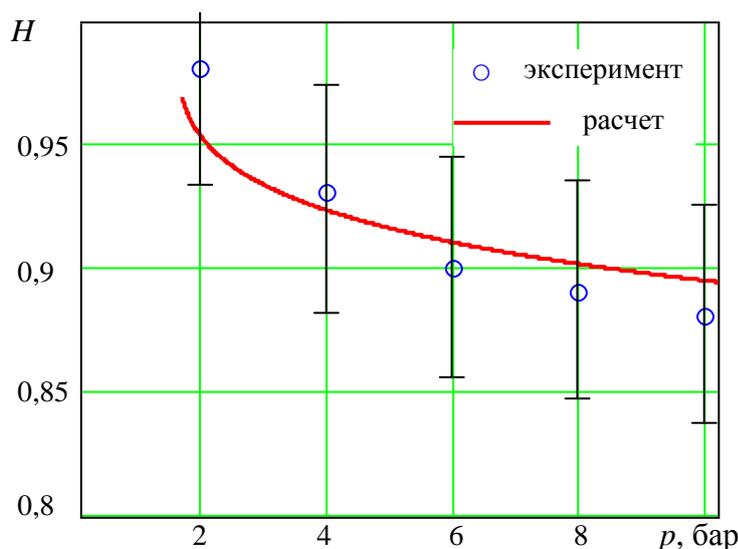


Рисунок 7 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных при определении коэффициента пропускания СРВ для теплового излучения

С учетом указанных на рис. 7 погрешностей измерений совпадение результатов можно считать удовлетворительным (отклонение между теоретическими и экспериментальными значениями коэффициента пропускания не превысило 10 %). Кроме экспериментальных погрешностей, на результат измерений некоторое влияние могли оказать особенности конструкции распылителя водяной струи (наличие завихрителя). Возможно, это проявляется в свойствах распыленной струи, которые сложно учесть при разработке ее математической модели.

Выводы

1. Создано экспериментальное оборудование для определения эффективности экранирования теплового излучения водяными завесами, что позволяет оценивать значение

коэффициента пропускания струи распыленной воды в зависимости от ее гидродинамических свойств.

2. Создан программно-аппаратный комплекс для определения дисперсности распыления водных огнетушащих веществ с использованием современных технологий в области компьютерного зрения.

3. Выполнена валидация математической зависимости для расчета эквивалентного диаметра капель (D_{eq}) конических струй распыленной воды осесимметричной формы в диапазоне значений диаметра Саутера 78 мкм...214 мкм. Отклонение между теоретическими и экспериментальными значениями не превысило 15 %.

4. Выполнена валидация математической модели экранирования теплового излучения пожаров завесами распыленной воды, которая базируется на значениях эквивалентного диаметра, коэффициента пропускания капель и толщины эквивалентного слоя воды для распыленных струй в диапазоне значений диаметра Саутера 78 мкм...214 мкм. Отклонение между теоретическими и экспериментальными значениями коэффициента пропускания не превысило 10 %.

5. Перспективы дальнейшей работы в данном направлении связаны с необходимостью выполнения более широкого комплекса экспериментальных исследований с целью проверки адекватности математической модели при использовании дренчерных щелевых оросителей, как одиночных, так и объединенных в более сложные системы, применяемые при создании противопожарных водяных завес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.algorithm.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 УкрНДПБ. – 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. Причалные 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. Форсунки Danfoss. Тип LE: Техническое описание. – 2 с. [http://www.danfoss-msk.ru/instruction/LE\(rus\).pdf](http://www.danfoss-msk.ru/instruction/LE(rus).pdf)
16. ImageJ [Электронный ресурс] Википедия – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/ImageJ>
17. Оператор Кэнни [Электронный ресурс] Википедия – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Оператор_Кэнни
18. CEN/TS 14972:2011 Fixed firefighting systems - Watermist systems - Design and installation.

