

УДК 532.525.3:614.838.441

Виноградов¹ А.Г., к. ф.-м. н.; Яхно² О.М., д.т.н.

1 - Черкасский национальный университет им. Богдана Хмельницкого, г. Черкассы, Украина;

2 - НТУУ «Киевский политехнический институт» г. Киев, Украина

ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ДИАМЕТР КАПЕЛЬ СТРУЙ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Vinogradov¹ A., Yakhno² O.

1 - The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine (vin_ag@mail.ru);

2 - National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (o.yahno@kpi.ua)

EQUIVALENT DIAMETER OF DROPLETS OF SPRAYED WATER JETS AND ITS DEPENDENCE ON TECHNICAL PARAMETERS

Представлено дальнейшее развитие ранее полученных результатов математического моделирования водяных завес противопожарного назначения. Предметом теоретического анализа являются плоские струи распыленной воды, создаваемые целевыми дренчерными оросителями. Основной целью исследования является развитие метода расчета одного из главных параметров модели – эквивалентного диаметра капель струи распыленной воды. Ранее определение этого параметра было возможно лишь с помощью сложных экспериментальных измерений. В данной работе для его расчета применены ранее опубликованные литературные данные. Формула, полученная в работе, позволяет выполнять расчет эквивалентного диаметра капель на основе конструктивных параметров дренчерной установки. Графические зависимости, полученные с помощью формулы, позволили определить зависимость эквивалентного диаметра капель от технических параметров. Применение формулы к математической модели теплозащиты позволило расширить ее возможности для практического применения. Модель может использоваться для проектирования водяных завес противопожарного назначения, а также для определения оптимальных режимов их применения.

Ключевые слова: противопожарная водяная завеса; эквивалентный диаметр капель; экранирование теплового излучения.

Введение

В последние годы быстрыми темпами прогрессируют новейшие технологии пожаротушения, предотвращения пожаров и защиты от опасных факторов пожаров, в основе которых лежит применение струй распыленной воды (СРВ). Одним из важнейших стимулов к их внедрению послужило принятие в 1987 году международного Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой (хлорфторуглероды и бромсодержащие галоны), под действие которого попали многие огнетушащие вещества. Среди альтернативных веществ, призванных заменить попавшие под запрет огнетушащие вещества, одним из наиболее востребованных является распыленная вода [1, 2].

Для разработки и совершенствования соответствующих технологий пожаротушения и защиты от пожаров необходимы научно обоснованные методики расчета режимов формирования и взаимодействия СРВ, которые по заданным начальным и граничным условиям позволили бы определить их основные параметры: геометрические размеры, пространственное распределение концентрации капель, их размеров и скоростей, температуру капель и воздуха, коэффициент экранирования теплового излучения. Эта задача может быть решена с помощью недавно разработанной математической модели [3, 4], в которой рассмотрены свойства СРВ, созданной с помощью системы оросителей для защиты от теплового излучения пожара.

Одной из главных проблем, препятствующих практическому применению данной математической модели и созданных на ее основе расчетных методик, является недостаточное количество информации, представленной в технических паспортах оросителей. В частности, в них отсутствует информация о параметрах функции распределения капель СРВ по диаметрам, которые являются необходимыми для выполнения технических расчетов. Согласно результатам, полученным при разработке математической модели [3, 4], для полидисперсной СРВ можно определить так называемый эквивалентный диаметр капель, т.е. диаметр капель некоторой монодисперсной СРВ, которая имеет такие же экранирующие свойства по отношению к тепловому излучению пожара, что и реальная СРВ. Эквивалентный диаметр капель необходим для расчета экранирующих свойств СРВ, и он может быть определен на основе ее функции распределения капель по диаметрам.

Таким образом, если возникает необходимость выполнить расчет характеристик противопожарной СРВ, для этого нужно предварительно провести весьма сложные и трудоемкие измерения параметров функции

распределения капель по диаметрам и их зависимости от давления воды в оросителе. При этом следует учесть, что до настоящего времени не существует ни надежных экспериментальных методов измерения этих параметров, ни методов их теоретического расчета по заданным техническим параметрам оборудования. Опубликованные экспериментальные работы свидетельствуют о наличии огромных (иногда до 100 – 200%) погрешностей при измерении среднего диаметра капель распыленных струй, в том числе и самыми современными методами [5, 6]. Строгую математическую модель процесса разрушения сплошной струи и ее превращения в поток мелких капель до настоящего времени создать также не удалось [7 – 9].

Весьма перспективным в этом направлении представляется подход, связанный с использованием безразмерного соотношения для диаметра медианы распределения по объемам капель СРВ $D_{0,5}$, полученного Хескестадом в предположении о логарифмически нормальном распределении капель по размерам [10]:

$$\frac{D_{0,5}}{d_0} = C_0 \cdot We^{-\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

где коэффициент C_0 (параметр дисперсности) зависит от конструкции оросителя и определяется экспериментально; d_0 – диаметр выходного отверстия оросителя; We – число Вебера для отверстия:

$$We = \frac{\rho_w \cdot u_0^2 \cdot d_0}{\sigma_w}, \quad (2)$$

u_0 – скорость потока воды в выходном отверстии; ρ_w и σ_w – плотность и поверхностное натяжение воды.

Соотношение (1) многократно анализировалось, подвергалось экспериментальным проверкам, и в большинстве случаев оно было подтверждено [11 – 16].

Постановка задачи

На основе соотношения (1) получить расчетную формулу для эквивалентного диаметра капель СРВ противопожарного назначения. Выполнить численные расчеты и получить графические зависимости эквивалентного диаметра капель от технических параметров для типичных режимов работы водяной завесы при экранировании теплового излучения пожара.

Изложение основного материала

Для расчета скорости потока воды u_0 в выходном отверстии оросителя можно воспользоваться теорией движения жидкостей через отверстия и насадки [17 – 19]. В данном случае ороситель можно рассматривать как насадок специфической формы, характеризующийся соответствующими параметрами: коэффициентом сжатия струи ε_j , коэффициентом скорости струи ϕ_j и коэффициентом расхода жидкости $\mu_j = \varepsilon_j \cdot \phi_j$.

По данным экспериментальных исследований известно, что эти коэффициенты зависят от числа Рейнольдса Re для струи, но при достаточном больших значениях Re , превышающих $\sim 10^4$, их величины выходят на постоянные уровни, зависящие от конструкции насадка. Элементарный расчет показывает, что для типичных режимов работы противопожарных оросителей условие $Re > 10^4$, как правило, выполняется.

Коэффициент сжатия существенно отличается от единицы для отверстия в тонкой стенке, но для всех основных типов насадков $\varepsilon_j = 1$ [17 – 19]. Другие два коэффициента по определению равны:

$$\phi_j = \frac{u_0}{u_j}, \quad (3)$$

$$\mu_j = \frac{Q_{noz}}{Q_j}, \quad (4)$$

где Q_{noz} – расход воды оросителя (объем воды за единицу времени), u_j и Q_j – скорость потока воды и расход воды оросителя для идеальной жидкости, которые можно определить через избыточное давление воды в оросителе p с помощью уравнения Бернулли. Для данного случая это уравнение имеет вид:

$$\frac{\rho_w \cdot u_j^2}{2} = p,$$

откуда:

$$u_j = \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}}.$$

Из (3) получим:

$$u_0 = \phi_j \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}}. \quad (5)$$

Для определения коэффициента скорости ϕ_j воспользуемся тем обстоятельством, что, поскольку, как указано выше, $\varepsilon_j = 1$, то $\mu_j = \varepsilon_j \cdot \phi_j = \phi_j$, т.е. коэффициент скорости оросителя численно равен его коэффициенту расхода. Расход воды для идеальной жидкости:

$$Q_j = S_{noz} \cdot u_j = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}} \quad (6)$$

В паспорте каждого оросителя, как правило, представлена (в табличном виде) экспериментально измеренная зависимость:

$$Q_{noz} = K \cdot \sqrt{p} \quad (7)$$

а также указана величина коэффициента K (K -фактор). Однако, следует иметь в виду, что численное значение K -фактора для расчетов необходимо перевести к единицам системы СИ и определить соответствующую величину K_{SI} . Подставляя (6) и (7) в (4), получим:

$$\mu_j = \phi_j = K_{SI} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{2}} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d_0^2} \quad (8)$$

И наоборот, если для данной конструкции оросителя известно значение коэффициента расхода μ_j , из (8) можно определить величину K_{SI} для заданного значения d_0 :

$$K_{SI} = \mu_j \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho_w}} \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \quad (9)$$

В качестве примера рассмотрим серию оросителей для водяных завес типа MXD-WD K1,7 – 63 известной фирмы «Minimax» (Германия) (рис. 1,а).



Рис. 1. Дренчерные оросители: а) MXD-WD K16 фирмы «Minimax»; б) VK790 фирмы «Viking»

В табл. 1 представлены паспортные данные оросителей этой серии, отличающихся диаметром выходного отверстия d_0 .

Таблица 1

Параметры оросителей MXD-WD K1,7 – 63 фирмы «Minimax»

Тип оросителя	d_0 , мм	K , л/(мин· $\sqrt{\text{бар}}$)	K_{SI} , м ³ /(с· $\sqrt{\text{Па}}$)
MXD-WD K1,7-1/4-Ms	1,8	1,7	$8,94 \cdot 10^{-8}$
MXD-WD K16-1/2-Ms	5,9	16	$8,42 \cdot 10^{-7}$
MXD-WD K20-1/2-Ms	6,6	20	$1,05 \cdot 10^{-6}$
MXD-WD K25-1/2-Ms	7,3	25	$1,32 \cdot 10^{-6}$
MXD-WD K31,5-1/2-Ms	8,2	31,5	$1,66 \cdot 10^{-6}$
MXD-WD K40-1/2-Ms	9,3	40	$2,10 \cdot 10^{-6}$
MXD-WD K50-1/2-Ms	10,4	50	$2,63 \cdot 10^{-6}$
MXD-WD K63-1/2-Ms	11,6	63	$3,31 \cdot 10^{-6}$

Расчет по формуле (8) для, например, оросителя типа MXD-WD K63 дает значение коэффициента расхода $\mu_j = 0,7$. Подставляя это значение в (9), получим зависимость K_{SI} от d_0 , график которой для данной серии оросителей представлен на рис. 2,а. На этом же рисунке точками показаны значения K_{SI} из табл. 1. Хорошее совпадение точек с расчетным графиком свидетельствует о пространственном подобии конструкции всех оросителей данной серии, вследствие чего они имеют одинаковую величину коэффициента расхода μ_j .

Это, однако, не значит, что данная закономерность характерна для щелевых оросителей всех типов. Например, на рис. 2,б представлен подобный расчет для оросителей серии VK790 – VK796 фирмы «Viking»

(США) (рис. 1,б). Здесь, в отличие от оросителей «Minimax», присутствует довольно большой разброс по величинам μ_j , вследствие чего точки не ложатся на график с одним значением μ_j .

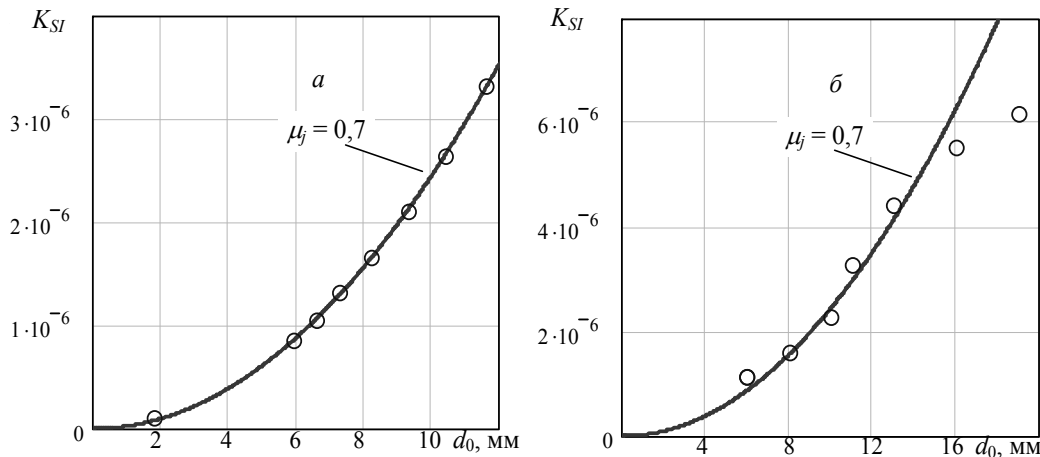


Рис. 2. Зависимости $K_{Sl}(d_0)$ для оросителей: а) серия MXD-WD; б) серия VK790 – VK796. Точки – данные технического паспорта, линия - расчет для $\mu_j = 0,7$

Таким образом, в общем случае нужно исходить из того, что даже в пределах одной серии каждый ороситель индивидуален, со своим значением коэффициента расхода. Для нахождения величины μ_j каждого оросителя необходимо определить (по паспортным данным или экспериментально) его K -фактор и диаметр выходного отверстия, после чего выполнить расчет по формуле (8). Расчеты, выполненные для оросителей других марок подобной конструкции (щелевые оросители для водяных завес) по их паспортным данным, показали, что их коэффициенты расхода в целом попадают в интервал значений от 0,5 до 0,9, но чаще всего – от 0,7 до 0,8.

С учетом (2) и (5), а также учитывая $\mu_j = \varphi_j$, из (1) получим:

$$D_{0,5} = C_0 \cdot d_0 \cdot \left(\frac{2 \cdot \mu_j^2 \cdot p \cdot d_0}{\sigma_w} \right)^{\frac{1}{3}},$$

или

$$D_{0,5} = C_0 \cdot \left(\frac{\sigma_w}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{d_0}{\mu_j} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot p^{-\frac{1}{3}}, \tag{10}$$

Исходя из свойств логарифмически нормального распределения, можно найти следующие соотношения для его параметров – среднего диаметра Саутера D_{32} и диаметра медианы распределения по объемам капель $D_{0,5}$:

$$D_{32} = \mu \cdot e^{\frac{5}{2} \cdot \sigma^2},$$

$$D_{0,5} = \mu \cdot e^{3 \cdot \sigma^2},$$

где μ – медиана, σ – параметр формы функции распределения капель СРВ по диаметрам. Отсюда:

$$D_{32} = D_{0,5} \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2}}. \tag{11}$$

Согласно выполненным расчетам [3], при $\sigma < 0,8$ эквивалентный диаметр капель СРВ $D_{eq} \approx D_{32}$. Отсюда, подставляя (10) в (11), найдем для эквивалентного диаметра капель:

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

Это соотношение позволяет решить важнейшую задачу конструкторского расчета системы противопожарной защиты на основе водяных завес. Она дает возможность определить экранирующие свойства водяной завесы (с помощью математической модели [3, 4]) на основе технических параметров оросителей без выполнения трудоемких и сложных измерений распределения капель по диаметрам.

Формула (12), однак, не дозволяє в кожному випадку виконати кількісний розрахунок еквівалентного діаметра капель СРВ до тих пор, пока експериментально не визначено невідомий коефіцієнт C_0 (параметр дисперсності), залежний від конструкції оросителя.

Все ж ця формула дає можливість зробити грубу оцінку еквівалентного діаметра капель для оросителів простейшої конструкції, к числу яких відносяться щелеві оросителі для водяних завес. На основі обобщення результатів експериментальних досліджень відомо, що величина параметра дисперсності для подібних оросителів знаходиться в межах $1.74 < C_0 < 3.21$ [11]. Якщо цей інтервал дійсно відповідає всім можливим значенням параметра дисперсності, то, вибираючи середнє з даного інтервалу $C_0 = 2,5$ при розрахунок D_{eq} , ми не зробимо помилку більш 30%. При такому способі вибору параметра дисперсності C_0 формула (12) є оціночною, т.е. не вимагає високої точності розрахунок.

Крім того, формула (12) дає цінну інформацію про характері залежності еквівалентного діаметра капель СРВ від параметрів d_0 , p і σ , і це дає можливість виробити методи оптимізації параметрів СРВ в кожному випадку конкретних умов теплового екранування. Щоб оцінити чисельні параметри і характер цієї залежності, на рис. 3 представлені результати розрахунок графіків $D_{eq}(p)$ і $D_{eq}(d_0)$, отриманих за допомогою формули (12). Для розрахунок були задані значення $\sigma = 0,5$, $\mu_j = 0,7$ і $C_0 = 2,5$.

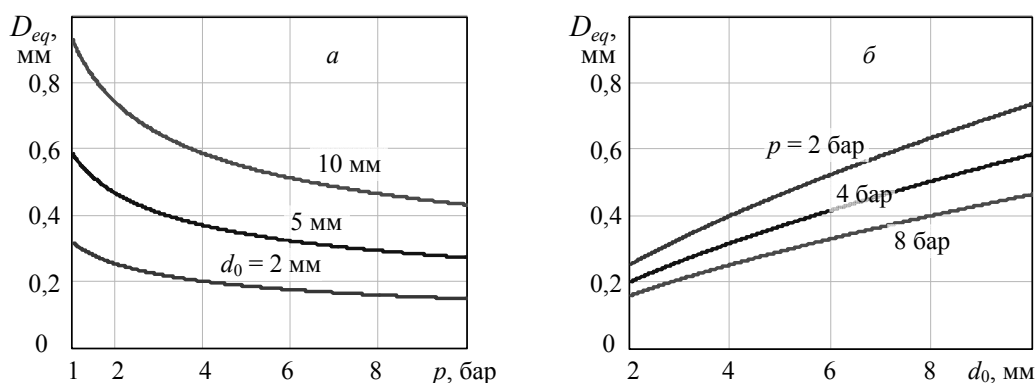


Рис. 3. Залежність еквівалентного діаметра капель СРВ від технічних параметрів оросителя

Из рис. 3 можно увидеть, что зависимости $D_{eq}(p)$ и $D_{eq}(d_0)$ являются довольно слабыми, и добиться существенного уменьшения эквивалентного диаметра капель можно лишь при многократном повышении давления или уменьшении диаметра отверстия. При необходимости значительного уменьшения D_{eq} наиболее рациональным методом является одновременное повышение давления и уменьшение выходного отверстия оросителя. Это позволяет при определенном соотношении этих изменений сохранить постоянным расход воды оросителя Q_{noz} . Согласно (4) и (6):

$$Q_{noz} = \mu_j \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}}$$

Таким образом, $Q_{noz} = \text{const}$ при условии:

$$d_0^4 \cdot p = \text{const}.$$

В этом случае, для уменьшения D_{eq} в k раз при сохранении постоянного расхода воды диаметр отверстия необходимо уменьшить в $k^{1/2}$ раз, и при этом давление повысить в k^2 раз.

Выводы

На основе литературных данных получена расчетная формула (12) для эквивалентного диаметра капель струй распыленной воды (водяных завес), используемых для экранирования теплового излучения пожаров. Для выполнения расчетов по этой формуле необходимо использовать информацию (параметры K и d_0) из технических паспортов оросителей, используемых для создания СРВ. Кроме того, необходимо экспериментальным путем определить параметр дисперсности C_0 и параметр формы σ логарифмически нормального распределения капель по диаметрам. Если нет возможности выполнить такие экспериментальные измерения, расчетную формулу (12) можно использовать для выполнения оценочных расчетов с точностью около 30%. В этом случае необходимо задать следующие значения неизвестных параметров: $C_0 = 2,5$; $\sigma = 0,5$. В дальнейшем при использовании данной методики расчетов необходимо дополнить технические паспорта оросителей для водяных завес информацией о величинах C_0 и σ . С этой целью предприятия-производители данного вида продукции должны иметь соответствующее метрологическое обеспечение и стандартные методики определения данных параметров.

Следующим этапом исследований в этом направлении должны быть экспериментальные измерения оросителей различных типов, с целью проверки и уточнения расчетной формулы (12), а также ее использование для усовершенствования математической модели, представленной в работах [3, 4].

Анотація. Представлені подальший розвиток раніше отриманих результатів математичного моделювання водяних завіс протипожежного призначення. Предметом теоретичного аналізу є плоскі струмені розпиленої води, що створюються циліндричними дренчерними зрошувачами. Основною метою дослідження є розвиток методу розрахунку одного з головних параметрів моделі – еквівалентного діаметру крапель струменя розпиленої води. Раніше визначення цього параметра було можливе лише за допомогою складних експериментальних вимірів. У цій роботі для розрахунку цього параметра застосовані раніше опубліковані літературні дані. Формула, отримана в роботі, дозволяє виконувати розрахунок еквівалентного діаметру крапель на основі конструктивних параметрів дренчерної установки. Графічні залежності, отримані за допомогою формули, дозволили визначити залежність еквівалентного діаметру крапель від технічних параметрів. Застосування цієї формули до математичної моделі теплозахисту дозволило розширити її можливості для практичного застосування. Ця модель може використовуватися для проектування водяних завіс протипожежного призначення, а також для визначення оптимальних режимів їх застосування.

Ключові слова: протипожежна водяна завіса; еквівалентний діаметр крапель; екранування теплового випромінювання.

Abstract.

Purpose. This work represents further development of earlier received results of simulation of water curtains used as fire protection walls. Subject of the theoretical analysis is the flat fan sprays which flow from the slot-hole sprinkler. The central objective of the study is to develop calculation method of one of the main parameters of this mathematical model. It is such parameter as the equivalent diameter of droplets of the sprayed water stream. Earlier there was no such calculation procedure, and determination of this parameter was made by means of the difficult experimental measurements.

Approach. In this study earlier published literary data are applied to calculation of this parameter. The formula received in the work allows carrying out calculation of called parameter on the basis of design characteristics of drencher installation. The graphic dependences constructed on the formula allowed defining dependence of the equivalent diameter of droplets of the sprayed stream on technical parameters.

Findings. Application of this formula to earlier developed mathematical model of thermal shielding allowed expanding its opportunities for practical use. This model can be used for designing of water curtains of fire-prevention appointment, and also for definition of optimum modes of their operation.

Keywords: fire-fighting water curtain; equivalent diameter of droplets; thermal radiation shielding.

Библиографический список использованной литературы

- Grant G. Fire Suppression by Water Sprays / G. Grant, J. Brenton, D. Drysdale // Progress in Energy and Combustion Science. – 2000. – V. 26. – P. 79-130.
- Мешалкин Е.А. Состояние и перспективы разработок изделий для тушения пожаров тонкораспыленной водой / Е.А. Мешалкин, П.М. Шевченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, № 1. – С. 68-75.
- Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 1. – С. 45-57.
- 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.
- Murrell J.V. Experimental study of the thermal radiation attenuation of sprays from selected hydraulic nozzles / J.V. Murrell, D. Crowhurst, P. Rock // Proceedings of Halon Options Technical Working Conference, 1995. – P. 369-378.
- Roberts G.V. An Experimental Investigation of Thermal Absorption by Water Sprays / G.V. Roberts // Home Office Fire Research and Development Group Report. – 2001. – № 2. – 38 p.
- Lin S.P. Drop and spray formation from a liquid jet / S.P. Lin, R.D. Reitz // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1998. – V. 30. – P. 85-105.
- Marshall A.W. Modelling aspects of sprinkler spray dynamics in fires / A.W. Marshall, M. Di Marzo // Process Safety and Environmental Protection. – 2004. – V.82. – P. 97-104.
- Ren N. A comprehensive methodology for characterizing sprinkler sprays / N. Ren, H.R. Baum, A.W. Marshall // Proceedings of the Combustion Institute. – 2011. – V. 33, No. 2. – P. 2547-2554.
- Heskestad G. Proposal for Studying Interaction of Water Sprays with Plume in Sprinkler Optimization Program / G. Heskestad. – Norwood, MA: Factory Mutual Research Corporation, 1972.
- Dundas P.H. Technical Report Optimization of Sprinkler Fire Protection the Scaling of Sprinkler Discharge: Prediction of Drop Size / P.H. Dundas. – Factory Mutual Research Corporation No. 18792 RC73-T-40, Norwood, MA, 1974.
- You H.Z. Investigation of spray patterns of selected sprinklers with the FMRC drop size measuring system / H.Z. You // Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, Gaithersburg, MD, 1985. – P. 1165-1176.
- Widmann J.F. Phase Doppler interferometry measurements in water sprays produced by residential fire sprinklers / J.F. Widmann // Fire Safety J. – 2001. – V. 36, No. 6. – P. 545-567.
- Wu D. A Modeling Basis for Predicting the Initial Sprinkler Spray / D. Wu, D. Guillemin, A.W. Marshall // Fire Safety Journal. – 2007. – V. 42. – P. 283-294.
- Magnone Z.L. A practical method for designing a virtual sprinkler spray / Z.L. Magnone, R.F. Accosta. – Proceedings of the Fire and Evacuation Modeling Technical Conference, USA, Baltimore, 2011. – P. 1-9.
- Huang J.C.P. The break-up of axisymmetric liquid sheets / J.C.P. Huang // J. Fluid Mech. – 1970. – V. 43, part 2. – P. 305-319.
- Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М., Недра, 1982. – 224 с.
- Рабинович Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М.: Недра, 1980. – 278 с.
- Чугаев Р.Р. Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

References

1. Grant, G., Brenton J. and Drysdale, D. (2000), Fire Suppression by Water Sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 26, pp. 79-130.
2. Meshalkin, E.A., Shevchenko, P.M. (2008), Sostojanie i perspektivy razrabotok izdelij dlja tushenija pozharov tonkoraspylennoj vody [State and prospects of development of products for fire suppression by sprayed water]. *Pozharovzryvobezopasnost'*, vol. 17, no 1, pp. 68-75.
3. Vinogradov, A.G. (2014), Metodika rascheta jekranirujushhh svoystv vodjanyh zaves, Calculation method of water curtain shielding properties, *Pozharovzryvobezopasnost'*, vol. 23, no. 1, pp. 45-57.
4. Vinogradov, A.G. (2013), Metodyka rozrahunkiv parametriv vodjanyh zavis na osnovi teorii' zatoplenyh strumeniv [Calculation method of water curtain parameters on basis of the submerged jet theory]. *Naukovyj visnyk UkrNDIPB (Journal of Research Fire Safety Institute of Ukraine)*, no. 2 (28), pp. 127-139.
5. Murrell, J.V., Crowhurst, D. and Rock, P. (1995), Experimental study of the thermal radiation attenuation of sprays from selected hydraulic nozzles. *Proceedings of Halon Options Technical Working Conference*, pp. 369-378.
6. Roberts, G.V. (2001), *An Experimental Investigation of Thermal Absorption by Water Sprays*. Home Office Fire Research and Development Group Report, no 2.
7. Lin, S.P. and Reitz R.D. (1998), *Drop and spray formation from a liquid jet*, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 30, pp. 85-105.
8. Marshall, A.W. and Marzo, M. Di. (2004), Modelling aspects of sprinkler spray dynamics in fires. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 82, pp. 97-104.
9. Ren, N., Baum, H.R. and Marshall, A.W. (2011), A comprehensive methodology for characterizing sprinkler sprays. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 33, no 2, pp. 2547-2554.
10. Heskestad, G. (1972), *Proposal for Studying Interaction of Water Sprays with Plume in Sprinkler Optimization Program*, MA, Factory Mutual Research Corporation, Norwood.
11. Dundas, P.H. (1974), *Technical Report Optimization of Sprinkler Fire Protection the Scaling of Sprinkler Discharge, Prediction of Drop Size*, Factory Mutual Research Corporation No 18792 RC73-T-40, Norwood, MA.
12. You, H.Z. (1985), *Investigation of spray patterns of selected sprinklers with the FMRC drop size measuring system*. Fire Safety Science – Proceedings of the First International Symposium, Gaithersburg, MD, pp. 1165-1176.
13. Widmann, J.F. (2001), *Phase Doppler interferometry measurements in water sprays produced by residential fire sprinklers*. *Fire Safety J*, vol. 36, no 6, pp. 545-567.
14. Wu, D., Guillemin D., Marshall A.W. (2007), A Modeling Basis for Predicting the Initial Sprinkler Spray. *Fire Safety Journal*, vol. 42, pp. 283- 294.
15. Magnone, Z.L. and Accosta, R.F. (2011), A practical method for designing a virtual sprinkler spray. *Proceedings of the Fire and Evacuation Modeling Technical Conference*, USA, Baltimore, pp. 1-9.
16. Huang, J.C.P. (1970), *The break-up of axisymmetric liquid sheets*. *J. Fluid Mech.*, vol. 43, part 2, pp. 305-319.
17. Al'tshul', A.D. (1982), *Gidravlicheskie soprotivlenija* [Hydraulic resistances], Nedra, Moscow, Russia.
18. Rabinovich, E.Z. (1980), *Gidravlika* [Hydraulics], Nedra, Moscow, Russia.
19. Chugaev, R.R. (1982), *Gidravlika* [Hydraulics], Jenergoizdat, Leningrad, Russia.

Подана до редакції 15.04.2016