

УДК 536.3:535.34:614.838.441

Виноградов А.Г., к. ф.-м. н., доц.

Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля

Национального университета гражданской защиты Украины, г. Черкассы, Украина

## ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАПЕЛЬ НА ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ВОДЯНОЙ ЗАВЕСЫ

Vinogradov A.

Fire Safety Institute named after Chornobyl Heroes, Cherkasy, Ukraine (vin\_ag@mail.ru)

### INFLUENCE OF A SPATIAL DISTRIBUTION INHOMOGENEITY OF DROPLETS ON THE WATER CURTAIN SHIELDING PROPERTIES

Одним из основных параметров водяной завесы, определяющим эффективность экранирования лучистого теплового потока, является ее толщина эквивалентного слоя воды. Для расчета данной величины и определения ее зависимости от конструктивных параметров системы оросителей и режима их работы применена теория затопленных струй. С учетом полученных результатов модифицирована разработанная ранее математическая модель экранирования теплового излучения водяными завесами. Исследовано влияние неоднородности пространственного распределения капель на экранирующие свойства водяных завес противопожарного назначения и выполнены численные расчеты для их типичных режимов работы.

Ключевые слова: водяная завеса; экранирование теплового излучения; коэффициент пропускания; толщина эквивалентного слоя.

#### Введение

Водяные завесы являются одним из наиболее распространенных средств теплового экранирования при пожаре. Дренчерные системы для создания водяных завес часто, особенно в последние годы, используются при проектировании и строительстве объектов с массовым присутствием людей (театры, вокзалы, гипермаркеты, производственные цеха, причалы и т.п.) [1, 2].

В недавно опубликованных работах [3] представлена математическая модель и разработанная на ее основе расчетная методика для проектирования дренчерных установок, предназначенных для создания защитных водяных завес противопожарного назначения. С помощью данной методики можно выполнить расчет экранирующих свойств водяной завесы, в частности, коэффициента пропускания теплового излучения, на основе предварительно заданных параметров. Среди этих параметров, однако, есть такие, которые отсутствуют в паспортных данных дренчерных оросителей и которые весьма сложно определить экспериментально. Среди них – объемная доля воды  $w_v$  (суммарный объем капель в единице объема распыленной водяной струи) и связанный с ней параметр – толщина эквивалентного слоя воды  $l_s$ , равная суммарному объему капель на единицу площади распыленной струи.

Известно, что объемная доля воды в распыленной водяной струе имеет весьма сложное пространственное распределение, т.е. рассматривать водяную завесу, как плоско-параллельный объект с однородной структурой, можно лишь в качестве самого грубого приближения. Принятие такого приближения в работах [3] следует рассматривать лишь как первый шаг на пути создания более совершенной математической модели. В работе [4] для исследования пространственного распределения объемной доли воды и толщины эквивалентного слоя была применена теория затопленных струй и получены расчетные формулы для этих величин. Была установлена существенная зависимость этих величин от вертикальной пространственной координаты. В данной работе эти результаты используются для исследования влияния неоднородности пространственного распределения капель на экранирующие свойства водяной завесы. Кроме однослойной водяной завесы, исследован также вопрос об экранирующих свойствах многослойной завесы (так называемой мультизавесы), которая применяется с целью обеспечения более эффективной защиты от теплового излучения очага пожара.

#### Постановка задачи

На основе ранее разработанной математической модели получить расчетные формулы для зависимости от вертикальной пространственной координаты коэффициента пропускания водяной завесы для теплового излучения очага пожара и выполнить расчеты для типовых параметров однослойной и многослойной водяных завес.

### Расчет толщины эквивалентного слоя воды

Реальные водяные завесы создаются, как правило, некоторым количеством (иногда – несколькими десятками) дренчерных оросителей, расположенными последовательно в ряд с определенным шагом. Размеры завесы и, соответственно, количество оросителей определяются размерами защищаемого объекта или проема. Расстояние между соседними оросителями  $\Delta z$  проектируется таким образом, чтобы обеспечить взаимное перекрытие создаваемых ими распыленных струй и образовать сплошную водяную завесу без промежутков.

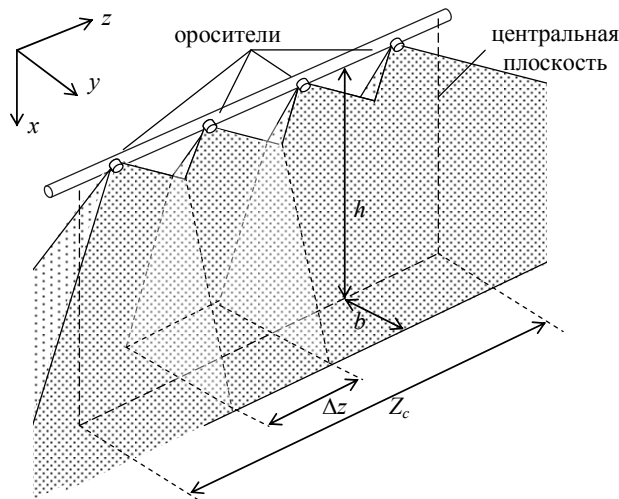


Рис. 1. Схема водяной завесы

Схематическое изображение водяной завесы представлено на рис. 1. В ее нижней части происходит взаимное перемешивание струй и выравнивание параметров. Вследствие этого при удалении от оросителей (в направлении  $x$ ) завеса становится более однородной, как по концентрации капель, так и по скоростям их движения. Т.о., зависимость параметров струй от координаты  $z$  при увеличении  $x$  становится менее выраженной.

Представленный ниже расчет выполнен в предположении об однородной в направлении оси  $z$  структуре нижней части водяной завесы. Скорость воздушно-капельной смеси является максимальной в центральной плоскости завесы (вертикальная плоскость, проходящая через линейку оросителей) и монотонно уменьшается

при возрастании  $x$ . Взаимное влияние струй приводит к тому, что в нижней части данной плоскости скорость направлена вертикально. При удалении от центральной плоскости (при изменении координаты  $y$ ) скорость  $u$  и массовая доля воды  $w_m$  уменьшаются. Профили этих величин определены в теории затопленных струй [4]:

$$u = u_m (1 - \bar{y}^{1,5})^2, \quad (1)$$

$$w_m = w_{mm} (1 - \bar{y}^{1,5}), \quad (2)$$

где  $\bar{y} = y/b$  – безразмерное расстояние от центральной плоскости,  $b$  – полуширина струи в данном сечении. В работе [6] найдено, что полуширина струи линейно возрастает с расстоянием от оросителей  $x$ :

$$b = 0,15 \cdot x. \quad (3)$$

Учитывая трансляционную симметрию данной системы (периодическое повторение параметров вдоль оси  $z$  с шагом  $\Delta z$ , равным расстоянию между оросителями), расчет можно выполнить для элемента водяной завесы длиной  $\Delta z$ . Общая эффективная длина завесы равна  $Z_c = N \cdot \Delta z$ , где  $N$  – число оросителей (см. рис. 1).

Для расчета осевой скорости и массовой доли воды применим законы сохранения импульса и массы. Чтобы составить первое уравнение, приравняем проекции на вертикальную ось суммарного импульса секундного потока струи в двух сечениях: в ближайшей окрестности оросителя и на произвольном расстоянии  $x$  от оросителя в нижней однородной зоне. Учитывая радиальный характер струи в первом сечении и плоскопараллельный – во втором, получим уравнение:

$$\frac{\rho_w \cdot \pi \cdot b_0^2 \cdot u_0^2}{\varphi_0} \cdot \int_0^{\frac{\varphi_0}{2}} \cos \varphi \cdot d\varphi = \rho_a \cdot \Delta z \cdot \int_0^b (1 + w_m) \cdot u^2 \cdot dy, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – угол вектора скорости элемента струи относительно оси  $x$ ,  $\varphi_0$  – угол раствора распыленной струи для одиночного оросителя,  $b_0$  – радиус отверстия оросителя,  $u_0$  – начальная скорость струи,  $\rho_w$  и  $\rho_a$  – плотность воды и воздуха соответственно.

На основе закона сохранения массы воды получим второе уравнение:

$$\rho_w \cdot \pi \cdot b_0^2 \cdot u_0 = 2 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \int_0^b w_m \cdot u \cdot dy. \quad (5)$$

Решение системы уравнений (4) и (5) в работе [3] позволило получить расчетные формулы для осевых значений массовой доли воды и скорости струи:

$$w_{mm} = \frac{\pi \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0}{0,3 \cdot I_3 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot u_m}. \quad (6)$$

$$u_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0}{\rho_a \cdot \Delta z \cdot x} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1 \right). \quad (7)$$

В безразмерном виде формула (7) имеет следующий вид:

$$\bar{u}_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w}{\rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x}} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0}} - 1 \right), \quad (8)$$

где  $\bar{x} = x/b_0$ ,  $\bar{\Delta z} = \Delta z/b_0$ .

Подставляя (7) в (6), получим зависимость массовой доли воды в центральной плоскости водяной завесы (однородная зона) от безразмерного расстояния  $\bar{x}$ :

$$w_{mm} = \frac{2,28}{\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \bar{\Delta z} \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0}}}. \quad (9)$$

Пример расчета графических зависимостей  $\bar{u}_m(\bar{x})$  и  $w_{mm}(\bar{x})$  по формулам (8) и (9) для  $\varphi_0 = 2,5$  рад и  $\bar{\Delta z} = 100$  представлен на рис. 2.

Используя профиль (2) и учитывая соотношение

$$w_v = w_m \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w},$$

из (9) найдем объемную долю воды в водяной завесе:

$$w_v = \frac{2,28 \cdot \rho_a}{\rho_w \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \bar{\Delta z} \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0}} - 1 \right)} \cdot (1 - \bar{y}^{1,5}). \quad (10)$$

Толщина эквивалентного слоя воды  $l_s$  – это толщина такого слоя, который образовался бы при осаждении всех капель на центральную плоскость. В простейшем случае, для идеальной водяной завесы (плоско-параллельной формы толщиной  $l$  с однородным распределением капель, т.е. при  $w_v = \text{const}$ ):

$$l_s = w_v \cdot l. \quad (11)$$

В общем случае, для неоднородной распыленной струи толщиной  $l = 2b$ :

$$l_s = \int_{-b}^b w_v \cdot dy, \quad (12)$$

Подставляя (10) в (12), с учетом (3) найдем:

$$l_s = \frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1 \right)}, \quad (13)$$

Данная формула позволяет выполнить расчет важнейшей характеристики водяной завесы – толщины эквивалентного слоя воды  $l_s$ , от которой, как показано ниже, непосредственно зависит основной параметр, характеризующий экранирующую способность водяной завесы – коэффициент пропускания теплового излучения (см. ниже (15)).

На рис. 3 представлено семейство графических зависимостей толщины эквивалентного слоя от  $x$  для разных величин  $b_0$  при  $\Delta z = 0,5$  м. Таким образом, при возрастании  $x$  толщина эквивалентного слоя водяной завесы возрастает.

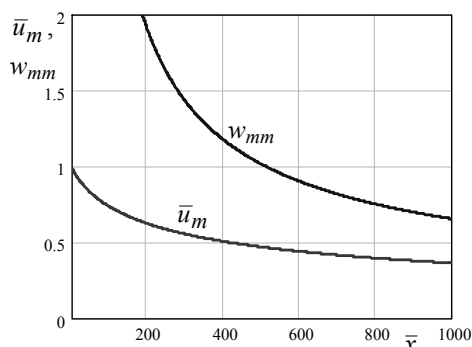


Рис. 2. Расчет зависимостей  $\bar{u}_m(\bar{x})$  и  $w_{mm}(\bar{x})$

Расчет коэффициента пропускания теплового излучения

Существенным отличием реальной водяной завесы от идеальной (рассмотренной в работе [5]) является неоднородность распределения капель по объему водяной завесы, т.е. зависимость концентрации капель от пространственных координат. О наличии такой зависимости свидетельствует соотношение (10). Необходимо определить, как эта зависимость влияет на коэффициент пропускания реальной водяной завесы.

Для выполнения соответствующего анализа воспользуемся представленной в [5] расчетной формулой для коэффициента пропускания полидисперсной водяной завесы:

$$H = \exp \left\{ -1,4 \cdot [1 - \eta(\psi, D_{eq}, T_f)] \cdot \frac{w_v \cdot l}{D_{eq}} \right\}, \quad (14)$$

где  $D_{eq}$  – эквивалентный диаметр капель,  $\eta(\psi, D_{eq}, T_f)$  – коэффициент пропускания капли диаметром  $D_{eq}$  для теплового излучения пожара, спектр которого задан параметрами  $\psi$  (относительный вклад молекулярных полос в спектр излучения) и  $T_f$  (эффективная температура очага пожара).

Эта формула получена в приближении плоской водяной завесы толщиной  $l$  с однородным распределением капель по ее объему. Для такой завесы толщина эквивалентного слоя воды определяется соотношением (11), и с учетом этого формула (14) преобразуется к виду:

$$H = \exp \left\{ -1,4 \cdot [1 - \eta(\psi, D_{eq}, T_f)] \cdot \frac{l_s}{D_{eq}} \right\}, \quad (15)$$

Это более общий вид расчетной формулы для коэффициента пропускания, который можно использовать и в случае неоднородного распределения капель по объему водяной завесы.

Правомерность перехода от (14) к (15) можно продемонстрировать с помощью следующих преобразований. Произвольную, неоднородную в направлении оси  $y$ , плоскую водяную завесу можно представить в виде ряда последовательных слоев толщиной  $\Delta y$  с коэффициентами пропускания  $\Delta H$ :

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

Их общий коэффициент пропускания (коэффициент пропускания всей завесы) равен произведению коэффициентов пропускания слоев:

$$H = \prod_{(i)} (\Delta H_i) = \prod_{(i)} \exp \left[ -1,4 \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{w_{vi} \cdot \Delta y}{D_{eq}} \right] = \exp \left[ -1,4 \cdot (1 - \eta) \cdot \frac{\sum_{(i)} w_{vi} \cdot \Delta y}{D_{eq}} \right].$$

Для водяной завесы, симметричной относительно вертикальной плоскости, толщиной  $2b$  (т.е.  $-b < y < b$ ) в предельном переходе  $\Delta y \rightarrow dy$  получим (см. (12)):

$$\sum_{(i)} w_{vi} \cdot \Delta y \rightarrow \int_{-b}^b w_v \cdot dy = l_s. \quad (16)$$

В итоге получим формулу (15), пригодную для неоднородных завес, с соответствующим значением  $l_s$ . В частности, для водяной завесы, полученной с помощью линейки дренчерных оросителей (см. рис. 1), величина  $l_s$  может быть определена расчетным путем по формуле (13).

Исходя из формулы (15), можно сделать вывод, что толщина эквивалентного слоя является одним из основных факторов, определяющих коэффициент пропускания водяной завесы. Существенным отличием реальной водяной завесы, созданной линейкой оросителей, от идеальной является, кроме неоднородности концентрации капель в горизонтальном сечении, также зависимость толщины эквивалентного слоя воды от вертикальной координаты  $x$  (расстояние от оросителей) (см. рис. 3). Очевидно, это должно приводить и к зависимости от этой координаты коэффициента пропускания завесы.

На рис. 4 представлен результат расчета графических зависимостей  $H(x)$  для типичных параметров водяных завес, соответствующих параметрам рис. 3. Расчет выполнен с использованием формул (13) и (15) для разных величин  $b_0$  при  $D_{eq} = 0,2$  мм;  $\Delta z = 0,5$  м;  $\psi = 0,2$ ;  $T_f = 1200$  К.

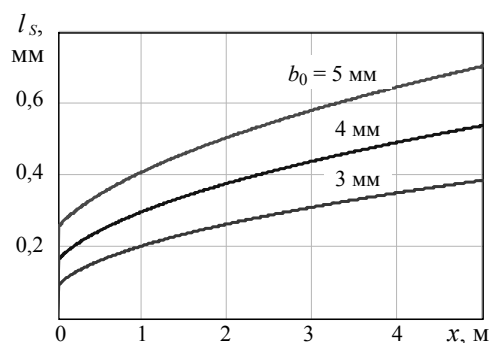


Рис. 3. Расчет зависимостей  $l_s(x)$  для разных радиусов отверстия оросителя

Таким образом, для водяных завес, созданных линейкой щелевых оросителей, направленных сверху вниз (наиболее распространенная схема водяных завес), наблюдается сильная зависимость коэффициента пропускания от вертикальной координаты. Нижняя часть завесы экранирует тепловое излучение гораздо более эффективно, по сравнению с верхней. Это связано с влиянием на коэффициент пропускания толщины эквивалентного слоя воды, которая возрастает при увеличении координаты  $x$  (см. рис. 3).

В некоторых случаях применяется другая технологическая схема создания водяной завесы – мультязавеса, позволяющая в несколько раз увеличить толщину эквивалентного слоя воды и, соответственно, уменьшить коэффициент пропускания. Для этого устанавливаются несколько параллельно расположенных оросителей, так что тепловое излучение должно проходить последовательно через несколько водяных завес (рис. 5). Если это одинаковые завесы с толщинами эквивалентного слоя  $l_s$ , то, согласно методике расчета (16), получим общую толщину эквивалентного слоя:

$$l_{s\Sigma} = N \cdot l_s,$$

где  $N$  – количество последовательных завес. Соответственно, расчетная формула (15) для коэффициента пропускания водяной мультязавесы приобретает вид:

$$H_{\Sigma} = \exp \left\{ -1,4 \cdot \left[ 1 - \eta(\psi, D_{eq}, T_f) \right] \cdot \frac{N \cdot l_s}{D_{eq}} \right\}. \quad (17)$$

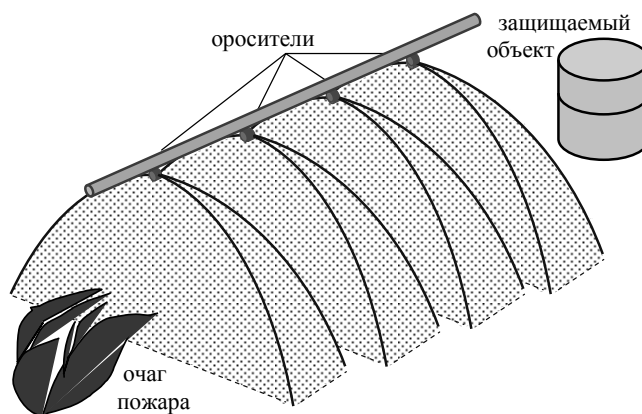


Рис. 5. Водяная мультязавеса

### Выводы

На основе теории затопленных струй разработан метод расчета параметров распыленной водяной струи, создаваемой линейкой дренчерных щелевых оросителей. Получены расчетные формулы (8) для осевой скорости, (10) для пространственного распределения объемной доли воды, (13) для толщины эквивалентного слоя воды в водяной завесе данного типа.

Показано, что толщина эквивалентного слоя является одним из основных параметров, характеризующих экранирующую способность водяной завесы – коэффициент пропускания теплового излучения. Получена соответствующая формула (15) для расчета коэффициента пропускания неоднородной водяной завесы, а также расчетная формула (17) для коэффициента пропускания водяной мультязавесы.

В результате выполненных расчетов найдено, что толщина эквивалентного слоя возрастает при удалении от линейки оросителей, вследствие чего нижняя часть водяной завесы экранирует тепловое излучение более эффективно, по сравнению с верхней.

Дальнейшее развитие данной математической модели будет связано с разработкой методики расчета по заданным конструктивным параметрам и режиму работы дренчерного оросителя одной из ключевых характеристик водяной завесы – эквивалентного диаметра капель  $D_{eq}$  (или среднего диаметра Саутера  $D_{32}$ ).

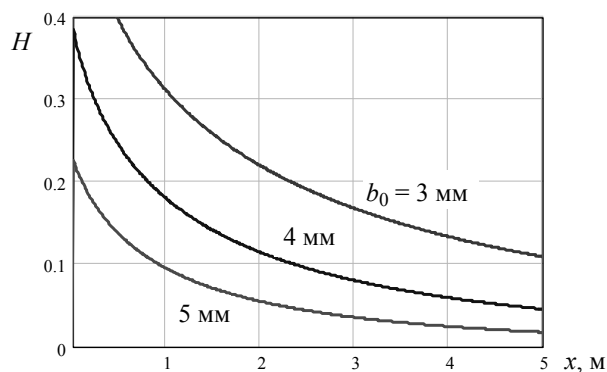


Рис. 4. Расчет зависимостей  $H(x)$  для разных радиусов отверстия оросителя

Кроме того, предполагается выполнить комплекс экспериментальных исследований с целью проверки адекватности математической модели, а также определения реальных численных коэффициентов основных расчетных формул.

**Анотація.** Одним з основних параметрів водяної завіси, що визначає ефективність екранування променистого теплового потоку, є її товщина еквівалентного шару води. Для розрахунку цієї величини і визначення її залежності від конструктивних параметрів системи зрошувачів і режиму їх роботи застосована теорія затоплених струменів. З урахуванням отриманих результатів модифікована розроблена раніше математична модель екранування теплового випромінювання водяними завісами. Досліджений вплив неоднорідності просторового розподілу крапель на екрануючі властивості водяних завіс протипожежного призначення і виконані чисельні розрахунки для їх типових режимів роботи.

**Ключові слова:** водяна завіса, екранування теплового випромінювання, коефіцієнт пропускання, товщина еквівалентного шару.

**Abstract. Purpose.** Development of calculated techniques for thermal radiation shielding by a water curtain and performing numerical calculations of its transmittance for fire thermal radiation.

**Methodology.** The central objective of the study is to develop calculation method of some major parameters of this mathematical model. These are such parameters: velocities of droplets moving, their concentration in space, thickness of equivalent layer of water, transmittance. Earlier there was no such calculation procedure, and determination of these parameters was made by means of the difficult experimental measurements. In this study the submerged jet theory is applied for calculation of these parameters. Subject of the theoretical analysis is the flat fan sprays which flow from the system of slot-hole sprinkler. The formulae received in the work allow to carry out calculation of called parameters on the basis of design characteristics of drencher installation. The graphic dependences constructed on the formulae allowed to define spatial distributions of these parameters.

**Findings.** Calculated formulae for the axial velocity of the sprayed stream, for volume ratio of water, for thickness of equivalent layer of water, for a thermal radiation transmittance, which take into account the inhomogeneity of a spatial distribution of droplets.

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

**Keywords:** water curtain, thermal radiation shielding, transmittance, thickness of water equivalent layer.

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. Жаров А. Дренчерные завесы: теория и практика / А. Жаров, А. Зархин, М. Митрофанова // БДИ. – 2006. – № 5 (68). – С. 24-28.
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. Виноградов А.Г. Применение теории затопленных струй к расчету параметров водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 5. – С. 76-87.
4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: Гос. издат. физ.-мат. литературы. 1984. – 715 с.
5. Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 1. – С. 45-57.

#### References

1. Zharov A., Zarhin A., Mitrofanova M. Drenchernye zavesy: teoriya i praktika (Drencher curtains: theory and practice), BDI, 2006, № 5 (68), pp. 24-28.
2. Sobeshhans'kyj D.I., Anohin G.O., Sklyzkova L.A. Vodjani zavyisy v systemah zabezpechennja protypozhezhnogo zahystu ob'jektiv riznogo pryznachennja (Water curtains in systems of ensuring fire-prevention protection of objects of different function), Naukovyj visnyk UkrNDIPB – Scientific journal of UkrNDIPB, 2010, № 2 (22), pp. 148-153.
3. Vinogradov A.G. Primenenie teorii zatoplennyh struj k raschetu parametrov vodjanyh zaves (Application of the submerged jet theory to calculation of water curtain parameters). Pozharovzryvobezopasnost' - Fire and explosion safety, 2014, vol. 23, no. 5, pp. 76-87.
4. Abramovich G.N. Teorija turbulentnyh struj (The theory of turbulent jets). Moscow: Gos. izdat. fiz.-mat. literatury, 1984, 715 p.
5. Vinogradov A.G. Metodika rascheta jekranirujushhh svojstv vodjanyh zaves (Calculation method of water curtain shielding properties). Pozharovzryvobezopasnost' - Fire and explosion safety, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 45-57.

Подана до редакції 02.09.2014