

УДК 532.525.3:614.838.441

Виноградов<sup>1</sup> А.Г., к. ф.-м. н.; Яхно<sup>2</sup> О.М., д.т.н.

1 - Черкаський національний університет ім. Богдана Хмельницького, г. Черкаси, Україна;

2 - НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І.Сикорського» г. Київ, Україна

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ КОНВЕКТИВНОГО НАГРЕВА И ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ НА ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ВОДЯНОЙ ЗАВЕСЫ

Vinogradov<sup>1</sup> A., Yakhno<sup>2</sup> O.

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

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

### EFFECT OF DROPLETS CONVECTIVE HEATING AND THEIR EVAPORATION ON THE SHIELDING PROPERTIES OF FIRE-FIGHTING WATER CURTAIN

*Представлено дальнейшее развитие ранее полученных результатов математического моделирования водяных завес противопожарного назначения. Предметом теоретического анализа являются плоские струи распыленной воды, которые создаются целевыми дренчерными оросителями. Основной целью работы является теоретическое исследование процесса конвективного нагрева и испарения капель в нагретом воздухе вблизи очага пожара и его влияния на экранирующие свойства противопожарной водяной завесы. Получена расчетная формула и выполнены численные расчеты для зависимости равновесной температуры капель от температуры воздуха. Получены расчетные формулы для времени испарения капель различных диаметров в горячем воздухе и для времени пролета капель вдоль оси водяной завесы. Согласно выполненным расчетам, для типичных параметров водяных завес нагрев капель и их испарение вследствие конвективного теплообмена с горячим воздухом не оказывают существенного влияния на экранирующие свойства противопожарных водяных завес. Применение полученных результатов 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; конвективный теплообмен; испарение капель.

#### Введение

Противопожарные водяные завесы, создаваемые на основе струй распыленной воды (СРВ), предназначены для защиты от опасных факторов пожаров, а также для ограничения их распространения [1-3]. Прежде всего, водяные завесы предназначены для ослабления до безопасного уровня интенсивности теплового излучения пожаров.

Для разработки и совершенствования соответствующих противопожарных технологий необходимы научно обоснованные методики расчета режимов формирования СРВ и их взаимодействия с окружающей средой. Эти методики по заданным начальным и граничным условиям должны позволить определить основные параметры СРВ: геометрические размеры, пространственное распределение концентрации капель, их размеров и скоростей, температуру капель и воздуха, коэффициент пропускания теплового излучения. Существующие на данный момент расчетные методики, основанные на компьютерном моделировании распыленных струй [4-6], либо предназначенные для анализа и расчета систем водяного пожаротушения [7, 8], не могут быть применены для решения данной задачи. В то же время, она может быть решена с помощью недавно разработанной математической модели [9, 10], в которой рассмотрены свойства мелкодисперсной СРВ, созданной с помощью системы дренчерных оросителей. Эта модель разработана именно с целью создания расчетной методики для конструирования противопожарных водяных завес и определения наиболее эффективных режимов их работы в тех или иных конкретных условиях в зоне пожара.

В данной работе продолжен процесс анализа всего комплекса взаимодействий СРВ в зоне пожара, которые необходимо учесть для того, чтобы рассматриваемая в [9, 10] математическая модель была адекватной. В ней рассмотрен конвективный теплообмен подвижных капель водяной завесы с воздушной средой, температура которой вблизи очага пожара может достигать весьма высоких значений.

В процессе движения капель в горячей воздушной среде происходит их нагрев вследствие конвективного теплообмена с воздухом, а также испарение, интенсивность которого увеличивается при повышении температуры капель. Процесс конвективного теплообмена и связанного с ним испарения капель может оказывать влияние на способность водяной завесы экранировать тепловое излучение пожаров вследствие

уменьшения диаметра капель. Ниже представлены расчеты, позволяющие оценить основные характеристики этих процессов. Параметры для расчетов взяты из технической и справочной литературы [11-14].

#### Постановка задачи

Выполнить расчет температурного режима и испарения капель СРВ противопожарного назначения в условиях их конвективного теплообмена с воздушной средой в зоне пожара. Для определения параметров СРВ использовать расчетные формулы математической модели, представленной в работах [9, 10]. Получить графические зависимости времени испарения капель от физико-технических условий данного процесса и сделать вывод о необходимости его учета при расчете параметров экранирования лучистого теплового потока от очага пожара.

#### Изложение основного материала

Рассмотрим каплю, которая летит с начальной скоростью  $v_0$  в воздухе, температура которого  $T_a$  значительно выше по сравнению с начальной температурой капли  $T_{d0}$ . Во время движения капли происходит ее нагрев вследствие конвективного теплообмена с воздухом и уменьшение ее размера вследствие испарения.

Плотность массового потока водяных паров с поверхности капли  $j_m$  можно определить с помощью формулы Максвелла [15]:

$$j_m = \beta \cdot (\rho_{vd} - \rho_{v\infty}) \quad (1)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $\rho_{vd}$  и  $\rho_{v\infty}$  – плотности водяных паров соответственно возле поверхности капли и на бесконечном расстоянии от нее ( $\text{кг/м}^3$ ). Плотность пара возле поверхности капли  $\rho_{vd}$  обычно принимают равной плотности насыщенных паров  $\rho_{vsd}$ . Для преобразования этой формулы используем влагосодержание (масса воды в 1 кг сухого воздуха):

$$d = \frac{\rho_v}{\rho_a} \quad (2)$$

где  $\rho_v$  и  $\rho_a$  – плотности, соответственно, водяных паров и воздуха.

Из уравнения Менделеева-Клапейрона получим [11]:

$$d = \frac{\mu_w \cdot p_v}{\mu_a \cdot p_a} = 0,62 \cdot \frac{p_v}{p_0 - p_v} = 0,62 \cdot \frac{\phi_v \cdot p_s}{p_0 - \phi_v \cdot p_s},$$

где  $\mu_w$  и  $\mu_a$  – молярные массы, соответственно, воды и воздуха;  $p_v$  – парциальное давление паров воды в воздухе;  $p_a$  – парциальное давление сухого воздуха;  $p_0 = p_a + p_v$  – атмосферное давление;  $p_s$  – давление насыщенных паров воды в воздухе;  $\phi_v$  – относительная влажность воздуха.

Для насыщенных паров ( $\phi_v = 1$ ):

$$d_s = 0,62 \cdot \frac{p_s}{p_0 - p_s},$$

Преобразуем (1) к следующему виду:

$$j_m = \beta \cdot \rho_a \cdot (d_{sd} - d_\infty) \quad (3)$$

где  $d_{sd}$  – влагосодержание для насыщенных паров возле капли;  $d_\infty$  – влагосодержание на большом расстоянии от капли:

$$d_\infty = 0,62 \cdot \frac{\phi_v \cdot p_{s\infty}}{p_0 - \phi_v \cdot p_{s\infty}} = \frac{0,62}{\frac{p_0}{\phi_v \cdot p_{s\infty}} - 1} \quad (4)$$

Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры воздуха  $p_s(T_a)$  исследована экспериментально и представлена в справочной литературе в табличном и графическом виде [12]. Для аналитического описания данной зависимости применяются разные аппроксимации. В частности, аппроксимация Шюле имеет вид:

$$\lg p_s = A - \frac{B}{T_a} \quad (5)$$

где единицы измерения:  $p_s$  –  $\text{кг/см}^2$ ,  $T_a$  – К. Константы  $A$  и  $B$  подобраны для разных температурных интервалов, чтобы аппроксимация (5) соответствовала эмпирической зависимости [12]:

- 1) для  $20^\circ\text{C} < T_a < 100^\circ\text{C}$  –  $A = 5,9778$ ;  $B = 2224,4$ ;
- 2) для  $100^\circ\text{C} < T_a < 200^\circ\text{C}$  –  $A = 5,6485$ ;  $B = 2101,1$ ;
- 3) для  $200^\circ\text{C} < T_a < 350^\circ\text{C}$  –  $A = 5,4514$ ;  $B = 2010,8$ .

Поскольку такая кусочная аппроксимация не позволяет получить единую расчетную формулу для данной математической модели, необходимо определить оптимальные значения констант  $A$  и  $B$  для более широкого температурного диапазона. Расчеты, выполненные для всех трех значений констант  $A$  и  $B$ , показали, что в температурном интервале  $20^\circ\text{C} < T_a < 300^\circ\text{C}$  при выборе значений этих констант, соответствующих кривой 2,

функция аппроксимации (5) с точностью до 10% соответствует эмпирической зависимости. При подстановке констант  $A = 5,6485$  и  $B = 2101,1$  в соотношение (5), после преобразований и перехода к единицам СИ получим:

$$p_s = 4,45 \cdot 10^{10} \cdot 10^{\frac{2101,1}{T_a}}, \text{ (Па).}$$

Вблизи поверхности капли температура пограничного слоя близка к температуре капли  $T_d$ . При этих условиях давление насыщенных паров:

$$p_{sd} = 4,45 \cdot 10^{10} \cdot 10^{\frac{2101,1}{T_d}}. \quad (6)$$

Влагосодержание для насыщенных паров вблизи поверхности капли:

$$d_{sd} = 0,622 \cdot \frac{p_{sd}}{p_0 - p_{sd}}. \quad (7)$$

Из (3) с учетом (7) получим:

$$j_m = \beta \cdot \rho_a \cdot \left( 0,62 \cdot \frac{p_{sd}}{p_0 - p_{sd}} - d_\infty \right).$$

Уравнение теплового баланса для капли массой  $m_d$ :

$$c_w \cdot m_d \cdot dT_d = (q_1 - q_2) \cdot S_d \cdot dt, \quad (8)$$

где  $c_w$  – удельная теплоемкость воды,  $S_d$  – площадь поверхности капли,  $q_1$  – плотность конвективного теплового потока от воздуха к капле:

$$q_1 = \alpha \cdot (T_a - T_d),$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $q_2$  – плотность теплового потока, который выносится водяными парами:

$$q_2 = L \cdot j_m,$$

$L$  – удельная теплота парообразования воды.

Нагревание капли за счет конвективного теплообмена продолжается до достижения некоторой равновесной температуры  $T_{eq}$ , при которой нагревание капли уравновешивается ее охлаждением за счет испарения. Условием такого равновесия (из уравнения теплового баланса (8)) является:

$$q_1 = q_2,$$

или

$$\alpha \cdot (T_a - T_{eq}) = L \cdot j_m = L \cdot \beta \cdot \rho_a \cdot \left( 0,62 \cdot \frac{p_{sd}}{p_0 - p_{sd}} - d_\infty \right). \quad (9)$$

Учтем связь между коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$  [11]:

$$\beta = \frac{\alpha}{\rho_a \cdot c_{ap}}, \quad (10)$$

где  $c_{ap}$  – удельная изобарная теплоемкость воздуха.

Подставляя (10) и (6) в (9), получим:

$$\Delta T = T_a - T_{eq} = \frac{L}{c_{ap}} \cdot \left( \frac{0,62}{2,27 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{2101,1}{T_{eq}}} - 1} - d_\infty \right), \quad (11)$$

откуда зависимость  $T_{eq}(T_a)$  (обратная функция):

$$T_a = \frac{L}{c_{ap}} \cdot \left( \frac{0,62}{2,27 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{\frac{2101,1}{T_{eq}}} - 1} - d_\infty \right) + T_{eq}. \quad (12)$$

Для оценки  $d_\infty$ , найдем эту величину из формулы (4) при ориентировочных параметрах  $T_a = 300$  К,  $\varphi_v = 0,8$ . В результате расчета получим  $d_\infty \approx 0,023$ . В первом приближении примем  $d_\infty = \text{const}$ . В соответствии с (2) это означает, что абсолютная влажность воздуха на большом расстоянии от капли  $\rho_{v\infty}$  остается постоянной.

На рис. 1 представлены рассчитанные для этих условий по формулам (11) и (12) графики зависимостей  $T_{eq}(T_a)$  и  $\Delta T(T_a)$ .

График на рис. 1,а позволяет сделать вывод, что капли воды даже в воздухе, нагретом до температуры 600 К (327°C), не нагреваются до кипения. Их нагревание уравновешивается конкурентным процессом охлаждения за счет испарения, и равновесная температура капли остается ниже точки кипения (373 К).

Разность температуры воздуха и равновесной температуры капли  $\Delta T$ , как показывает расчет по формуле (11), зависит от температуры воздуха почти линейно (рис. 1, б, линия). Это позволяет использовать для практических расчетов функцию аппроксимации (рис. 1, б, точки):

$$\Delta T = 0,9 \cdot (T_a - 300). \quad (13)$$

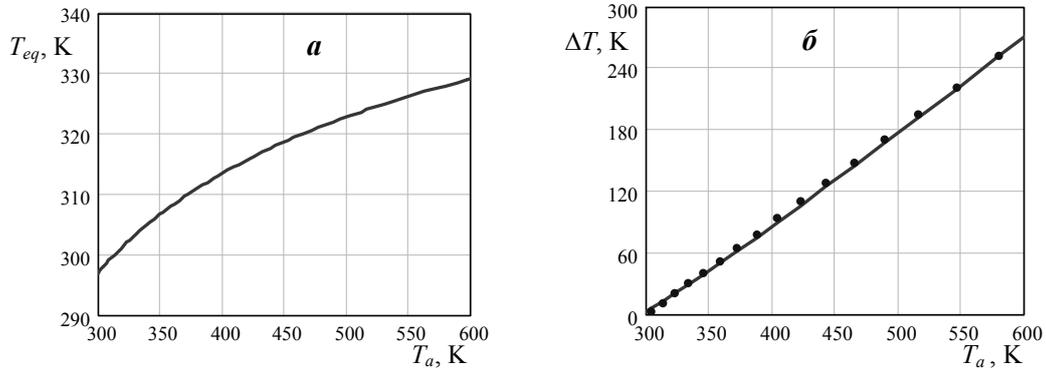


Рис. 1. Зависимости от температуры воздуха: а) равновесной температуры капли; б) разности температур воздуха и капли

Найдем время испарения капли в условиях конвективного теплообмена с горячим воздухом. По определению:

$$j_m = \frac{dm_d}{S_d \cdot dt} = \frac{\rho_w}{2} \frac{dD}{dt}.$$

где  $\rho_w$  – плотность воды,  $D$  – диаметр капли. Подставляя в (9), получим:

$$\alpha \cdot \Delta T = L \cdot \frac{\rho_w}{2} \frac{dD}{dt}. \quad (14)$$

Как показано в [16], скорость мелких капель относительно воздуха быстро падает практически до нуля, а их температура приближается к равновесной температуре  $T_{eq}$ . Предельная величина числа Нуссельта для сферической капли  $Nu_{min} = 2$ . В этом случае:

$$\alpha_{min} = \frac{Nu_{min} \cdot \lambda_a}{D} = \frac{2 \cdot \lambda_a}{D},$$

где  $\lambda_a$  – теплопроводность воздуха.

В результате из (14) получим уравнение:

$$dt = \frac{L \cdot \rho_w}{4 \cdot \lambda_a \cdot \Delta T} \cdot D \cdot dD.$$

После интегрирования найдем, что неподвижная относительно воздуха капля с начальным диаметром  $D_0$ , которая уже нагрелась до равновесной температуры  $T_{eq}$ , полностью испарится в течение времени

$$\tau_{ev} = \frac{L \cdot \rho_w}{8 \cdot \lambda_a \cdot \Delta T} \cdot D_0^2.$$

С учетом (13) получим расчетную формулу:

$$\tau_{ev} = \frac{L \cdot \rho_w}{7,2 \cdot \lambda_a \cdot (T_a - 300)} \cdot D_0^2. \quad (15)$$

Сравним время испарения капли  $\tau_{ev}$  со временем ее пролета  $t_{fl}$  вдоль водяной завесы, образованной несколькими плоскими веерными СРВ от оросителей, расположенных в ряд с интервалом  $\Delta z$  (рис. 2).

Для расчета времени пролета воспользуемся формулой (39) из [10] для зависимости осевой скорости  $u_m$  каплей водяной завесы от вертикальной координаты  $x$ :

$$u_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0}{\rho_a \cdot \Delta z \cdot x} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\phi_0}{2}}{\rho_w \cdot \phi_0 \cdot b_0^2}} - 1 \right),$$

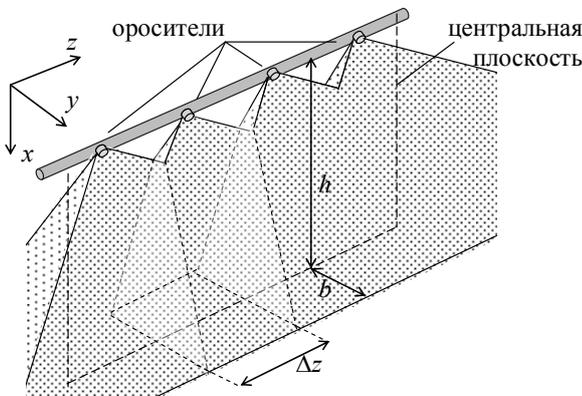


Рис. 2. Схема водяной завесы

где  $u_0$  – начальная скорость струи,  $b_0$  – начальный радиус струи,  $\phi_0$  – угол раскрытия веерной распыленной струи. Интегрируя это выражение, найдем время движения капли в центральной части (вдоль оси) водяной завесы, считая, что длина пути равна высоте завесы  $h$ :

$$t_{fl} = \int_0^h \frac{\rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot dx}{12,5 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0 \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\phi_0}{2} - 1}{\rho_w \cdot \phi_0 \cdot b_0^2}} \right)} \quad (16)$$

Для сравнения величин  $\tau_{ev}$  и  $t_{fl}$  выполним их расчет по формулам, соответственно, (15) и (16). На рис. 3,а представлены расчетные графики зависимости  $\tau_{ev}$  для трех значений температуры воздуха: 350 К (77°C), 450 К (177°C), 550 К (277°C). При анализе полученных результатов расчета следует учесть, что наиболее типичные значения диаметров капель противопожарных водяных завес находятся в интервале 0,1 – 0,3 мм.

На рис. 3,б представлен результат расчета по формуле (16) зависимостей  $t_{fl}(h)$  для типичных параметров  $b_0 = 3$  мм,  $\phi_0 = 2,5$  рад,  $\Delta z = 0,5$  м, для разных величин начальной скорости струи  $u_0$ .

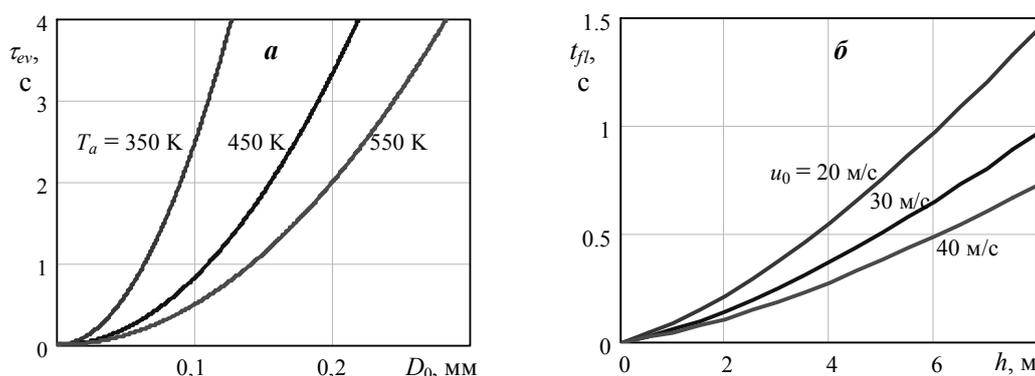


Рис. 3. Графики зависимостей: а) времени полного испарения капли от ее начального диаметра; б) времени пролета капли от высоты водяной завесы

В течение времени пролета  $t_{fl}$  капли, движущаяся в горячем воздухе, может частично или полностью испариться. Это влияет на размер и концентрацию капель водяной завесы, а значит, и на ее экранирующие свойства. Сравнение расчетных величин  $\tau_{ev}$  и  $t_{fl}$  для разных значений параметров позволяет определить, при каких режимах необходимо принимать во внимание температуру воздуха и процесс испарения капель, их влияние на экранирующие свойства водяных завес. При этом следует учесть, что расчетные формулы (15) и (16) получены для идеальных условий и определяют лишь некоторые предельные значения величин.

Формула (15) получена в предположении, что температура воздуха остается постоянной, и не учитывает его охлаждение вследствие конвективного теплообмена с потоком капель. На самом деле, по мере теплообмена и испарения капли величина  $T_a$  в (15) постепенно уменьшается, а время  $\tau_{ev}$  возрастает. Таким образом, формула (15) определяет минимальное время испарения капли, а реальное время должно быть больше.

Формула (16) также является предельной, т.к. она получена для центральной (осевой) части водяной завесы, где скорость воздушно-капельного потока является максимальной и, соответственно, время  $t_{fl}$  минимально. Время пролета вдоль всей высоты водяной завесы периферийных капель существенно больше. Однако, учитывая форму профиля концентрации капель в струе (см. (10) в [10]), количество таких капель относительно невелико, и они не оказывают значительного влияния на коэффициент пропускания СРВ.

Таким образом, формулы (15) и (16) определяют минимальные значения времен  $\tau_{ev}$  и  $t_{fl}$ , вследствие чего с их помощью можно выполнять оценочные расчеты, а также определять характер их зависимости от различных параметров.

Тем не менее, даже с учетом приближенного характера полученных формул, по результатам сделанных расчетов можно сделать некоторый общий вывод. Он заключается в том, что в большинстве случаев при расчете экранирующих свойств водяных завес рассмотренным выше эффектом можно пренебречь, т.е. нагрев и испарение капель вследствие их конвективного теплообмена с воздухом можно не учитывать. Это связано с тем, что водяные завесы обычно расположены на некотором расстоянии от очага пожара, где температура воздуха внутри водяной завесы, по оценкам, не превышает 400 К. Согласно расчетам (рис. 3), для этой температуры воздуха время испарения типичных для противопожарных СРВ капель диаметром 0,1 – 0,3 мм существенно превосходит время их пролета вдоль завесы высотой 4 – 6 м, и значительного изменения экранирующих свойств завесы не происходит.

## Выводы

На основе математической модели конвективного теплообмена и испарения капель в горячем воздухе получена расчетная формула и выполнены численные расчеты для зависимости равновесной температуры капель от температуры воздуха.

Получены расчетные формулы для минимального времени испарения капель различных диаметров в горячем воздухе и для минимального времени пролета капель вдоль оси водяной завесы. Согласно выполненным расчетам, для типичных параметров водяных завес ( $D_{eq} > 0,1$  мм;  $u_0 > 20$  м/с;  $h < 8$  м;  $T_a < 400$  К) нагрев капель и их испарение вследствие конвективного теплообмена с горячим воздухом не оказывают существенного влияния на экранирующие свойства противопожарных водяных завес.

Следующим этапом исследований в этом направлении должны быть экспериментальные измерения с целью верификации расчетных формул математической модели экранирования теплового излучения пожаров струями распыленной воды.

## Анотація.

Представлено 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 роботи є теоретичне дослідження процесу конвективного нагрівання й випаровування крапель у нагрітому повітрі поблизу осередку пожежі та його впливу на екрануючі властивості протипожежної водяної завіси. Отримано розрахункову формулу і виконано чисельні розрахунки для залежності рівноважної температури крапель від температури повітря. Отримано розрахункові формули для часу випаровування крапель різних діаметрів в гарячому повітрі і для часу прольоту крапель уздовж осі водяної завіси. Згідно з виконаними розрахунками, для типових параметрів водяних завіс нагрівання крапель і їх випаровування внаслідок конвективного теплообміну з гарячим повітрям не мають істотного впливу на екрануючі властивості протипожежних водяних завіс. Застосування отриманих результатів до математичної моделі теплозахисту дозволило розширити її можливості для практичного застосування. Модель може використовуватися для проектування водяних завіс протипожежного призначення, а також для визначення оптимальних режимів їх застосування.

**Ключові слова:** протипожежна водяна завіса; конвективний тепломасообмін; випаровування крапель.

## 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 theoretical research of processes of droplets convective heating and their evaporation in heated air near the fire seat and their influence on the shielding properties of a fire-fighting water curtain.

**Approach.** In this study the earlier published literary data are applied to fulfill the calculations. The calculated formula allowed to have received numerical results for graphic dependence of droplet equilibrium temperature on air temperature. Other calculated formulae allowed to have executed calculations of the droplet evaporation time and of the time of droplet flight along an axis of a water curtain. According to the executed calculations, for typical parameters of water curtain the droplets heating and their evaporation owing to heat convection with hot air have no significant effect on the shielding properties of fire-fighting water curtain.

**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; convective heat and mass exchange; droplets evaporation.

## Библиографический список использованной литературы

1. Жаров А. Дренчерные завесы: теория и практика [Электронный ресурс] / А. Жаров, А. Зархин, М. Митрофанова // БДИ. – 2006. – № 5 (68). – С. 24-28. Режим доступа: <http://mx1.algorithm.org/arch/?id=22&a=547> (дата обращения 20.05.2016 г.). – Название с экрана.
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. Противопожарная водяная завеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bikoms.ru/dictionary/p/protivopozharnaja-vodjanaja-zavesa/> (дата обращения 20.05.2016 г.). – Название с экрана.
4. Gant S.E. CFD Modeling of Water Spray Barriers / S.E. Gant.– Health and Safety Laboratory, UK, Report HSL/2006/79.– 35 p.
5. Meroney R.N. CFD modeling of water spray interaction with dense gas plumes / R.N. Meroney // Atmospheric Environment. – 2012. – V. 54. – P. 706-713.
6. Cong B.H. Review of modeling fire suppression by water sprays by computational fluid dynamics / B.H. Cong, G.X. Liao, W.K. Chow // International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. – 2005. – V. 7, № 2. – P. 35-56.
7. 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.
8. Стась С.В. Аналіз системи генерування струминних потоків, що застосовуються в пожежогасінні / С.В. Стась // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», сер. Машинобудування. – 2011. – № 63. – с. 240-243.

9. Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 1. – С. 45-57.
10. Виноградов А.Г. Методика розрахунків параметрів водяних завес на основі теорії затоплених струменів / А.Г. Виноградов // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2013. – № 2 (28). – С. 127-139.
11. Луканин В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. – М.: Высш. школа, 1999. – 671 с.
12. Техническая энциклопедия. Под ред. Мартенса Л.К., в 26 тт., Т. 4. – М.: АО «Советская энциклопедия», 1928. – 940 с.
13. Вукалович М.П. Теплофизические свойства воды и водяного пара / М. П. Вукалович. – М.: Машиностроение, 1967. – 159 с.
14. Физические величины: Справочник, под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
15. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде / Н.А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 91 с.
16. Виноградов А.Г. Учет вторичных воздушных потоков при математическом моделировании распыленных водяных струй / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 2. – с. 29-33.

## References

1. Zharov, A., Zarhin, A. and Mitrofanova, M. (2006) *Drenchernye zavesy: teorija i praktika* [Drencher curtains: theory and practice], BDI, No. 5 (68), pp. 24-28, available at: <http://mx1.algorithm.org/arch/?id=22&a=547> (Accessed 20 May 2016).
2. Sobeshhans'kyj, D.I., Anohin, G.O. and Sklyzkova, L.A. (2010), “Water curtains in systems of ensuring fire-prevention protection of objects of different function” [Vodjani zavisy v systemah zabezpechennja protypozhezhnogo zahystu ob’jektiv riznogo pryznachennja], *Naukovyj visnyk UkrNDIPB*, No. 2 (22), pp. 148-153.
3. “Fire-fighting water curtain” [Protivopozharnaja vodjanaja zavesa], available at: <http://www.bikoms.ru/dictionary/p/protivopozharnaja-vodjanaja-zavesa/>, (Accessed 20 May 2016).
4. Gant, S.E., (2006), CFD “Modeling of Water Spray Barriers”, *Health and Safety Laboratory*, UK, Report HSL, no 79.
5. Meroney, R.N. (2012), “CFD modeling of water spray interaction with dense gas plumes”, *Atmospheric Environment*, vol. 54, pp. 706-713.
6. Cong, B.H., Liao, G.X. and Chow, W.K. (2005), “Review of modeling fire suppression by water sprays by computational fluid dynamics”, *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, vol. 7, No. 2, pp. 35-56.
7. Meshman, L.M. (2002), *Proektirovanie vodjanyh i pennyh avtomaticheskikh ustanovok pozharotushenija* [Projection of water and foamy automatic installations of a firefighting], N.P. Kopylov. ed. by VNIPO, Moscow, Russia.
8. Stas, S.V. (2011), The analysis of jet streams generation system which are applied in fire-fighting. [Analiz systemy generuvannya strumy`nny`x potokiv, shho zastosovuyut`sya v pozhezhogasinni], *Visnyk Nacionalnogo texnichnogo universytetu Ukrainy «Kyivskij politexnichnyj instytut», ser. Mashynobuduvannya*, No. 63, pp. 240-243.
9. Vinogradov, A.G. (2014), “Pozharovzryvobezopasnost”, *Metodika rascheta jekranirujushhijh svojstv vodjanyh zaves* [Calculation method of water curtain shielding properties], vol. 23, No. 1, pp. 45-57.
10. Vynogradov, A.G. (2013), “Calculation method of water curtain parameters on basis of the submerged jet theory” [Metodyka rozrahunkiv parametriv vodjanyh zavys na osnovi teorii` zatoplenyh strumeniv], *Naukovyj visnyk UkrNDIPB*, No. 2 (28), pp. 127-139.
11. Lukanin, V.N., Shatrov M.G. et al. (1999), *Teplotehnika* [Heat engineering], Vysshaja shkola, Moscow, Russia.
12. Martens, L.K. (ed.) (1928), АО “Sovetskaja jenciklopedija”, *Tehnicheskaja jenciklopedija* [Technical encyclopedia], vol.4, Moscow, Russia.
13. Vukalovich, M.P. (1967), *Teplotfizicheskie svojstva vody i vodjanogo para* [Thermal properties of water and steam], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
14. Grigor'ev, I.S. and Mejlihov, E.Z. (ed.), (1991), *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* [Physical quantities: Reference book], Jenergoatomizdat, Moscow, Russia.
15. Fuks, N.A. (1958), *Isparenie i rost kapel' v gazoobraznoj srede* [Evaporation and body height of drops in the gaseous environment], Izdatel'stvo AN SSSR, Moscow, Russia.
16. Vinogradov, A.G. (2011), “Pozharovzryvobezopasnost” *Uchet vtorichnyh vozdushnyh potokov pri matematicheskom modelirovanii raspylennyh vodjanyh struj* [Consideration of secondary air streams at mathematical modeling of the atomized water jets], vol. 20, no. 2, pp. 29-33.

Подана до редакції 29.05.2016