УДК 532.529.5:614.838.441 **А.Г. Виноградов, О.М. Яхно**

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНУСНОЙ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДЯНОЙ СТРУИ

Представлены результаты математического моделирования струй распыленной воды, используемых в качестве водяных завес противопожарного назначения. Главной целью исследования является разработка методики расчета некоторых важнейших параметров распыленных струй конусной формы. К таким параметрам относятся скорости движения капель, их распределение в пространстве, толщина эквивалентного слоя воды. Для разработки математической модели используется теория затопленных струй. Полученные в работе формулы позволяют выполнять расчет названных выше параметров на основе конструктивных характеристик дренчерной установки. Применение этих формул к ранее развитой математической модели теплового экранирования позволило расширить ее возможности для практического использования.

Ключевые слова: *струи распыленной воды, экранирование теплового излучения, противопожарные водяные завесы*.

Введение

Одним из наиболее распространенных средств теплового экранирования при пожаре являются водяные завесы, т.е. струи распыленной воды (СРВ), расположенные таким образом, чтобы защитить людей или материальные ценности от теплового излучения очага пожара. В недавно опубликованных работах [1-4] автор представил математическую модель и разработанную на ее основе расчетную методику для проектирования дренчерных установок, предназначенных для создания защитных водяных завес противопожарного назначения.

При конструировании систем для создания водяных завес наиболее часто используются щелевые оросители, которые создают СРВ в форме плоского веера. В работе [5] разработана ее математическая модель, в основе которой лежит методика, предложенная Г.Н. Абрамовичем при разработке теории затопленных струй [6].

Однако в некоторых случаях для теплового экранирования используются также оросители другого типа, образующие осесимметричные СРВ конусообразной формы. В данной работе названная методика применена с целью получения расчетных формул для противопожарных СРВ этого типа.

Математическая модель

Рассмотрим конусную осесимметричную распыленную струю с начальной скоростью u_0, создаваемую оросителем с выходным отверстием радиусом b_0 (рис. 1). Угол при вершине конуса φ_0 зависит от конструктивных параметров данного оросителя.

Для выполнения расчетов используем соотношения для профилей скорости u и массовой доли воды w_m по произвольному сечению СРВ [6]:

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

,

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

где $\bar{y} = y/b$ – безразмерное расстояние от центральной оси, b – радиус распыленной струи на произвольном расстоянии x от сопла:

$$b = b_0 + x \cdot \tan\frac{\varphi_0}{2} \approx x \cdot \tan\frac{\varphi_0}{2} \tag{3}$$

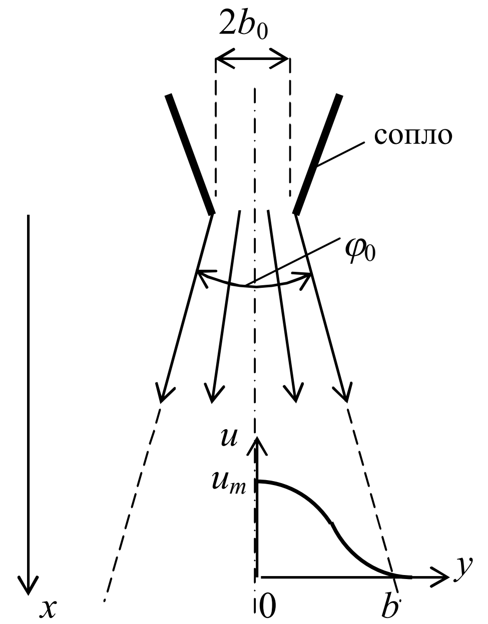

Рис. 1. Схема конусной распыленной струи

На основе законов сохранения импульса и массы получим два уравнения:

$$\rho_w \cdot \pi \cdot b_0^2 \cdot u_0^2 = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^b \rho_s \cdot u^2 \cdot y \cdot dy, \tag{4}$$

$$\rho_w \cdot \pi \cdot b_0^2 \cdot u_0 = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^b \rho_d \cdot u \cdot y \cdot dy, \tag{5}$$

где ρ_s – плотность воздушно-капельной смеси:

$$\rho_s = \rho_a \cdot \left(1 + w_m\right), \tag{6}$$

ρ_a – плотность воздуха, ρ_d – плотность распыленной воды:

$$\rho_d = \rho_a \cdot w_m. \tag{7}$$

После подстановки (1), (2), (6), (7) в уравнения (4) и (5), а также с учетом соотношения (3) получим:

$$\rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0^2 = 2 \cdot \rho_a \cdot x^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2} \cdot u_m^2 \cdot \left(J_4 + w_{mm} \cdot J_5\right), \tag{8}$$

$$\rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0 = 2 \cdot \rho_a \cdot w_{mm} \cdot x^2 \cdot \varphi_0 \cdot u_m \cdot J_3, \tag{9}$$

где использованы обозначения определенных интегралов:

$$J_3 = \int_0^1 \left(1 - \bar{y}^{1,5}\right)^3 \cdot \bar{y} \cdot d\bar{y} = 0{,}089, \tag{10}$$

$$J_4 = \int_0^1 \left(1 - \bar{y}^{1,5}\right)^4 \cdot \bar{y} \cdot d\bar{y} = 0{,}067, \tag{11}$$

$$J_5 = \int_0^1 \left(1 - \bar{y}^{1,5}\right)^5 \cdot \bar{y} \cdot d\bar{y} = 0{,}053. \tag{12}$$

После расчета числовых коэффициентов найдем из (9):

$$w_{mm} = \frac{5{,}62 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0}{\rho_a \cdot x^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2} \cdot u_m}. \tag{13}$$

Подставляя (11) – (13) в (8), после преобразований получим квадратное уравнение относительно u_m:

$$0{,}134 \cdot \rho_a \cdot x^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2} \cdot u_m^2 + 0{,}596 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0 \cdot u_m - \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0^2 = 0.$$

Положительный корень данного уравнения:

$$u_m = \frac{2{,}22 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0}{\rho_a \cdot x^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1{,}51 \cdot \rho_a \cdot x^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot b_0^2}} - 1\right). \tag{14}$$

При условии $x \cdot \tan \frac{\varphi_0}{2} > 200 \cdot b_0$ (т.е. $b > 200 \cdot b_0$) и учитывая, что $\rho_a = 1{,}2$ кг/м^3, $\rho_w = 10^3$ кг/м^3, найдем, что дробный член под радикалом значительно больше единицы. В этом случае для достаточно больших x:

$$u_m \approx \frac{2{,}73 \cdot b_0 \cdot u_0}{x \cdot \tan \frac{\varphi_0}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a}}. \tag{15}$$

В безразмерном виде формулы (14) и (15) имеют следующий вид:

$$\bar{u}_m = \frac{2{,}22 \cdot \rho_w}{\rho_a \cdot \bar{x}^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1{,}51 \cdot \rho_a \cdot \bar{x}^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w}} - 1 \right) \tag{16}$$

$$\bar{u}_m \approx \frac{2{,}73}{\bar{x} \cdot \tan \frac{\varphi_0}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a}}, \tag{17}$$

где $\bar{x} = x/b_0$; $\bar{u}_m = u_m/u_0$.

Результат расчета графических зависимостей $\bar{u}_m(\bar{x})$ по формулам (16) (пунктир) и (17) (сплошная линия) для двух значений угла φ_0 = 0,5 рад и φ_0 = 1 рад представлен на рис. 2. Сравнивая графики, можно найти, что удовлетворительное (с точностью 20%) соответствие расчетов по формулам (16) и (17) в случае φ_0 = 1 рад имеет место при $\bar{x}$ > 200, а для φ_0 = 0,5 рад – при $\bar{x}$ > 500.

Подставляя (14) в (13), получим зависимость массовой доли воды на оси струи от безразмерного расстояния $\bar{x}$:

$$w_{mm} = \frac{2{,}53}{\left(\sqrt{1 + \frac{1{,}51 \cdot \rho_a \cdot \bar{x}^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w}} - 1 \right)}.$$

Используя профиль (2), получим расчетную формулу для массовой доли воды в произвольной точке распыленной струи с безразмерными координатами $\bar{x}$ и $\bar{y}$:

$$w_m = \frac{2{,}53}{\left(\sqrt{1 + \frac{1{,}51 \cdot \rho_a \cdot \bar{x}^2 \cdot \tan^2 \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w}} - 1 \right)} \cdot \left(1 - \bar{y}^{1{,}5}\right). \tag{18}$$

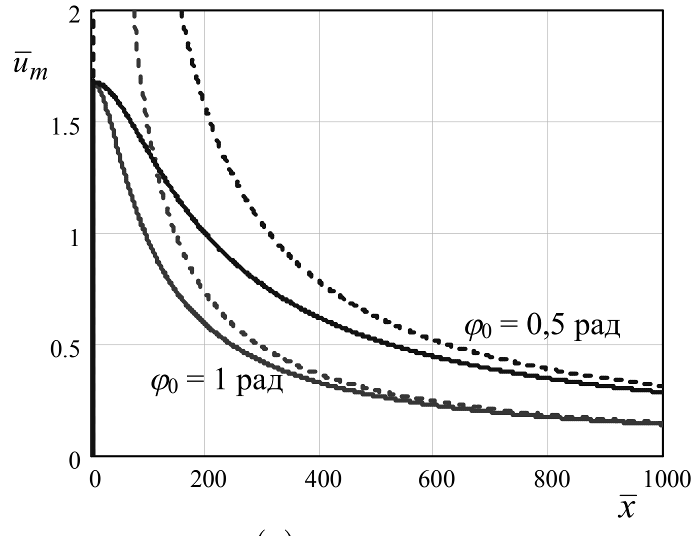

Рис. 2. Расчет зависимостей $\bar{u}_m(\bar{x})$ по формулам (16) (пунктир) и (17) (линия)

Во многих случаях используют не массовую, а объемную долю воды в распыленной струе w_v (суммарный объем капель в единице объема завесы). Связь между этими двумя величинами

$$w_v = w_m \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w}, \tag{19}$$

где ρ_w – плотность воды.

С учетом (19), из (18) найдем объемную долю воды в СРВ:

$$w_v = \frac{2{,}53 \cdot \rho_a}{\cdot \rho_w \left(\sqrt{1 + \dfrac{1{,}51 \cdot \rho_a \cdot \bar{x}^2 \cdot \tan^2 \dfrac{\varphi_0}{2}}{\rho_w}} - 1 \right)} \cdot \left(1 - \bar{y}^{1{,}5}\right). \tag{20}$$

При использовании СРВ в качестве водяных завес большое значение имеет проекция общего количества воды на плоскость водяной завесы (плоскость $y = 0$), перпендикулярную к направлению теплового излучения пожара. Это так называемая «толщина эквивалентного слоя воды», или, по-другому, толщина водяной пленки, которая образовалась бы, если бы всю воду из капель удалось распределить вдоль этой плоскости. Она равна суммарному объему капель на единицу площади распыленной струи. Для однородного (т.е. при w_v = const) плоского слоя распыленной воды толщиной l:

$$l_{eq} = w_v \cdot l. \tag{21}$$

Для неоднородной струи величина w_v изменяется вдоль y. В этом случае:

$$l_{eq} = 2 \cdot \int_0^b w_v \cdot dy. \tag{22}$$

В отличие от плоской струи, в случае конусной струи говорить о толщине эквивалентного слоя воды достаточно сложно, т.к. она очень сильно зависит от пространственных координат. И все же, если рассматривать экранирующие свойства конусной струи при определенной координате x в области ее наибольшей толщины (напротив осевой линии), такой расчет можно сделать. Используя формулы (22) и (20), получим:

$$l_{eq} = 2 \cdot \frac{2{,}53 \cdot \rho_a \cdot b}{\cdot \rho_w \left(\sqrt{1 + \dfrac{1{,}51 \cdot \rho_a \cdot \bar{x}^2 \cdot \tan^2 \dfrac{\varphi_0}{2}}{\rho_w}} - 1 \right)} \cdot \int_0^1 \left(1 - \bar{y}^{1{,}5}\right) \cdot d\bar{y}. \tag{23}$$

Выполним расчет определенного интеграла:

$$I_1 = \int_0^1 \left(1 - \bar{y}^{1{,}5}\right) \cdot d\bar{y} = 0{,}6.$$

Далее из (23) с учетом (3) получим:

$$l_{eq} = \frac{3{,}04 \cdot \rho_a \cdot x \cdot \tan\dfrac{\varphi_0}{2}}{\cdot \rho_w \left(\sqrt{1 + \dfrac{1{,}51 \cdot \rho_a \cdot x^2 \cdot \tan^2 \dfrac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot b_0^2}} - 1 \right)} . \tag{24}$$

При условии $x \cdot \tan\dfrac{\varphi_0}{2} \gtrsim 100 \cdot b_0$ эту формулу можно упростить:

$$l_{eq} \approx 2{,}5 \cdot b_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w}} . \tag{25}$$

Таким образом, в случае одиночной конусной СРВ при достаточно большом удалении от оросителя максимальная толщина эквивалентного слоя воды (напротив оси струи) не зависит от расстояния x и на всем протяжении струи сохраняет постоянное значение, зависящее только от радиуса отверстия оросителя b_0.

Следует заметить, что конусные СРВ не являются оптимальным вариантом для создания защитных водяных завес вследствие большой неоднородности толщины эквивалентного слоя воды по площади завесы. Это обусловлено как чисто геометрическим фактором (формой СРВ), так и неоднородным распределением капель по объему СРВ (см. (2)). Поэтому при проектировании противопожарных водяных завес предпочтение следует отдавать плоским веерным СРВ, которые лишены этого недостатка.

Выводы

Разработана математическая модель струи распыленной воды конусной формы, применяемой для пожаротушения и защиты от тепловых потоков в зоне пожара. Для разработки модели использована методика, применяемая в теории затопленных струй [6]. Получены соотношения для расчета следующих параметров конусной СРВ: осевая скорость (14), массовая доля воды (18), объемная доля воды (20), толщина эквивалентного слоя воды (24). Также получены упрощенные формулы для приближенных расчетов параметров основного участка конусной СРВ.

Перспектива дальнейшего развития данной работы связана с применением полученных результатов для расчета параметров теплового экранирования пожаров.

Литература

1. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва, 2012. – Т. 21, № 7. – с. 77-86.
2. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами. Часть 2 / А.Г.Виноградов// Пожаровзрывобезопасность. – Москва, 2013. – Т. 22, № 4. – с. 72-84.
3. Виноградов А.Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва, 2013. – Т. 22, № 6. – с. 74-84.
4. Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – Москва, 2014. – Т. 23, № 1. – с. 45-56.
5. 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.
6. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: Гос. издат. физ.-мат. литературы. 1984. – 715 с.

Стаття надійшла _14_._10_._2014___
Прийнято до друку _04_._11_._2014___

Анотація

А.Г. Виноградов, О.М. Яхно

Методика розрахунку гідродинамічних параметрів конусного розпиленого водяного струменя.

Представлені результати математичного моделювання струменів розпиленої води, що використовуються як водяні завіси протипожежного призначення. Головною метою дослідження є розробка методики розрахунку деяких найважливіших параметрів розпилених струменів конусної форми. До таких параметрів відносяться швидкості руху крапель, їх розподіл в просторі, товщина еквівалентного шару води. Для розробки математичної моделі використовується теорія затоплених струменів. Отримані в роботі формули дозволяють виконувати розрахунок названих вище параметрів на основі конструктивних характеристик дренчерної установки. Застосування цих формул до раніше розвиненої математичної моделі теплового екранування дозволило розширити її можливості для практичного використання.

Ключові слова: *струмені розпиленої води, екранування теплового випромінювання, протипожежні водяні завіси.*

Summary

A.G. Vinogradov, O.M. Yakhno

Calculation method of hydrodynamic parameters of the conic sprayed water jet

This work represents the results of mathematical modeling of water sprayes used as fire-prevention curtains. A main goal of research is development of a method of calculation of some major parameters of the sprayed jets of a conic form. These parameters include droplets movement velocities, their space distribution, thickness of the equivalent layer of water. For development of mathematical model the submerged jet theory is used. The formulae received in work allow carrying out calculation of the called parameters on the basis of design characteristics of drencher installation. Application of these formulae to earlier developed mathematical model of thermal shielding allowed expanding its opportunities for practical use.

Key words: *sprayed water jets, heat radiation shielding, fire-prevention water curtains.*