

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЙ

THE CALCULATION OF SOME MAJOR PARAMETERS OF WATER CURTAINS, WHICH BASED ON SUBMERGED JET THEORY

На основе теории затопленных струй разработана математическая модель распыленной водяной струи, используемой для создания водяных завес противопожарного назначения. Полученные формулы позволяют выполнить расчет основных параметров водяных завес: геометрических размеров, толщины эквивалентного слоя воды, пространственных распределений скоростей движения и объемной доли воды. Проанализировано влияние гравитационного поля на относительное движение фаз. Результаты работы направлены на усовершенствование ранее разработанной математической модели экранирования теплового излучения пожаров с помощью водяных завес

Ключевые слова: водяная завеса, пространственное распределение воды, теория затопленных струй.

Введение

В работах [1–5] представлена математическая модель и разработанная на ее основе методика проектирования дренчерных установок, предназначенных для создания защитных водяных завес противопожарного назначения. С помощью этой методики можно выполнить расчет экранирующих свойств водяных завес, в частности, коэффициента пропускания теплового излучения на основе предварительно заданных параметров. Однако есть параметры, отсутствующие в паспортных данных дренчерных установок и которые определить экспериментально затруднительно. Среди них — объемная доля воды w , (суммарный объем капель в единице объема распыленной струи).

Известно, что эта величина зависит от конструктивных параметров оросителя, а также от режима его работы. Но кроме того, объемная доля воды в распыленной водяной струе имеет сложное пространственное распределение, т.е. рассматривать водяную завесу как плоскопараллельный объект с однородной структурой, можно лишь грубо приближенно. Принятие такого приближения [1–5] следует рассматривать как первый шаг на пути создания более совершенной математической модели. В большинстве зарубежных работ на эту тему [6–11] рассматриваются математические модели с использованием данного приближения.

Теоретическое описание движения ансамбля частиц в непрерывной среде является чрезвычайно трудной задачей, которая в большинстве случаев имеет лишь приближенные решения. Единственное точное аналитическое решение найдено для двух одинаковых сферических частиц, движущихся вдоль линии их центров (Стимсон и Джеффри, 1926) [12]. По этой причине следует отказаться от попыток выполнить расчет пространственных распределений большого количества капель распыленной воды методом расчета отдельных траекторий капель. Бо-

лее перспективным является альтернативный путь решения этой задачи — исследовать движение единой воздушно-капельной среды методами гидродинамики, используя теорию затопленных струй.

Согласно расчетным и экспериментальным данным [13, 14], при взаимодействии с воздушной средой мелких капель происходит их быстрая релаксация и выравнивание скоростей движения со скоростью окружающего воздуха. Движение каждой капли влияет на состояние воздуха, создавая в нем некое поле скоростей и давлений. Импульс, потерянный каплей при торможении, передается окружающему воздуху, который вследствие этого приходит в движение в том же направлении, что и капля. После этого движение капель в основном соответствует законам движения воздуха, и распыленную в воздухе воду (водяной туман) в первом приближении можно считать затопленной воздушной струей.

Затопленные струи подробно исследованы экспериментально и теоретически [15–18]. При наличии в составе струи примеси к основному веществу (например, мелких капель воды в составе воздушной струи) можно выполнить расчет пространственного распределения примеси, используя теорию затопленных струй. Главным условием применимости такого метода является достаточная степень дисперсности воды (малый размер капель).

В работе [19] разработана математическая модель распыленной струи. Расчетные формулы получены в рамках теории затопленных струй в предположении, что две составляющие (воздух и мелкие капли воды), образующие в совокупности распыленную водяную струю, движутся как единая среда, с равными скоростями в каждом микрообъеме струи. Исходя из этого, влияние на движение распыленной струи гравитационного поля игнорировалось, подобно тому, как это должно быть в случае однородной затопленной струи. Однако в случае

воды, распыленной в воздухе, в некоторых случаях (для достаточно крупных капель) относительное движение фаз игнорировать невозможно. В связи с этим необходимо проанализировать проблему и сделать численные оценки, позволяющие определить границы применимости приближения затопленной струи, в рамках которого выполнены расчеты. При выходе за пределы данных границ необходимо учитывать влияние гравитационного поля и относительное движение фаз, и на этой основе определить поправки к соответствующим расчетным формулам.

Расчет параметров распыленной водяной струи без учета влияние гравитационного поля

Рассмотрим распыленную плоскую веерную струю, создаваемую шелевым оросителем. В этом случае из отверстия радиусом b_0 выходит сплошной поток воды и после отражения от дефлектора образует распыленный поток в некотором секторе с центральным углом φ_0 , который для разных типов оросителей составляет около 100–150° (рисунок 1).

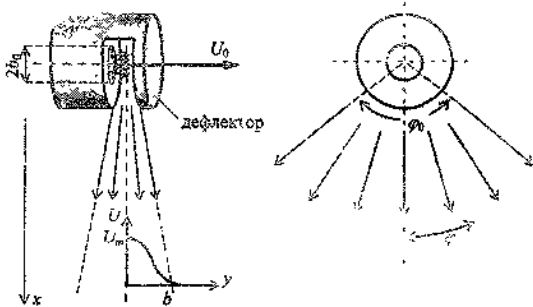


Рисунок 1 — Схема веерной распыленной струи

Математическое моделирование процесса формирования распыленной струи, выполненное с использованием теории затопленных струй [15], позволило получить расчетную формулу для скорости воздушно-капельной смеси на оси потока [19]

$$u_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0}{\rho_a \cdot \varphi_0 \cdot x^2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,21 \cdot \rho_a \cdot \varphi_0 \cdot x^2}{\rho_w \cdot b_0^2}} - 1 \right) \quad (1)$$

где x — расстояние от оросителя, ρ_a — плотность воздуха, ρ_w — плотность воды, u_0 — начальная скорость капель.

При условии $x > 100 \cdot b_0$ и учитывая, что $\rho_a = 1,2 \text{ кг/м}^3$, $\rho_w = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\varphi_0 = (2-3) \text{ рад}$, найдем, что в (1) дробный член под радикалом значительно больше единицы. Поэтому для достаточно больших x

$$u_m \approx \frac{5,7 \cdot b_0 \cdot u_0}{x} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a \cdot \varphi_0}} \quad (2)$$

В безразмерном виде формулы (1) и (2) имеют следующий вид

$$\bar{u}_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w}{\rho_a \cdot \varphi_0 \cdot \bar{x}^2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,21 \cdot \rho_a \cdot \varphi_0 \cdot \bar{x}^2}{\rho_w}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\bar{u}_m \approx \frac{5,7}{\bar{x}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a \cdot \varphi_0}} \quad (4)$$

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

Массовая доля воды на оси струи (отношение суммарной массы капель к массе воздуха)

$$w_{min} = \frac{28,5 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0}{\rho_a \cdot x^2 \cdot \varphi_0 \cdot u_m} \quad (5)$$

Объемная доля воды в распыленной струе (суммарный объемный капель в единице объема)

$$w_v = \frac{5}{\bar{x}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w \cdot \varphi_0}} \cdot (1 - \bar{y}^{1,5}) \quad (6)$$

где $\bar{y} = y/b$ — безразмерное расстояние, y — расстояние от центральной плоскости распыленной струи (рисунок 1), $b = 0,15 x$ — полуширина струи, возрастающая при увеличении расстояния x .

Важным параметром водяной завесы является проекция общего количества воды на центральную плоскость ($y = 0$). Это так называемая “толщина эквивалентного слоя” воды, другими словами, толщина водяной пленки, которая образовалась бы, если бы всю воду из капель удалось равномерно распределить вдоль этой плоскости. Она равна суммарному объему капель на единицу площади распыленной струи.

Для однородного ($w_v = \text{const}$) плоского слоя распыленной воды толщиной l

$$l_s = w_v \cdot l \quad (7)$$

Для рассмотренной выше неоднородной струи величина w_v зависит от координаты y в соответствии с (6), а толщина струи $l = 2b$. В этом случае

$$l_s = 2 \cdot \int_0^b w_v \cdot dy \quad (8)$$

откуда подставляя в (6), получим

$$l_s = \frac{10}{x} \cdot b_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w \cdot \varphi_0}} \cdot b \cdot \int_0^1 (1 - \bar{y}^{1,5}) \cdot d\bar{y},$$

или

$$l_s = 0,9 \cdot b_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_w \cdot \varphi_0}} \quad (9)$$

Таким образом, толщина эквивалентного слоя воды в плоской веерной струе, создаваемой шелевым оросителем, не зависит от расстояния x и на всем протяжении струи сохраняет постоянное значение, зависящее только от радиуса отверстия распылителя b_0 и угла раствора струи φ_0 .

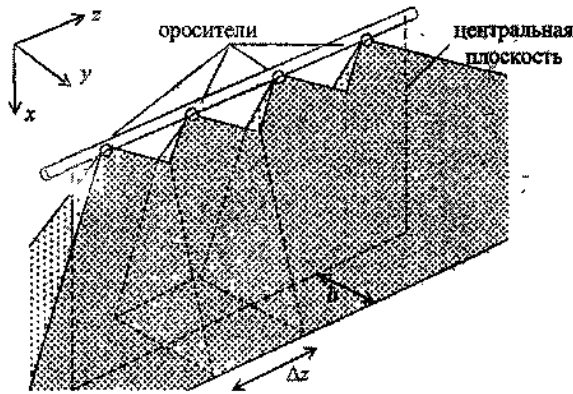


Рисунок 2 — Схема водяной завесы

Реальные водяные завесы создаются, как правило, некоторым количеством (иногда несколькими десятками) дренчерных оросителей, расположенных последовательно в ряд. Размеры завесы определяются размерами защищаемого объекта или проема. Расстояние Δz между соседними оросителями проектируется таким образом, чтобы обеспечить взаимное перекрытие создаваемых ими распыленных струй и образовать сплошную водяную завесу без промежутков. Расчет водяной завесы должен учесть взаимодействие распыленных струй от отдельных оросителей в зонах их перекрытия, как изображено на рисунке 2. В ее нижней части происходит перемешивание струй и выравнивание параметров. Поэтому при удалении от оросителей (в направлении x) завеса становится более однородной как по концентрации капель, так и по скоростям их движения.

Расчет, выполненный по той же методике, что и для одиночной веерной струи, позволил получить расчетную формулу для скорости воздушно-капельной смеси на оси потока [19]

$$u_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w \cdot b_0^2 \cdot u_0}{\rho_a \cdot \Delta z \cdot x} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1 \right) \quad (10)$$

В безразмерном виде формула (10) имеет вид

$$\bar{u}_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w}{\rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0}} - 1 \right) \quad (11)$$

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

Кроме того в работе [19] приведена зависимость массовой доли воды в центральной плоскости водяной завесы (однородная зона) от безразмерного расстояния x.

$$w_{mm} = \frac{2,28}{\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \bar{\Delta z} \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0}}} \quad (12)$$

Пример расчета графических зависимостей по формулам (11) и (12) для $\varphi_0 = 2,5 \text{ рад}$ и $\Delta z = 100$ изображен на рисунке 3.

Объемную долю воды в водяной завесе найдем из формулы (12)

$$w_v = \frac{2,28 \cdot \rho_a}{\rho_w \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \bar{\Delta z} \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0}} - 1 \right)} \cdot (1 - \bar{y}^{1,5}) \quad (13)$$

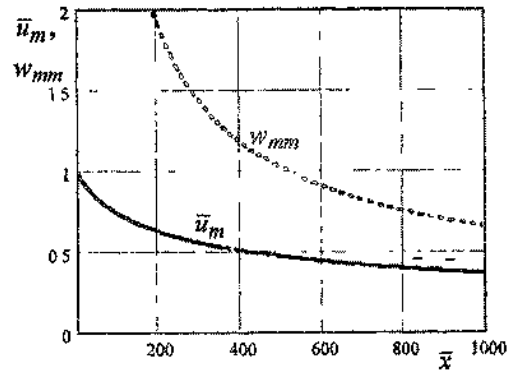


Рисунок 3 — Расчет зависимостей $u_m(x)$ и $w_{mm}(x)$

Толщину эквивалентного слоя найдем с помощью формулы (8). После интегрирования w_v по y получим

$$l_s = \frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1 \right)} \quad (14)$$

На рисунке 4 представлено семейство графических зависимостей толщины эквивалентного слоя от x для разных величин b_0 при $\Delta z = 0,5 \text{ м}$. На основании полученных графиков можно сделать вывод, что при возрастании x толщина слоя и, соответственно, эффективность теплового экранирования водяной завесы возрастают, т.е. при верхнем расположении оросителей нижняя часть дрен-

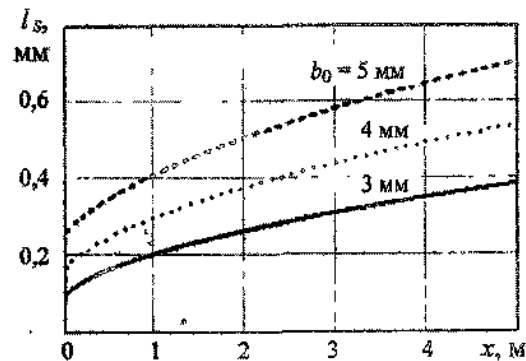


Рисунок 4 — Расчет зависимостей $l_s(x)$ для разных радиусов отверстия оросителей

черной завесы имеет более высокую эффективность экранирования, чем верхняя.

Формула (14) получена для водяной завесы, образованной с помощью щелевого оросителя (рисунок 1). В нее входят два его параметра: радиус отверстия оросителя b_0 и угол раствора струй φ_0 . Если отверстие изменит свою форму, принципиально ничего не изменится, но при этом вместо b_0 в формулы нужно подставить эквивалентный радиус $b_{эк}$, определенный из условия равенства площади сечения выходного отверстия S_{noz}

$$S_{noz} = \pi \cdot b_{эк}^2.$$

Таким образом, более общей по сравнению с (14) является формула толщины эквивалентного слоя

$$l_s = \frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot \sqrt{1 + \frac{1,32 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot S_{noz}} - 1}} \quad (15)$$

Учет влияния гравитационного поля

Влияние гравитационного поля на движение распыленной струи проявляется в том, что капельная фаза приобретает дополнительную скорость относительно газовой фазы струи, направленную в сторону действия силы тяжести вертикально вниз. Теоретический анализ позволяет сделать вывод, что на основном участке струи скорость движения капель относительно воздуха (лагранжева скорость) должна быть близка к скорости седиментации капель. Таким образом, в неподвижной системе отсчета скорость капель (эйлерова) равна сумме скоростей воздушного потока и седиментации капель [20].

При $D \leq 0,2$ мм

$$v_c = \frac{g \rho_w D^2}{26 \cdot \nu_a \rho_a} \quad (16)$$

при $D \geq 0,2$ мм

$$v_c = 3,8 \cdot 10^3 \cdot D \quad (17)$$

где ν_a — кинематическая вязкость воздуха.

Суммируя их с формулами (4) и (11), для безразмерной скорости капель на оси потока получим формулы для четырех случаев:

1) для одиночной распыленной струи

— при $D \leq 0,2$ мм

$$\bar{u}_m \approx \frac{5,7}{\bar{x}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a \cdot \varphi_0} + \frac{g \rho_w D^2}{26 \cdot \nu_a \rho_a \cdot u_0}} \quad (18)$$

— при $D \geq 0,2$ мм

$$\bar{u}_m \approx \frac{5,7}{\bar{x}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_a \cdot \varphi_0} + \frac{3,8 \cdot 10^3 \cdot D}{u_0}} \quad (19)$$

2) для водяной завесы, созданной линейкой оросителей:

— при $D \leq 0,2$ мм

$$\bar{u}_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w}{\rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x}} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0} - 1} + \frac{g D^2 \cdot \Delta z \cdot \bar{x}}{325 \cdot \nu_a \cdot u_0} \right] \quad (20)$$

— при $D \geq 0,2$ мм

$$\bar{u}_m = \frac{12,5 \cdot \rho_w}{\rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x}} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0} - 1} + \frac{300 \cdot D \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x}}{\rho_w \cdot u_0} \right] \quad (21)$$

Подставляя формулы (18) и (19) в (5), а также (20) и (21) в (12), после преобразований получим расчетные формулы зависимостей массовой доли воды в центральной плоскости водяной завесы от безразмерного расстояния \bar{x} :

1) для одиночной распыленной струи

— при $D \leq 0,2$ мм

$$w_{mm} = \frac{\varepsilon}{\bar{x} \cdot \sqrt{\frac{\rho_a \cdot \varphi_0}{\rho_w} + \frac{g D^2 \cdot \varphi_0 \cdot \bar{x}^2}{148 \cdot \nu_a \cdot u_0}}} \quad (22)$$

— при $D \geq 0,2$ мм

$$w_{mm} = \frac{5}{\bar{x} \cdot \sqrt{\frac{\rho_a \cdot \varphi_0}{\rho_w} + \frac{670 \cdot \rho_a \cdot \varphi_0 \cdot \bar{x}^2}{\rho_w \cdot u_0}}} \quad (23)$$

2) для водяной завесы, созданной линейкой оросителей,

— при $D \leq 0,2$ мм

$$w_{mm} = \frac{2,28}{\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0} - 1} + \frac{g D^2 \cdot \Delta z \cdot \bar{x}}{325 \cdot \nu_a \cdot u_0}} \quad (24)$$

— при $D \geq 0,2$ мм

$$w_{mm} = \frac{2,28}{\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0} - 1} + \frac{300 \cdot D \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x}}{\rho_w \cdot u_0}} \quad (25)$$

Чтобы оценить влияние размера капель на величины \bar{u}_m и w_{mm} , выполним расчет их зависимостей от безразмерной координаты \bar{x} для разных значений диаметра капель D . На рисунках 5 и 6 представлены результаты расчета по формулам (18)–(25) для $u_0 = 20$ м/с, $\varphi_0 = 2,5$ рад и $\Delta z = 100$.

Согласно расчетам, для данных параметров водяной завесы при $D < 0,2$ мм изменение величин \bar{u}_m и w_{mm} под влиянием гравитационного поля не превышает 10%. При увеличении диаметра капель до 0,5 мм изменение данных величин достигает 25–30%. Следовательно, полу-

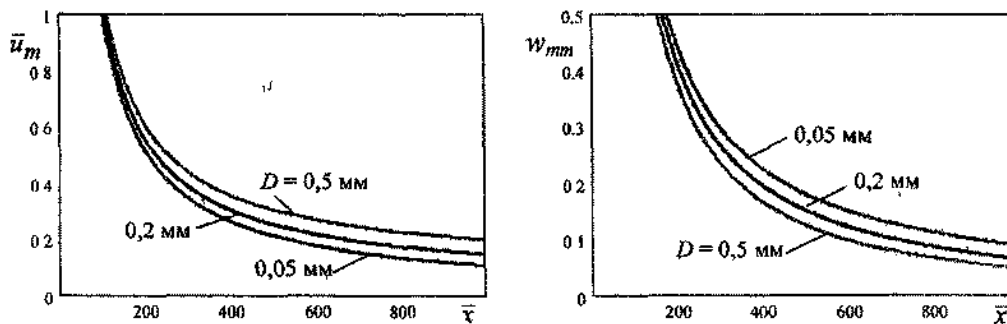


Рисунок 5 — Расчет зависимостей $\bar{u}_m(\bar{x})$ и $\bar{w}_{mm}(\bar{x})$ для разных значений D одиночного оросителя

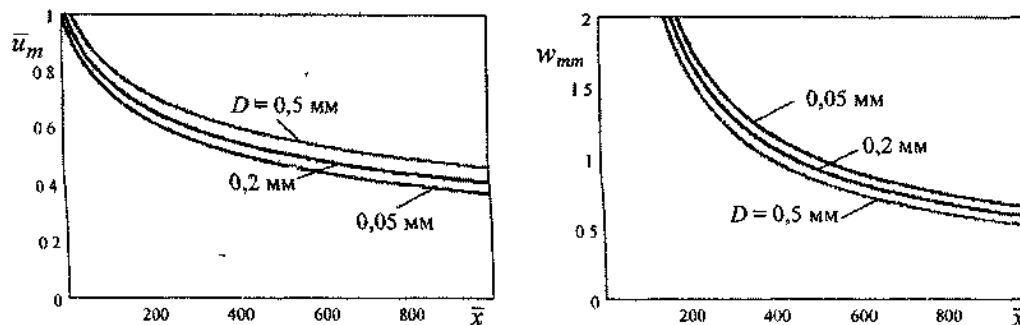


Рисунок 6 — Расчет зависимостей $\bar{u}_m(\bar{x})$ и $\bar{w}_{mm}(\bar{x})$ для разных значений D одиночного оросителя

ченые ранее расчетные формулы (1)–(6) и (9)–(14) можно применять для распыленных струй, для которых средний диаметр Саугера каплей не превышает, ориентировочно, 0,2 мм. Это связано с тем, что при $D \geq 0,2$ мм скорость седиментации каплей становится сравнимой со скоростью распыленной струи [20] и ее нужно учитывать при расчетах.

Очевидно, что формулы (18), (20), (22), (24) при $D \leq 0,2$ мм дают весьма малые поправки к формулам (1)–(6) и (9)–(14), поэтому в большинстве случаев ими можно пренебречь. Напротив, формулы (19), (21), (23), (25) дают существенные поправки к формулам и позволяют расширить возможности применения данной математической модели для больших диаметров каплей.

Из формул (23) и (25) найдем объемную долю воды в произвольной точке водяной завесы с безразмерными координатами \bar{x} и \bar{y} при $D \geq 0,2$ мм.

1) Для одиночной распыленной струи

$$w_v = \frac{5 \cdot \rho_a}{\rho_w \cdot \left(\bar{x} \cdot \sqrt{\frac{\rho_a \cdot \varphi_0}{\rho_w} + \frac{670 \cdot D \cdot \rho_a \cdot \varphi_0 \cdot \bar{x}^2}{\rho_w \cdot u_0}} \right)} \cdot (1 - \bar{y}^{1,5}). \quad (26)$$

2) Для водяной завесы, созданной линейкой оросителей

$$w_v = \frac{2,28 \cdot \rho_a}{\rho_w \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x} \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0}} - 1 + \frac{300 \cdot D \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot \bar{x}}{\rho_w \cdot u_0} \right)} \cdot (1 - \bar{y}^{1,5}). \quad (27)$$

Толщину эквивалентного слоя завесы для данных двух случаев получим с помощью формулы (8).

1) Для одиночной распыленной струи

$$l_s = \frac{0,9 \cdot b_0^2}{b_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho_w \cdot \varphi_0}{\rho_a} + \frac{670 \cdot D \cdot \rho_a \cdot \varphi_0 \cdot x}{u_0}}}, \quad (28)$$

2) Для водяной завесы, созданной линейкой оросителей

$$l_s = \frac{0,41 \cdot \rho_a \cdot x}{\rho_w \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{0,42 \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}}{\rho_w \cdot \varphi_0 \cdot b_0^2}} - 1 + \frac{300 \cdot D \cdot \rho_a \cdot \Delta z \cdot x}{\rho_w \cdot u_0 \cdot b_0^2} \right)}. \quad (29)$$

Расчетные формулы (26)–(29) являются обобщениями формул (6), (9), (13) и (14). Они должны применяться для струй крупнокапельного распыла со средними диаметрами каплей, превышающими, ориентировочно, 0,2 мм.

В то же время, для очень крупных каплей, диаметром более 0,5 мм, применение теории затопленных струй вряд ли можно считать оправданным, поскольку такие капли движутся в воздушной среде по самостоятельным траекториям, значительно менее зависимым от движения данной среды. Для анализа таких распыленных струй, очевидно, необходимо применять другую методику расчетов, на основе расчета траекторий отдельных каплей.

Выводы

На основе теории затопленных струй разработан метод расчета параметров веерных распыленных водяных струй, создаваемых щелевыми оросителями. Получены расчетные формулы для осевой скорости, для пространственного распределения объемной доли воды, для толщины эквивалентного слоя воды в одиночной веерной струе, а также для водяной завесы, созданной линейкой щелевых оросителей.

Выполнен теоретический анализ влияния гравитационного поля на указанные параметры водяной завесы. С учетом относительного движения фаз под влиянием гравитационного поля найдены поправки к расчетным формулам, выполнены расчеты для типичных параметров, сделаны численные оценки и определены пределы применимости уточненных формул. Сделан вывод о том, что данные поправки к формулам существенны для распыленных струй, для которых средний диаметр Саутера капель превышает, ориентировочно, 0,2 мм. Однако для очень крупных капель диаметром более 0,5 мм, необходимо применять другую методику расчетов, на основе расчета траекторий отдельных капель.

Для экспериментальной проверки методики расчетов, предложенной в данной работе, можно использовать измерение параметров, для которых получены расчетные формулы, с целью исследования и сравнения с теорией их зависимости от среднего диаметра капель распыленной струи.

Литература

1. Виноградов, А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21, № 7. — С. 73—82.
2. Виноградов, А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами. Часть 2 / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность — 2013. — Т. 22, № 4. — С. 72—84.
3. Виноградов, А.Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22. — № 6. — С. 74—84.
4. Виноградов, А.Г. Учет спектрального состава теплового излучения при расчете коэффициента пропускания капли воды / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 9. — С. 64—73.
5. Виноградов А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 1. — С. 45—57.
6. Ravigururajan, T.S. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets / T.S. Ravigururajan, M.R. Beltran // Fire Safety J., 1989. — Vol. 15. — P. 171—181.
7. Coppalle, A. Fire protection: water curtains / A. Coppalle, D. Nedelka, B. Bauer // Fire Safety J., 1993. — Vol. 20. — P. 241—55.
8. Yang, W. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression / W. Yang, T. Parker, H. Ladouceur, R. Kee // Fire Safety J., 2004. — Vol. 39. — P. 41—66.
9. Buchlin, J.-M. Thermal shielding by water spray curtain / J.-M. Buchlin // J. Loss Prev. Process Industries,

2005. — Vol. 18, No. 4—6. — P. 423—432.

10. Collin, A. On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method / A. Collin, P. Boulet, D. Lacroix. G. Jeandel // Hi. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2005. — Vol. 92. — P. 85—110.
11. Collin, A. Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield / A. Collin, S. Lechene, P. Boulet, G. Parent // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2010. — Vol. 57. — P. 537—553.
12. Хаппель, Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж. Хаппель, Г. Бреннер. — М.: Мир, 1976. — 631 с.
13. Sheppard, D.T. Spray Characteristic of Fire Sprinklers / D.T. Sheppard // NIST GCR 02 — 838, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2002. — 206 p.
14. Виноградов, А.Г. Учет вторичных воздушных потоков при математическом моделировании распыленных водяных струй / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 2. — С. 29—33.
15. Абрамович, Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. — М.: Гос. издат. физ.-мат. литературы. 1984. — 715 с.
16. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. — В 2 ч.: Ч. 1. — М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. — 600 с.
17. Бай Ши-и. Теория струй / Бай Ши-и. — М.: Физматгиз, 1960. — 326 с.
18. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1987. — 840 с
19. Виноградов, А.Г. Методика розрахунків параметрів водяних завес на основі теорії затоплених струменів / А.Г. Виноградов // Науковий вісник УкрНДІПБ. — 2013. — № 2 (28). — С. 191—203.

References

1. Vinogradov, A.G. Pogloshhenie teplovogo izlucheniya vodjanyimi zavesami [Thermal radiation absorption by water curtains]. Pozharovzryvobezopasnost' (Fire and explosion safety), 2012, vol. 21, no. 7, pp. 73—82.
2. Vinogradov, A.G. Pogloshhenie teplovogo izlucheniya vodjanyimi zavesami. Chast' 2 [Thermal radiation absorption by water curtains. Part 2]. Pozharovzryvobezopasnost' (Fire and explosion safety), 2013, vol. 22, no. 4, pp. 72—84.
3. Vinogradov, A.G. Jekranirovanie teplovogo izlucheniya polidispersnymi vodjanyimi zavesami [Heat radiation shielding by the polydisperse water curtains], Pozharovzryvobezopasnost' (Fire and explosion safety), 2013, vol. 22, no. 6, pp. 74—84.
4. Vinogradov, A.G. Uchet spektral'nogo sostava teplovogo izlucheniya pri raschete koefficienta propuskaniya kapli vody [Accounting of thermal radiation spectral distribution at calculation of water droplet transmittance]. Pozharovzryvobezopasnost' (Fire and explosion safety), 2013, vol. 22, no. 9, pp. 64—73.
5. Vinogradov, A.G. Metodika rascheta jekranirujushhih

svojstv vodjanyh zavес [Calculation method of water curtain shielding properties]. *Pozharovzryvobezopasnost' (Fire and explosion safety)*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 45—57.

6. Ravigururajan, T.S., Beltran M.R. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets. *Fire Safety Journal*, 1989, vol. 15, pp. 171—181.

7. Coppalle, A., Nedelka, D., Bauer, B. Fire protection: water curtains. *Fire Safety Journal*, 1993, vol. 20, pp. 241—255.

8. Yang, W., Parker, T., Ladouceur, H.D., Kee, R.J. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression. *Fire Safety Journal*, vol. 39, no. 1, 2004, pp. 41—66.

9. Buchlin, J.-M. Thermal shielding by water spray curtain, *J. Loss Prev. Process Industries*, 2005, vol. 18, no. 4—6, pp. 423—432.

10. Collin, A., Boulet, P., Lacroix, D., Jeandel, G. On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2005, vol. 92, pp. 85—110.

11. Collin, A., Lechene, S., Boulet, P., Parent, G. Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2010, vol. 57, pp. 537—553.

12. Happel, J., Brenner H. *Low Reynolds number Hydrodynamics*. Martinus Nijhoff Publ., The Hague, The Netherlands. 1983, 553 p.

13. Sheppard, D.T. *Spray Characteristic of Fire Sprinklers*. NIST GCR 02 — 838, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2002, 206 p.

14. Vinogradov, A.G. Uchet vtorignyh vozdušnyh potokov pri matematicheskom modelirovanii raspylenyh vodjanyh struj [Consideration of secondary air streams at mathematical modelling of the sprayed water jets], *Pozharovzryvobezopasnost' (Fire and explosion safety)*, 2011, vol. 20, no. 2, pp. 29—33.

15. Abramovich, G.N. *The Theory of Turbulent Jets*. The MIT press, Cambridge, Massachusetts, 1963, 671 p.

16. Abramovich, G.N. *Prikladnaia gazovaia dinamika. V 2 ch. [Applied gas dynamics. In 2 parts]*. Moscow, Nauka, 1991, Part 1, 600 p.

17. Pai Shih-I. *Fluid Dynamics of Jets*. Published by D. Van Nostrand, London, 1954, 227 p.

18. Lojčanskij, L.G. *Mehanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas]*. Moscow, Nauka, 1987, 840 p.

19. Vynogradov, A.G. *Metodyka rozrahunkiv parametrov vodjanyh zavес na osnovi teorii zatoplennyh 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)*, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 191—203.

20. Vynogradov, A.G., Gajev, Je.O. *Matematyčne modeljuvannja vil'nogo padinnja sferychnoi' vodjanoi' krapli v povit-rjanomu seredovyshhi [Mathematical modelling of free falling spherical water droplet in a gaseous environment]* *Pozhezhna bezpeka: teorija i praktyka: Zb. naukovykh prac' (Fire safety: theory and practice: Collection of scientific works)*. Cherkasy: APB im. Geroi'v Chornobylja (Fire Safety Institute of Cherkasy named after Chornobyl Heroes, Cherkasy, Ukraine), 2011, no. 9. pp. 22— 32.

Надійшла 30.03.2014

УДК 532.529.5:614.838.441

Розрахунок основних параметрів водяних завіс на основі теорії затоплених струменів

А.Г. Виноградов

На основі теорії затоплених струменів розроблено математичну модель розпиленого водяного струменя, що використовується для створення водяних завіс протипожежного призначення. Отримані формули дозволяють виконати розрахунок основних параметрів водяних завіс: геометричних розмірів, товщини еквівалентного шару води, просторових розподілів швидкостей руху і об'ємної частки води. Виконано аналіз впливу гравітаційного поля на відносний рух фаз. Результати роботи спрямовані на удосконалення раніше розробленої математичної моделі екранування теплового випромінювання пожеж за допомогою водяних завіс.

Ключові слова: водяна завіса; просторовий розподіл води; теорія затоплених струменів.

UDK 532.529.5:614.838.441

The calculation of some major parameters of water curtains, which based on submerged jet theory

A.G. Vinogradov

This work represents further development of earlier received results of simulation of water curtains used as fire protection walls. 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. 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 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. The considerable attention is paid to consideration of influence of a gravitational field on the relative moving of phases. Application of these formulae to earlier developed mathematical model of thermal shielding allowed to expand 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: water curtain; spatial distribution of water; submerged jet theory.