

УДК 614.844.2:532.525.3:004.021:550.8.053:519.2

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПЫЛЕННОЙ СТРУИ, ФОРМИРУЕМОЙ СТВОЛАМИ УСТАНОВОК ИМПУЛЬСНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Иваницкий А.Г.

В статье выявлены процессы, влияющие на эффективность использования установок импульсного пожаротушения. Разработан алгоритм определения параметров стволов установок импульсного пожаротушения, геометрических и дисперсных характеристик формируемой ими распыленной струи жидкого огнетушащего вещества.

(Поступила в редакцию 10 декабря 2007 г.)

В настоящее время в мире все большее распространение получает метод тушения пожаров с использованием распыленных водяных струй, подаваемых как в постоянном, так и в импульсном режиме [1, 2]. Эффективность использования установок тушения распыленной водой во многом зависит от способа подачи огнетушащего вещества (ОТВ), определяющего дисперсность образующихся капель, скорость их движения к очагу пожара, а также геометрию (корневой угол и дальность подачи) формируемой струи. Однако на территории Республики Беларусь использование установок импульсного пожаротушения (УИП) носит ограниченный характер. С целью расширения области применения и повышения эффективности использования УИП необходима разработка процедуры, позволяющей на основании описания процессов, происходящих при истечении жидкого ОТВ из стволов УИП, а также процессов формирования распыленной струи ОТВ создать алгоритм определения параметров стволов УИП для эффективного тушения пожаров с известными характеристиками (видом пожарной нагрузки, геометрией очага). Разработка такого алгоритма позволит определить параметры стволов УИП, требуемые для тушения типовых (модельных) очагов пожара, и произвести модернизацию конструкции ствола СИ-И УИП-1 за счет создания возможности дискретного регулирования давления в воздушной камере ствола и изменения диаметра отверстия истечения. Алгоритм в состоянии обеспечить возможность проведения дальнейших исследований по повышению эффективности тушения УИП пожаров различных классов с применением воды и составов на ее основе.

Эффективность применения УИП зависит от характеристик формируемой распыленной струи ОТВ, на которые оказывают влияние:

- процессы, происходящие в стволе установки и влияющие на параметры процесса истечения жидкого ОТВ;
- процессы распада струи истекающего жидкого ОТВ на капли;
- процессы движения распыленной струи жидкого ОТВ к очагу пожара;
- процессы взаимодействия распыленной струи жидкого ОТВ с очагом пожара.

На процессы, происходящие в стволе установки, а следовательно, и на параметры процесса истечения жидкого ОТВ наибольшее влияние оказывают рабочие и геометрические характеристики ствола установки. Как показывает анализ публикаций, в литературных источниках отсутствует единый теоретический подход, задающий процедуру определения параметров стволов УИП [3–13]. Так, при проектировании УИП-1 [3] математическая модель, описывающая рабочие параметры установки, разрабатывалась путем решения уравнения Бернулли без учета инерционных потерь при движении вытесняемой жидкости, в то время как жидкость является инерционной средой. Как результат, до настоящего времени отсутствовала математическая модель изменения во времени параметров истечения с учетом инерционности жидкого ОТВ. Это связано со сложностью моделирования процессов внутри стволов УИП, в то время как практика настоятельно требует разработки такой инженерной

процедуры, которая бы обобщала теоретические и экспериментальные достижения в этом направлении.

Следует учесть прежде всего то обстоятельство, что после выхода жидкости из ствола УИП и прохождения резинового распылителя начинает формироваться распыленная струя ОТВ. Механизм распада жидкостных струй в значительной мере определяется их формой, которая зависит от формы соплового канала, параметров истечения на срезе ствола и соотношения скоростей струи и окружающего газа.

Следующим этапом при определении эффективности является процесс движения распыленной струи жидкого ОТВ к очагу пожара. Движению распыленных водяных струй в пространстве посвящен ряд работ, которые описывают как движение отдельных капель (в т. ч. испаряющихся) ОТВ [4–8], так системы капель в целом [9,10].

Процессы взаимодействия капель ОТВ с нагретыми веществами и материалами (очагом пожара) рассмотрены в [11–13]. При разработке математических моделей в качестве исходных данных используются скорость капли, размер капли, свойства ОТВ и характеристики нагретых веществ и материалов.

Зависимости, приведенные в вышеуказанных работах, могут использоваться применительно к стволам УИП при условии известной начальной скорости истечения ОТВ из ствола, начального размера и угла движения образующихся капель относительно горизонтальной оси. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для разработки алгоритма определения наиболее эффективных параметров стволов УИП не хватает данных о характеристиках процесса истечения жидкого ОТВ и формировании распыленных струй стволами УИП, позволяющих объединить существующие разработки в области использования распыленных струй жидкого ОТВ применительно к установкам импульсного пожаротушения.

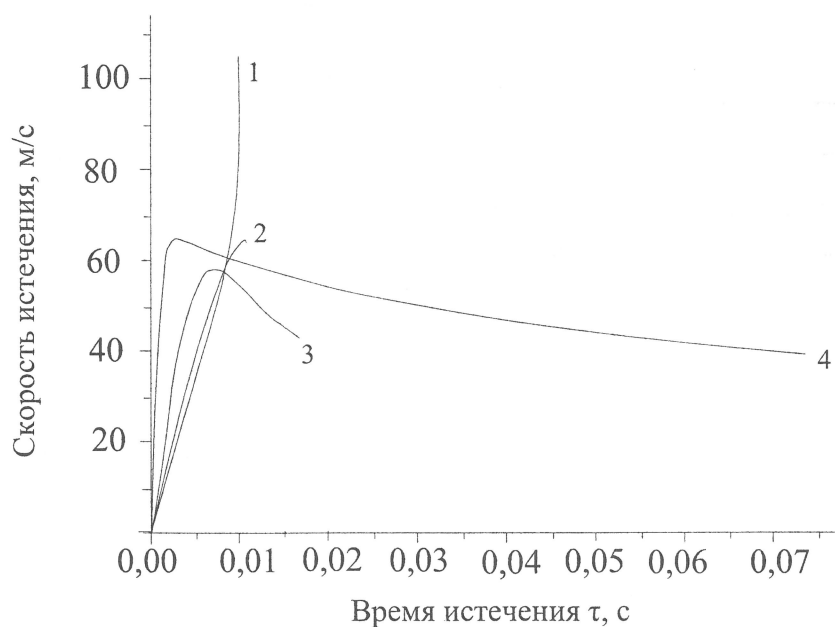
Нами [14] на основании решения уравнения Бернулли для неустановившегося движения жидкости применительно к геометрической модели типового ствола УИП получена зависимость скорости движения жидкости в водяной камере ствола v_i от диаметра отверстия истечения $d_{отв}$, внутреннего диаметра водяной камеры $d_{БК}$, давления среды, в которую происходит истечение P_{OC} , начального давления в воздушной камере ствола P_0 , длины водяной камеры $l_{БК}$, длины воздушной камеры ствола $l_{Г}$, толщины устройства изменения режима подачи ОТВ $l_{Н}$, плотности ОТВ $\rho_{ж}$, показателя адиабаты вытесняющего жидкость газа n , координаты границы раздела фаз «жидкость – газ» z :

$$v_i = \sqrt{\frac{2 \cdot x^{\left(\frac{d_{БК}^4}{d_{отв}^4} - 1\right)} \cdot \left(\int_x^{x_0} \frac{dx}{(1-x)^n \cdot x^{\frac{d_{БК}^4}{d_{отв}^4}}} \cdot \frac{P_{OC} \cdot \left(1 + \frac{l_{БК}}{l_{Г}} \cdot \left(1 + \frac{d_{БК}^2 \cdot l_{Н}}{d_{отв}^2 \cdot l_{БК}} \right) \right)^n}{P_0} \cdot \int_x^{x_0} \frac{dx}{x^{\frac{d_{БК}^4}{d_{отв}^4}}} \right)}{\rho_{ж}}}, \quad (1)$$

$$\text{где } x = \left(1 + \frac{d_{БК}^2 \cdot l_{Н}}{d_{отв}^2 \cdot l_{БК}} - z \right) \cdot \frac{\frac{l_{БК}}{l_{Г}}}{1 + \frac{l_{БК}}{l_{Г}} \cdot \left(1 + \frac{d_{БК}^2 \cdot l_{Н}}{d_{отв}^2 \cdot l_{БК}} \right)}.$$

Так как процесс истечения является неустановившимся и изменение скорости истечения во времени происходит неравномерно, возникает необходимость преобразования зависимости (1) в зависимость скорости истечения как функции времени истечения $v_E = f(\tau)$. Аналитическим и численным методами не представляется возможным преобразовать зави-

симось $v_i = f(z)$ в $v_E = f(\tau)$ вследствие трудностей, возникающих при интегрировании бета-функции Эйлера, входящей в подынтегральное выражение в (1). Преобразование зависимости $v_i = f(z)$ в $v_i = f(\hat{z})$, однако, можно произвести графоаналитическим методом, учитывая, что для разработанной математической модели истечения жидкости из ствола $\hat{z} = z \cdot l_{ж}$, $d\tau = d\hat{z} / v_i$. Функция $v_i = f(\hat{z})$ разбивается на элементарные участки $d\hat{z}$ и определяются скорости v_i для начала и конца каждого элементарного участка. Принимается, что в пределах элементарного участка $d\hat{z}$ скорость v_i стремится к постоянной величине, а средняя скорость на участке $d\hat{z}$ равна полусумме конечных значений. Таким образом, определяется $d\tau = d\hat{z} / v_i$, где $v_i = (v_{i,H} + v_{i,K}) / 2$ для заданного элементарного участка $d\hat{z}$. Выполнение данной операции по всей длине графика и объединение полученных участков дает зависимость $dv_i = f(d\tau)$. Окончательно зависимость $v_E = f(\tau)$ получается из уравнения неразрывности: $dv_E = f(d\tau) = (dv_i \cdot d_{БК}^2) / d_{отв}^2$. Преобразование зависимостей для параметров СП-И УИП-1 ($l_{БК} = 0,348$ м, $l_{Г} = 0,356$ м, $l_{Н} = 0$, рабочий газ – воздух ($n = 1,4$), $d_{БК} = 0,064$ м, $P_0 = 25$ атм, $P_E = 1$ атм) для разных $d_{отв}$ при $dz = 0,0001$ м приведено на рисунке 1. Использована программная среда OriginPro 7.5 [15,16].



1 – $d_{отв} = 62,5$ мм; 2 – $d_{отв} = 56,9$ мм; 3 – $d_{отв} = 41,6$ мм; 4 – $d_{отв} = 19,1$ мм

Рисунок 1 – Зависимость времени истечения огнетушащего вещества для СП-И УИП-1 при различных диаметрах отверстия истечения

После определения параметров процесса истечения жидкого ОТВ по зависимостям $v_i = f(\hat{z})$ и $v_E = f(\tau)$ определяется объем истекающего жидкого ОТВ для интервалов скоростей и устанавливаются диапазон скоростей, при которых истекает основная часть ОТВ. В таблице 1 приведены результаты расчета объема истекающего жидкого ОТВ $V_i(v_i, d_{отв,j})$ в зависимости от интервала скоростей и диаметра отверстия истечения.

Таблица 1 – Объем истекающего жидкого ОТВ для выбранного ряда диаметров отверстий истечения и интервалов скоростей

Интервал скоростей v_i , м/с	Диаметр отверстия истечения $d_{отв,j}$, мм												
	62,5	56,9	50,4	46,5	43,7	41,6	39,9	38,5	32,2	30	24	20,2	19,1
	$V_i(v_i, d_{отв,j})$, %												
до 5	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5–10	1,6	0,9	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
10–15	2,2	1,6	1,0	0,7	0,5	0,5	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
15–20	2,7	2,4	1,5	1,1	0,8	0,7	0,4	0,5	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0
20–25	5,1	3,1	1,9	1,4	1,2	0,9	0,9	0,7	0,4	0,3	0,1	0,1	0,0
25–30	5,4	4,0	2,5	1,8	1,4	1,2	1,0	0,9	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1
30–35	6,6	4,8	3,2	2,3	1,8	1,5	1,2	1,1	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1
35–40	7,7	5,9	3,9	2,9	2,3	2,0	1,7	1,4	0,7	0,5	0,2	0,1	0,1
40–45	8,4	7,2	5,0	3,8	3,0	2,4	24,2	26,9	36,0	38,1	42,0	43,3	43,6
45–50	9,3	8,6	6,5	25,2	33,1	38,2	19,7	19,4	18,8	18,8	18,5	18,4	18,3
50–55	9,5	10,4	32,2	29,1	26,2	23,5	21,6	20,2	16,4	15,8	15,4	15,1	15,1
55–60	9,4	12,7	41,5	31,1	29,2	28,8	28,5	28,3	18,1	18,1	13,0	12,7	12,0
60–65	8,7	16,8							8,1	7,3	7,4	8,0	8,8
65–70	7,6	21,2									2,9	2,1	1,9
70–75	5,7												
75–80	4,2												
80–85	2,6												
85–90	1,6												
90–100	1,0												
100–110	0,2												

Так как скорость истечения жидкого ОТВ из стволов УИП, срез которых рассматривается как струйная форсунка, изменяется во времени, распад истекающей струи возможен в режимах осесимметричного, волнообразного распада и турбулентного распыла. Отсюда следует, что необходимо определить границы режимов распада и установить, какая часть струи распадается в каждом из режимов. Для определения границ между различными режимами распада струй, истекающих из отверстий и цилиндрических насадков в воздух, А.С. Лышевским [17] предложены следующие зависимости:

$$- \text{начало волнообразного распада: } We = 16,6 \cdot \left(\frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{ж} \cdot d_0 \cdot \sigma_{ж}} \right)^{0,3} \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} \right)^{1,05}, \quad (2)$$

$$- \text{начало турбулентного распыла: } We = 266 \cdot \left(\frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{ж} \cdot d_0 \cdot \sigma_{ж}} \right)^{0,133} \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} \right)^{0,8}, \quad (3)$$

где $We = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot v_E^2 \cdot d_0}{\sigma_{\text{ж}}}$ – критерий Вебера;

d_0 – диаметр струи;

$\sigma_{\text{ж}}$ – коэффициент поверхностного натяжения жидкого ОТВ (воды) на границе раздела «жидкость – воздух»;

$\mu_{\text{ж}}$ – вязкость жидкого ОТВ;

ρ_{Γ} – плотность среды, в которой происходит распад струи (воздуха).

Результаты расчета границ режимов распада струи при истечении из СП-И УИП-1 для разных диаметров отверстия истечения $d_{\text{отв}}$ приведены в таблице 2 [18].

Таблица 2 – Границы режимов распада струи при истечении из СП-И УИП-1

$d_{\text{отв}}$, мм	v_{max} , м/с	We_{max}	Скорость начала волнообразного распада, м/с	Скорость при $We = 500$, м/с	Скорость начала турбулентного распыла, м/с
62,5	110,00	12728	13,48	21,80	90,20
56,9	67,90	4415	14,33	22,85	95,12
50,4	61,01	3157	15,50	24,28	101,89
46,5	60,48	2863	16,34	25,28	106,65
43,7	60,71	2711	17,01	26,07	110,47
41,6	61,10	2614	17,56	26,72	113,59
39,9	61,51	2540	18,04	27,29	116,31
38,5	61,90	2482	18,47	27,78	118,69
32,2	64,02	2221	20,74	30,37	131,33
30,0	64,80	2120	21,72	31,47	136,70
24,0	66,87	1806	25,11	35,18	155,12
20,2	67,94	1569	28,09	38,35	171,03
19,1	68,21	1496	29,13	39,44	176,54

После определения границ режимов распада струи путем сопоставления с данными, приведенными в таблице 1, производится определение режима распада основной части струи. Для установления геометрических характеристик распыленной струи ОТВ (длины и площади поперечного сечения) необходимо определить дисперсный состав образующихся капель и углы их истечения.

Для расчета среднего диаметра капель, образующихся при небольших скоростях истечения, используется зависимость, предложенная Н.С. Панасенковым [19]:

$$\frac{\bar{d}}{d_0} = 6 \cdot Re^{-0,125}, \quad (4)$$

где \bar{d} – средний диаметр образующихся капель.

Средний диаметр капель, образующихся при больших скоростях истечения, определяется согласно работе [10], где указано, что диаметр капель, образующихся при распыливании струи при $We \geq 500$, задается формулой:

$$\frac{\bar{d}}{d_0} = 1,1 \cdot 10^3 \cdot We^{-0,63} \cdot \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,0013} \cdot Lp^{-0,327} \cdot \left(\frac{\mu_{\Gamma}}{\mu_{\text{ж}}} \right)^{0,6} \quad (5)$$

Результаты обработки зависимости (5) для выбранного ряда диаметров отверстия истечения приведены на рисунке 2.

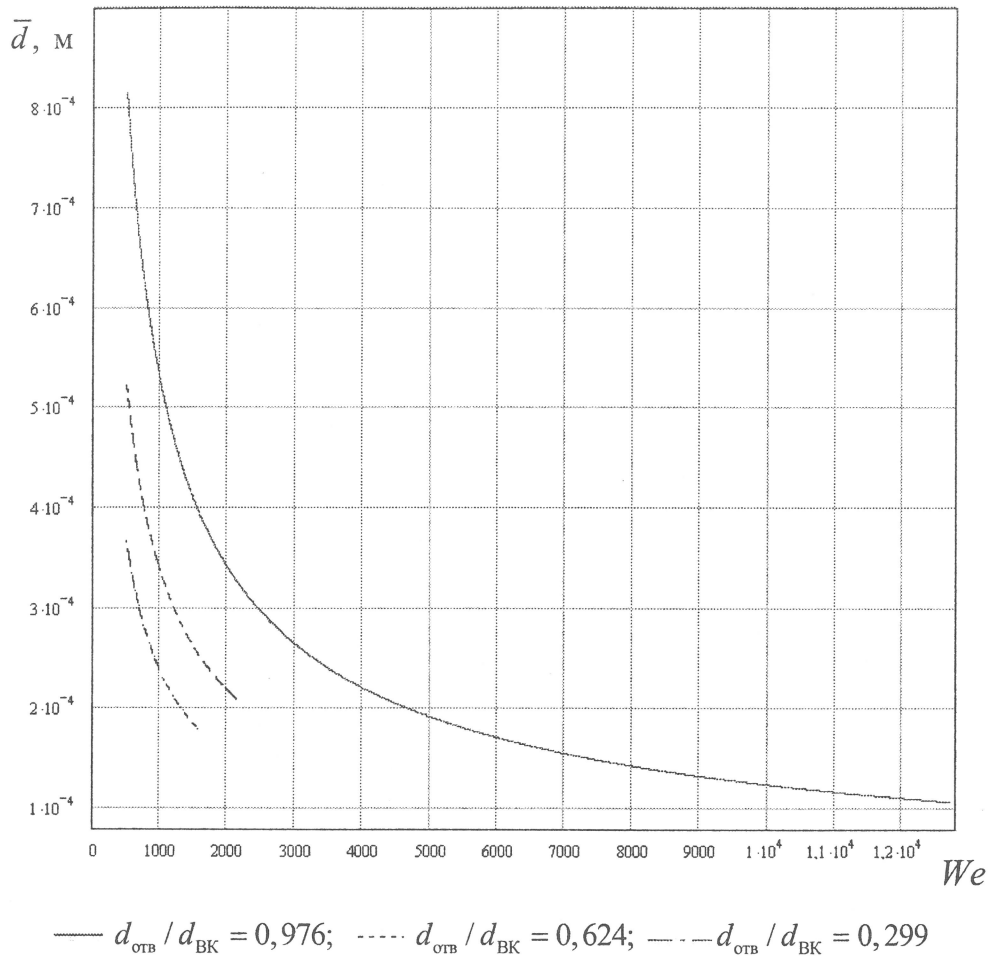
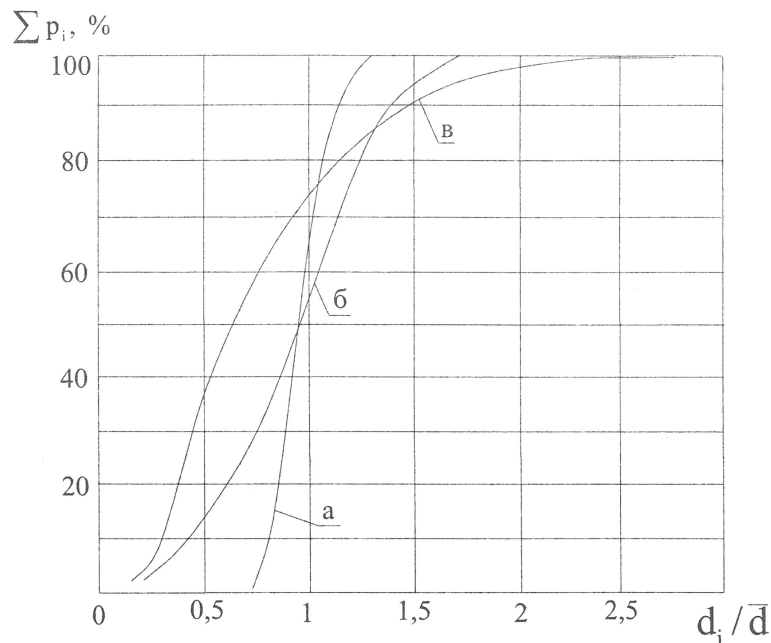


Рисунок 2 – Зависимость среднего диаметра образующихся капель от критерия Вебера We для разных диаметров отверстия истечения из СП-И УИП-1

Так как средний диаметр образующихся капель при прочих равных условиях для каждого из случаев зависит от скорости истечения ОТВ, необходимо выделить для каждой зависимости $v_E = f(\tau)$ участки $d\tau$ с $v_E \approx \text{const}$ и определить значение \bar{d} для каждого из них. Необходимо учесть, что образование капель в режимах волнообразного распада и турбулентного распыла носит случайный характер [17]. На рисунке 3 приведены зависимости суммарной вероятности появления капель различного относительного диаметра d_i / \bar{d} , где d_i – текущий диаметр образующихся капель.

С помощью вычисленного среднего диаметра образующихся капель \bar{d} и зависимостей, приведенных на рисунке 3, можно определить вероятность образования капель с текущими диаметрами d_i для каждого интервала времени, которые после образования продолжают двигаться в воздухе к очагу пожара, формируя распыленную струю ОТВ.



а – осесимметричный распад; б – волнообразный распад; в – турбулентный распыл

Рисунок 3 – Зависимости суммарной вероятности появления капель различного относительного диаметра от режима распада струи [17]

Так как движение жидкости при истечении из ствола УИП неустановившееся и скорость истечения изменяется со временем, то после распада струя представляет собой полидисперсную систему капель ОТВ. Для определения формы распыленной струи ОТВ должны быть найдены траектории движения образующихся капель. Уравнение для проекций скоростей движения испаряющейся капли согласно работе [8] имеет вид:

$$x' = v_1(t) = \frac{v_1}{1 - \frac{\beta}{\gamma} \cdot \ln \left(1 - \frac{\gamma \cdot t}{r_0} \right)}, \quad (6)$$

$$y' = v_2(t) = \frac{v_2 + \frac{g}{\gamma} \cdot (r_0 + \beta \cdot v_1 \cdot t)}{1 - \frac{\beta \cdot v_1}{\gamma} \cdot \ln \left(1 - \frac{\gamma \cdot t}{r_0} \right)}, \quad (7)$$

где начальные условия: $x(0) = y(0) = 0$, $x'(0) = v_1 = v_0 \cdot \cos(\theta_0)$, $y'(0) = v_2 = v_0 \cdot \sin(\theta_0)$;

v_0, θ_0 – скорость и угол истечения капли из ствола;

v_1, v_2 – проекции скорости на координатные оси;

k – приведенный коэффициент аэродинамического сопротивления движению;

r_0 – радиус капли в момент выхода на траекторию, м;

γ – скорость убывания радиуса капли во времени за счет испарения, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Из (6) и (7) получаем зависимость координат капли на траектории движения от времени:

$$x(t) = \int_0^t v_1(t) \cdot dt, \quad (8)$$

$$y(t) = \int_0^t v_2(t) \cdot dt. \quad (9)$$

Для определения характеристик распыленной струи в соответствии с уравнениями (6–9) необходимо знать величину корневого угла факела распыла, который задается расчетным или экспериментальным способом. Расчетная схема изменения корневого угла факела распыла приведена в [19] и изображена на рисунке 4.

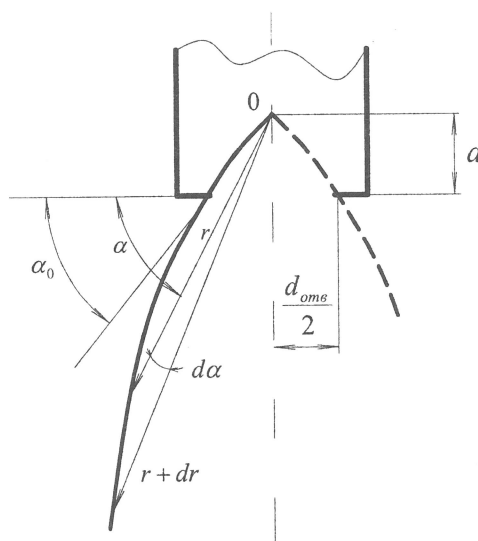


Рисунок 4 – Расчетная схема определения корневого угла факела распыла [19]

Преобразованное уравнение для максимального (при $\alpha_0 = \alpha$) корневого угла факела распыла [19] имеет вид:

$$2 \cdot \sqrt{r^2 + \left(\frac{d_{\text{отв}}}{2}\right)^2} = d_{\text{отв}} \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{S_{\text{отв}}}{2 \cdot d_{\text{к}} \cdot r} \right), \quad (10)$$

где $d_{\text{к}}$ – диаметр образующихся капель, м;
 $S_{\text{отв}}$ – площадь отверстия истечения, м².

Решение уравнения (10) графическим способом относительно выбранного ряда диаметров отверстия истечения и средних диаметров образующихся капель показывает, что в данном случае количество решений зависит от условий приближения (рисунок 5). Задаться ими при решении данной задачи не представляется возможным.

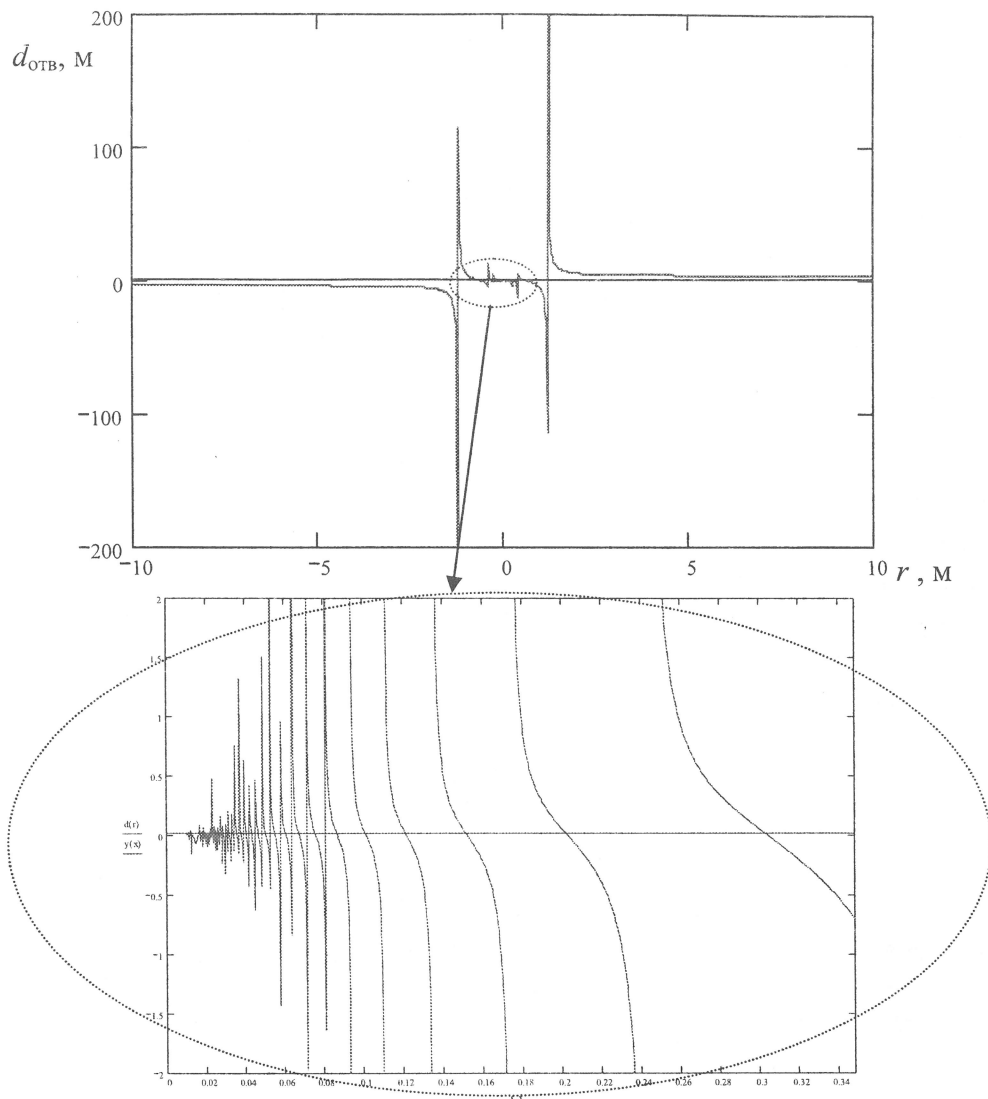


Рисунок 5 – Графическое решение уравнения (10) для $d_{\text{отв}} = 19,1$ мм, $d_{\text{к}} = 75$ мкм

Это также означает, что для случая истечения из ствола УИП положение полюса струи (точка «0», рисунок 4) с течением времени изменяется. Так как количество неотрицательных решений уравнения (10) достаточно велико, для расчетного определения траекторий полета капель распыленной струи ОТВ корневой угол факела распыла основной части жидкого ОТВ должен определяться по результатам обработки изображений, полученных при видеосъемке выстрелов из СП-И. После определения корневой угла факела распыла расчет траекторий движения капель с известным средним диаметром производится по уравнениям (6–9) при задании суммарной вероятности появления капель для каждого момента времени dt . Траектории сводятся на одну координатную сетку, и таким образом получается геометрия факела распыла для заданного диаметра отверстия истечения.

Итак, алгоритм определения характеристик распыла жидкого ОТВ для стволов УИП может быть представлен в следующем виде:

1. Установление зависимости $v_E = f(z)$ с использованием математической модели [14].
2. Пересчет зависимости $v_E = f(z)$ в $v_E = f(\tau)$ по [15].
3. Определение границ режимов распада осесимметричный распад – волнообразный распад – турбулентный распыл.

4. Определение точки с $We = 500$.
5. Определение корневого угла факела распыла по результатам обработки изображения видеосъемки процесса выстрела из ствола УИП.
6. Разбиение графика $v_E = f(\tau)$ на участки $d\tau$, где $v_E \approx \text{const}$.
7. Определение $\frac{d_i}{d_i}$ для каждого участка $d\tau$.
8. Определение наиболее вероятных текущих диаметров d_i .
9. Определение скоростей и траектории движения капель, образовавшихся на каждом из участков $d\tau$.
10. Сведение траекторий участков $d\tau$ на одну координатную сетку и получение зависимости $(x, y) = f(\tau)$, описывающей форму факела распыла.

Разработанный алгоритм позволяет определять характеристики распыленной струи в заданный момент времени и на заданном расстоянии от места установки ствола УИП как функции параметров ствола. В свою очередь вычисляются параметры ствола УИП в зависимости от характеристик очага и наиболее эффективное расстояние от установки до очага пожара. Кроме того, оптимизируются возможности УИП по тушению пожаров при фиксированных параметрах ствола.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корольченко, А.Я. Технология импульсного водяного пожаротушения IFEX 3000 / А.Я. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2001. – № 2. – С. 3–5.
2. Даунгауэр, С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизмы, особенности, перспективы / С.А. Даунгауэр // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 6. – С. 78–81.
3. Разработать теорию, устройство и технологию импульсной подачи воды в зону горения: отчет о НИР (заключ.) / РНПЦ ПБ ГУВПС МВД Респ. Беларусь; рук. темы Н.А.Тычина. – Минск, 1997. – 316 с. – № ГР 1997760.
4. Дунский, В.Ф. Об испарении в турбулентной свободной воздушно-капельной струе / В.Ф. Дунский, Ю.В. Яцков // Инженер.-физич. журн. – 1971. – Т. 20, № 3. – С. 423–426.
5. Головин, А.М. О движении испаряющейся капли / А.М. Головин // Инженер.-физич. журн. – 1973. – Т. 24, № 2. – С. 250–255.
6. Наумов, В.А. Влияние испарения на динамику падающих капель / В.А. Наумов // Инженер.-физич. журн. – 1998. – Т. 71, № 2. – С. 222–224.
7. Ольшанский, В.П. О динамике испаряющейся капли жидкого огнетушащего вещества, диспергированного установкой пожаротушения / В.П. Ольшанский, В.И. Лавинский // Акад. гражданской защиты Украины. – Харьков, 2005. – Вып. 17: Проблемы пожарной безопасности. – С. 138–147.
8. Ольшанский, В.П. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения / В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – № 4. – С. 67–70.
9. Диспергирование гидроимпульсной струи / О.П. Алексеев [и др.] // Акад. гражданской защиты Украины. – Харьков, 2004. – Вып. 16: Проблемы пожарной безопасности. – С. 21–34.
10. Карпенчук, И.В. Дифференциальные уравнения одномерного осредненного движения распыленной струи жидкости / И.В. Карпенчук, С.Г. Петуховский, Ю.В. Заневская // Чрезвычайные ситуации: Предупреждение и ликвидация. – 2005. – №7 (17). – С. 14–20.
11. Попов, Ю.А. Отражательная способность слоя полидисперсных водяных капель / Ю.А. Попов // Инженер.-физич. журн. – 1980. – Т. 38, № 5. – С. 871–875.
12. Барич, М.А. Взаимодействие потока диспергированной жидкости с нагретой поверхностью / М.А. Барич // Инженер.-физич. журн. – 1981. – Т. 40, № 1. – С. 35–40.

13. Линчевский, Е.А. О падении испаряющейся капли огнетушащего вещества в восходящем тепловом потоке / Е.А. Линчевский, В.П. Ольшанский // *Акад. гражданской защиты Украины.* – Харьков, 2004. – Вып.16: Проблемы пожарной безопасности. – С. 136–142.
14. Дмитриченко, А.С. Математическая модель движения жидкости в стволе установки импульсного пожаротушения / А.С. Дмитриченко, А.Г. Иваницкий // *Акад. гражданской защиты Украины.* – Харьков, 2005. – Вып.18: Проблемы пожарной безопасности. – С. 38–44.
15. Дмитриченко, А.С. Экспериментальное определение параметров истечения жидкости из ствола установки импульсного пожаротушения / А.С. Дмитриченко, А.Г. Иваницкий // *Вестн. Командно-инженер. ин-та МЧС Респ. Беларусь.* – 2007. – № 2. – С. 78–87.
16. Дмитриченко, А.С. Гидродинамические параметры истечения жидкости из ствола СП-И УИП-1 / А.С. Дмитриченко, А.Г. Иваницкий // *Пожарная безопасность-2007: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Черкассы, 15–16 ноября 2007 г. / Акад. пожарной безопасности им. Героев Чернобыля; редкол.: В.П. Бут [и др.].* – Черкассы, 2007. – С. 226–227.
17. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учебник для вузов / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.
18. Иваницкий, А.Г. Определение режимов распада и характеристик распыленной струи, формируемой стволами установок импульсного пожаротушения / А.Г. Иваницкий // *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация.* – 2007. – № 2 (22). – С. 131–138.
19. Справочник по распыливающим, оросительным и каплеулавливающим устройствам / А.Н. Чохонелидзе [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 608 с.