

УДК 614.842.628:66.013.8:662.1/2

**Н. П. Кузнецов**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**А. Н. Бураков**, соискатель, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**Е. В. Бухтулова**, кандидат технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СПЕКТРА РАСПЫЛА ВОДЫ ФОРСУНОЧНОЙ ГОЛОВКОЙ ЖРД ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРА**

*Проанализированы возможности конверсионного использования форсуночных головок утилизируемых ракет с ЖРД в системах пожаротушения. Показана возможность аппроксимации спектра капельного распыла полиномиальными моделями.*

**Ключевые слова:** системы пожаротушения, мелкодисперсный распыл жидкости, спектр распыла, форсуночные головки утилизируемых ракет с ЖРД.

**Р**азработка методов эффективного тушения пожаров является одной из главных задач противопожарной безопасности. На практике наиболее широкое применение нашли гидравлические системы для тушения возгорания, когда огнегасящая жидкость подается на очаг возгорания или в зону пламени через распыляющие насадки. Принято считать, что интенсивность подачи воды не зависит от размеров площади пожара, но на нее влияют размеры и характер пожарной нагрузки, доступность поверхности горения для контакта с водой [1, 2]. Влияние воздействия воды на дымовые газы и само пламя в направлении подавления процесса горения практически не рассматривается. При тушении пожаров, независимо от причин пожаров, все более широкое применение находит тонкое распыление воды, при этом интенсивность подачи жидкости определяется эффективностью охлаждения продуктов горения распыленной водой, что во многом определяется влиянием дисперсности распыленной воды на теплообмен между движущимися каплями и дымовыми газами или даже пламенем.

Одним из эффективнейших способов мелкодисперсного распыла жидкости являются центробежные форсунки. В монографиях [3, 4] показана эффективность и перспективность использования в энергетических объектах машиностроения форсуночных головок от утилизируемых ракет с ЖРД, которые могут быть использованы в узлах распыла жидкости. Именно спектр распыла капель определяет эффективность использования многофорсуночных головок по тому или иному назначению. Спектр распыла будет характеризовать интегральную оценку эффективности использования форсуночных головок, которая тем не менее во многом определяется теплообменом отдельной капли с высокотемпературной газовой средой.

Задача теплообмена твердых и жидких частиц малого диаметра с газовой средой является одной из важнейших задач исследования процессов в камерах сгорания авиационных двигателей и двигателей с ЖРД [5]. Однако при мелкодисперсном распыле жидкости в дымовые газы имеются свои специфические особенности, в том числе и в построении соответствующих физико-математических моделей. Так, в работе [6], например, при решении задачи теплообмена не учитываются свойства продуктов горения. В свою очередь, в работах [7, 8] не учитывается время прогрева капель, необходимое для их испарения. Во многих работах вообще не учитывается влияние дисперсности капель распыла на конечный результат, а там, где это учитывается, получены результаты, противоречащие практике. Так, в работе [9] количество тепла, воспринимаемое одной каплей, и общее количество теплоты, аккумулированное всей массой распыленной воды, получены для некоего постоянного диаметра отдельной капли  $d$ . Этот подход совершенно не учитывает спектр распыла жидкости форсунками, поэтому приведенные в работе [9] результаты вызывают большое сомнение.

Тем самым для оценки влияния дисперсности распыленной воды на интенсивность ее подачи при тушении пожара необходимо в первую очередь определить спектр распыла гасящей жидкости. При использовании центробежных форсунок от утилизируемых ракет с ЖРД спектр распыла будет определяться спектром распыла одиночной форсунки, наилучшим образом спектр распыла одиночных форсунок описывается функцией распределения Г. Треша [10]. Лышевский А. С. в монографии [11] проанализировал различные законы распределения капель по размеру. В монографии [12] показано, что при распыле воды через форсуночные головки от ЖРД для описания спектра распыла жидкости из центробеж-

ных форсунок целесообразно использовать закон Розина – Раммлера, поскольку он учитывает поверхность и объем капель распыла, которые определяют параметры теплообмена жидкости. Типичный вид дифференциального закона Розина – Раммлера весового содержания капель воды при ее распыле форсуночными головками приведен на рис. 1, который дает статическое распределение капель по размерам.

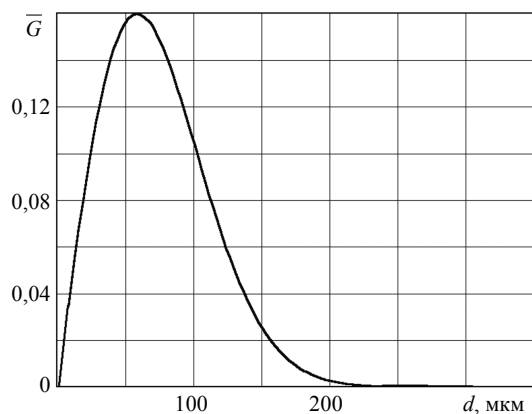


Рис. 1. Относительное весовое содержание капель разного диаметра [12]

Как отмечается в монографии [11], несмотря на большое разнообразие законов для описания спектров распыла и условий, для которых они получены, одни и те же экспериментальные результаты можно с достаточной степенью точности аппроксимировать различными функциями распределения. Поэтому целесообразно выбрать такую форму описания дисперсного состава спектра распыла, которая бы обеспечила минимальную трудоемкость вычислительных операций.

На практике для оценки дисперсионного состава спектра распыла капель используется модальный диаметр капель, медианный и максимальный диаметры. Модальный диаметр капель может быть определен из условия экстремума соответствующей дифференциальной функции распределения.

Эти характерные размеры спектра распыла могут быть найдены либо расчетным путем, либо экспериментально, либо полуэмпирически [10, 13].

Одним из вариантов функции изменения относительного содержания капель в спектре распыла может быть следующий:

$$\varphi(D) = B_1 D^\delta + C_1 D^{\delta+1} + E_1 D^{\delta+2}, \quad (1)$$

где  $B_1, C_1, D_1, \delta$  – константы, определяемые из свойств закона распределения.

Начальному условию  $\varphi_1(D) = 0$  при  $D = 0$  выражение (1) удовлетворяет.

Условие экстремума функции распределения запишется в виде

$$\delta B_1 D_M^{\delta-1} + (\delta+1)C_1 D_M^\delta + (\delta+2)D_M^{\delta+1} = 0. \quad (2)$$

Используя два основных свойства интегральной функции распределения [14], будем иметь:

$$\int_0^{D_{\max}} \varphi_1(D) dD = \int_0^{D_{\max}} (B_1 D^\delta + C_1 D^{\delta+1} + E_1 D^{\delta+2}) dD = 1; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^{D_m} (B_1 D^\delta + C_1 D^{\delta+1} + E_1 D^{\delta+2}) dD = \\ & = \int_{D_m}^{D_{\max}} (B_1 D^\delta + C_1 D^{\delta+1} + E_1 D^{\delta+2}) dD. \end{aligned} \quad (4)$$

Правая граница закона распределения может быть записана в виде

$$B_1 + C_1 D_{\max} + E_1 D_{\max}^2 = 0. \quad (5)$$

При известных характерных размерах спектра распыла  $D_m, D_{\max}, D_M$  из системы уравнений (2)–(5) легко получить следующее уравнение для отыскания значения параметра  $\delta$ :

$$\begin{aligned} & \left[ \left( \frac{D_m}{D_{\max}} \right)^{\delta+1} \frac{2}{\delta+1} - \left( \frac{D_m}{D_{\max}} \right)^{\delta+3} \frac{2}{\delta+3} - \frac{2}{(\delta+1)(\delta+3)} \right] \times \\ & \times \left[ (\delta+1) \frac{D_M}{D_{\max}} - \delta \right] = \\ & = \left[ \frac{1}{(\delta+1)(\delta+2)} + \frac{2}{\delta+2} \left( \frac{D_m}{D_{\max}} \right)^{\delta+2} - \left( \frac{D_m}{D_{\max}} \right)^{\delta+1} \frac{2}{\delta+1} \right] \times \\ & \times \left[ \delta - (\delta+2) \left( \frac{D_m}{D_{\max}} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Для оценки влияния всего спектра распыления жидкости отдельной форсункой на процесс поглощения тепла из окружающего пространства всеми каплями распыляемой жидкости, в том числе и в процессе испарения, необходимо определить общее количество капель  $n_0$ , производимых одной форсункой за 1 сек. Для этого предположим, что объемный секундный расход жидкости через отдельную форсунку, равный  $Q_{\text{ж}}$ , определяется из выражения

$$Q_{\text{ж}} = \frac{G_\phi}{\gamma_{\text{ж}}}, \quad (7)$$

где  $G_\phi$  – секундный расход жидкости;  $\gamma_{\text{ж}}$  – удельный вес жидкости.

В свою очередь,  $Q_{\text{ж}}$  будет равен объему всех капель  $n_0$ , тогда будем иметь

$$Q_{\text{ж}} = \int_0^{D_{\max}} \frac{\pi}{6} D^3 n_0 \varphi(D) dD. \quad (8)$$

Подынтегральное выражение записано так потому, что количество капель, диаметр которых заключен в диапазоне от  $D$  до  $D + dD$ , равно  $n_0 \varphi(D) dD$ ,

а объем одной такой капли составляет  $\frac{\pi}{6}D^3$ . Тогда для  $n_0$  будем иметь

$$n_0 = \frac{6G_\phi}{\pi\gamma_{ж} \int_0^{D_{\max}} D^3 \phi(D) dD}. \quad (9)$$

Необходимо учитывать два основных механизма теплоотвода: количество тепла, поглощаемое всеми каплями распыляемой жидкости, и количество тепла, купируемое процессом парообразования. Во многих работах отдается предпочтение тому или иному механизму процесса теплоотвода. Так, в работе [9] учитывается только теплообмен между распыленной водой и дымовыми газами, а в работе [15], наоборот, анализируется теплообменный процесс в диффузионном пламени и исключается учет процесса прогрева капель до момента испарения. При этом практически ни в одной работе не учитывается влияние спектра распыла на процессы теплообмена, поскольку и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , и время прогрева капли  $\tau_k$  от начальной температуры до конечной также зависят от диаметра капли. В свою очередь, оценка времени прогрева капли является достаточно трудоемкой задачей, требующей решения дифференциального уравнения в частных производных параболического типа [16], решение которых представляет собой, в соответствии с методом Фурье, ряды Фурье. В работе [12] предлагается решение таких уравнений искать в виде степенных рядов (рядов Тейлора или Маклорена)

С другой стороны, время прогрева отдельной капли не является основным показателем эффективности ее участия в процессе теплоотвода при тушении пожара, поскольку удельная теплоемкость  $C$  воды номинально в 539 раз меньше, чем удельная теплота испарения воды  $\gamma$  [17]. То есть процесс теплоотвода за счет механизма испарения является более чем в 5 раз более эффективным, чем процесс механизма прогрева капли. Более того, процессу интенсивного испарения капли предшествует прогрев ее испаряющегося слоя до температуры испарения, то есть до температуры капли, равной  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ . А поскольку динамика процесса прогрева отдельной капли будет определяться главным образом динамикой испарения, общее количество теплоты всей массой распыленной воды будет определяться той ее массой, которая в данный момент времени испарилась. Поэтому главное внимание при анализе эффективности использования распыленной жидкости для тушения пожаров необходимо уделить процессу испарения капли.

Капля, неподвижная относительно газа, испаряется по закону, впервые полученному Б. Срезневским [10], который имеет следующий вид:

$$\frac{dS}{dt} = -K, \quad (10)$$

где  $S$  – поверхность капли, равная  $\pi D^2$ ;  $t$  – время;  $K$  – постоянная для данных условий испарения величина, которая зависит от физических свойств газа среды, жидкости капли и условий массообмена.

Значение постоянной  $K$  может быть определено по формуле Д. Б. Сполдинга [18]

$$K = \frac{8\pi\gamma_r}{\gamma_{ж}} K_d \ln(1+B), \quad (11)$$

где  $\gamma_r, \gamma_{ж}$  – удельный вес газовой среды, куда впрыскивается капля, и жидкости капли;  $K_d$  – коэффициент взаимной диффузии пара жидкости в газ среды;

$B = \frac{C_{p_{cp}}(T_r - T_s)}{Q}$  – диффузионный напор (движущая сила массообмена между каплей и газом);  $C_{p_{cp}}$  – средняя по составу и температуре удельная теплоемкость газа у поверхности капли;  $T_r$  – температура газовой среды, в которую впрыскивается капля;  $T_s$  – температура на поверхности капли, равная температуре кипения жидкости;  $Q$  – полная теплота испарения жидкости, складывающаяся из теплоты нагрева жидкости от начальной температуры до кипения и скрытой теплоты испарения при температуре кипения, т. е.

$$Q = C_{ж}(T_{\text{кип}} - T_{\text{нач}}) + \gamma_{ж}(T_{\text{кип}}). \quad (12)$$

Из уравнения (12) получим закон изменения диаметра капли по времени:

$$D^2 = D_0^2 - \frac{K}{\pi}t, \quad (13)$$

где  $D_0$  – начальный (при  $t = 0$ ) диаметр капли.

Для времени испарения капли будем иметь выражение

$$t_{\text{исп}} = \frac{\pi D_0^2}{K}. \quad (14)$$

Как отмечается в [10], задача об испарении капель, движущихся относительно газа, является более сложной и до настоящего времени аналитического точного решения не имеет. Однако, используя полуэмпирический подход, в монографии [10] приведена зависимость изменения диаметра капли в процессе ее испарения при квазистационарном ее движении в газовой среде. Но скорость движения отдельной капли относительно дымового газа будет по времени меняться из-за изменения аэродинамического воздействия на каплю окружающего ее газа, которое будет изменяться в процессе испарения капли и обусловлено особенностями ее траекторного движения. В монографии [12] показано, что в первом приближении закон изменения диаметра капли по времени в ходе ее испарения может быть определен из выражения

$$\frac{d}{dt} \left( \rho_{ж} \frac{D^3}{6} \right) = q_m D^2, \quad (15)$$

где  $q_m$  – массовый поток.

Отсюда следует, что диаметр капли по времени изменяется по линейному закону.

Ввиду малости начального диаметра капли выражение (13) может быть аппроксимировано в виде ряда Тейлора:

$$D = D_0 \left( 1 - \frac{1}{2} \alpha_1 t - \frac{1}{8} \alpha_1^2 t^2 \right), \quad (16)$$

где для уравнения (13) будем иметь  $\alpha_1 = \frac{K}{D_0^2 \pi}$ . Ана-

логично будет выглядеть зависимость, учитывающая скорость движения капли.

Тем самым изменение диаметра по времени каждой отдельной капли в процессе ее испарения можно задать в общем виде в виде уравнения

$$D = D_0 (1 - a_1 t - a_2 t^2 - a_3 t^3 - \dots). \quad (17)$$

Форсунка, производящая капли гасящей жидкости, создает спектр распыла, в котором капли в начальный момент времени распределяются по закону  $\varphi_0(D_0)$ , но в дымовых газах и в пламени пожара каждая капля, испаряясь, изменяет свой диаметр по закону (17). Через некоторое время после момента впрыска распределение капель по размерам изменится, поскольку часть капель полностью испарится, а оставшиеся капли будут иметь меньшие диаметры. Если в момент времени  $t$  было бы известно новое распределение по размерам капель  $\varphi_t(D, t)$ , то количественную характеристику испарения капель можно было бы определить по формуле

$$\psi(t) = 1 - \frac{\int_0^{D_{\max}} \frac{\pi}{6} D^3 n'_0 \varphi_t(D, t) dD}{\int_0^{D_{0\max}} \frac{\pi}{6} n_0 \varphi_0(D_0) dD}, \quad (18)$$

где  $n_0$  – количество капель в рассматриваемой порции жидкости в начальный момент времени;  $n'_0$  – количество капель в рассматриваемой порции воды в текущий момент времени;  $n'_0 \varphi_t(D, t) dD$  – количество капель размером от  $D$  до  $D + dD$ ;  $\frac{\pi}{6} D^3$  – объем одной капли этого размера.

В выражении (18), и в знаменателе, и в числителе, суммирование объемов (интегрирование) производится по всем каплям от наименьшей (нулевого размера) до наибольшей. Чтобы установить закон изменения  $\varphi_t(D, t)$ , необходимо произвести функциональное преобразование согласно закону изменения диаметра капли. Известно, что функциональное преобразование плотности вероятности производится по известному из теории вероятностей [14] правилу: «новая» плотность вероятности равна «старой», в которой «старая» переменная выражена через «новую», помноженную на производную от «старой» переменной по «новой» переменной. «Старая» пере-

менная –  $D_0$ , «новая» переменная –  $D$ . Связь между переменными определяется выражением (18), откуда будем иметь

$$\frac{dD_0}{dD} = \frac{1}{1 - a_1 t - a_2 t^2}. \quad (19)$$

С учетом всех основных свойств закона изменения плотности распределения случайной величины функцию распределения относительного количества капель распыленной жидкости по диаметру зададим в виде

$$\varphi_2(D) = A_2 D + B_2 D^2 + C_2 D^3 + E_2 D^4, \quad (20)$$

где  $A_2, B_2, C_2, E_2$  – const. Константы в выражении (20) находятся из следующей системы уравнений:

$$A_2 + B_2 D_{\max} + C_2 D_{\max}^2 + E_2 D_{\max}^3 = 0; \quad (21)$$

$$A_2 + 2B_2 D_M + 3C_2 D_M^2 + 4E_2 D_M^3 = 0; \quad (22)$$

$$\int_0^{D_m} (A_2 D + B_2 D^2 + C_2 D^3 + E_2 D^4) dD = \int_{D_m}^{D_{\max}} (A_2 D + B_2 D^2 + C_2 D^3 + E_2 D^4) dD; \quad (23)$$

$$\int_0^{D_{\max}} (A_2 D + B_2 D^2 + C_2 D^3 + E_2 D^4) dD = 1. \quad (24)$$

Система уравнений (21)–(24) позволяет однозначно определить константы  $A_2, B_2, C_2, E_2$ . Тогда для  $\varphi_t(D, t)$  будем иметь

$$\varphi_t(D, t) = \left[ A_2 \frac{D}{1 - a_1 t - a_2 t^2} + B_2 \frac{D^2}{(1 - a_1 t - a_2 t^2)^2} + C_2 \frac{D^3}{(1 - a_1 t - a_2 t^2)^3} + E_3 \frac{D^4}{(1 - a_1 t - a_2 t^2)^4} \right] \times \frac{1}{1 - a_1 t - a_2 t^2}. \quad (25)$$

Доля испарившейся воды к моменту времени  $t$  составит

$$\psi(t) = 1 - \frac{\int_0^{D_{\max}} D^3 \varphi_t(D, t) dD}{\int_0^{D_{0\max}} D_0^3 \varphi_0(D_0) dD_0}, \quad (26)$$

где  $D_{\max} = D_{0\max} (1 - a_1 t - a_2 t^2)$ .

Подставив в выражение (26) значения функций  $\varphi_0(D)$  и  $\varphi_t(D, t)$ , имеем

$$\psi(t) = 1 - (1 - a_1 t - a_2 t^2)^3. \quad (27)$$

Или, перейдя к безразмерной переменной  $\tau = t/t_{исп}$ , функцию  $\psi(\tau)$  запишем в следующем виде:

$$\psi(\tau) = 1 - (1 - a_1 \tau t_{исп} - a_2 \tau^2 t_{исп}^2). \quad (28)$$

Время полного испарения порции воды определяется временем испарения капли максимального диаметра. В форсуночной головке, как отмечалось выше, обычно используются форсунки трех типоразмеров, каждый из которых имеет свой спектр распыла воды, свой максимальный диаметр капли, свое количество форсунок. Если положить, что количество форсунок  $i$ -го типоразмера равно  $N_i$ , а время полного испарения максимальной капли форсунки  $i$ -го типоразмера равно  $t_{i,исп}$ , тогда комплексная характеристика испарения распыленной одной форсункой воды может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} \psi_{комп}(\tau) = & 1 - (N_1(1 - a_1 \tau t_{1,исп} - a_2 \tau^2 t_{1,исп}^2) + \\ & + N_2(1 - a_1 \tau t_{2,исп} - a_2 \tau^2 t_{2,исп}^2) + \\ & + N_3(1 - a_1 \tau t_{3,исп} - a_2 \tau^2 t_{3,исп}^2)) / (N_1 + N_2 + N_3). \quad (29) \end{aligned}$$

В монографии [12] проанализированы характеристики спектра распыла форсунок форсуночной головки от ракетного двигателя 9Д21 и определены кинематические характеристики капель при распыле воды в рабочую полость дегазационной колонны, где рабочее давление пароводяной смеси составляло порядка 0,01 МПа. Отмеченное выше влияние на скорость испарения капли скорости набегающего потока характерно для случая впрыска капель в камеру сгорания жидкостного ракетного двигателя, где давления составляют порядка 10 МПа. Поскольку в монографии [12] показано, что скорость движения капель практически не влияет на процесс испарения, можно в первом приближении считать, что при впрыскивании воды в атмосферную среду (в воздух) влияние скорости обдува капли газовым потоком на процесс испарения влияет незначительно. Тогда в дальнейших расчетах за основной закон изменения диаметра отдельной капли по времени примем закон в виде выражения (13). Тогда с учетом выражения (14) по-

лучим функцию производной переменной  $D_0$  по  $D$  в виде

$$\frac{dD_0}{dD} = \frac{D}{\sqrt{D^2 + \frac{K}{\pi}}}. \quad (30)$$

Тогда функция  $\varphi_i(D, t)$  примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \varphi_i(D, t) = & \left( A_2 \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^{\frac{1}{2}} + B_2 \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right) + \right. \\ & \left. + C_2 \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^{\frac{3}{2}} + E_2 \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^2 \right) \frac{D}{\sqrt{D^2 + \frac{K}{\pi} t}} = \\ & = A_2 D + B_2 D \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^{\frac{1}{2}} + \\ & + C_2 D \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right) + E_2 D \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (31) \end{aligned}$$

Тогда функция (27) запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \psi(t) = & 1 - \left( \int_0^{D_{\max}} D^3 \left( A_2 D + B_2 D \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^{\frac{1}{2}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + C_2 D \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right) + E_2 D \left( D^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^{\frac{3}{2}} \right) dD \right) / \\ & / \left( \int_0^{D_{\max}} D_0^3 \left( A_2 D_0 + B_2 D_0^2 + C_2 D_0^3 + E_2 D_0^4 \right) dD_0 \right), \quad (32) \end{aligned}$$

где  $D_{\max} = \sqrt{D_{0\max}^2 - \frac{K}{\pi}}$ .

Интегралы в выражении (32) берутся в замкнутом виде [20].

Проанализируем процессы испарения капель воды, производимые форсунками двигателя 9Д21, для чего результаты расчета параметров спектра распыла сведем в единую табл. 1.

Значения параметров спектров распыла для уравнения (32) приведены в табл. 2.

Таблица 1. Характеристики капель спектра распыла форсунок двигателя 9Д21 [12]

| №   | Тип форсунки                   | $D_{\max}$ , мм | $D_m$ , мкм | $D_M$ , мкм | Количество форсунок |
|-----|--------------------------------|-----------------|-------------|-------------|---------------------|
| I   | Форсунки окислителя            | 0,310           | 69          | 54,000      | 252                 |
| II  | Периферийные форсунки горючего | 0,240           | 67          | 52,4355     | 64                  |
| III | Форсунки основного горючего    | 0,258           | 69          | 54,000      | 204                 |

Таблица 2. Параметры спектров распыла жидкости форсунками двигателя 9Д21

| №   | $E_2$               | $C_2$              | $B_2$               | $A_2$   |
|-----|---------------------|--------------------|---------------------|---------|
| I   | $-3,268 \cdot 10^4$ | $2,273 \cdot 10^4$ | $-5,104 \cdot 10^3$ | 372,899 |
| II  | $-4,799 \cdot 10^4$ | $2,79 \cdot 10^4$  | $-5,475 \cdot 10^3$ | 370,053 |
| III | $1,298 \cdot 10^4$  | $9,583 \cdot 10^3$ | $-4,469 \cdot 10^3$ | 390,698 |

Обозначив

$$\begin{aligned} \eta_i = & \int_0^{D_{i,\max}} D_i^3 \left( A_2^i D_i + B_2^i D_i \left( D_i^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^{\frac{1}{2}} + \right. \\ & \left. + C_2^i D_i \left( D_i^2 + \frac{K}{\pi} t \right) + E_2^i D_i \left( D_i^2 + \frac{K}{\pi} t \right)^{\frac{3}{2}} \right) dD_i; \quad (33) \end{aligned}$$

$$\chi_i = \int_0^{D_{i,0,max}} D_{i,0}^3 (A_2^i D_{i,0} + B_2^i D_{i,0}^2 + C_2^i D_{i,0}^3 + E_2^i D_{i,0}^4) dD_{i,0}, \quad (34)$$

для комплексной характеристики испарения жидкости, распыляемой форсуночной головкой, по аналогии с выражением (29) будем иметь

$$\psi(\tau) = 1 - \frac{N_1 \eta_1 + N_2 \eta_2 + N_3 \eta_3}{N_1 \chi_1 + N_2 \chi_2 + N_3 \chi_3}. \quad (35)$$

Характер изменения функции  $\psi(\tau)$  представлен на рис. 2. Там же представлен характер изменения функции  $\psi(\tau)$  для случая монодисперсного распыла жидкости: кривая 1 соответствует постоянному (одинаковому) диаметру капель 310 мкм, кривая 2 – диаметру 250 мкм, кривая 3 – диаметру 200 мкм.

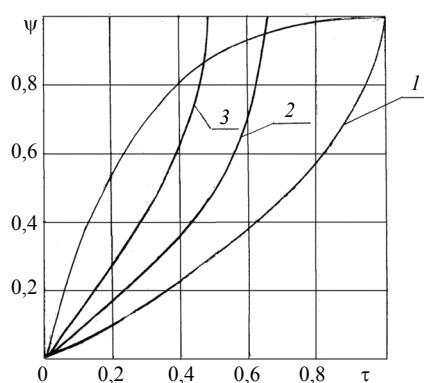


Рис. 2. График процесса испарения жидкости

Как следует из рис. 2, использование многофорсуночных головок для гашения пожаров на объектах снаряжения и расснаряжения боеприпасов более эффективно, чем использование монодисперсного распыла жидкости на очаг возгорания. Это обусловлено тем, что капли малого диаметра, попадая в зону дымовых газов, эффективно испаряются, а капли более крупных размеров проникают в зону пламени и более эффективно отводят тепло непосредственно из пламени. На рис. 3 представлена фотография отдельной форсуночной головки от двигателя ЖРД 9Д21, а на рис. 4 – фотография связки четырех форсуночных головок от того же двигателя, которые (связки форсуночных головок) эффективно использовались для организации процесса дегазации воды в системе городского централизованного водоснабжения [12].

При этом следует отметить, что при использовании форсуночных головок от ракет с ЖРД в системах пожаротушения необходимо убирать из конструкции форсуночной головки «исаевский крест» и минимально сокращать длину оставляемой юбки, поскольку на этих поверхностях будет происходить концентрация распыляемых форсунками капель жидкости. Более того, использование в системе вытеснения гасящей жидкости в форсуночные головки вытеснительной системы подачи с углекислотным рабочим телом позволяет повысить эффективность теплоотвода тепла из дымовых газов и пламени.

Мелкая дисперсность распыла гасящей жидкости отдельными форсунками позволяет подавать гасящую жидкость и во фронтальном направлении при гашении пожара, а подачу жидкости на гашении пожара организовать через гирлянду форсуночных головок, как это предлагается в заявке на изобретение № 2013117233 [21].

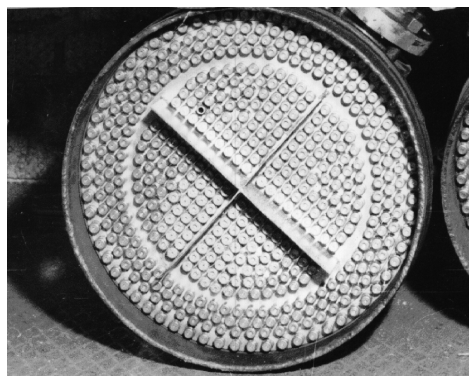


Рис. 3. Фотография отдельной форсуночной головки от ЖРД ракеты 8К14 [5, 6, 12]



Рис. 4. Фотография узла распыла горячей воды на дегазацию промышленного дегазатора [5, 6, 12]

### Библиографические ссылки

1. Гарпинченко А. М., Евтушкин Н. М., Кимстач И. Ф. Пожарная тактика. – Ч. II. Тушение пожаров на объектах народного хозяйства / под ред. И. Ф. Кимстача. – М.: Изд-во литер. по строительству. – 1971. – 287 с.
2. Тербнев В. В., Подгрудный А. В. Пожарная тактика: Основы тушения пожаров / под общ. ред. М. М. Верзилина. – М., 2009. – 505 с.
3. Кузнецов Н. П., Пономаренко В. А., Салтыков А. И. Конверсионное использование элементов утилизируемых ракет с ЖРД. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 188 с.
4. Кузнецов Н. П., Кургузкин М. Г., Николаев В. А. Утилизация ракет с ЖРД (на примере ракеты 8К14). – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 288 с.
5. Кудряшов Л. И., Гусаков Л. А. О влиянии конвективного теплообмена на теплоотдачу нагретых частиц весьма малого размера // Вопросы механики жидкостей и газов: докл. науч.-техн. конф.: Тр. Куйбышевского авиационного ин-та. – Вып. XXIV. – 1966. – С. 29–38.
6. Natarajan R., Ikosh A. K. Dynamics of vaporizing Drops injected into stagnant gas // 2 – Phase momentum, Heat and Mass Transfer in Chemical Processes and Engineering systems. Ed. Durst et al. – 1979. – Vol. 1. – P. 133–144.

7. Dumarque P., Audebert P. Evaporation convective d'une particule spherique liquide a faible nombre de eynolas dans un gaz a haute temperature // Ann. Phus (Fr). – 1988. – Vol. 13. – No. 3. Collouque No. 2. – P. 81–88.

8. Исследование процессов тепломассообмена с учетом пограничного слоя испаряющейся капли / Н. А. Дикий, А. Н. Мочалов, В. И. Павлищев [и др.] // Тр. НКИ. – 1975. – № 97.

9. Влияние дисперсности распыленной воды на интенсивности ее подачи при тушении пожара в закрытом объеме / В. В. Дударев, О. Г. Гороховых, С. Н. Бардушко, И. А. Шмулевцев, С. Н. Бобрышева // Науковий вісник Укр. – НДУПБ, 2009. – № 1(19).

10. Волков Е. Б., Головкин Л. Г., Сырицын Т. А. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Воениздат, 1970. – 590 с.

11. Лышевский А. С. Закономерности дробления жидкостей механическими форсунками давления. – Новочеркасск: РИО НПИ, 1961. – 185 с.

12. Техничко-экономические аспекты городского централизованного водоснабжения / Н. П. Кузнецов, В. А. Пономаренко, А. И. Салтыков, Е. В. Бухтулова. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. – 480 с.

13. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / под ред. проф. В. М. Кудрявцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 703 с.

14. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литер., 1962. – 564 с.

15. Численное исследование воздействия тонкораспыленной воды на турбулентное диффузионное пламя / А. А. Шумихин, А. И. Карпов, М. А. Корепанов, В. Б. Новожилов // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14. – Вып. 3. – С. 391–400.

16. Смирнов М. М. Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. – М.: Наука, 1964. – 205 с.

17. Элементарный учебник физики. – Т. 1. Механика. Теплота. Молекулярная физика / под ред. акад. Г. С. Ландсберга. – М.: Наука, 1971. – 655 с.

18. Сполдинг Д. Б. Горение и массообмен / пер. с англ. Р. Н. Гизатуллина и В. И. Ягодкина; под ред. В. Е. Дорошенко. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

19. Прудников А. Г., Волинский М. С., Сагалович В. Н. Процессы смесеобразования и горения в ракетных двигателях. – М.: Машиностроение, 1971. – 356 с.

20. Прудников А. П., Брычков Ю. Б., Маричев О. И. Интегралы и ряды. – М.: Наука, 1981. – 798 с.

21. Буравов А. Н., Бухтулова Е. В., Кузнецов Н. П. Способ пожаротушения и устройство для его осуществления: Заявка на предполагаемое изобретение РФ № 2013117233.

N. P. Kuznetsov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

A. N. Buravov, Applicant, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

E. V. Bukhtulova, PhD in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### On Definition of Water Spray Spectrum of LRE Injector Head in Firefighting

*The paper discusses the possibilities of the conversion applying the injector heads taken from salvageable liquid-propellant rocket engines, in the firefighting systems. The paper shows the possibility of approximating the drop spray spectrum by polynomial models.*

**Key words:** firefighting equipment, fine spray of liquid, spray spectrum, injector heads of salvageable liquid-propellant rocket engines.

УДК 621.69

**А. Н. Шельпяков**, кандидат технических наук, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

**К. А. Михалев**, аспирант, Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета имени М. Т. Калашникова

**В. Б. Куимов**, ООО «Завод НГО «Техновек», Воткинск

**Р. З. Закиров**, ООО «Завод НГО «Техновек», Воткинск

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНОГО СМЕСИТЕЛЯ

*Приводятся результаты исследований газожидкостного смесителя, влияния конструкции эжектора на параметры смешения.*

**Ключевые слова:** смеситель, моделирование, концентрация, эжектор.

**В**о многих отраслях, в том числе при добыче нефти, требуется создание мелкодисперсной газожидкостной смеси. Например, при измерении количества или расхода дебита скважины для обеспечения точности измерения требуется создание мелкодисперсной смеси. Кроме того, аналогичная задача возникает при создании калибровочных и тарировочных устройств. Однако созда-

ние и исследование работоспособности различных конструкций смесителей с использованием натуральных образцов требует очень больших материальных и временных затрат. Одним из современных методов исследования гидродинамических процессов является применение программных систем конечно-элементного анализа (например, ANSYS/CFX и FlowVision).