УДК 614.843.8

И.В. Качанов[1], И.В. Карпенчук[2], С.Ю. Павлюков[2] (Беларусь)
([1]Белорусский национальный технический университет,
[2]Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь;
e-mail: hidrokaf@bntu.by)

РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ИНЖЕКТОРЕ ОРОСИТЕЛЯ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Проведены теоретические исследования механики движения жидкости в оросителе пожарном с предварительной аэрацией огнетушащего вещества. Проведено интегральное решение уравнений движения газожидкостной смеси в диффузоре инжектора для аэрации огнетушащего состава.

Ключевые слова: системы пожаротушения, пена, инжектор, предварительная аэрация, спринклер.

I.V. Kachanau, I.V. Karpenchuk, S.Y. Pauliukou (Belarus)

SOLUTION OF DIFFERENTIAL EQUATIONS OF TWO-PHASE FLOW IN THE SPRINKLERS INJECTOR IN FIRE EXSTINGUISHING SYSTEM

Carried out theoretical studies of the mechanics of fluid motion in the fire sprinkler with pre-aeration of the extinguishing agent. A solution of integral equations of motion of the gas-liquid mixture in the diffuser for aeration injector extinguishing agent.

Key words: fire extinguishing systems, foam, injector, pre-aeration, sprinkler.

Одним из самых распространённых средств пассивной противопожарной защиты являются пенные установки автоматического пожаротушения, которые широко применяются в важнейших для Беларуси отраслях промышленности (нефтедобывающая, химическая, нефтехимическая, нефтеперерабатывающая, металлургическая, энергетическая и др.).

Проведенный литературный обзор показал, что перспективным методом повышения эффективности работы установок пенного пожаротушения (увеличение дисперсности воздушно-механической пены низкой кратности) является использование пенных оросителей с предварительной аэрацией огнетушащего вещества. Рабочий процесс данных оросителей детально не изучен и не регламентирован действующими техническими нормативно-правовыми актами. Таким образом, изучение протекания рабочих процессов, и разработка методик расчёта гидродинамических параметров оросителя с предварительной аэрацией огнетушащего вещества для автоматических установок пенного пожаротушения являются актуальными задачами.

С целью углублённого изучения движения двухфазной жидкости в вертикальном инжекторе записаны уравнения осредненного одномерного движения газожидкостной смеси в диффузоре [5]. При выводе уравнений движения были применены методы, использовавшиеся в [1, 2] для вывода уравнений движения газожидкостной смеси в круглой трубе.

Рассмотрим полученные дифференциальные уравнения движения двухфазной жидкости в диффузоре инжектора для аэрации огнетушащего состава:

$$g \cdot \rho_{\text{дф.}} - \frac{2\tau}{x \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} - \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} = \rho_{\text{дф.}} \cdot v \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x} + v \frac{1}{x^2} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\rho_{\text{дф.}} \cdot x^2 \cdot v\right), \tag{1}$$

$$\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \rho_{\text{дф.}} \cdot v \cdot x^2 = \text{const} = m_{\text{дф.}}. \tag{2}$$

Последний член уравнения (1) можно представить в виде:

$$\frac{v}{x^2} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\rho_{\text{дф}} \cdot x^2 \cdot v\right) = v^2 \cdot \frac{\mathrm{d}\rho_{\text{дф}}}{\mathrm{d}x} + \frac{2\rho \cdot v^2}{x} + \rho \cdot v \cdot \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}. \tag{3}$$

Тогда уравнение (1)примет вид:

$$g \cdot \rho_{\text{дф.}} \cdot \mathrm{d}x - \frac{2\tau \cdot \mathrm{d}x}{x \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} - \mathrm{d}p = v^2 \cdot \mathrm{d}\rho_{\text{дф.}} + \frac{2\rho_{\text{дф.}} \cdot v^2 \cdot \mathrm{d}x}{x} + \rho \cdot v \cdot \mathrm{d}v. \tag{4}$$

Проинтегрируем последнее уравнение:

$$g \cdot \rho_{\text{дф.}} \int_{x1}^{x2} \mathrm{d}x - \frac{2\tau}{\operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} \int_{x1}^{x2} \frac{\mathrm{d}x}{x} - \int_{p1}^{p2} \mathrm{d}p = v^2 \int_{\rho_{\text{дф.}1}}^{\rho_{\text{дф.}2}} \mathrm{d}\rho_{\text{дф.}} + 2\rho_{\text{дф.}} \cdot v^2 \int_{x1}^{x2} \frac{\mathrm{d}x}{x} + \rho_{\text{дф.}} \int_{v1}^{v2} v \cdot \mathrm{d}v. \tag{5}$$

После интегрирования и преобразований получим выражение, определяющее потери давления в диффузоре инжектора для аэрации огнетушащего состава:

$$\Delta p = \left(\frac{2 \cdot \tau}{x \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} + 2\rho_{\text{дф.}} \cdot v^2 \right) \ln \frac{x2}{x1} - v^2\left(\rho_{\text{дф.1}} - \rho_{\text{дф.2}}\right) - \frac{\rho_{\text{дф.}}}{2}\left(v_1^2 - v_2^2\right) - g \cdot \rho_{\text{дф.}} \cdot l, \tag{6}$$

где l – длина диффузора от начального (сжатого) сечения до начала цилиндрической части.

Проанализируем уравнение (6). Последний член этого уравнения представляет собой изменение давления в результате действия веса двухфазной жидкости в объёме диффузора на расчётном участке его длины. Поскольку вес двухфазной жидкости значительно меньше сил давления, его значением можно пренебречь. Плотность двухфазной жидкости $\rho_{\text{дф.}}$ представляет собой плотность потока жидкости в начальном сечении диффузора в сжатом сечении с диаметром d_0 и может быть принята равной плотности огнетушащего состава без газонасыщения, то есть $\rho_{\text{дф.}} = \rho$.

Скорость v_1,то есть скорость в начальном сечении можно принять равной скорости потока без газонасыщения в узком сечении на выходе из конфузора и определять её через объёмный расход рабочей среды:

$$v_1 = v_0 = \frac{4Q}{\pi \cdot d_0^2}, \tag{7}$$

где Q – объёмный расход огнетушащего состава;

d_0 – диаметр сжатого сечения.

Отношение x_2 / x_1 можно записать как D / d_0, где D – диаметр выходного сечения диффузора.

С учётом сделанных допущений уравнение (6) примет вид:

$$\Delta p = 2\left(\frac{\tau}{\mathrm{tg}\frac{\alpha_д}{2}} + \rho_{дф.} \cdot v^2\right)\ln\frac{D}{d_0} - v^2\left(\rho - \rho_{дф.}\right) - \frac{\rho_{дф.}}{2}\left(v_0^2 - v^2\right). \tag{8}$$

Проведём некоторые преобразования уравнения (8). Скорость среды, исходя из уравнения (2), можно представить в виде:

$$v = \frac{m_{дф.}}{\pi \mathrm{tg}^2 \frac{\alpha_д}{2} \cdot \rho_{дф.} \cdot x^2}. \tag{9}$$

Координату расчётного сечения x (с началом координат в точке схождения диффузора) можно записать так:

$$x = l + \frac{d_0}{2\mathrm{tg}\frac{\alpha_д}{2}}. \tag{10}$$

Поскольку масса жидкой фазы значительно больше массы воздушной фазы, сделаем допущения, что:

$$m_{дф.} \approx m, \tag{11}$$

то есть

$$m_{дф.} \approx \rho \cdot Q, \tag{12}$$

тогда формула (9) примет вид:

$$v = \frac{\rho \cdot Q}{\pi \mathrm{tg}^2 \frac{\alpha_д}{2} \rho_{дф.} \left(l + \frac{d_0}{2 \cdot tg\frac{\alpha_д}{2}}\right)^2}. \tag{13}$$

С учётом вышесказанного и выражения (7) последний член уравнения (8) можно записать так:

$$\frac{\rho_{\text{дф.}}}{2}\left(v_0^2 - v^2\right) = \frac{8 \cdot Q^2 \cdot \rho_{\text{дф.}}}{\pi^2}\left[\frac{1}{d_0^4} - \frac{\rho^2}{\rho_{\text{дф}}^2\left(2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2} + d_0\right)^4}\right]. \qquad (14)$$

После сделанных допущений, преобразований и подстановок имеем следующее уравнение:

$$\Delta p = 2\ln\frac{D}{D_0}\left[\frac{\tau}{\operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} + \frac{16\rho^2 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot \rho_{\text{дф.}}\left(2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2} + d_0\right)^4}\right] -$$
$$- \frac{\rho^2 Q^2\left(\rho - \rho_{\text{дф.}}\right)}{\pi^2 \rho^2_{\text{дф.}}\left(2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2} + d_0\right)^4} - \frac{8\rho_{\text{дф.}} \cdot Q^2}{\pi^2}\left[\frac{1}{d_0^4} - \frac{\rho^2}{\rho_{\text{дф.}}\left(2 \cdot l \cdot \operatorname{tg}\frac{\alpha_{\text{д}}}{2} + d_0\right)^4}\right]. \qquad (15)$$

Плотность газожидкостной смеси двухфазного потока в диффузоре инжектора непостоянна и является функцией давления:

$$\rho_{\text{дф.}} = \rho_{\text{дф.}}(p). \qquad (16)$$

Плотность двухфазного газожидкостного потока определим следующим образом. При атмосферном давлении плотность пены можно представить в виде:

$$\rho_{\text{дф.}} = \frac{\rho_{\text{воз.}} \cdot (n-1) + \rho}{n}, \qquad (17)$$

где $\rho_{\text{воз.}}$ – плотность воздуха;

n – заданная кратность пены.

Вследствие сжимаемости воздуха кратность пены в диффузоре будет зависеть от давления. В общем случае кратность пены может быть записана так:

$$n = \frac{V_{\text{воз.}} + V}{V} = 1 + \frac{V_{\text{воз.}}}{V}, \qquad (18)$$

где $V_{\text{воз.}}$ – объём воздуха;

V – объём раствора пенообразователя.

Объём воздуха для двухфазного потока в диффузоре может быть представлен в виде:

$$V_{\text{воз.}} = \frac{V_{\text{воз.}}^{\text{ат}} \cdot p_{\text{ат}}}{p_{\text{абс}}} = \frac{V_{\text{воз.}}^{\text{ат}} \cdot p_{\text{ат}}}{\left(p + p_{\text{ат}}\right)}, \tag{19}$$

где $V_{\text{воз.}}^{\text{ат.}}$ – объём воздуха в пене при атмосферном давлении;

$p_{\text{ат}}$ – атмосферное давление;

$p_{\text{абс}}$ – абсолютное давление;

p – давление (манометрическое) в расчётном сечении диффузора.

Тогда кратность пены при давлении в расчётном сечении составит:

$$n_p = 1 + \frac{V_{\text{воз.}} \cdot p_{\text{ат}}}{V\left(p + p_{\text{ат}}\right)}, \tag{20}$$

или

$$n_p = 1 + \left(n - 1\right)\frac{p_{\text{ат}}}{\left(p + p_{\text{ат}}\right)}. \tag{21}$$

С учётом выражения (21), плотность двухфазного потока в расчётном сечении составит:

$$\rho_{\text{дф.}} = \rho_{\text{воз.}}\left(1 - \frac{1}{1 + \left(n - 1\right)\dfrac{p_{\text{ат}}}{\left(p + p_{\text{ат}}\right)}}\right) + \frac{\rho\left(p + p_{\text{ат}}\right)}{p + n \cdot p_{\text{ат}}}. \tag{22}$$

Поскольку плотность воздуха (в диапазоне расчётных давлений 0,05-1,0 *МПа*) значительно меньше плотности рабочей жидкости, первым членом выражения (22) можно пренебречь, тогда выражение плотности двухфазного потока в зависимости от давления примет вид:

$$\rho_{\text{дф.}} = \frac{\rho\left(p + p_{\text{ат}}\right)}{p + n \cdot p_{\text{ат}}}. \tag{23}$$

Таким образом, в уравнении (15), которое решает основную задачу расчёта инжектора – определение потерь давления при движении двухфазного потока в диффузоре, остается неопределенным касательное напряжение на стенке диффузора τ. Это напряжение определим так [4]:

$$\tau = \rho_{\text{дф.}} \cdot v_*, \tag{24}$$

где v_* – динамическая скорость (или скорость касательного напряжения на стенке) [4].

Используем полуэмпирическую теорию Прандтля для турбулентного потока, имеющую наибольшую известность. Согласно этой теории касательное напряжение по всему поперечному сечению потока одинаково и равно напряжению на стенке (рассматривается течение в трубе круглого сечения). Однако при неравномерном движении жидкости (течение в диффузоре) касательные напряжения на стенке диффузора и по сечению будут отличными от напряжений при равномерном движении. Сделаем допущение, что поскольку сила сопротивления пропорциональна площади эпюр касательных напряжений на стенках каналов при равномерном и неравномерном движениях, эти площади равны в соответствии с рис. 1, а касательные напряжения пропорциональны радиусу канала.

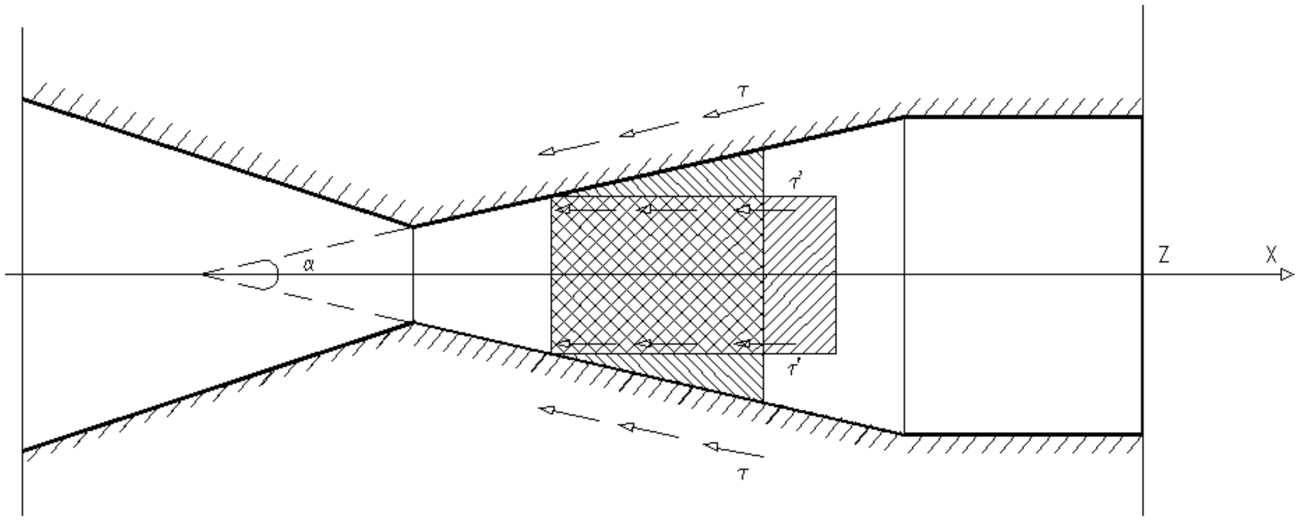

Рис. 1. Схема преобразования касательных напряжений при неравномерном движении газожиткостного потока

Тогда можно записать следующее уравнение:

$$2\pi \cdot \tau' \cdot \tau' = \pi\left(\tau \cdot \sin\frac{\alpha_д}{2} + \tau' + \tau'\right)\tau, \tag{25}$$

где τ' – касательное напряжение при равномерном движении газожиткостного потока.

Решив уравнение (25) относительно τ, касательное напряжение на стенке диффузора можно представить в виде:

$$\tau = \frac{\sqrt{1 + 2\sin\frac{\alpha_д}{2}} - 1}{\sin\frac{\alpha_д}{2}} \cdot \tau', \tag{26}$$

или

$$\tau = k \cdot \tau', \tag{27}$$

где k – коэффициент, учитывающий неравномерность движения и зависящий от угла конусности диффузора:

$$k = \frac{\sqrt{1 + 2\sin\frac{\alpha_д}{2}} - 1}{\sin\frac{\alpha_д}{2}}. \tag{28}$$

Формулу (28) методом наименьших квадратов можно привести к виду:

$$k = 0{,}996^{\alpha}, \tag{29}$$

который удобен для вычислений.

Для определения динамической скорости воспользуемся формулой, полученной по результатам исследований И. Никурадзе [4]:

$$v = v_* \left(5.75 \lg \frac{a}{\Delta} + 8.5 \right), \tag{30}$$

откуда

$$v_* = \frac{v}{\left(5.75 \lg \frac{a}{\Delta} + 8.5 \right)}, \tag{31}$$

где Δ – эквивалентная шероховатость;

a – расстояние от стенки канала до слоя, движущегося со средней скоростью v [4].

Для определения значения a воспользуемся законом "одной седьмой" Кармана [4]:

$$\frac{v}{v_{\max.}} = \left(\frac{a}{r} \right)^{1/7}, \tag{32}$$

где $v_{\max.}$ – максимальная скорость в канале.

При турбулентном режиме $v \,/\, v_{\max.} = 0{,}75\text{-}0{,}9$ [4].

Таким образом, проведено интегральное решение уравнений движения газожидкостной смеси в диффузоре инжектора для аэрации огнетушащего состава. При этом показано, что полученное уравнение (15) для определения потерь давления в диффузоре решается однозначно и может быть использовано при гидравлическом расчёте инжекторов для аэрации огнетушащего состава. Решая обратную задачу и задавая потери давления в инжекторе, можно определить необходимый расход огнетушащего состава (раствора пенообразователя) для автоматических установок пожаротушения.

Литература

1. ***Кутателадзе С.С., Стырикович М.М.*** Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. 296 с.

2. ***Уравнения*** движения кавитационного двухфазного потока в диффузоре пеносмесителя ПС-5 / Карпенчук И.В. и др. // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2005. № 7 (17). Мн.: НИИ пожарной безопасности и проблем ЧС МЧС Беларуси. С. 154–160.

3. ***Rayleigh O.M.*** On the pressure developed in a the collapse ofashericel cavitg. Phyl. Mag., 1917, V. 34, № 200. P. 94–98.

4. ***Рабинович Е.З.*** Гидравлика. М.: Недра, 1980. 278 с.

5. ***Павлюков С.Ю., Ерома С.П., Пармон В.В.*** Уравнения движения двухфазного потока в диффузоре инжектора-аэратора для газонасыщения огнетушащего вещества в автоматических установках пожаротушения // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. в 2 ч. Ч. 1. Мн.: КИИ, 2012. С. 224-226.

Статья опубликована 18 декабря 2012 г.