

УДК 614.843.8

МЕХАНИКА ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ДИФFUЗОРЕ ОРОСИТЕЛЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ГАЗОНАСЫЩЕНИЕМ

Качанов И.В.* , д.т.н., профессор, Карпенчук И.В.** , к.т.н., доцент, Павлюков С.Ю.**

*Белорусский национальный технический университет

**Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

*e-mail: hidrokaф@bntu.by

**e-mail: asb@kii.gov.by

Получены основные уравнения движения двухфазного потока, которая позволяет рассчитывать распределение осредненного давления в диффузоре по длине, а также определять потери давления в диффузоре, что дает возможность проектировать выходной участок гидравлической системы с гидродинамическим сопротивлением, обеспечивающим работу инжектора в заданном режиме.

Governing equations of motion of two-phase flow, which allows to calculate the distribution of the mean pressure in the diffuser length, as well as to determine the pressure loss in the diffuser, which makes it possible to design the output section of the hydraulic system of hydrodynamic resistance, offers an injector in a given mode.

(Поступила в редакцию 30 июня 2012 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Установки автоматического пожаротушения являются одним из самых эффективных средств пассивной противопожарной защиты. Применение таких систем, где огнетушащее вещество при возгорании автоматически подается в защищаемое помещение, позволяет ликвидировать пожар на ранней стадии. В качестве огнетушащего вещества в таких установках используются: вода, пена, газ, порошок, аэрозоль.

Наибольшее распространение как в Беларуси, так и за рубежом получили автоматические установки пожаротушения, в которых в качестве огнетушащего вещества используются вода или пена. В Республике Беларусь доля пенных установок в общем объеме составляет около 15 %.

Установки пенного пожаротушения применяются для защиты промышленных предприятий, складов, нефтехранилищ, транспорта и т. д. Это обусловлено такими достоинствами тушения с применением пены как: существенное сокращение расхода воды, тушение пожаров больших площадей, объемное тушение, повышенная (по сравнению с водой) смачивающая способность. Кроме того, при тушении пеной не требуется одновременное перекрытие всего зеркала горения, поскольку пена способна растекаться по поверхности горящего материала.

К числу свойств пен, которые связаны с их огнетушащей способностью, относятся: кратность, стойкость, вязкость и дисперсность.

Кратностью пены называют отношение объема пены к объему раствора, из которого она получена. Кратность показывает, сколько газа содержится в пене, полученной из определенного объема жидкости. Чем больше кратность, тем легче пена и тем больше заключено в ней газа. Пены бывают низкой (менее 10), средней (10-100) и высокой (более 100) кратности.

Средняя интенсивность разрушения пены показывает, насколько уменьшается единица объема пены за единицу времени. Для оценки качества пены используется обычно не средняя интенсивность разрушения, а величина, обратная ей, которая называется стойкостью пены.

Вязкость характеризует способность пены к растеканию по поверхности. Это свойство весьма важно, так как при тушении пламени пена в ряде случаев должна пройти весьма большое расстояние от места подачи.

Дисперсность пены дает представление о степени измельченности пузырьков пены и определяется их размером. Пена полидисперсна, т. е. состоит из пузырьков различных размеров. При разрушении пены дисперсность ее меняется. Изменение размеров пузырьков протекает неодинаково в разных местах слоя пены. На поверхности пены происходит более быстрое укрупнение пузырьков, чем в глубинных слоях.

В настоящее время для получения пены низкой кратности в автоматических установках пенного пожаротушения наиболее широко применяются (до 90 % от общего числа пенных оросителей) универсальные пенные оросители. Повышение эффективности пенных оросителей и эффективности пожаротушения может быть достигнуто предварительной аэрацией (газонасыщением) огнетушащего вещества, что необходимо для повышения кратности и дисперсности пены – основных параметров, влияющих на пожаротушение.

Проведенные в начале 80-х годов работниками ВНИИПО МВД России (И.Ф. Безродный, В.А. Меркулов, В.М. Кучер, В.Ч. Реутт) исследования по изучению основных характеристик пены, влияющих на огнетушащую эффективность, позволяют сделать вывод, что одной из важных характеристик пены, влияющей на скорость ее разрушения на поверхности горючего, является дисперсность. По результатам проведенных опытов установлено, что при малой плотности теплового потока скорость разрушения пены прямо пропорциональна размеру пузырьков в пене, а при большой – не зависит от их размера. Гидродинамические параметры пенного слоя зависят от дисперсности. Уменьшение размеров пузырьков приводит к увеличению огнетушащей эффективности только до некоторого предела, при котором еще возможно хорошее растекание до горячей поверхности. Принимая во внимание то обстоятельство, что скорость разрушения пены зависит от плотности теплового потока, можно утверждать, что огнетушащая эффективность пены при неразвившихся пожарах (пожарах с тепловым потоком малой плотности), будет напрямую зависеть от дисперсности пены. Учитывая, что автоматические установки пожаротушения предназначены для обнаружения и локализации пожара на ранней стадии, т. е. на той стадии, когда плотность теплового потока будет невелика, увеличение дисперсности пены в данных установках повысит их эффективность.

Дисперсность определяется типом пеногенерирующей аппаратуры. Необходимо подчеркнуть, что до настоящего времени задача создания отечественного оросителя с предварительной аэрацией огнетушащего вещества для автоматических установок пенного пожаротушения не решена. Это можно объяснить тем, что рабочий процесс таких оросителей детально не изучен, он также и не регламентирован действующими техническими нормативно-правовыми актами. В этой связи представляет интерес провести исследования механики движения жидкости в данных оросителях.

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ДИФFUЗОРЕ

Сформулируем основные уравнения движения двухфазной жидкости в вертикальном инжекторе. Воспользуемся представлением о движении двухфазных сред, предложенном в [1, 2]. Совместное движение газа и жидкости многообразно. Крайними формами является движение двух сплошных параллельных потоков, взаимодействующих только по одной непрерывной поверхности раздела, и движение потока пены, в которой обе фазы образуют сложную и неустойчивую структуру. Специфической особенностью рассматриваемой среды является тот факт, что даже в случае, когда обе фазы практически можно считать несжимаемыми, газожидкостная система ведет себя как сжимаемая жидкость.

Схема течения двухфазной жидкости в диффузоре инжектора представлена на рис. 1.

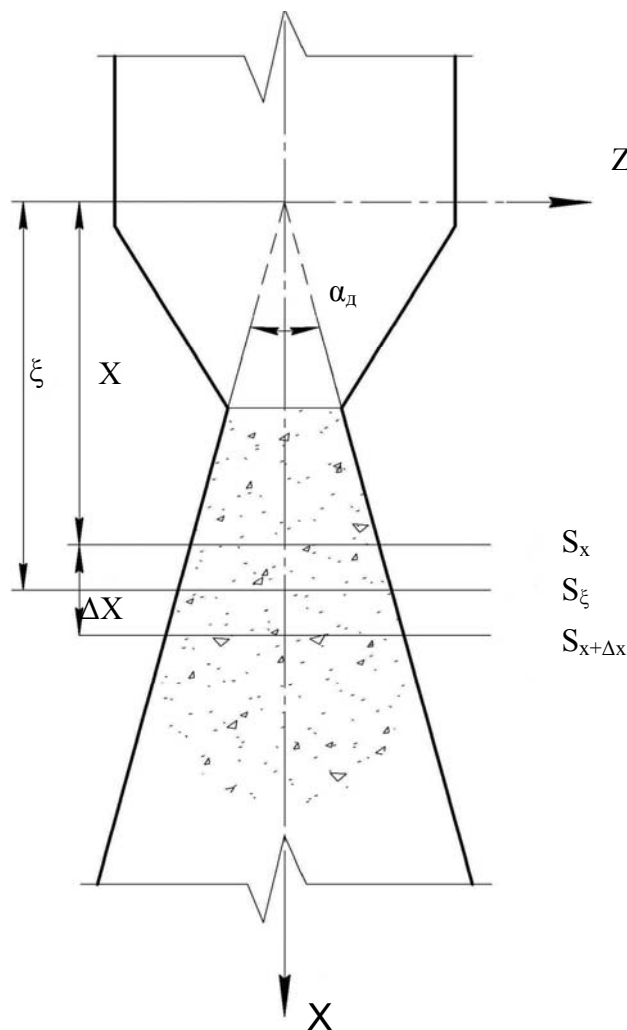


Рисунок 1 – Схема течения двухфазной жидкости в диффузоре инжектора

Как показано на рисунке, диффузор расположен вертикально. Обозначим площадь произвольного сечения диффузора инжектора через S .

Известно, что газосодержание φ определяется по формуле [1, 2]:

$$\varphi(x_0, t_0) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \varphi'(x_0, t_0) dt, \quad (1)$$

где $\varphi'(x_0, t_0)$ – доля площади S_{x_0} , занятая газообразной фракцией в момент времени t ; $\Delta t \gg 1/n_{\text{ср}}$ ($n_{\text{ср}}$ – средняя частота прохождения отдельных образований газообразной фракции через сечение S_{x_0}), поэтому в дальнейшем будем рассматривать двухфазный поток в диффузоре как движение сжимаемой жидкости.

Определим силы, действующие на элементарный участок диффузора, заключенный между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$, а также их проекции на ось Ox .

Массовые силы:

$$G = g \iiint_V \rho_{\text{дф.}} dV = g \int_x^{x+\Delta x} d\xi \int_{S_x} \rho_{\text{дф.}} dydz, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения;

$\rho_{\text{дф.}}$ – плотность двухфазной жидкости ($\rho_{\text{дф.}} = \rho_{\text{дф.}}(x, p)$);

V – объем диффузора между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$;

ξ – координата промежуточного сечения между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$.

При вертикально расположенном инжекторе массовые силы составят:

$$G = g \int_x^{x+\Delta x} \rho_{\text{дф.}} S_\xi d\xi = g \int_x^{x+\Delta x} \pi \cdot \text{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \xi^2 \rho_{\text{дф.}} d\xi, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{д}}$ – угол конусности диффузора.

Силы трения:

$$\vec{T} = \iint_{S_{\text{бок.}}} \vec{\tau} dS = \int_x^{x+\Delta x} \tau \frac{d\xi}{\cos \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} \int_{l_\xi} \vec{e}_\tau dl, \quad (4)$$

где $S_{\text{бок.}}$ – боковая поверхность усеченного конуса между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$;

τ – касательные напряжения на стенке диффузора;

l_ξ – длина окружности радиуса $r = \xi \cdot \text{tg}(\alpha_{\text{д}}/2)$;

\vec{e}_τ – вектор единичной длины, сонаправленный с $\vec{\tau}$.

$$\int_{l_\xi} \vec{e}_\tau dl = -2 \cdot \pi \cdot \vec{e}_0 \cdot \cos \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \text{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \xi, \quad (5)$$

где \vec{e}_0 – вектор единичной длины, сонаправленный с осью Ox .

В проекции на ось Ox сила трения составит:

$$T = - \int_x^{x+\Delta x} 2 \cdot \pi \cdot \text{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \xi \cdot \tau d\xi. \quad (6)$$

При определении сил реакции стенок имеем:

$$\vec{N} = \iint_{S_{\text{бок.}}} \vec{\sigma} dS, \quad (7)$$

где σ – нормальные напряжения на стенке диффузора.

В проекции на ось Ox аналогично, как и в случае определения сил трения, получим:

$$N = \int_x^{x+\Delta x} 2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_d}{2} \cdot \xi \cdot \sigma d\xi. \quad (8)$$

Определяем силы давления, которые действуют на площади сечения S_x и $S_{x+\Delta x}$, ограничивающие участок Δx :

$$\begin{aligned} F &= p(x, t) \cdot S_x - p(x + \Delta x, t) \cdot S_{x+\Delta x} = \\ &= -S_{x+\Delta x} \cdot [p(x + \Delta x, t) - p(x, t)] + p(x, t) \cdot (S_x - S_{x+\Delta x}), \end{aligned} \quad (9)$$

$$F = -\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_d}{2} \cdot \left[(x + \Delta x)^2 \cdot \int_x^{x+\Delta x} \frac{\partial p}{\partial x} d\xi + p \cdot (2 \cdot x \cdot \Delta x + (\Delta x)^2) \right],$$

где p – давление в перпендикулярных оси Ox сечениях.

Сделаем допущение, что проскальзывание фаз отсутствует, т. е. скорости фаз равны.

Для элементарного участка диффузора, заключенного между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$ (т. е. $\Delta x \ll 1$, при этом заменяем Δx на dx), запишем закон сохранения импульса. Для этого используем формулы (3)-(9). Учтем, что для непрерывной функции

$$\int_x^{x+\Delta x} f(\xi) d\xi = f(x) dx \quad (10)$$

(с точностью до членов 2-го порядка малости). Пренебрегая членами порядка малости больше единицы, запишем изменение импульса для массы двухфазной жидкости от сечения S_x и $S_{x+\Delta x}$ при пренебрежении обменом массы между фазами:

$$\begin{aligned} &g \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_d}{2} \cdot x^2 \cdot \rho_{дф} \cdot dx - 2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_d}{2} \cdot x \cdot \tau \cdot dx + \\ &+ 2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_d}{2} \cdot x \cdot \sigma \cdot dx - \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_d}{2} \cdot \left(x^2 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx + 2 \cdot x \cdot p \cdot dx \right) = \\ &= (m_{дф.} + dm_{дф.}) \cdot (v + dv) - m_{дф.} \cdot v, \end{aligned} \quad (11)$$

где $m_{дф.}$ – массовый расход двухфазной жидкости;
 v – скорость двухфазной жидкости.

По Релею [3] вследствие быстротечности процесса через поверхность пузырьков отток массы практически не происходит.

Для преобразований используем следующие соотношения:

$$m_{\text{дф.}} = \pi \cdot \text{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \left[-x^2 \cdot \frac{\partial(\rho_{\text{дф.}})}{\partial t} dt + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{дф.}} \cdot v \cdot x^2) dx \right],$$

$$\frac{dv}{dx} = \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (12)$$

$$dm_{\text{дф.}} = 0 \text{ (постоянство суммарного массового расхода),}$$

Пренебрегая величинами 2 и 3-го порядка малости, из уравнения (11) после преобразования получим:

$$g \cdot \rho_{\text{дф.}} + \frac{2 \cdot \sigma}{x} - \frac{2 \cdot \tau}{x \cdot \text{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2 \cdot p}{x} = \rho_{\text{дф.}} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) +$$

$$+ v \left[-\frac{\partial \rho_{\text{дф.}}}{\partial t} + \frac{1}{x^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{дф.}} \cdot x^2 \cdot v) \right]. \quad (13)$$

К полученному уравнению добавим уравнение неразрывности, которое в данном случае примет следующий вид:

$$\pi \cdot \text{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \left[x^2 \cdot \frac{\partial \rho_{\text{дф.}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (x^2 \cdot \rho_{\text{дф.}} \cdot v) \right] = 0. \quad (14)$$

В случае установившегося движения уравнения (13) и (14) примут следующий вид:

$$g \cdot \rho_{\text{дф.}} - \frac{2 \cdot \tau}{x \cdot \text{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} + \frac{2 \cdot \sigma}{x} - \frac{dp}{dx} - \frac{2 \cdot p}{x} =$$

$$\rho_{\text{дф.}} \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} + v \cdot \frac{1}{x^2} \cdot \frac{d}{dx} (\rho_{\text{дф.}} \cdot x^2 \cdot v); \quad (15)$$

$$\pi \cdot \text{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \rho_{\text{дф.}} \cdot v \cdot x^2 = \text{const} = m_{\text{дф.}}. \quad (16)$$

В результате получена незамкнутая система двух уравнений с пятью неизвестными ($\tau, \sigma, p, v, \rho_{\text{дф.}}$), описывающих движение газо-жидкостной смеси в диффузоре инжектора.

Далее рассмотрим случай установившегося движения жидкости в диффузоре инжектора с малыми углами конусности ($\alpha < 15^\circ$).

Поскольку диффузор расположен вертикально и рабочие давления много больше гидростатического давления в сечении диффузора, будем считать давление в сечении диффузора одинаковым [4]. Вследствие этого нормальные напряжения на стенке можно принять равным значению давления в сечении. Тогда уравнение (15) примет следующий вид:

$$g \cdot \rho_{\text{дф.}} - \frac{2 \cdot \tau}{x \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} - \frac{dp}{dx} = \rho_{\text{дф.}} \cdot v \frac{dv}{dx} + v \cdot \frac{1}{x^2} \cdot \frac{d}{dx} (\rho_{\text{дф.}} \cdot x^2 \cdot v), \quad (17)$$

или

$$g \cdot \rho_{\text{дф.}} - \frac{2 \cdot \tau}{x \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} - \frac{dp}{dx} = \rho_{\text{дф.}} \cdot v \frac{dv}{dx} + \frac{2\rho_{\text{дф.}} \cdot v^2}{x}. \quad (18)$$

Полученные уравнения осредненного по времени движения газожидкостной смеси в диффузоре позволяют рассчитывать распределение осредненного давления в диффузоре по его длине, а также определять давление на ее границе в конце диффузора [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система уравнений (16) и (18) описывает движение двухфазного потока в диффузоре инжектора. Решение этих уравнений позволит в дальнейшем определять потери давления в инжекторе, его геометрические характеристики и гидродинамические параметры. Для элементарного участка диффузора, заключенного между сечениями, записан закон сохранения импульса и уравнение неразрывности. Значение газосодержания задается в зависимости от кратности пены.

Таким образом, получены основные уравнения движения двухфазного потока, отличающиеся неравномерным характером движения газожидкостной смеси в диффузоре инжектора, которые позволят рассчитывать распределение осредненного давления в диффузоре по длине, а также определять потери давления в диффузоре, что даст возможность проектировать выходной участок гидравлической системы с гидродинамическим сопротивлением, обеспечивающим работу инжектора в заданном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.М. Стырикович. – М. : Энергия, 1976. – 296 с.
2. Уравнения движения кавитационного двухфазного потока в диффузоре пеносмесителя ПС-5 / И.В. Карпенчук [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2005. – № 7 (17). – С. 154–160.
3. Rayleigh, O.M. On the pressure developed in the collapse of a spherical cavity. *Phyl. Mag.*, 1917, V. 34, N 200. – P. 94–98.
4. Рабинович, Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М. : Недра, 1980. – 278 с.
5. Павлюков, С.Ю. Уравнения движения двухфазного потока в диффузоре инжектора-аэратора для газонасыщения огнетушащего вещества в автоматических установках пожаротушения / С.Ю. Павлюков, С.П. Ерома, В.В. Пармон // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 1. – Мн. : КИИ, 2012. – С. 224–226.