

И.В. Качанов¹, И.В. Карпенчук², С.Ю. Павлюков² (Беларусь)

(¹Белорусский национальный технический университет,

²Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь;

e-mail: hidrokaf@bntu.by)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ДИФфуЗОРЕ ОРОСИТЕЛЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ГАЗОНАСЫЩЕНИЕМ РАСТВОРА ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ

Разработана математическая модель двухфазного потока, которая позволяет рассчитывать распределение осреднённого давления в диффузоре по длине, а также определять потери давления в диффузоре, что даёт возможность проектировать выходной участок гидравлической системы с гидродинамическим сопротивлением, обеспечивающим работу инжектора в заданном режиме.

Ключевые слова: ороситель, диффузор, инжектор, двухфазный поток.

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

MATHEMATICAL MODEL OF TWO-PHASE FLOW IN THE DIFFUSER SPRINKLERS PRE-GAS-SATURATED SOLUTION OF FOAMING AGENT

A mathematical model 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.

Key words: sprinkler, diffuser, injector, two-phase flow.

Установки автоматического пожаротушения являются одним из самых эффективных средств пассивной противопожарной защиты.

Применение таких систем, где при возгорании огнетушащее вещество автоматически подаётся в защищаемое помещение, позволяет ликвидировать пожар на ранней стадии. В качестве огнетушащего вещества в таких установках используются вода, пена, газ, порошок, аэрозоль.

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

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

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 низкой кратности. Повышение эффективности пенных оросителей и эффективности пожаротушения может быть достигнуто предварительной аэрацией (газонасыщением) огнетушащего вещества для повышения кратности и дисперсности пены как основных параметров, влияющих на пожаротушение.

До настоящего времени задача создания отечественного оросителя с предварительной аэрацией огнетушащего вещества для автоматических установок пенного пожаротушения не решена. Это можно объяснить тем, что до настоящего времени процесс функционирования данных оросителей детально не изучен и не регламентирован действующими техническими нормативно-правовыми актами. В этой связи представляют интерес исследования механики движения жидкости в данных оросителях.

Проведённые исследования основных характеристик пены, влияющих на огнетушащую эффективность, позволяют сделать вывод, что одной из важных характеристик пены, влияющей на скорость её разрушения на поверхности горючего, является дисперсность, которая определяется типом пеногенерирующей аппаратуры. Гидродинамические параметры пенного слоя зависят от дисперсности. Уменьшение размеров пузырьков приводит к увеличению огнетушащей эффективности только до некоторого предела, при котором ещё возможно хорошее растекание до горячей поверхности. Принимая во внимание зависимость плотности теплового потока от скорости разрушения пены, можно сделать вывод, что огнетушащая эффективность пены при неразвившихся пожарах (пожарах с тепловым потоком малой плотности) зависит от дисперсности пены.

Проведём теоретическое исследование движения двухфазной жидкости в вертикальном инжекторе. Воспользуемся методом, предложенном в [1, 2].

Выберем систему координат, как указано на рис. 1.

Обозначим площадь сечения диффузора инжектора через S .

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

Массовые силы:

$$G = g_x \iiint_V \rho_{\text{дф.}} dV = g_x \int_x^{x+\Delta x} d\xi \int_{S_x} \rho_{\text{дф.}} dy dz, \quad (1)$$

где g_x – проекция ускорения свободного падения на ось Ox (принимая расположение диффузора вертикальным, $g_x = g$);

$\rho_{\text{дф.}}$ – плотность двухфазной жидкости;

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

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

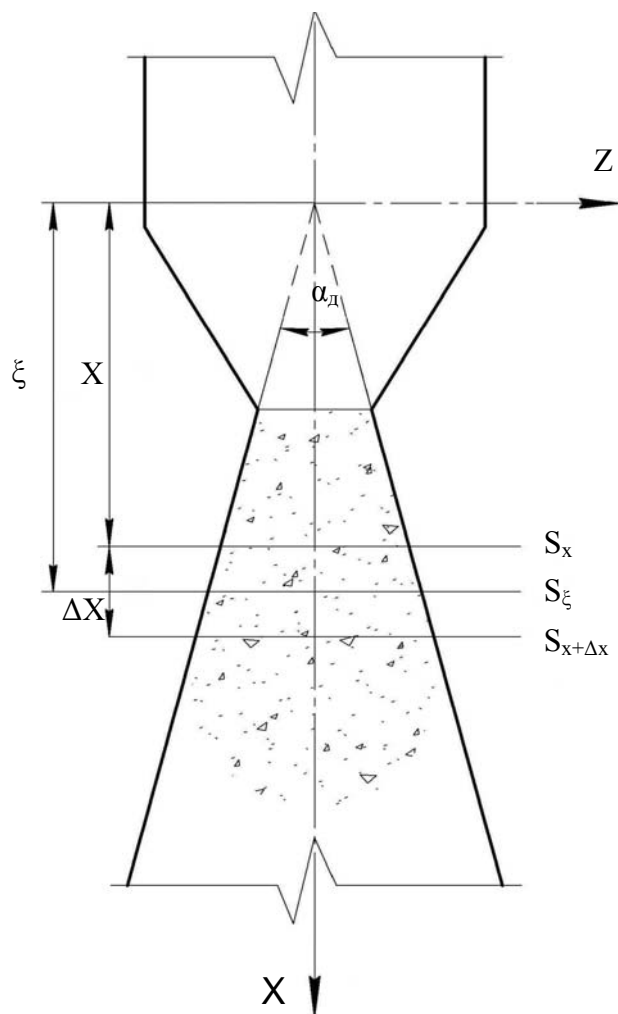


Рис. 1. Схема течения двухфазной жидкости в диффузоре инжектора

В отличие от случая, рассмотренного в [1, 2], где массовые силы в проекции на ось Ox обращались в ноль, в данном случае при вертикально расположенном инжекторе массовые силы составят:

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

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

Силы трения:

$$\vec{T} = \iint_{S_{\text{бок.}}} \vec{\tau} dS = \int_x^{x+\Delta x} \tau \frac{d\xi}{\cos \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} \int_{l_{\xi}} \vec{e}_{\tau} dl, \quad (3)$$

где $S_{\text{бок.}}$ – боковая поверхность усечённого 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 $\vec{\tau}$.

$$\int_{l_{\xi}} \vec{e}_{\tau} dl = -2 \cdot \pi \cdot \vec{e}_0 \cdot \cos \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \text{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \xi, \quad (4)$$

где $\vec{e}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ – вектор единичной длины, сонаправленный с осью Ox .

В проекции на ось Ox сила трения составит:

$$T = - \int_x^{x+\Delta x} 2 \cdot \pi \cdot \text{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \xi \cdot \tau d\xi. \quad (5)$$

При определении сил реакции стенок имеем:

$$\vec{N} = \iint_{S_{\text{бок}}} \vec{\sigma} dS, \quad (6)$$

где σ – нормальные напряжения на стенке диффузора.

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

$$N = \int_x^{x+\Delta x} 2 \cdot \pi \cdot \text{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \xi \cdot \sigma d\xi. \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} F &= p(x, t) \cdot S_x - p(x + \Delta x, t) \cdot S_{x+\Delta x} = \\ &= -S_{x+\Delta x} \cdot [p(x + \Delta x, t) - p(x, t)] + p(x, t) \cdot (S_x - S_{x+\Delta x}), \end{aligned} \quad (8)$$

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

где p – давление в перпендикулярных оси Ox сечениях.

Сделаем допущение, что проскальзывание фаз отсутствует, то есть скорости фаз равны.

Для элементарного участка диффузора, заключённого между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$ (то есть $\Delta x \ll 1$, при этом заменяем Δx на dx), запишем закон сохранения импульса. Для этого используем формулы (2)-(8). Учитывая, что для непрерывной функции

$$\int_x^{x+\Delta x} f(\xi) d\xi = f(x) dx \quad (9)$$

(с точностью до членов 2-го порядка малости), пренебрегая членами порядка малости больше единицы, запишем:

$$\begin{aligned}
& g \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot x^2 \cdot \rho_{\text{дф}} \cdot dx - 2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot x \cdot \tau \cdot dx + \\
& + 2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot x \cdot \sigma \cdot dx - \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \left(x^2 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx + 2 \cdot x \cdot p \cdot dx \right) = \quad (10) \\
& = (m_{\text{дф}} + dm_{\text{дф}}) \cdot (v + dv) - m_{\text{дф}} \cdot v,
\end{aligned}$$

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

В правой части уравнения (10) записана скорость изменения импульса от сечения S_x к $S_{x+\Delta x}$, пренебрегая обменом массы между фазами (по Релею [3] вследствие быстротечности процесса через поверхность пузырьков отток массы практически не происходит).

Для преобразований используем следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
m_{\text{дф}} &= \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \left[-x^2 \cdot \frac{\partial(\rho_{\text{дф}})}{\partial t} dt + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{дф}} \cdot v \cdot x^2) dx \right], \\
\frac{dv}{dx} &= \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (11)
\end{aligned}$$

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

Пренебрегая величинами 2-го и 3-го порядка малости, из уравнения (10) после преобразования получим:

$$\begin{aligned}
g \cdot \rho_{\text{дф}} + \frac{2 \cdot \sigma}{x} - \frac{2 \cdot \tau}{x \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2 \cdot p}{x} &= \rho_{\text{дф}} \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\
& + v \left[-\frac{\partial \rho_{\text{дф}}}{\partial t} + \frac{1}{x^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\text{дф}} \cdot x^2 \cdot v) \right]. \quad (12)
\end{aligned}$$

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

$$\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \left[x^2 \cdot \frac{\partial \rho_{\text{дф}}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (x^2 \cdot \rho_{\text{дф}} \cdot v) \right] = 0. \quad (13)$$

В случае установившегося движения уравнения (12) и (13) примут следующий вид:

$$g \cdot \rho_{\text{дф}} - \frac{2 \cdot \tau}{x \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} + \frac{2 \cdot \sigma}{x} - \frac{dp}{dx} - \frac{2 \cdot p}{x} = \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
\rho_{\text{дф}} \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} + v \cdot \frac{1}{x^2} \cdot \frac{d}{dx} (\rho_{\text{дф}} \cdot x^2 \cdot v); \\
\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_{\text{д}}}{2} \cdot \rho_{\text{дф}} \cdot v \cdot x^2 = \text{const} = m_{\text{дф}}. \quad (15)
\end{aligned}$$

В результате получена незамкнутая система двух уравнений с пятью неизвестными (τ , σ , 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 рабочее давление много больше гидростатического давления в сечении диффузора, будем считать давление в любом сечении диффузора одинаковым [4]. Вследствие этого нормальные напряжения на стенке можно принять равными значению давления в сечении. Тогда уравнение (14) примет следующий вид:

$$g \cdot \rho_{\text{дф}} - \frac{2 \cdot \tau}{x \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\text{д}}}{2}} - \frac{dp}{dx} = \rho_{\text{дф}} \cdot v \frac{dv}{dx} + v \cdot \frac{1}{x^2} \cdot \frac{d}{dx} (\rho_{\text{дф}} \cdot x^2 \cdot v), \quad (16)$$

или

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

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

Заключение

Система уравнений (17) и (15) описывает двухфазный поток в диффузоре инжектора для газонасыщения огнетушащего вещества в автоматических системах пожаротушения. Решение этих уравнений позволит определить потери давления в инжекторе, его геометрические характеристики и гидродинамические параметры при заданной кратности генерируемой пены. Для элементарного участка диффузора, заключённого между сечениями, записаны закон сохранения импульса и уравнение неразрывности. Значение газосодержания задаётся исходя из необходимой кратности воздушно-механической пены.

Таким образом, разработана математическая модель двухфазного потока, в которой учитывается неравномерный характер движения газожидкостной смеси в диффузоре инжектора, позволяющая рассчитывать распределение осреднённого 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.

Литература

1. **Кутателадзе С.С., Стырикович М.М.** Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. 296 с.
2. **Уравнения** движения кавитационного двухфазного потока в диффузоре пеноносителя 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 of a spheroidal cavity. *Phil. 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.