

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИ ПОДАЧЕ ПЕНЫ ПЕНОГЕНЕРИРУЮЩИМИ СИСТЕМАМИ СО СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

Карпенчук И.В., к. т. н., доцент, Грачулин А.В.
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: mail@kii.gov.by

В работе рассмотрена математическая модель движения газожидкостной смеси в случае осредненного одномерного движения. Проведено интегрирование уравнений движения газожидкостного потока с учетом реологических особенностей растворов пенообразователя. Приведена инженерная методика расчета потерь давления при подаче пены пеногенерирующими системами со сжатым воздухом.

The work describes the mathematical model of movement of gas-water mix at one-dimensional movement. The equations of movement of gas-water mix are integrated with rheological features of solutions of foam concentrate. The engineering design procedure of losses of pressure is described at foam supplying in Compressed Air Foam Systems.

(Поступила в редакцию 1 июля 2011 г.)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для получения воздушно-механической пены низкой кратности используют стволы воздушно-пенные, пенные оросители, стволы высокого давления с пенным насадком, генераторы пены низкой кратности, стволы многофункциональные ручные и лафетные с соответствующими характеристиками. Альтернативным способом получения пены является принудительное введение воздуха в раствор пенообразователя с помощью компрессора. За рубежом такие системы в последнее время получили широкое распространение в связи с их преимуществами над традиционными способами получения воздушно-механической пены низкой кратности.

Применение пеногенерирующих систем со сжатым воздухом при тушении пожаров имеет значительные преимущества по сравнению с использованием с той же целью эжекционных генераторов пены из водных растворов пенообразователей. Однако применение пеногенерирующих систем со сжатым воздухом в составе насосно-рукавной системы требует определения таких параметров, как давление на насосном агрегате и расход огнетушащего вещества, что невозможно без определения потерь давления в насосно-рукавной системе. Движение газожидкостной смеси, которой является подаваемая по насосно-рукавной системе пена, не изучено. Кроме того необходимо учитывать и реологические свойства пенообразователей. Поэтому разработка инженерной методики расчета насосно-рукавных систем при подаче по ним пены с учетом реологических свойств пенообразователей является актуальной задачей при внедрении в отечественную практику пожаротушения пеногенерирующих систем со сжатым воздухом.

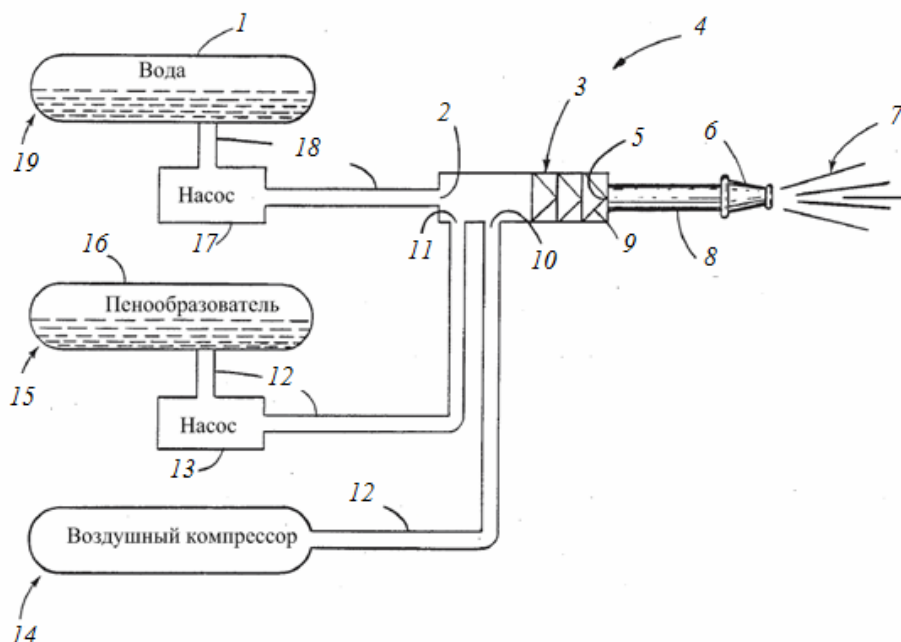
КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕНОГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ СО СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

Современная пеногенерирующая система со сжатым воздухом (далее – ПССВ) представляет собой комбинированную систему, состоящую из трех основных элементов: пожарного насоса, воздушного компрессора и системы дозирования пенообразователя. Пенообразователь, воздух и вода смешиваются непосредственно в системе. В результате образуется однородная пена высокого качества, которая подается по рукавам к месту пожара. Управляет

процессом смешения и получения пены специальное устройство – контроллер. С помощью контроллера задаются давление на насосе, концентрация пенообразователя, кратность пены, которые поддерживаются в автоматическом режиме при тушении [1].

Преимуществом данной системы является возможность подачи пены на большие расстояния (до 2000 м) и высоту (до 400 м). Это возможно благодаря особым свойствам пены, таким как низкий вес из-за высокого содержания воздуха с одновременно высоким уровнем гомогенизации [2]. Так же преимуществом ПССВ является уникальная возможность получения пены различных типов, отличающихся по физико-химическим свойствам, что предоставляет широкие возможности по выбору типа пены для тушения пожаров в каждой конкретной ситуации. С помощью ПССВ можно получать пену от типа 1 (сухая пена) до типа 5 (влажная пена) [1]. Особая структура пены определяет высокую адгезионную способность, которая позволяет эффективно использовать этот способ для тушения пожаров класса А. В этом случае пена, нанесенная на поверхность горючего материала и прилипнувшая к ней, позволяет создавать тепловой барьер, защищая ее.

На рис. 1 показана принципиальная схема пеногенирующей системы со сжатым воздухом. Приводом системы служит встроенный двигатель внутреннего сгорания. Приведен общий принцип получения пены со сжатым воздухом [3].



1 – вода; 2 – впускное отверстие для воды; 3 – камера смешения; 4 – контроллер; 5 – выпускное отверстие для пены; 6 – сопло; 7 – поток пены; 8 – рукав; 9 – лезвия для смешения; 10 – впускное отверстие для воздуха; 11 – впускное отверстие для пенообразователя; 12 – соединительная трубка; 13 – насос для пенообразователя; 14 – воздушный компрессор; 15 – емкость для пенообразователя; 16 – пенообразователь; 17 – насос для воды; 18 – водные коммуникации; 19 – емкость для воды

Рисунок 1 – Принципиальная схема ПССВ

По отзывам в зарубежной литературе [4], технология ПССВ имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными технологиями тушения пожаров:

- многофункциональность, так как пеногенирующая система может использоваться для подачи пены, чистой воды, раствора смачивателя или подачи воздуха для работы пневматического аварийно-спасательного инструмента;

- значительно (до семи раз) сокращается количество воды, требуемое для тушения пожаров, и, как следствие, снижается косвенный ущерб от пролитой воды. Сокращенное количество воды позволяет использовать в случае необходимости шасси, меньшее по грузоподъемности;

- вес рукавной линии составляет около 50 % веса стандартного рукава с чистой водой, что экономит силы пожарного, обеспечивая возможность работы без подствольщика;
- дальность подачи пены по сравнению с водой не уменьшается и при одинаковой величине расхода даже выше, чем у воды. Это связано с пневматическим действием пенного потока на выходе из сопла и более низким коэффициентом трения пены в рукавных линиях;
- пена обладает более сильным охлаждающим эффектом, чем мелкодисперсная вода, что позволяет более быстро локализовать и ликвидировать пожар;
- поданная на стенки и потолки пена остается на месте и продолжает абсорбировать тепло от пожара, пока вся вода из пены не испарится;
- использование пены не приводит к эффекту «инверсии температуры», а ведет к значительному и быстрому снижению температуры в горящем помещении.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ В СЛУЧАЕ ОСРЕДНЕННОГО ОДНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрим случай осредненного одномерного движения газожидкостной смеси при равномерном движении.

Выберем систему координат, как показано на рис. 2. Обозначим сечение канала плоскостью $x = a$ через S_a . Как известно, газосодержание φ определяется по формуле [5]

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

где $\varphi(x_0, t_0)$ – доля площади S_{x_0} , занятая газообразной фракцией в момент времени t .

$$\Delta t \gg \frac{1}{n},$$

где n – частота прохождения отдельных образований газообразной фракции через сечение S_{x_0} .

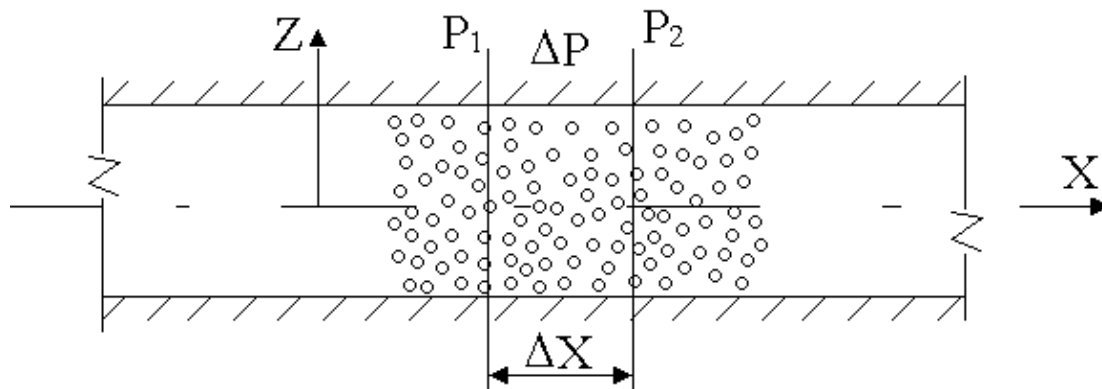


Рисунок 2 – Схема течения двухфазной жидкости

В дальнейшем приняты следующие обозначения осредненных по времени и сечениям S_x величин:

- τ – касательные напряжения на стенке канала;
 - δ – нормальные напряжения на стенке;
 - p – давления в перпендикулярных к оси Ox сечениях;
 - ρ_1, ρ_2 – плотность жидкой и газообразной фаз соответственно;
 - v_1, v_2 – скорости жидкой и газообразной фаз.
- Массовые силы:

$$G = g_x \iiint_V [(1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2] dV = g_x. \quad (2)$$

Определим проекции на ось Ox сил, действующих на элементарный участок магистрали, заключенный между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$:

$$G = g_x \left\{ \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} [(\rho_2 - \rho_1)\varphi + \rho_1] S d\tilde{x} \right\} = \left\{ \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} \pi r^2 [(\rho_2 - \rho_1)\varphi + \rho_1] d\tilde{x} \right\}, \quad (3)$$

где g_x – проекция ускорения свободного падения на ось Ox ;

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

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

Силы трения:

$$\bar{T} = \iint_{S_{бок}} \bar{\tau} ds = \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} \tau d\tilde{x} \int_e \bar{e}_\tau dl, \quad (4)$$

где $S_{бок}$ – боковая поверхность выделенного объема между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$;

\bar{e}_τ – вектор единичной длины, сонаправленный с τ ;

l – длина окружности радиуса r .

$$\int_e \bar{e}_\tau dl = -2\pi \bar{e}_0 r, \quad (5)$$

где $e_0 = -$ единичный вектор вдоль оси Ox .

Тогда в проекции на ось Ox имеем:

$$\bar{T} = - \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} 2\pi r \tau d\tilde{x}. \quad (6)$$

Сила реакции стенок:

$$\bar{N} = \iint_{S_{бок}} \bar{\delta} dS = 0, \quad \text{т. к.} \quad G \perp Ox. \quad (7)$$

Определяем силы давления, действующие на площадки сечений S_x и $S_{x+\Delta x}$, ограничивающие участок Δx :

$$P = p(x,t)S_x - p(x+\Delta x,t)S_{x+\Delta x} = -S[p(x+\Delta x,t) - p(x,t)] = -\pi r^2 \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} \frac{\partial p}{\partial x} d\tilde{x}. \quad (8)$$

Осредненную по сечению скорость запишем следующим образом [6]:

$$\bar{v} = \frac{1}{\Delta t \sum_i S_i} \int_{\Delta t} \left(\sum_i \int_{S_i} v dS \right) dt, \quad \Delta t \gg \frac{1}{n}, \quad (9)$$

где n – средняя частота прохождения отдельных образований данного компонента через данное сечение.

Для элементарного участка магистрали, заключенного между сечениями S_x и $S_{x+\Delta x}$ (т. е. $\Delta x \ll 1$, при этом заменяем Δx на dx), запишем закон изменения импульса (без учета взаимодействия на границе раздела фаз). Учитывая, что для непрерывной функции

$$\int_{x_0}^{x_0+\Delta x} f(\tilde{x}) d\tilde{x} = f(x) dx \quad (10)$$

(с точностью до членов 3-го порядка малости), пренебрегая членами порядка малости больше единицы, запишем:

$$\begin{aligned} & g_x \pi r^2 [(\rho_2 - \rho_1)\varphi + \rho_1] dx - 2\pi r \tau dx - \pi r^2 \frac{\partial p}{\partial x} dx = \\ & = (m_1 + dm_2)(v_1 + dv_1) + (m_2 + dm_2)(v_2 + dv_2) - m_1 v_1 - m_2 v_2, \end{aligned} \quad (11)$$

где m_1 и m_2 – соответственно массовые расходы жидкой и газообразной фаз.

В правой части данного уравнения записано изменение импульса от сечения S_x и $S_{x+\Delta x}$, пренебрегая обменом между фазами (согласно [7] вследствие быстротечности процесса через поверхность пузырьков приток и отток массы практически не происходят). Используем соотношения

$$dm_1 = \pi r^2 \left\{ -\frac{\partial \varphi \rho_1}{\partial t} dx + \frac{\partial}{\partial x} [(1-\varphi)\rho_1 v_1] dx \right\}; \quad (12)$$

$$\frac{dv_i}{dx} = \frac{1}{v_i} \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x}, \quad (13)$$

Так как $d(m_1+m_2) = 0$ (тождественно суммарного массового расхода), пренебрегая величинами 2-го и 3-го порядка малости, из (11) после преобразований получаем:

$$g_x [(\rho_2 - \rho_1)\varphi + \rho_1] - \frac{2\tau}{r} - \frac{\partial p}{\partial x} = \varphi \rho_2 \left(\frac{\partial v_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) + (1-\varphi)\rho_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) + (v_1 - v_2) \left\{ -\frac{\partial \varphi \rho_1}{\partial t} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} [(1-\varphi)\rho_1 x^2 v_1] \right\}. \quad (14)$$

К полученному уравнению добавим уравнение неразрывности, которое в данном случае имеет вид [5]:

$$\pi r^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial t} [\rho_2 \varphi + (1-\varphi)\rho_1] + \frac{\partial}{\partial x} [\rho_2 \varphi v_2 + \rho_1 (1-\varphi)v_1] \right\} = 0. \quad (15)$$

В случае установившегося движения уравнения (14) и (15) примут вид:

$$g_x [(\rho_2 - \rho_1)\varphi + \rho_1] - \frac{2\tau}{r} - \frac{\partial p}{\partial x} = \varphi \rho_2 v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + (1-\varphi)\rho_1 v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + (v_1 - v_2) \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} [(1-\varphi)\rho_1 x^2 v_1], \quad (16)$$

$$\pi r^2 [\rho_2 \varphi v_2 + \rho_1 (1-\varphi)v_1] = \text{const}. \quad (17)$$

В результате получена незамкнутая система двух уравнений с семью неизвестными ($\tau, p, \varphi, v_1, v_2, \rho_1, \rho_2$), описывающих движение газожидкостной системы при течении воды при возможном вспенивании пенообразователя в гидромагистральных.

УЧЕТ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПЕНЫ

При рассмотрении течения пены в магистральных будем считать систему горизонтальной или пренебрегать значением геометрического напора вследствие его малости по сравнению с остальными членами системы уравнений, т. е. полагая, что $g_x = 0$.

В расчетах принимаем, что рабочей жидкостью является вода, в этом случае можем считать $\rho_1 = \text{const}$ и $\rho_1 \gg \rho_2$, а величины v_1 и v_2 , $\frac{dv_1}{dx}$ и $\frac{dv_2}{dx}$ одного порядка, поэтому по [5]

$$(1-\varphi)\rho_1 v_1 \gg \rho_2 \varphi v_2; \quad (18)$$

$$(1-\varphi)\rho_1 v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \gg \rho_2 \varphi v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x}. \quad (19)$$

С учетом допущений (18) и (19) уравнения (16) и (17) примут вид:

$$-\frac{2\tau}{r} - \frac{\partial p}{\partial x} = (1-\varphi)\rho_1 v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x}; \quad (20)$$

$$\pi r(1-\varphi)v_1 = Q, \quad (21)$$

где Q – исходный расход жидкости.

Учитывая, что двухфазный поток раствора пенообразователя является неньютоновской средой, для которой $\tau = f(\dot{\gamma})$, касательное напряжение на стенке может быть определено по формуле

$$\tau = k \left(\frac{8v}{d} \right)^n. \quad (22)$$

Тогда уравнения движения примут вид:

$$\frac{2k}{r} \left(\frac{4v}{r} \right)^n - \frac{dP}{dx} = (1-\varphi)\rho v \frac{dv}{dx}; \quad (23)$$

$$\pi r^2(1-\varphi)v = Q. \quad (24)$$

На основе анализа данных течений водных растворов ПАВ (натриевой соли полимеров), по химическому составу сходных с пенообразователями – тоже ПАВ на основе натриевых солей полимеров, например, лаурилсульфатанатрия ($C_{12}H_{25}OSO_3Na$), получены приближенные зависимости для нахождения реологических характеристик растворов пенообразователей:

$$n = 1 - 1,1c; k = e^{3c-2,5}, \quad (25)$$

где c – концентрация сухого пенообразователя в растворе, %.

Таким образом, имеем замкнутую систему уравнений, однозначно решаемую относительно φ и r , что позволяет рассчитывать системы при движении как растворов пенообразователя ($\varphi = 0$), так и пенных сред по пенопроводу, например для пеногенерирующих систем со сжатым воздухом.

ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА

Для интегрирования рассмотрим уравнения движения раствора пенообразователя (23) и (24). Из уравнения (24) выражаем скорость потока раствора пенообразователя:

$$v = \frac{Q}{\pi r^2(1-\varphi)}. \quad (26)$$

Интегрируем уравнение (23) следующим образом:

$$\frac{2k}{r} \left(\frac{4v}{r} \right)^n dx - \frac{dP}{dx} dx = (1-\varphi)\rho v \frac{dv}{dx} dx; \quad (27)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{2k}{r} \left(\frac{4v}{r} \right)^n dx - \int_{P_1}^{P_2} dP = \int_0^v (1-\varphi)\rho v dv; \quad (28)$$

$$-(P_2 - P_1) = (1-\varphi)\rho \frac{v^2}{2} + \frac{2k}{r} \left(\frac{4v}{r} \right)^n (x_2 - x_1). \quad (29)$$

Так как интегрирование проводится вдоль оси Ox по направлению течения, то выражение $-(P_2 - P_1) = \Delta P$ – положительное. В результате получаем следующее уравнение:

$$\Delta P = (1 - \varphi) \rho \frac{v^2}{2} + \frac{2kl}{r} \left(\frac{4v}{r} \right)^n. \quad (30)$$

Подставим в уравнение (30) скорость потока раствора пенообразователя из уравнения (26) и получим:

$$\Delta P = \frac{\rho Q^2}{2\pi^2 r^4 \cdot (1 - \varphi)} + \frac{2kl}{r} \left(\frac{4Q}{\pi r^3 (1 - \varphi)} \right)^n. \quad (31)$$

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОДАЧЕ ПЕНЫ ПЕНОГЕНЕРИРУЮЩИМИ СИСТЕМАМИ

Из уравнения Вейсбаха и основного уравнения равномерного движения можно записать:

$$\lambda v^2 = \frac{8\tau}{\rho}. \quad (32)$$

Приближенное решение системы дифференциальных уравнений (23) и (24) и уравнения (32) дает возможность получить зависимость вида:

$$\Delta p = \left(\lambda_{\text{дф}} \frac{l}{d} + 1 \right) \rho \frac{v^2}{2}, \quad (33)$$

где $\lambda_{\text{дф}}$ – коэффициент гидравлического трения двухфазной смеси.

$$\lambda_{\text{дф}} = \psi \lambda, \quad (34)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения по жидкой фазе;
 $\psi = 1,2 \div 1,4$.

Коэффициент гидравлического трения по жидкой фазе можно определить по формуле Альтшуля или Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}; \quad (35)$$

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}, \quad (36)$$

где $\text{Re} = vd/\nu$ – критерий Рейнольдса;

ν – коэффициент вязкости по жидкой фазе;

Δ – шероховатость.

Рассмотрим модель пузырькового режима.

Допустим, что в пенопроводе имеет место независимое движение отдельных пузырей (т. к. пенопровод находится под давлением).

В [6] приводится графическая зависимость сопротивления трения от скорости движения двухфазной смеси (сводный график). С помощью метода наименьших квадратов он может быть аппроксимирован зависимостью вида

$$h_{\text{тр}} = \frac{l}{d} 10^{-3} (0,7v^2 + 4,5v + 6,2), \quad (37)$$

где l – длина пенопровода;

d – диаметр пенопровода;

v – средняя скорость газожидкостной смеси.

Потери напора в местных сопротивлениях системы определяем по формуле Вейсбаха. С учетом течения газожидкостной смеси константы местных сопротивлений увеличиваются в 1,5 раза [6].

$$h_m = (\zeta_{\text{зад}} + \zeta_{\text{кр}} + \zeta_{\text{вых}}) \frac{v^2}{2g}, \quad (38)$$

где $\zeta_{\text{зад}}$ – коэффициент местного сопротивления задвижки;

$\zeta_{\text{кр}}$ – коэффициент местного сопротивления крана;

$\zeta_{\text{вых}}$ – коэффициент местного сопротивления выхода под уровень.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения работы были проанализированы конструктивные особенности и принцип работы ПССВ, приведена математическая модель движения газожидкостной смеси в случае осредненного одномерного движения, учтены реологические свойства пенообразователей, осуществлено интегрирование уравнений движения газожидкостного потока, а также разработана инженерная методика расчета потерь давления при подаче пены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Colletti, D.J. Compressed-air foam mechanics / D.J. Colletti // Fire Engineering. – 1994. – № 3. – 147 p.
2. Белова, Н.А. Народ, который изобрел порох, знает, как бороться с огнем / Н.А. Белова // Журнал «Пожарное дело». – 2009. – № 5. – С. 18–19.
3. Apparatus for compressed air foam discharge : Пат. 4981178 США МПК7 А 62 С 35/00 Eric D. Bundy / заявл. 16.03.90; опубл. 01.01.1991.
4. Robert, G.T. Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions / Robert G.T. – Moristown, New Jersey : Moristown Fire Bureau, 1998. – 149 p.
5. 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). – 14–20 с.
6. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем/ С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М. : Энергия, 1976. – 296 с.
7. Rayleigh, O.M. On the pressure developed in a liquid during the collapse of spherical cavity / O.M. Rayleigh// “Phyl. Mag.”. – 1977. – V. 34, № 200. – P. 94–98.