

## ПОЖАРНАЯ ТЕХНИКА И ВООРУЖЕНИЕ

УДК 614.843.4

д-р техн. наук Качанов И.В., канд. техн. наук Карпенчук И.В.\*,  
канд. техн. наук Пармон В.В.\*, Шкутник В.А.\*,  
канд. техн. наук Янкевич Н.Г.\*\*, Патоцкий Д.А.\*\*

### **Математическая модель движения огнетушащей жидкости в проточном тракте лафетного ствола с винтовой структуризацией потока**

*УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск  
\*ГУО «Командно-инженерный институт»*

*Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, г. Минск  
\*\*Филиал «Оптрон ЦИКЛО» РУП «Приборостроительный завод «Оптрон»*

Разработана математическая модель движения огнетушащей жидкости в проточном тракте лафетного ствола с винтовой структуризацией потока. Установлено, что использование прямоугольного сечения на изгибе канала позволяет уменьшить потерю от кривизны в 2,5 раза по сравнению с круглым сечением.

*Ключевые слова:* огнетушащая жидкость, лафетный ствол.

**Dr. (Tech.) I.V. Kachanov, Ph.D. (Tehn.) I.V. Karpenchuk\*,  
Ph.D. (Tehn.) V.V. Parmon\*, V.A. Shkutnik\*, Ph.D. (Tehn.) N.G. Yankevich\*\*,  
D.A. Patotski**

### **The mathematical model of the extinguishing fluid motion in the flow path of the fire monitor with a spiral flow structuring**

*Belarusian National Technical University, Minsk  
The State Educational Establishment «Command and Engineering Institute»  
of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk  
\*\*Branch «Optron CYCLE» RUE «Instrument-Making Plant «Optron»*

The mathematical model of the motion of fire extinguishing fluid in the flow path of the monitor with a spiral flow structuring has been developed. It is established that the use of rectangular section on the channel bending has been intended to reduce the loss from the curvature of 2.5 times compared with round cross section.

*Keywords:* extinguishing fluid, fire monitor.

### **Введение**

Обновление ствольной пожарной техники в соответствии с уровнем мировых стандартов и научно-технических достижений сопровождается появлением на мировом рынке

стволов нового поколения. В отличие от ранее применяемых, данные лафетные стволы позволяют подавать воду и водные растворы огнетушащих веществ в широком диапазоне расходов и давлений (формируют

спектр различных видов струй и их комбинаций, обеспечивая при этом высокое качество распыла с различным углом факела), а также пену низкой и средней кратности. Однако существующие пожарные лафетные стволы не обеспечивают необходимую дальность подачи огнетушащего вещества для тушения резервуаров нефти и нефтепродуктов.

С целью увеличения дальности подачи огнетушащего вещества предлагается разработать лафетный ствол с винтовой структуризацией потока. В современных лафетных стволах для перераспределения силы реакции струи перед дефлекторным струеформирующим насадком устанавливают криволинейный цилиндриче-

ский канал с поворотами, в общей сумме составляющими 270-360° (рисунок 1). Потери давления на этих участках при подачах огнетушащего вещества 40-60 % могут составлять 0,050-0,1 МПа, что уменьшает дальность боя струи на 15-20 %, снижая тактико-технические характеристики лафетного ствола.

При движении жидкости по криволинейному каналу на все частицы действуют центробежные силы. Так как распределение скоростей по сечению неравномерно (в центре скорости больше, а у стенок – меньше), то центробежная сила, пропорциональная квадрату скоростей, будет значительно больше в центральной части потока, чем у стенок [1].



Рисунок 1 – Криволинейный подводящий канал перед лафетными стволами

### Основная часть

Рассмотрим это на рисунке 2. Относительно осей  $O_1$  и  $O_2$  возникают моменты центробежных сил, которые приводят жидкость во вращение. В середине потока жидкость переме-

щается от внутренней стенки к внешней, т.е. вдоль радиуса кривизны, а у боковых стенок – в обратном направлении. Так образуется пара вихрей [1].

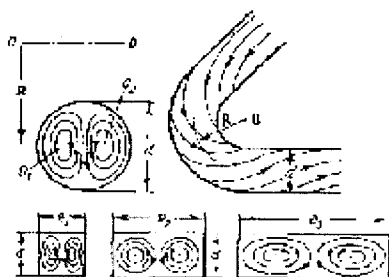


Рисунок 2 – Образование парного вихря при изгибе канала

Рассмотрим теорию движения жидкости в криволинейном канале пожарного лафетного ствола при подходе к струеформирующему насадку. Для упрощения рассмотрим симмет-

рично расположенную половину канала (рисунок 3).

Поскольку винтовое движение является частным случаем вихревого движения, к нему применимы теоремы Гельмгольца и Томсона.

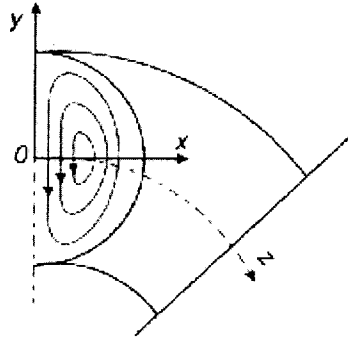


Рисунок 3 – Схема образования вихря в криволинейном канале подводит к головке лафетного ствола

Исходя из третьей теоремы Гельмгольца на поверхности вихревой трубки циркуляции скорости вдоль любого замкнутого контура равна нулю. Равенство нулю рассматриваемой циркуляции сохраняется, следовательно, сохраняется и сама вихревая трубка (в частности винтовой шнур). Четвертая теорема Гельмгольца показывает постоянство напряжения вихревой трубки во времени. Вдоль вихревой трубки напряжение по второй теореме постоянно. На основании теоремы Томсона можно утверждать, что циркуляция скорости вдоль контура вихревой трубки не зависит от времени. Таким образом, на-

пряжение вихревой трубки также не зависит от времени [2]. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что сам по себе вихрь является устойчивой структурой. При повороте (изгибе) потока в нем возникает так называемый «парный вихрь» [1]. В результате сложения кругового движения жидкости с поступательным потоком разделяется на два винтовых потока [1].

Рассмотрим механику движения огнетушащей жидкости в криволинейном канале пожарного лафетного ствола при организации винтового потока. Воспользуемся известным уравнением Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + X + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + Y + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right), \quad (1) \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + Z + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

где  $u_x, u_y, u_z$  – компоненты скорости;

$t$  – время;

$X, Y, Z$  – проекции ускорения массовой силы на оси координат;

$p$  – давление;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости;

$\rho$  – плотность огнетушащего раствора;

$x, y, z$  – координаты.

К привязанной выше системе уравнений добавим уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(pu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(pu_y)}{\partial y} + \frac{\partial(pu_z)}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Сделаем следующие допущения:

1. Движение установившееся, т.е. рассмотрим течение в плоскости  $xOy$ ;

2. Плотность огнетушащего раствора постоянна,  $\rho = \text{const}$ ;

3. Значение массовой силы значительно меньше остальных действующих сил и ею можно пренебречь.

С учетом сделанных допущений уравнения Навье-Стокса и неразрыв-

ности при регулярном течении примут вид:

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Уравнения Навье-Стокса и уравнение неразрывности записаны в традиционной системе «скорость-давление».

Для описания винтового движения в канале пожарного ствола представим эти уравнения в системе «функция тока-вихрь» [3].

Введем следующие определения [3]:

– функции тока  $\Psi$

$$u_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, u_y = \frac{\partial \Psi}{\partial x}; \quad (5)$$

– функции вихря

$$\omega = \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}. \quad (6)$$

Тогда искомые уравнения преобразуются к следующему виду:

$$u_x \frac{\partial}{\partial x} + u_y \frac{\partial}{\partial y} = - \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = - \quad (8)$$

или

$$\left( u_x \frac{\partial}{\partial x} + u_y \frac{\partial}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right). \quad (9)$$

Граничные условия на твердых неподвижных поверхностях задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_x|_r &= 0 \\ u_y|_r &= 0 \\ \Psi|_r &= \text{const} \\ \left. \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} \right|_r & \end{aligned} \quad (10)$$

где  $r$  – нормаль к границе (стенке)  $\Gamma$ .

Константа для функции тока на стенках выбирается следующим образом. На одной из граничных стенок функции тока равна нулю, на других – функция тока подбирается таким образом, что разница функций между двумя границами равна удельному расходу огнетушащей среды между ними [3]:

$$q = \Psi|_{\Gamma_y} - \Psi|_{\Gamma_x}. \quad (11)$$

На входных и выходных отверстиях рассматриваемого участка канала для решения задается профиль скорости (например, равномерный прямоугольный, как для средней скорости), а расчетные формулы для функции тока и вихря получаются либо интегрированием, либо дифференцированием, в соответствии с их определениями [4].

В работах [5, 6] показано, что растворы пенообразователей являются неньютоновскими жидкостями и, следовательно, возникает необходимость учитывать их реологические свойства.

Коэффициент динамической вязкости можно представить в виде

$$= \dots, \quad (12)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига по нормали  $\tau$ ;

$\dot{\gamma}$  – скорость сдвига или градиент скорости;

$$\tau = \frac{\partial v}{\partial r}, \quad (13)$$

где  $r$  – нормаль к стенке;

$v$  – средняя скорость.

Для неньютоновских жидкостей напряжение трения на стенке определяется по зависимости [7]:

$$\tau = k \left( \frac{8v}{D} \right)^n, \quad (14)$$

где  $k$  – мера консистенции жидкости (чем выше вязкость, тем больше значения  $k$ );

$v$  – средняя скорость;

$D$  – диаметр канала, если канал не круглый, то  $D = D_3$ ;

$D_3$  – эквивалентный диаметр;

$n$  – характеристика степени неньютоновского поведения жидкости (чем больше значения  $n$  отличается от единицы, тем сильнее проявляются ее неньютоновские свойства). Тогда значение вязкости для неньютоновской жидкости примет следующий вид:

$$= \frac{k}{D_3} (8v)^n. \quad (15)$$

Теперь система уравнения движения примет вид

$$\begin{cases} (u_x \frac{\partial}{\partial x} + u_y \frac{\partial}{\partial y}) = \frac{k}{D} (8v)^n (\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}) \\ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = -\omega \end{cases} \quad (16)$$

Полученная система уравнений описывает винтовое движение одного из «парных вихрей» в канале пожарного ствола при изгибе и закрутке потока с учетом реологических свойств растворов пенообразователей. Решение этих уравнений при известных реологических характеристиках огнетушащего раствора позволит определить конкретные параметры проточного тракта пожарного ствола.

Рассмотрим практическую возможность уменьшения сопротивления криволинейного подводящего участ-

ка, в котором образуется так называемый «парный вихрь».

«Парный вихрь» вызывает непрерывный расход энергии, который пропорционален моменту инерции площади поперечного сечения вихря. Минимальным моментом инерции обладает круглое сечение вихря, которое возможно при соотношении сторон прямоугольного канала, равном

$$\frac{e}{d} \approx 2. \quad (17)$$

Поэтому минимальное сопротивление поворота получается при соотношении сторон прямоугольника порядка двух или несколько больше [1].

В этом случае поперечное сечение каждого из вихрей имеет естественную, т.е. круглую форму. В других случаях вихри будут деформированными.

С точки зрения уменьшения потерь на трение гидравлически наиболее выгоднейшей формой поперечного сечения трубы является круглая. Однако для получения минимального значения сопротивления закругления канала выгоднее всего прямоугольная форма сечения канала в соотношении сторон  $\sim 2,5$ , причем большая сторона параллельна оси кривизны. Коэффициент сопротивления изгибающегося канала с такой формой сечения выражается зависимостью [1]:

$$\xi = 0,4\xi_0, \quad (18)$$

где  $\xi_0$  – коэффициент сопротивления изгиба трубопровода круглого сечения.

По разработкам Г.Н.Абрамовича для определения коэффициента сопротивления канала с изгибом предлагается использовать следующую зависимость:

$$\xi_0 = 0,73abc, \quad (19)$$

где  $a$  – функция относительного радиуса кривизны, задаваемого графиком

$$a = f_1\left(\frac{R}{d}\right), \quad (20)$$

где  $R$  – радиус кривизны изгиба канала;

$d$  – диаметр канала, если канал круглого сечения.

График функции  $a = f_1\left(\frac{R}{d}\right)$  представлен на рисунке 4.

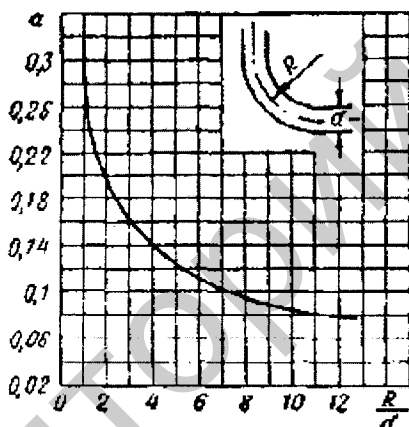


Рисунок 4 – График зависимости функции  $a = f_1(R/d)$

График, представленный на рисунке 4, с использованием метода «наименьших квадратов» аппроксимирован зависимостью

$$a = 0,3\left(\frac{R}{d}\right)^{0,54}. \quad (21)$$

В формуле (19)

$$a = f_2(\alpha). \quad (22)$$

Функция угла поворота, задаваемая графиком, представлена на рисунке 5 ( $\alpha = 90 - b = 1$ ).

График аппроксимируется зависимостью

$$b = \frac{2,35\alpha}{120 + \alpha}. \quad (23)$$

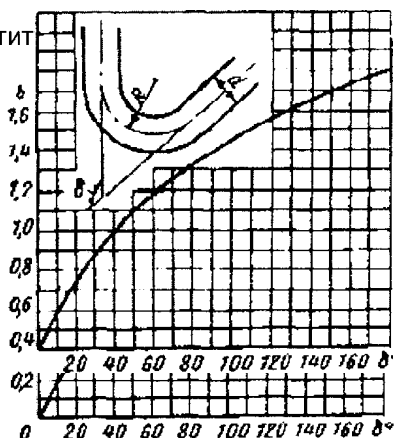


Рисунок 5 – График зависимости функции  $b = f_2(\alpha)$

В формуле (19)  $c$  – функция формы поперечного сечения трубы, равная 1 для круглого сечения

$$c = f_1\left(\frac{e}{d}\right), \quad (24)$$

где  $e$  – большая сторона прямоугольного сечения;

$d$  – меньшая сторона прямоугольного сечения.

Минимальным моментом инерции обладает круглое сечение вихря, которое может иметь место при соотношении сторон прямоугольника,

равном  $\frac{e}{d} \approx 2$ . Поэтому минимальное сопротивление изгиба получается при соотношении сторон прямоугольного канала порядка двух или несколько больше [1]. В этом случае поперечное сечение каждого из вихрей имеет естественную, т.е. круглую форму, во всех других случаях вихри будут деформированными в одном или другом направлениях.

На рисунке 6 представлен график функции  $c = f_3\left(\frac{e}{d}\right)$ .

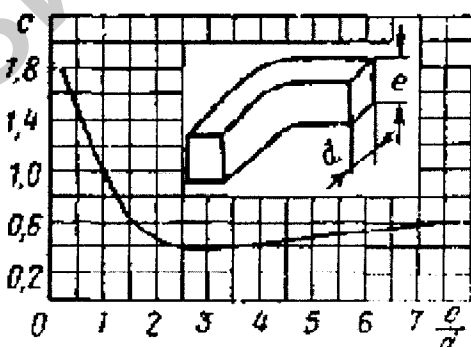


Рисунок 6 – График зависимости функции  $c = f_3(e/d)$

Анализ графика показывает, что функция  $c$  имеет экстремум (мини-

мум) при  $\frac{e}{d} \approx 2,5$ . График аппроксимируется зависимостью



$$c = \frac{0,33 e/d}{e/d - 0,66} \quad (25)$$

или

$$c = \frac{0,33e}{e - 0,66d} \quad (26)$$

### Заключение

Рассмотрена математическая модель винтового движения и образования парного вихря при изгибе, что имеет место в криволинейном подводном канале лафетных стволов, который предназначен для компенсации и перераспределения силы реакции струи. Сделан и обоснован вывод, что если с точки зрения уменьшения потерь на трение гидравлически наиболее выгоднейшей формой поперечного сечения канала является круглая, то для получения минимального значения коэффициента сопротивления изгиба  $\xi$  выгоднее всего прямоугольное сечение с отношением сторон  $\sim 2,5$  (большая сторона параллельна оси кривизны изгиба). Определены зависимости для расчета сопротивления криволинейных каналов прямоугольного сечения. Применяв такую форму сечения канала на изгибе, можно уменьшить потерю от кривизны в 2,5 раза по сравнению с круглым сечением.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Некрасов, Б.Б. Гидравлика и ее применение в летательных аппаратах / Б.Б. Некрасов. – М.: Машиностроение, 1967. – 364 с.

2. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.

3. Ясинский, Ф.Н. О решении уравнения Навье-Стокса в переменных «функции тока – вихрь» на многопроцессорной вычислительной машине с использованием системы СИДА / Ф.Н. Ясинский, А.В. Евсеев // Вестник ИГУ. – 2010. – Вып.3. – С. 73–75.

4. Самарский, А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1982. – 172 с.

5. Карпенчук, И.В. Математическая модель движения растворов пенообразователей, подчиняющихся степенному реологическому закону / И.В. Карпенчук, Э.Э. Шатило // Вестник КИИ. – 2011. – № 2 (14). – С. 49–54.

6. Карпенчук, И.В. Расчет систем пожаротушения с учетом реологических свойств растворов пенообразователей / И.В. Карпенчук, Э.Э. Шатило // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: Сборник тезисов докладов VI Международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 1 / Ред. кол. А.Ю. Лупей [и др.]. – Мн., 2011. – С. 314–315.

7. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.