

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ОГNETУШАЩЕЙ ЖИДКОСТИ В ПРОТОЧНОМ ТРАКТЕ ЛАФЕТНОГО СТВОЛА С ВИНТОВОЙ СТРУКТУРИЗАЦИЕЙ ПОТОКА**

*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: винтовой поток, огнетушащая жидкость, вихрь.*

*I.V. Kachanau, I.V. Karpenchuk, V.A. Shkutnik*

## **MATHEMATICAL MODEL OF MOTION EXTINGUISHING LIQUID IN THE FLOW PATH OF FIRE MONITORS OF STRUCTURING SCREW FLOW**

*A mathematical model of the motion of extinguishing fluid in the flow path of the fire monitor with the structuring of a screw thread. Found that the use of rectangular channels in the bend loss to reduce the curvature of 2,5 times compared with the circular section.*

*Key words: screw flow, the fire-extinguishing liquid, vortex.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 28 октября 2013 г.

### **Введение**

Обновление ствольной пожарной техники в соответствии с уровнем мировых стандартов и научно-техническими достижениями 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, 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 дефлекторной струеформирующей головкой устанавливаются криволинейный цилиндрический канал с поворотами, в общей сумме составляющими 270-360°. Потери давления на этих участках при подачах огнетушащего вещества 40-60 % могут составлять 0,0500,1 МПа, что уменьшает дальность боя струи на 15-20 %, снижая тактико-технические характеристики лафетного ствола.

## Основная часть

При движении жидкости по искривленному каналу на все частицы действуют центробежные силы. Но 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].

Рассмотрим это на рис. 1. Относительно осей  $O_1$  и  $O_2$  возникают моменты центробежных сил, которые приводят жидкость во вращение. В середине потока жидкость перемещается от внутренней стенки к внешней, то есть вдоль радиуса кривизны, а у боковых стенок – в обратном направлении. Так образуется пара вихрей [1].

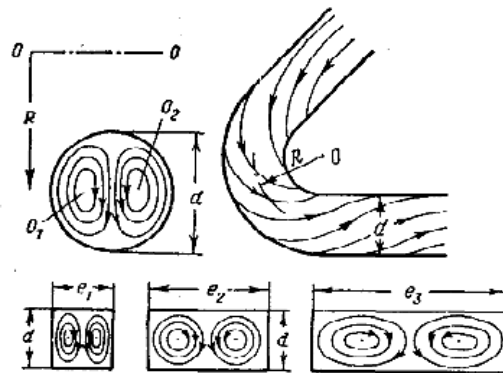


Рис. 1. Образование парного вихря при изгибе канала

Рассмотрим теорию движения жидкости в криволинейном канале пожарного лафетного ствола при подходе к струеформирующей головке. Для упрощения рассмотрим симметрично расположенную половину канала (рис. 2)

Поскольку винтовое движение является частным случаем вихревого движения, к нему применимы теоремы Гельмгольца и Томсона. Исходя из третьей теоремы Гельмгольца, на поверхности вихревой трубки циркуляция 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, напряжение вихревой трубки также не зависит от времени [2]. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что сам по себе вихрь – очень устойчивая структура. При повороте (изгибе) потока в нём возникает так называемый "парный вихрь" [1]. В результате сложения кругового движения жидкости с поступательным поток разделяется на два винтовых потока [1]. Если разделить такой поток по сечению с использованием дефлектора или разделительной решетки на вихревые шнуры, они затем скрутятся в жгут [3]. Истекающая струя становится устойчивой к распаду и дальнобойность её значительно увеличивается.

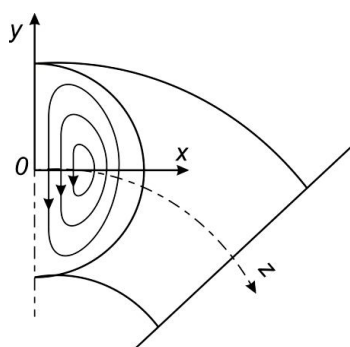


Рис. 2. Схема образования вихря в криволинейном канале

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

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

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:

- движение установившееся, то есть рассмотрим течение в плоскости  $xOy$ ;

- плотность огнетушащего раствора постоянна,  $\rho = \text{const}$ ;

- значение массовой силы значительно меньше остальных действующих сил и ею можно пренебречь.

С учётом сделанных допущений уравнения Навье-Стокса и неразрывности 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 [4]:

– 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:

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

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

или

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

Граничные условия на твердых неподвижных поверхностях задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} u_x|_G &= 0; \\ u_y|_G &= 0; \\ \Psi|_G &= \text{const}; \\ \omega|_G &= \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} \Big|_G, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $r$  – нормаль к границе (стенке)  $G$ .

Константа для функции тока на стенках выбирается следующим образом. На одной из граничных стенок функция тока равна нулю, на других – функция тока подбирается таким образом, что разница функций между двумя границами равна удельному расходу огнетушащей среды между ними [4]:

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

На входных и выходных отверстиях рассматриваемого участка канала для решения задается профиль скорости (например, равномерный прямоугольный, как для средней скорости), а расчётные формулы для функций тока и вихря получаются либо интегрированием, либо дифференцированием, в соответствии с их определениями [4, 5].

В работах [4, 5] показано, что растворы пенообразователей являются неньютоновскими жидкостями и, следовательно, возникает необходимость учитывать их реологические свойства.

Коэффициент динамической вязкости можно представить в виде:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \quad (12)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига по нормали  $\tau$ ;  
 $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига или градиент скорости

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

где  $r$  – нормаль к стенке;  $v$  – средняя скорость.

Для неньютоновских жидкостей напряжение трения на стенке определяется по зависимости [6]

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

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

$v$  – средняя скорость;

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

$D_s$  – эквивалентный диаметр;

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

$$\mu = \frac{k}{\dot{\gamma}} \left( \frac{8v}{D_s} \right)^n. \quad (15)$$

Теперь система уравнений движения примет вид:

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

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

Решение полученной системы уравнений применительно к конкретно разрабатываемой конструкции будет проведено на следующем этапе.

Рассмотрим практическую возможность уменьшения сопротивления криволинейного подводящего участка, 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

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

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, то есть круглую форму. В других случаях вихри будут деформированными.

С точки зрения уменьшения потерь на трение наиболее выгодной 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, задаваемая графиком

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

где  $R$  – радиус кривизны изгиба канала;

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

Полученный график с использованием метода "наименьших квадратов" аппроксимируется 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 задаётся графиком. Если  $\alpha = 90$ , то  $b = 1$ . Далее график аппроксимируется зависимостью

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

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, то есть круглую форму, во всех других случаях вихри будут деформированными в одном или в другом направлении.

График функции  $c$  аппроксимируется зависимостью:

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

или

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

### Заключение

Таким образом, если с точки зрения уменьшения потерь на трение наиболее выгоднейшей формой поперечного сечения трубы 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). 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 её применение в летательных аппаратах. М.: Машиностроение, 1967. 364 с.
2. **Алтишуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П.** Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1987. 414 с.
3. **Ясинский Ф.Н., Евсеев А.В.** О решении уравнения Навье-Стокса в переменных "функции тока – вихрь" на многопроцессорной вычислительной машине с использованием системы СИДА. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. Вестник ИГУ. Вып. 3. 2010. С. 73-75.
4. **Карпенчук И.В., Шатило Э.Э.** Математическая модель движения растворов пенообразователей, подчиняющихся степенному реологическому закону // Вестник КИИ. 2011. № 2 (14). С. 49-54.
5. **Карпенчук И.В., Шатило Э.Э.** Расчёт систем пожаротушения с учётом реологических свойств растворов пенообразователей // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. VI междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. Мн., 2011. С. 314-315.
6. **Уилкинсон У.Л.** Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 216 с.