

Ю. Г. Бурков, В. А. Горюнов¹, Д. А. Дудников², А. Ю. Чулюнин³, В. В. Корзин⁴

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СТРУЙНОГО ЭЛЕМЕНТА

Волжский институт строительства и технологий

¹**Волгоградский государственный технический университет**

²**Институт проблем управления РАН**

³**Научно-исследовательский институт механики МГУ**

⁴**Волжский политехнический институт**

E-mail: korzinv@mail.ru

Статья посвящена моделированию процессов переключения струйного элемента с помощью программного пакета ANSYS Fluent. Выполнен расчет переходных процессов, происходящих в рабочей камере струйного элемента. Приведены полученные изображения струйных течений в камере элемента.

Ключевые слова: струйный элемент, пневматический струйный генератор, флюидика, электромагнитные поля, пожаробезопасность, взрывобезопасность.

This work is devoted to modeling of processes of switching fluidics element using the software package ANSYS Fluent. Calculations of transients occurring in the working chamber of the fluidics element. Shows the obtained images of fluidics streams in the member's chamber.

Keywords: jet element, air jet generator, fluidics, electromagnetic fields, fireproof, explosion-proof.

Внешние воздействия электромагнитной природы существенно влияют на живучесть электронных систем управления (СУ), среди которых присутствуют естественные дестабилизирующие факторы (грозовые разряды, радиационные потоки космического пространства, электромагнитные поля и др.), а также искусственные (ионизирующие излучения, сверхвысокочастотные излучения, лазерные излучения и пр.).

В последнее время повысился интерес к построению резервных СУ на струйных элементах [1], которые работоспособны в условиях, характеризуемых низкими и высокими давлениями и температурами, электромагнитными излучениями, интенсивной радиацией, ударными нагрузками [2]. Однако существенно низкое быстроедействие по сравнению с электронной аппаратурой ограничивает использование струйной

техники в построении СУ. В [3] было показано, что главными факторами повышение быстродействия струйных элементов являются их миниатюризация, использование легких газов и повышение величины отношения давления питания и давления окружающей среды. Наряду с этим важным является качество функциональных характеристик, которые определяются аэрогидродинамическими процессами переключения струй, распространения сигналов давлений и расходов в коммуникационных каналах и т. п. Рабочий процесс в камере струйного генератора рассмотрен в [4, 5]. Особо заметное влияние оказывают

линейные размеры каналов струйных элементов. В статье на примере струйного генератора рассматривается влияние различных параметров на характеристики элемента.

Для анализа и оценки работы струйного генератора был использован программный пакет ANSYS Fluent для расчета переходных процессов, происходящих в его рабочей камере. Расчет проводился в двумерной постановке. Течение рабочей жидкости – сжимаемого газа – описывалось с помощью системы нестационарных осредненных уравнений Навье-Стокса (URANS) и энергии, которые записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - h\vec{J} + (\overline{\tau_{eff}} \cdot \vec{u})), \tag{3}$$

где ρ – плотность газа, μ – вязкость газа, x_i, x_j – пространственные координаты, t – время, δ_{ij} – символ Кронекера, \vec{u} – вектор скорости газа; u_i, u_j – компоненты скорости газа; k_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности; $E = C_p T - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}$; C_p – теплоемкость при постоянном давлении; T – температура газа; $-\rho \overline{u_i u_j}$ – тензор рейнольдсовых напряжений, которые согласно гипотезе Буссинеска записываются в виде:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}, \tag{4}$$

где μ_t – турбулентная вязкость, для вычисления которой используются полуэмпирические модели турбулентности. В данной работе используется двухпараметрическая модель SST, поскольку она лучше описывает пристеночные и отрывные течения [1]. Выражения для вычисления

турбулентной вязкости в модели SST имеют следующий вид [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k, \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega, \tag{6}$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right)}, \tag{7}$$

где k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций; ω – скорость диссипации кинетической энергии; G_k, G_ω – источники генерации k и ω ; Γ_k и Γ_ω – коэффициенты диффузии для k и ω соответственно; Y_k и Y_ω – диссипативные источники для k и ω ; α^*, a_1, F_2 – константы модели турбулентности [2].

Для замыкания системы уравнений (1)–(7) используются следующие граничные условия:

- На входе в расчетную область..... Давление $P = 4000$ Па
Температура $T = 300$ К
Интенсивность турбулентности 5 %
Масштаб турбулентности 1 м
- На контуре канала..... Условие прилипания $U = 0$
- На выходе..... Давление $P = 0$ Па
«Мягкие» граничные условия для температуры и параметров турбулентности

Построение сеточной модели осуществлялось в программном комплексе ICEM CFD. Для разбиения расчетной области на контрольные объемы использовалась неструктурированная расчетная сетка типа «тэтра», размерность которой составила 1 млн элементов. У поверхности твердых стенок строился призматический слой ячеек с тем учетом, чтобы безразмерный параметр $y \leq 2$. Это условие необходимо для правильной работы выбранной модели турбулентности. Шаг по времени составил $\tau = 10^{-6}$ с, длительность расчета 1100 шагов.

Исходя из полученной при численном моделировании картины переключения были выделены основные этапы переключения силовой струи и распространения волн давления.

На рис. 1 представлен процесс установления струи в рабочей камере элемента после подачи питания. По обе стороны струи идет процесс образования вихрей, которые формируются случайным образом. Рабочая среда эжектируется и из каналов управления. Первоначальный поток струи питания сбрасывается в атмосферные окна и частично поступает в выходной канал. Случайным образом исходя из мгновенных сопротивлений выходных и атмосферных каналов струя питания устанавливается вдоль левой стенки рабочей камеры. На диаграмме можно видеть ядро струи и ее основное направление. Численные значения скоростей потока представлены справа от шкалы скоростей. Время работы струйного генератора показано внизу рисунка.

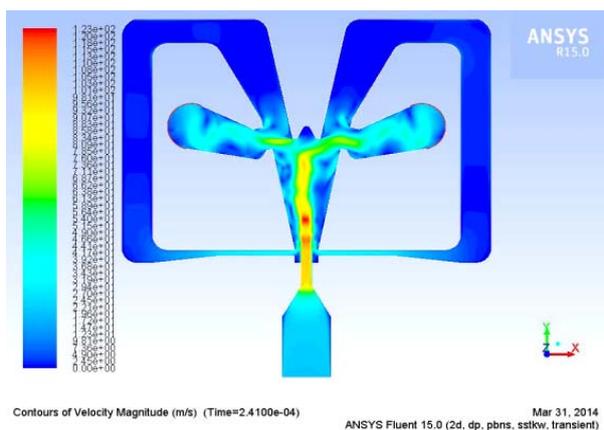


Рис. 1. Процесс установления струи в рабочей камере элемента после подачи питания

На рис. 2 показано, как происходит набор давления в левом выходном канале, что приводит к появлению давления управления в левом управляющем канале. Струя начинает отклоняться вправо. При этом происходит поступление рабочей среды от силовой струи в правый канал управления и распространение волны давления по нему навстречу формирующемуся в правом выходном канале потоку рабочей среды. Нестабильное поведение силовой струи объясняется еще неустановившимся течением рабочей среды в камере элемента.

Рис. 2. Набор давления в левом выходном канале

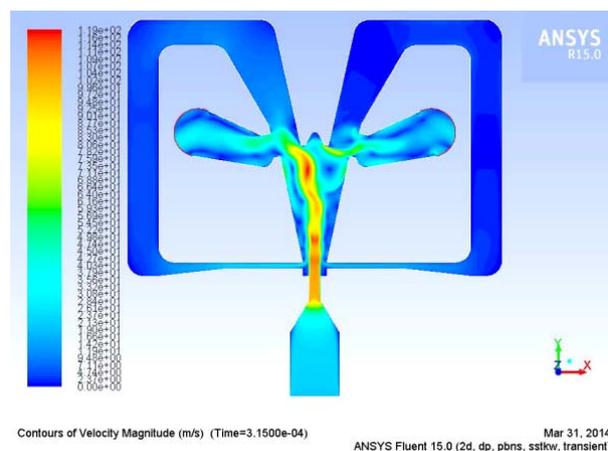


Рис. 2. Набор давления в левом выходном канале

На рис. 3 видно, что уже почти отклонившаяся вправо струя сбрасывается в левое атмосферное окно и пока не может преодолеть вихрь отраженного потока, формируемый справа от нее дефлектором. В правый выходной канал начинается выброс пульсаций давления и расхода, которые формируют потоки пульсирующей рабочей среды отраженного потока и которые могут являться источником ложных срабатываний генератора.

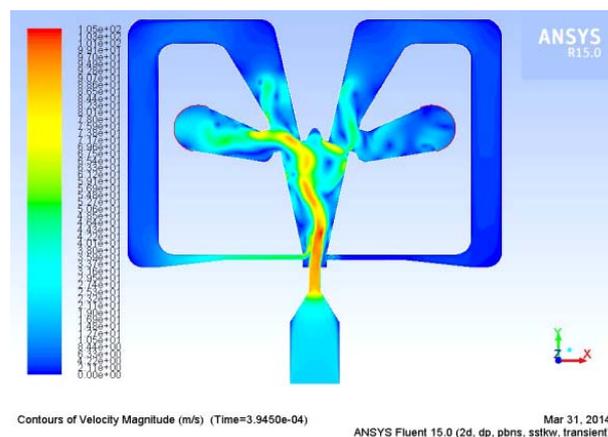


Рис. 3. Сброс струи в левое атмосферное окно

На рис. 4 видно, как струя опять устанавливается в «среднее» положение, отклонившись от левой стенки.

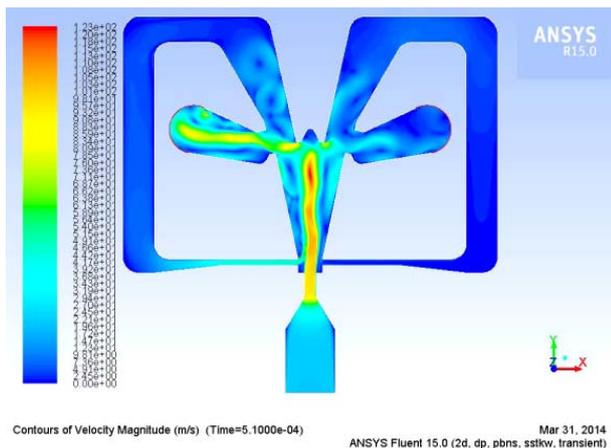


Рис. 4. Установка струи в среднее положение

Основной поток сбрасывается в левый атмосферный канал. По обе стороны струи формируются отраженные потоки. В обоих выходных каналах формируются пульсации давления. В рассматриваемый момент в левом выходном канале они больше, что и определяет поступление управляющего давления и расхода в левый канал управления по обратной связи генератора и перемещение силовой струи к правой стенке.

При этом мощность нового отраженного потока, формирующегося слева от силовой струи, сравнима с мощностью силовой струи. Этот мгновенный поток, отразившись от левой стенки рабочей камеры, направляется сначала против силовой струи, прижимает ее к правой стенке и потом разрывает ее. Только последнее перемещение силовой струи к правой стенке рабочей камеры ослабляет этот отраженный поток и он начинает эжектироваться силовой струей. Силовая струя восстанавливает свою целостность. Пульсации давления в левом выходном канале приводят к пульсациям давления в левом управляющем канале, что также вызывает нестабильность положения силовой струи, что дает начальные пульсации давления в правый выходной канал. Под влиянием давления в левом управляющем канале струя окончательно переходит к правой стенке элемента.

На рис. 5 показано, как поток рабочей среды в правом выходном канале начинает переключать силовую струю снова к левой стенке рабочего элемента.

Происходит формирование правого отраженного потока. В процессе его формирования виден разрыв силовой струи, отклонившейся от правой стенки. Таким образом, возникают пульсации давления в правом выходном канале.

Одновременно начинает поступать расход в левый канал управления, в то время пока ядро струи отклоняется влево.

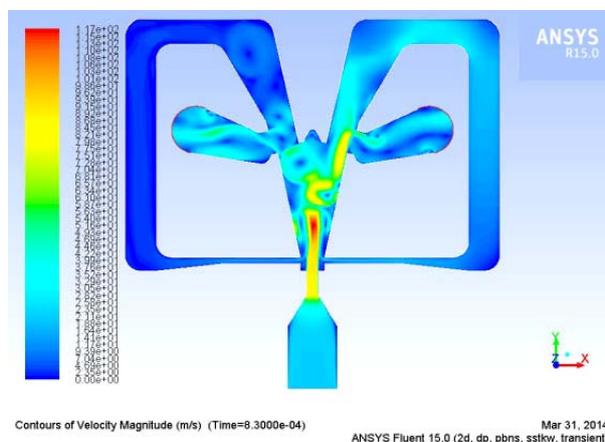


Рис. 5. Переключение силовой струи к левой стенке рабочей камеры элемента

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что:

- картина переключения силовой струи получена впервые численным методом расчета. Она отличается от общепринятой картины переключения [6, 7], которая существовала ранее. Полученные численные данные полей скоростей дают наглядную картину процесса переключения струйного элемента, согласующуюся с экспериментальными данными;

- на высокочастотных режимах работы переключение силовой струи происходит не под влиянием установившегося расхода в выходных каналах, а под влиянием выбросов расхода и давления, получающихся в выходных каналах элемента в процессе переключения струи;

- в каналах обратной связи волны давления распространяются как по направлению течения рабочей среды, так и против него. При увеличении частоты генератора этот переходный процесс начинает принимать постоянный характер с небольшой переменной составляющей. При этом с увеличением частоты генератора постоянная составляющая увеличивается, а переменная уменьшается. В конечном итоге в обеих обратных связях генератора появляется постоянный расход, поступающий в оба канала управления. Процесс переключения генератора останавливается. Достигнутая в этот момент частота генератора и является предельной;

- процесс переключения силовой струи в рабочей камере элемента может также иметь и акустическую природу. Перемещение силовой струи по кромкам дефлектора, атмосфер-

ным и выходным каналам с высокой скоростью вызывает появление акустических волн. С увеличением частоты генератора частота акустического шума увеличивается;

– полученная картина течения показывает, что оптимизация размеров струйного генератора позволит значительно увеличить его быстродействие. С точки зрения увеличения быстродействия необходимо переключать только ядро струи, а не развитую струю, имеющую эжекционные турбулентные составляющие. Оптимизацию размеров возможно провести, используя программный пакет ANSYS.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Касимов, А. М.* Схемно-технические решения построения аппаратуры резервного канала комплекса командных приборов системы управления летательным аппаратом / А. М. Касимов, Э. М. Мамедли, А. В. Коротков, Е. В. Пустовалов, П. А. Харитонов // Датчики и Системы, 2005. – № 12. – С. 2–7.

2. *Касимов, А. М.* Вопросы реализации резервной системы управления / А. М. Касимов, Э. М. Мамедли, Л. И. Мельников, Л. Т. Чернявский // Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М. : Изд. Центр РГГУ. – 2005. – С. 507–509.

3. *Касимов, А. М.* Радикальное повышение быстродействия элементной базы резервных систем управления летательными аппаратами / А. М. Касимов, Э. М. Мамедли, А. И. Попов, Л. Т. Чернявский // Датчики и Системы, 2005. – № 4. – С. 29–33.

4. *Чаплыгин, Э. И.* Математическая модель струйного расходомера / Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков, В. В. Корзин // Журнал технической физики, 2004. – Т. 74, вып. 6. – С. 16–19.

5. *Chaplygin, E. I.* Mathematical model of a fluid flowmeter / E. I. Chaplygin, Yu. V. Zemskov, V. V. Korzin // Technical Physics, Vol. 49, № 6, 2004, pp. 677–680.

6. *Лебедев, И. В.* Элементы струйной автоматики / И. В. Лебедев, С. Л. Трескунов, В. С. Яковенко. – М. : Машиностроение, 1973. – 360 с.

7. *Дудников, Д. А.* Исследование аэрогидромеханических методов построения струйных логических схем и разработка многотактных устройств : дис. ... канд. техн. наук / Дудников Д. А. – Волгоград, 1995.