

УДК 623.464.34

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО РАСЧЁТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПНЕВМОАВТОМАТИКИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

© 2017 В.Н. Самсонов, В.Г. Шахов, И.С. Барманов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 10.07.2017

В работе представлены результаты моделирования течения газа в каналах струйных элементов пневмоавтоматики на примере двухходового усилителя. Разработана математическая модель расчета параметров течения газа методом конечных объемов, базирующимся на численном решении систем дифференциальных уравнений в частных производных Навье-Стокса, осредненных по методу Рейнольдса. Данный метод реализуется с помощью программного комплекса Ansys CFX. Для замыкания этих уравнений применяется модель турбулентности, сформулированная в соответствии с предположением Буссинеска, согласно которому рейнольдсовы напряжения могут быть связаны со скоростью средней деформации через турбулентную вязкость. С помощью математической модели выполнена серия численных расчетов, на основании результатов которых построены характеристики струйного двухходового усилителя.

Ключевые слова: управление сложными техническими системами, струйная техника, пневмоавтоматика, струйный усилитель, математическая модель, численные расчёты.

Пневмоустройства, построенные на использовании струйных элементов, имеют широкое применение в промышленности, например, в расходомерах газов, датчиках скорости, устройствах автоматики и других пневмоустройствах [1-4]. Данные устройства имеют перспективы развития, в связи с чем совершенствование конструкции и улучшение характеристик струйных элементов является весьма актуальным. Добиться этого можно, используя современные вычислительные продукты.

В работе приведены результаты исследований и апробации математической модели для выполнения расчета параметров потока газа в каналах элементов струйной техники миниатюрных размеров. Для выполнения численных расчетов разработана математическая модель струйного устройства. Представлены результаты моделирования течения газа в каналах струйного двухходового усилителя, который предназначен для усиления входных сигналов по давлению и расходу и выполнения логических операций «отрицание» и «повторение».

Рассматривается задача течения газа в каналах элементов струйного двухходового усилителя. Моделирование процессов течения газа

Самсонов Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры основ конструирования машин. E-mail: samsonov@ssau.ru

Шахов Валентин Гаврилович, кандидат технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов.

Барманов Ильдар Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин. E-mail: isbarmanov@mail.ru

внутри каналов струйных устройств проведено методом конечных объемов, базирующимся на численном решении систем дифференциальных уравнений в частных производных Навье-Стокса, осредненных по методу Рейнольдса. Уравнения Навье-Стокса включает уравнение сохранения массы (уравнение неразрывности), уравнение сохранения количества движения и уравнение сохранения энергии. Данный метод реализуется с помощью программного комплекса ANSYS CFX. Для замыкания этих уравнений применяется модель турбулентности, сформулированная в соответствии с предположением Буссинеска, согласно которому рейнольдсовы напряжения могут быть связаны со скоростью средней деформации через турбулентную вязкость.

Уравнение неразрывности записывается в виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_j) = 0.$$

Уравнение сохранения количества движения [5, 6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho U_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i U_j) &= - \frac{\partial P^*}{\partial x_i} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right\} \end{aligned}$$

для $i = 1, 2, 3$.

Проекции U_i и U_j соответствуют компонентам U_x , U_y , U_z вектора скорости потока; ρ – плотность; δ_{ij} – символ Кронекера. Параметр P^* представляет собой сумму давления

P и величины $(2/3)\rho\delta_{ij}k$, где k – турбулентная кинетическая энергия. Оба этих слагаемых соответствуют нормальным напряжениям. Эффективная вязкость μ_{eff} определяется суммой ламинарной и турбулентной вязкостей $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$. Уравнение сохранения энергии представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) - \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_j H) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \times \\ & \times \left\{ \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} + U_i \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right\}, \end{aligned}$$

где $H = h + 0,5U_i U_j + k$ – полная энталпия; h – энталпия; T – температура; Pr_t – турбулентное число Прандтля. Также в систему уравнений включено уравнение состояния. Во всех уравнениях по повторяющимся индексам производится суммирование [7, 8]. Для замыкания уравнений неразрывности, сохранения количества движения и сохранения энергии в исследований настоящей работы использовалась гибридная двухзональная модель Ментера (модель переноса сдвиговых напряжений) [9].

Уравнения переноса для характеристик турбулентности в соответствии с гибридной двухзональной моделью турбулентности Ментера (SST) имеют вид [10]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \\ & = \tilde{P}_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right], \\ & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega U_i) = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \times \\ & \times \left[(\mu + \mu_t \sigma_\omega) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{2(1-F_1)}{\omega} \rho \sigma_{\omega 2} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \end{aligned}$$

В уравнении переноса для k функция \tilde{P}_k , используемая в модели SST для предотвращения нарастания турбулентности в застойных областях, записывается следующим образом [11]: $\tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \tilde{D}_k)$, где $\tilde{D}_k = \beta^* \rho k \omega$, ω – скорость диссипации кинетической энергии, $\beta^* = 0,09$. В двухзональной модели Ментера применяются две системы констант, составляющие которых отмечены индексами 1 и 2:

$$\sigma_{k1} = 0,85; \sigma_{\omega 1} = 0,5; \beta_1 = \frac{3}{40}; \alpha_1 = \frac{5}{9};$$

$$\sigma_{k2} = 1; \sigma_{\omega 2} = 0,856; \beta_2 = 0,0828; \alpha_2 = 0,44.$$

Первая система калибрована по пристеночным течениям, а вторая обладает высокой степенью применения для свободных сдвиговых слоёв. Первая система констант используется во внутренней области пограничного слоя и соответствует $k - \omega$ модели Уилкокса, а вторая – в области пограничного слоя и соответствует стандартной $k - \varepsilon$ модели. В модели Ментера используется линейная комбинация этих двух систем констант с гладким переключателем вида $\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2$, где F_1 – связующая функция. Вблизи стенки в значительной части пограничного слоя эта функция должна быть близка к единице. Однако, по мере перехода от стенки и приближения к границе пограничного слоя она стремится к нулю, чтобы обеспечить независимость от внешних условий, характерную для $k - \varepsilon$ модели. Связующая функция определяется по формуле:

$$F_1 = \text{th}(\arg_1^4);$$

$$\begin{aligned} \arg_1 &= \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k \omega} y^2} \right], \\ CD_{k \omega} &= \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right), \end{aligned}$$

где \arg_1 – переменная, $CD_{k \omega}$ – положительная часть перекрёстных диффузионных членов в уравнении переноса.

По мере удаления от стенки $\arg_1 \rightarrow 0$. Внутри пограничного слоя первый член представляет отношение масштаба турбулентности к расстоянию от стенки и равен 2,5 в логарифмическом подслое. Он исчезает при приближении к границе подслоя. Второй член записан так, чтобы $F_1 = 1$ в пределах подслоя (когда исключается использование двухпараметрической диссипативной модели турбулентности). При этом параметр $1/y^2 \omega$ является константой вблизи стенки, но в логарифмической зоне он стремится к нулю. Третий аргумент в формуле переменной \arg_1 предотвращает вырожденность решения исходной модели $k - \omega$ при малых значениях ω набегающего потока.

В целях наилучшего моделирования ограниченных стенками потоков, в отличие от модели $k - \omega$, в модель SST введена расширенная формулировка вихревой вязкости $\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}$, где вместо абсолютной

величины завихренности потока Ω , применяемой в ранних версиях модели Ментера, используется абсолютная величина скорости сдвиговых деформаций $S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2}$.

Функция F_2 имеет вид:

$$F_2 = \operatorname{th}(\arg_2^2);$$

$$\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right),$$

где \arg_2 – переменная. Для внешнего слоя константы не изменяются, а для внутреннего слоя добавляется константа $a_1=0,31$.

На основе описанных математических моделей проведён расчёт газодинамических характеристик струйного двухходового усилителя, трёхмерная геометрическая модель которого представлена на рис. 1. На рис. 2 изображён общий вид расчётной сетки. Для моделирования вязкого взаимодействия стенки каналов и газа предусмотрен градиентный рост толщины ячеек с поверхности канала.

На входах в каналы питания задана величина скорости потока. Скорость на входе в канал пит器ия нижней платы струйного двухходового усилителя равна 16,5 м/с, а на входе в канал питания верхней платы 14,5 м/с. Величины скоростей подобраны таким образом, чтобы дав-

ление газа на входе в каналы питания соответствовало заданной величине 20 кПа.

Управляющие сигналы, поступающие на нижнюю плату устройства, моделируются граничным условием скорость на входе. Величина скорости потока на входе в управляющие каналы переменная и подбирается из условия соответствия давления газа в канале заданному диапазону. Необходимость перехода от давления к скорости потока при назначении граничных условий на входах в каналы питания и управления диктуется требованиями устойчивого сходящегося итерационного процесса интегрирования задачи.

На входах в дренажные отверстия присвоено условие равенства статического давления, на выходе – атмосферному давлению. На выходе из каналов, где формируются выходные сигналы, граничное условие обеспечивает равенство статического давления потока на выходе из канала атмосферному давлению, подбирая потребный для этого расход. Стенкам каналов логического устройства присвоено условие непротекания. Данное граничное условие позволяет также мо-

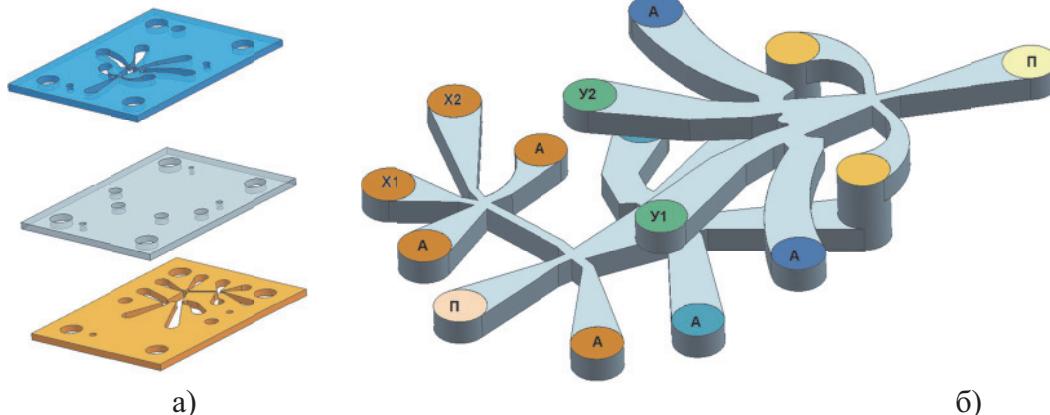


Рис. 1. Основные составные части (а) и геометрическая модель внутренних каналов (б) струйного двухходового усилителя



Рис. 2. Расчетная сетка струйного двухходового усилителя

Таблица 1. Результаты расчета параметров потока в каналах усилителя при увеличении давления в канале управления X_1

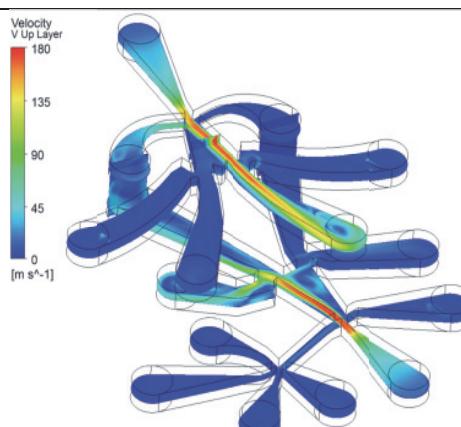
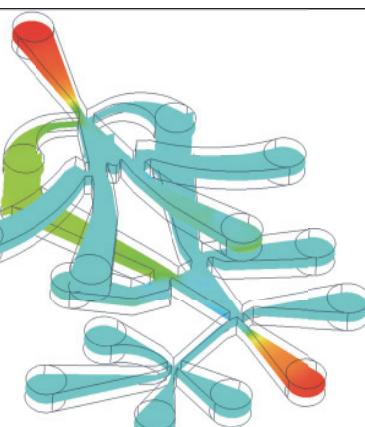
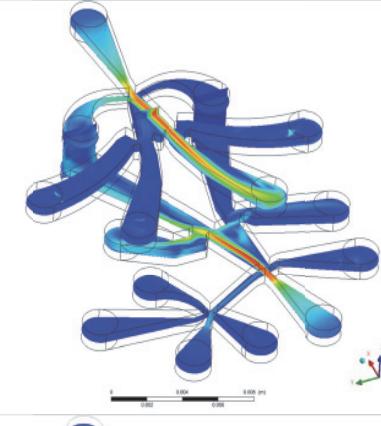
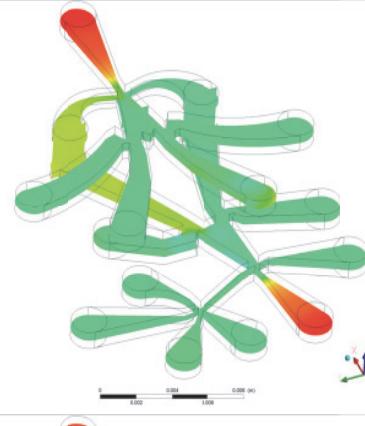
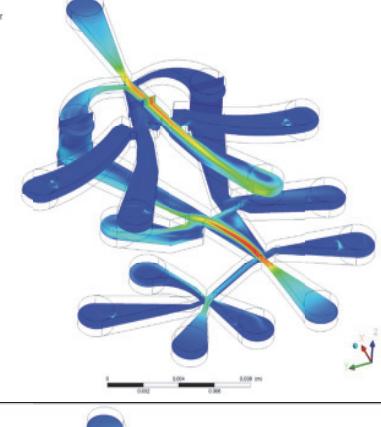
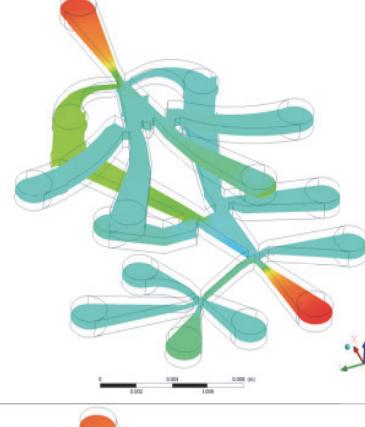
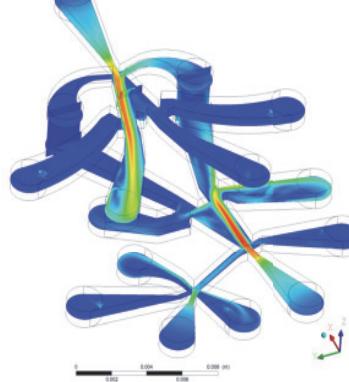
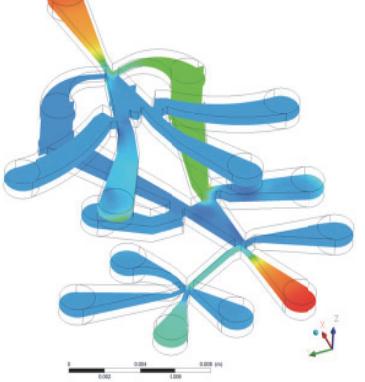
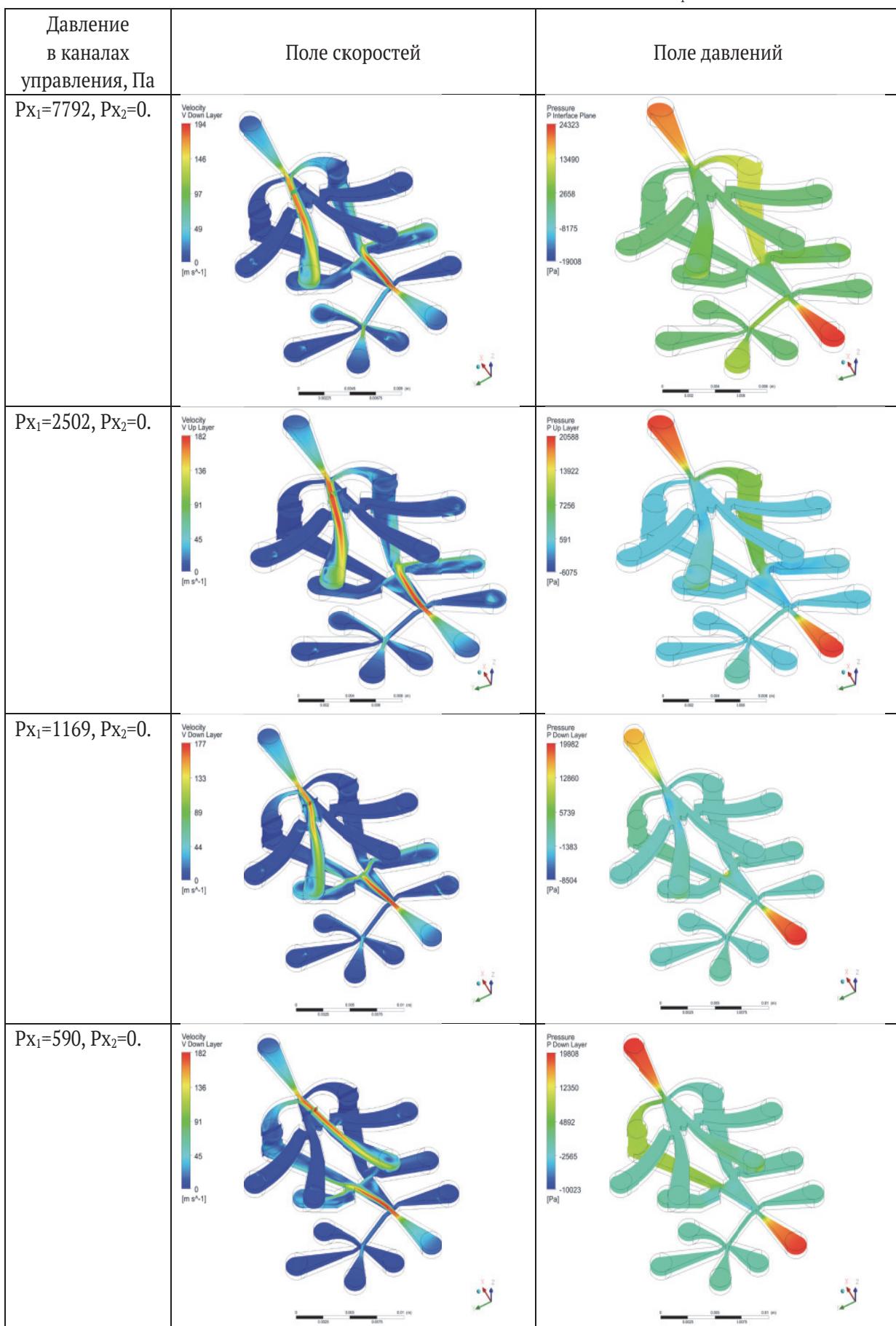
Давление в каналах управления, Па	Поле скоростей	Поле давлений
$P_{X_1}=0$, $P_{X_2}=0$.		
$P_{X_1}=590$, $P_{X_2}=0$.		
$P_{X_1}=3416$, $P_{X_2}=0$.		
$P_{X_1}=4814$, $P_{X_2}=0$.		

Таблица 2. Результаты расчета параметров потока в каналах усилителя при уменьшении давления в канале управления X_1



делировать вязкое взаимодействие газа со стенками каналов.

При расчётах были приняты следующие параметры среды: газ – воздух, сжимаемый, вязкий, температура воздуха 25°C, динамическая вязкость $1,831 \cdot 10^{-5}$ Па·с, начальная плотность 1,18 кг/м³. режим теплообмена – изотермический, атмосферное давление 101325 Па. Под термином давление далее подразумевается статическое давление, являющееся величиной превышения давления над атмосферным.

Некоторые результаты численного расчета параметров потока в каналах струйного двухходового усилителя при увеличении и снижении давления в канале управления X_1 приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Аналогичным образом были проведены расчеты по управляющему каналу X_2 . На основании полученных результатов построены характеристики переключения двухходового усилителя для каналов X_1 и X_2 (рис. 3).

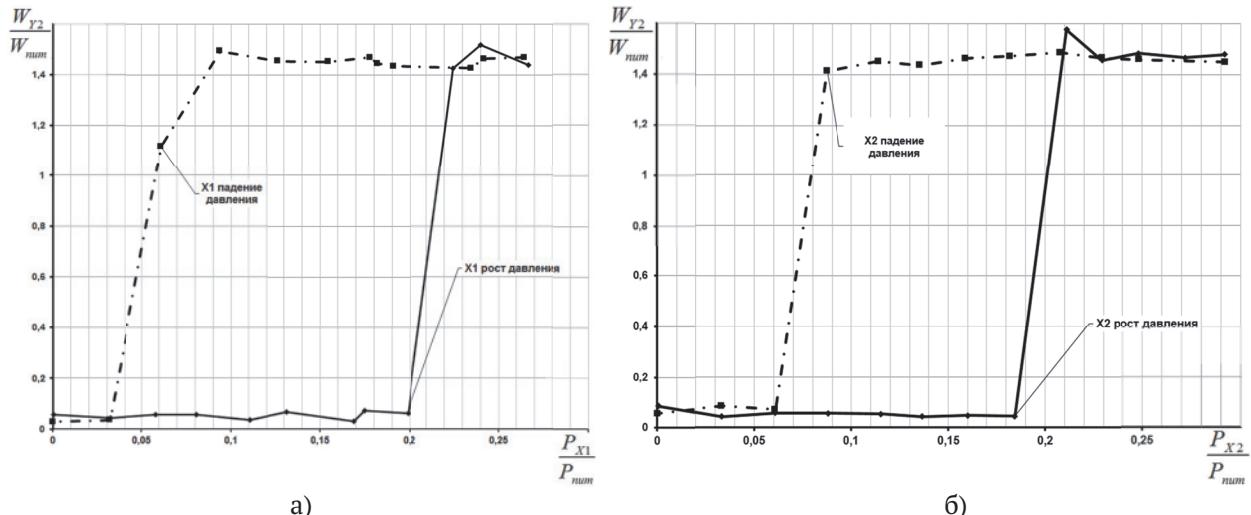


Рис. 3. График зависимости относительного расхода воздуха в канале Y_2 от относительного давления в канале питания X_1 (а) и X_2 (б)

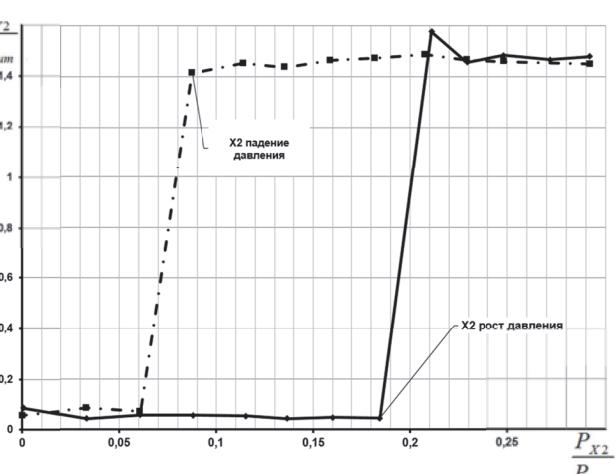
Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что рассматриваемый струйный элемент способен функционировать согласно заданной схеме логических состояний при включении/отключении соответствующих управляющих сигналов. При отсутствии давления на управляющих сигналах струя питания на нижней плате усилителя отклонена влево, что позволяет формировать соответствующий управляющий сигнал на верхней плате усилителя для формирования выходного сигнала в канале Y_1 . При повышении давления в управляющем канале X_1 до 4815 Па и в канале X_2 до 4384 Па происходит переключение питающей струи в нижней плате усилителя, что влечет за собой переключение выходного сигнала на верхней плате усилителя, создавая расход в канале Y_2 . Обратное переключение двухходового усилителя происходит при снижении давления

в канале X_1 до 590 Па и в канале X_2 до 1152 Па. Внешний вид полученных характеристик струйного двухходового усилителя качественно совпадает с теоретическими характеристиками. Это позволяет утверждать об адекватности разработанной математической модели и возможностях её применения для расчета параметров потока газа в каналах струйных элементов.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель и методика численного расчёта параметров потока газа в малых каналах струйных элементов с использованием программных продуктов течения газа в каналах струйного двухходового усилителя.

На основе математического моделирования методами вычислительной газодинамики получены картины течения газа внутри каналов устройства на различных режимах, включая поля скоростей и давлений.



б)

Определены рабочие характеристики струйного двухходового усилителя, качественно подтверждающие логику работы устройства, что свидетельствует о высокой достоверности применяемой модели течения газа в каналах струйного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касимов А.М. Попов А.И. Расходомеры с нулевым перепадом давления и компенсационные измерители скорости // Датчики и системы. М.: Сенсидент плюс. 2004. № 4. С. 27–31.
2. Ванин В.А. Родина А.А., Колодин А.Н. Управление автоматической линии гальванопокрытий средствами струйной техники // Материалы III международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн». Тамбов: Тамбовский государственный технический университет. 2016, С. 283–287.

3. Многопоточный эжектор и новое направление для развития струйной техники / Ю.А. Сазонов, А.В. Деговцов, Е.С. Казакова, К.И. Клименко // Территория Нефтегаз. М.: ЗАО «Камелот Паблишинг». 2012. № 4. С. 75-77.
4. Лаврентьев В.В., Метляев Д.Д. Исследование возможности использования элементов струйной техники во взрывателях // Молодежный научно-технический вестник. М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). 2015. № 12. С. 14.
5. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2-х. т. Т. 1. М.: Мир, 1991. 504 с.
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2-х. т. Т. 2. М.: Мир, 1991. 554 с.
7. Андерсон Д., Таннхилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2-х. т. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 384 с.
8. Андерсон Д., Таннхилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2-х. т. Т. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 392 с.
9. Практика применения и особенности современных методов расчёта аэродинамических характеристик летательных аппаратов на основе решений уравнений Навье-Стокса / В.В. Вождаев, Л.Л. Теперин, С.Л. Чернышев // Труды центрально-го аэрогидродинамического института им. Проф. Н.Е. Жуковского, вып. 2740. М.: издательский отдел ЦАГИ, 2014. 63 с.
10. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal, 1994, V. 32, N 8.
11. Ten year of Industrial Experience with the SST-Turbulence Model / Turbulence, Heat and mass transfer 4 / F. Menter, M. Kuntz, R. Lantry. Edited by Hanjalic K., Nagano Y., Tummers M. USA, CT, Redding: Begell House Inc. 2003.

TECHNIQUE OF NUMERICAL CALCULATION OF GASDYNAMIC CHARACTERISTICS OF JET ELEMENTS OF PNEUMOAUTOMATIC EQUIPMENT OF CONTROL SYSTEMS OF DIFFICULT TECHNICAL SYSTEMS

© 2017 V.N. Samsonov, V.G. Shakhov, I.S. Barmanov

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The paper presents the results of modeling of gas flow in the channels of the fluidic elements of pneumoautomatics - a dual input amplifier. The mathematical model of calculation of parameters of gas flow with finite elements method based on the numerical solution of systems of differential equations Navier-Stokes equations, averaged by Reynolds's method. This method is implemented using the software Ansys CFX. To close these equations a turbulence model, are formulated in accordance with the Boussinesq assumption, according to which Reynolds's tensions can be related to the speed of the average strain through the turbulent viscosity. With the help of mathematical model a series of numerical calculations, on the basis of which the characteristics of the jet of a dual input amplifier.

Keywords: Management of difficult technical systems, jet equipment, pneumoautomatic equipment, jet amplifier, mathematical model, numerical calculations

Vladimir Samsonov, Doctor of Technical Science, Professor at the Machine Building Design Department.

E-mail: samsonov@ssau.ru

Valentin Shakhov, Candidate of Technical Science, Professor at the Aircraft Construction and Design Department.

Ildar Barmanov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Machine Building Design Department.

E-mail: isbarmanov@mail.ru