

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА И СОЗДАНИЕ ВИХРЕВОГО СТРУЙНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ГАЗА

А. Ю. Усс¹, А. В. Чернышев¹, Н. В. Атамасов²

¹Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет),
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

²ООО «Премиум Консалтинг»,
Россия, 125190, г. Москва, ул. Ленинградский проспект, д. 80, корп. 5

В работе на основе проведенного анализа и предварительного численного расчета течения газа в рабочей полости регулятора разработана новая конструкция вихревого регулятора давления газа. С применением аддитивных технологий изготовлен экспериментальный образец устройства. На базе разработанного стенда для проведения испытаний вихревого регулятора проведен ряд экспериментов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили работоспособность конструкции. Проведены численные исследования и разработана новая конструкция вихревого регулятора с распределенной подачей управляющего потока рабочей среды, а также с регулированием закрутки питающего и управляющего потоков рабочей среды.

Ключевые слова: вихревой регулятор, вихревой усилитель, вихревая камера, поток управления, ручка блокировки.

Введение

Запорно-регулирующие устройства (ЗРУ) во многом определяют надежность и безотказность работы пневмогидравлических систем, в составе которых они функционируют. Прежде всего это связано с наличием подвижных элементов в ЗРУ, движущихся с большими скоростями и соударяющихся с деталями и узлами конструкции.

Повысить надежность работы ЗРУ можно за счет создания конструкций без подвижных элементов, принцип работы которых основан исключительно на аэродинамических эффектах с использованием вихревого течения газа. Вихревые регуляторы давления газа — это устройства без механически подвижных частей, которые могут функционировать при работе с высокотемпературными и загрязненными газами. В работах [1, 2] представлена разработка вихревого регулятора давления газа с локальной подачей потока питания и управления, а также представлены результаты экспериментальных исследований.

Однако вихревые регуляторы с локальной подачей управляющего потока имеют ряд недостатков: высокий уровень газодинамического шума, невозможность выступать в качестве запорного элемента в пневматической системе, а самое главное — такие регуляторы требуют внешнего источника повышенного давления рабочей среды для потока управления. С целью устранения выше изложенных недостатков разработана конструкция вихревого регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочего газа.

В работах [3, 4] рассмотрена конструкция focused jet amplifier (сфокусированный струйный

усилитель) (рис. 1а), в работе [5] представлен коллектор (рис. 1б), при помощи которого можно осуществлять закрутку основного потока, в работе [6] представлен дивертор с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочей среды (рис. 1в). Анализ научно-технической литературы показал актуальность выбранного направления исследования и подтвердил преимущества струйных устройств с распределенной подачей потоков рабочей среды по сравнению со струйными устройствами с сосредоточенной подачей потоков.

Теоретические основы расчета течения газа в вихревых регуляторах изложены в работах Залмансона Л. А., Лебедева И. В., Бугаенко В. Ф., профессора МВТУ им. Н. Э. Баумана Попова Д. Н. [7–12]. Предложенные ими математические модели расчета рабочих процессов строились на эмпирических зависимостях, которые на практике могли быть использованы лишь на начальном этапе расчета подобных конструкций.

В связи с отсутствием вычислительных возможностей в 60-х годах прошлого века расчетов по распределенным параметрам не проводилось. В работе [2] представлен экспериментальный стенд для испытания вихревого регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочей среды, но не была представлена методика расчета данной конструкции. В данной работе предложена математическая модель рабочих процессов в проточной полости вихревого регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего потока, основанная на методах вычислительной гидрогазодинамики.

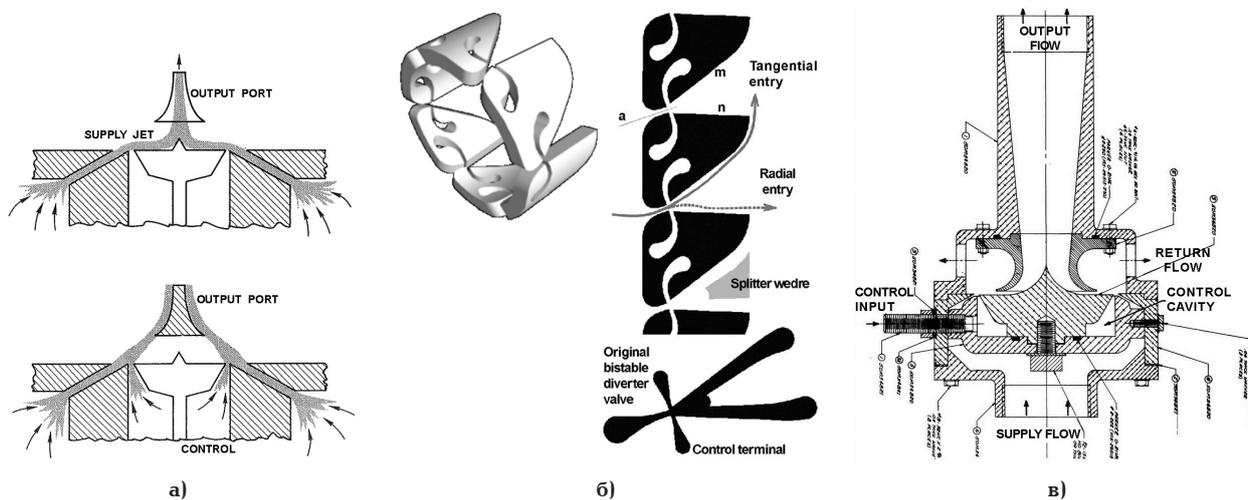


Рис. 1. а) усилитель с фокусирующей струей; б) коллектор из триггеров для управления закруткой потока; в) трехходовой клапан (дивертер) с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочей среды
 Fig. 1. a) amplifier with focusing jet; b) trigger collector for controlling the flow swirling; c) three-way valve (diverter) with a distributed supply of supply and control flow of the working medium

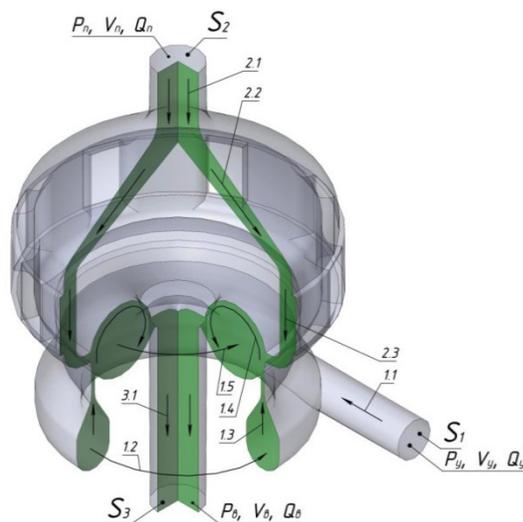


Рис. 2. Расчетная область регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочего газа (вырез 1/4)
 Fig. 2. Estimated area of gas pressure regulator with distributed supply of supply and control flow of working gas (cut-out 1/4)

Математическая модель

Для сокращения временных затрат на разработку и повышение эффективности проектирования вихревого регулятора давления газа проведено моделирование течения рабочего тела в проточной полости регулятора. Процесс моделирования течения рабочего тела включает в себя ряд этапов. На первом этапе проводится разработка математической модели, на основе методов вычислительной гидрогазодинамики.

Алгоритм разработки математической модели включает в себя:

- выбор расчетной области;
- формулировку допущений;
- составление системы уравнений, описывающих процессы в исследуемом устройстве;

— назначаются условия однозначности (граничные и начальные условия).

Расчетная область (рис. 2) представляет собой трехмерную модель проточной полости регулятора давления газа.

Принцип работы регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочего газа, аналогично принципу работы регулятора давления с сосредоточенной подачей управляющего и питающего потоков, основан на принципе взаимодействия струй. Однако в данной конструкции поток питания 2 поступает в питающий патрубок, далее, обтекая центральное тело, поступает в торобразную вихревую камеру регулятора. Стрелки 2.1-2.2-2.3 обозначают течение газа в питающем канале. Поток управления 1 поступает в управ-

Таблица 1. Расчетные параметры и граничные условия
Table 1. Design parameters and boundary conditions

Расчетные параметры	
Процесс	Стационарный
Рабочая среда	Атмосферный воздух
Граничные условия	
Давление в сечении S_1 , p_1	2,7 МПа
Давление в сечении S_2 , p_2	0,2 МПа
Давление в сечении S_3 , $p_{\text{вых}}$	0,1 МПа
Тип выходного канала	Открытый
Температура в сечении S_1 , T_1	25 °С
Температура в сечении S_2 , T_2	25 °С
Температура в сечении S_3 , $T_{\text{вых}}$	25 °С
Давление в сечении S_1 , p_1	SST
На входе в расчетную область	$p(R) = p_n; R(r, \theta_r, z, t) \in S_{12}$
На выходе из расчетной области	$p(R) = p_{\text{вых}}; R(r, \theta_r, z, t) \in S_3; \vec{u}(R) \perp S_2$
На внешних границах	$u_x(\vec{r}) = u_y(\vec{r}) = u_z(\vec{r}) = 0$

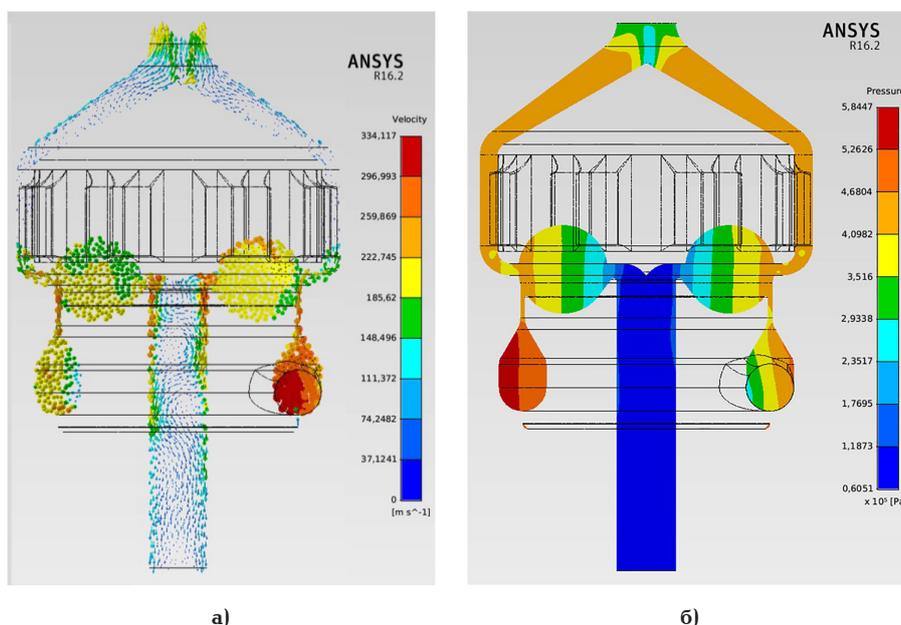


Рис. 3. а) распределение поля скорости газа в проточной полости вихревого регулятора давления газа;
б) распределение поля давлений в проточной полости вихревого регулятора давления газа
Fig. 3. a) the distribution of the gas velocity field in the flow cavity of the vortex gas pressure regulator;
b) distribution of the pressure field in the flow cavity of the vortex gas pressure regulator

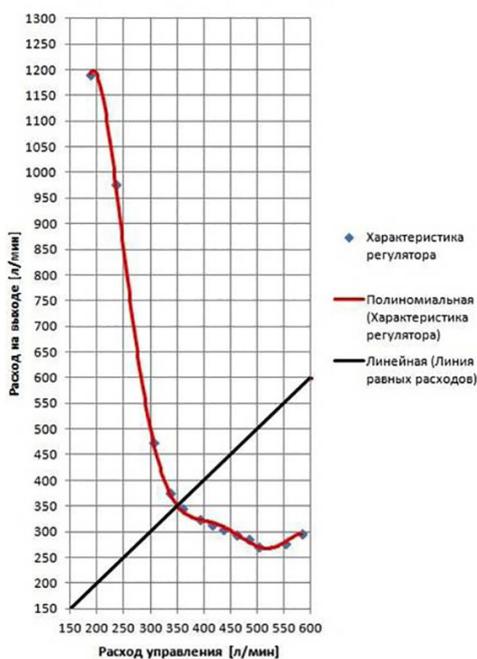
ляющий канал 1.1, далее завихряется в проточной полости 1.2 и затем тангенциально поступает в вихревую камеру 1.3. В вихревой камере образуется спиральное течение, которое состоит из меридионального 1.4 и кольцевого 1.5. В результате сформировавшегося вихревого течения под действием центробежных сил газ отбрасывается на периферию вихревой камеры, создавая область повышенного давления, которая и создает дросселирование потока рабочего газа из канала питания.

Основные допущения при построении математической модели течения рабочего тела:

- отсутствие теплообмена с окружающей средой;
- рабочее тело является ньютоновской вязкой жидкостью.

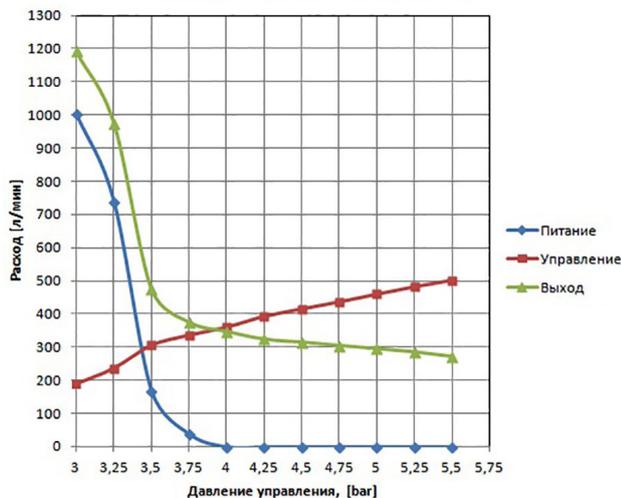
В данном случае математическая модель описывает стационарное турбулентное течение сжимаемой ньютоновской вязкой жидкости. Данная математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений:

Характеристика регулятора



а)

Характеристика регулятора



б)

Рис. 4. а) зависимость расхода на выходе от расхода управления;
б) номограмма зависимости расхода в питающем, управляющем и выходном патрубке от давления управления

Fig. 4. а) the dependence of the flow rate on the output from the flow control;
б) nomogram of flow in the supply, control and outlet connections of the control pressure

— уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0,$$

где p — давление; t — время; ρ — плотность; \vec{u} — вектор скорости;

— закон сохранения количества движения:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i,$$

где индекс i относится к входящему потоку, индекс j — к выходящему потоку, u_i — проекция вектора скорости \vec{u} на ось x_i , S_i — источник объемных и поверхностных сил, τ_{ij} — тензор напряжений для вязкой жидкости.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left(\xi - \frac{2}{3} \mu \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij},$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления; μ — динамическая вязкость; δ_{ij} — оператор Кронекера.

Система уравнений замыкается граничными условиями: на входе в устройство задаются значения давления p_0 , p_i ; скорости потоков v_0 , v_i ; температур потоков T_0 , T_1 , на выходе — давление p_2 .

Данная система дополняется моделью турбулентности SST:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = P - D + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \Gamma_\Phi) \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right] + A,$$

$$\text{где } A = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}.$$

Следует отметить, что составленная система уравнений не имеет аналитического решения и может быть решена только численным методом. Известен ряд программных пакетов, в которых реализована методика решения данной системы уравнений. В данной работе решение математической модели реализовано с использованием программного пакета ANSYS Fluid CFX.

Численное моделирование течения газа в проточной полости вихревого регулятора давления газа

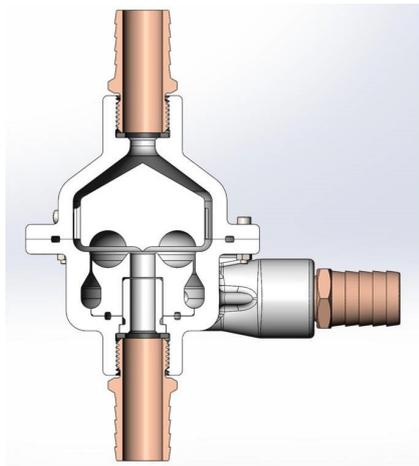
На следующем этапе численного моделирования расчетная область импортируется в расчетную среду программы и проводится её разбиение на сетку контрольных объемов.

Далее назначаются расчетные параметры и граничные условия (табл. 1).

Начальные условия: распределение давлений, скоростей в начальный момент времени:

$$t = 0 \mid p = p_{atm}; \vec{u} = 0.$$

В результате расчета получено распределение поля скоростей и давлений в проточной полости



а)



б)

Рис. 5. а) трехмерная модель вихревого регулятора давления газа;
б) экспериментальный образец
Fig. 5. а) three-dimensional model of the vortex gas pressure regulator;
б) experimental sample

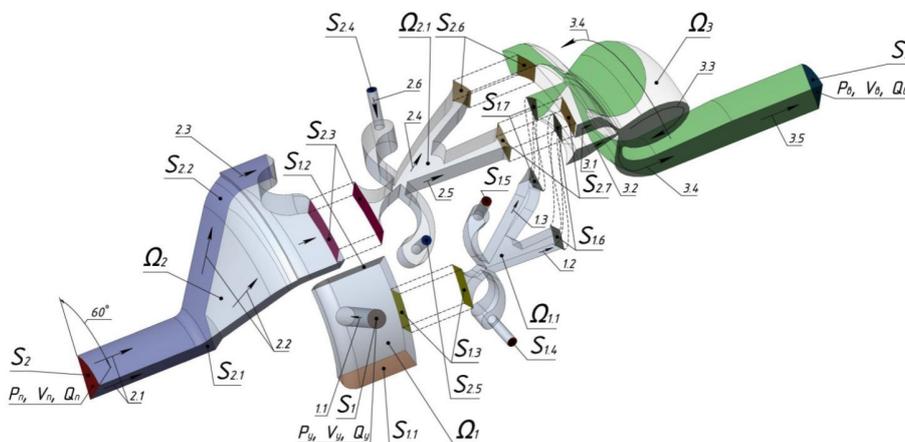


Рис. 6. Расчетная область регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочей среды, а также с возможностью их закрутки (вырез 5/6)
Fig. 6. The calculated area of the gas pressure regulator with a distributed supply of supply and control flow of the working medium, as well as with the possibility of their spin (cut 5/6)

вихревого регулятора давления газа (рис. 3). Все иллюстрированные рисунки приведены для эффекта запираания питающего канала.

В результате численного расчета построены зависимости расхода на выходе от расхода управления при различных значениях давления управления (рис. 4а), а также номограмма зависимости расхода в питающем, управляющем и выходном патрубке от давления управления, по которой определено значение давления управления, при котором происходит эффект запираания питающего канала (рис. 4б). Это значение равняется 4 атм.

Результаты расчетно-теоретических исследований рабочих процессов позволили определить основные конструктивные размеры и функциональные параметры устройства. На их основе разработана конструкция вихревого регулятора давления газа с распределенной подачей управляющего потока (рис. 5а).

С применением аддитивных технологий изготовлен экспериментальный образец вихревого регулятора давления газа (рис. 5б).

Математическая модель рабочего процесса вихревого регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего каналов, а также с регулировкой закрутки питающего и управляющего потоков рабочей среды

Проведено моделирование течения рабочего тела в проточной полости регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего каналов, а также с регулировкой закрутки питающего и управляющего потоков рабочей среды. Процесс моделирования течения рабочего тела включает в себя ряд этапов. На первом этапе проводится разработка ма-

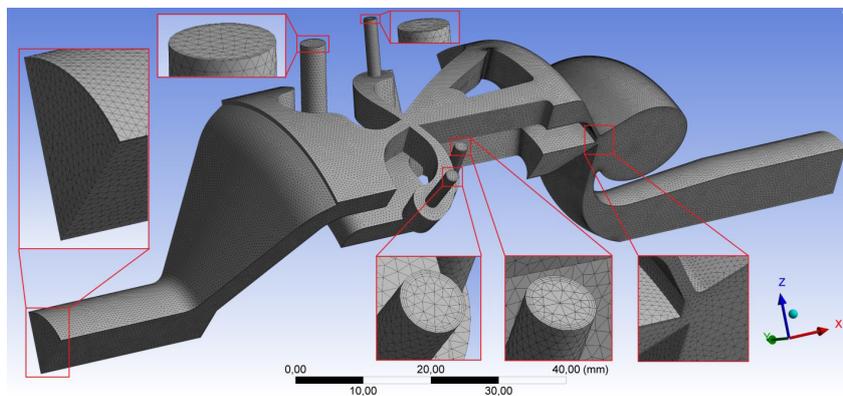


Рис. 7. Разбиение расчетной области на сетку контрольных объемов
Fig. 7. Splitting the computational domain into a grid of control volumes

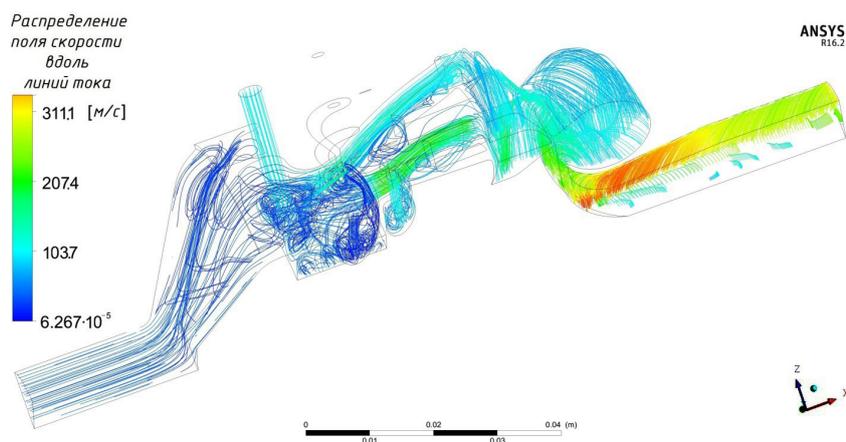


Рис. 8. Распределение поля скоростей в проточной полости вихревого регулятора давления газа с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочей среды
Fig. 8. The distribution of the velocity field in the flow cavity of the vortex gas pressure regulator with a distributed supply of supply and control flow of the working medium

тематической модели на основе методов вычислительной гидрогазодинамики.

Алгоритм разработки математической модели включает в себя ряд этапов: проводится выбор расчетной области, формулируются допущения, составляется система уравнений, описывающих процессы в исследуемом устройстве, и назначаются условия однозначности (граничные и начальные условия).

Расчетная область (рис. 6) представляет собой трехмерную модель проточной полости регулятора давления газа.

Принцип работы регулятора давления газа с распределенной подачей питающего управляющего потоков рабочей газа и с регулировкой закруткой питающего и управляющего потоков, так же как и принцип работы регулятора давления с сосредоточенной подачей управляющего и питающего потоков, основан на принципе взаимодействия струй. Однако в данной конструкции поток питания 2.1 через сечение S_2 поступает в питающий патрубок, далее обтекая центральное тело поступает в коллектор из шести триггеров $\Omega_{2,1}$. Стрелки 2.1-2.2-2.3 обозначают течение газа в питающем канале. Триггер $\Omega_{2,1}$ работает

следующим образом: при подаче рабочего тела в сечение $S_{2,4}$ (под давлением, равным давлению питания) происходит взаимодействие потоков 2.3 и 2.6, вследствие этого результирующий поток движется в радиальном направлении 2.5. Для отклонения питающего потока в тангенциальном направлении рабочая среда (под давлением, равным давлению питания) подается в сечение $S_{2,5}$. Вследствие этого происходит взаимодействие потоков 2.3 и 2.5 и результирующий поток 2.4 движется в тангенциальном направлении. Затем рабочий поток 3.1 подается в вихревую торобразную камеру, где взаимодействует с потоком управления 3.2. Поток управления, как и поток питания, может быть предварительно закручен при помощи коллектора из шести триггеров $\Omega_{1,1}$ на канале управления. Принцип работы коллектора управления аналогичен принципу работы коллектора, установленного на потоке питания. Для подачи управляющего потока 1.1 в радиальном направлении рабочее тело (под давлением, равным давлению управления) подается в сечение $S_{1,5'}$ для подачи управляющего потока в тангенциальном направлении рабочее тело подается в сечение $S_{1,4}$. При взаимодействии пита-

Таблица 2. Расчетные параметры и граничные условия
Table 2. Design parameters and boundary conditions

Расчетные параметры	
Процесс	Стационарный
Рабочая среда	Атмосферный воздух
Граничные условия	
Давление в сечении S_1 , p_1	0,4 МПа
Давление в сечении S_2 , p_2	0,2 МПа
Давление в сечении S_3 , $p_{вых}$	0,1 МПа
Тип выходного канала	Открытый
Температура в сечении S_1 , T_1	25 °С
Температура в сечении S_2 , T_2	25 °С
Температура в сечении S_3 , $T_{вых}$	25 °С
Модель турбулентности	SST
На входе в расчетную область	$p(R) = p_n; R(r, \theta_r, z, t) \in S_{12}$
На выходе из расчетной области	$p(R) = p_{вых}; R(r, \theta_r, z, t) \in S_3; \vec{u}(R) \perp S_2$
На внешних границах	$u_x(\vec{r}) = u_y(\vec{r}) = u_z(\vec{r}) = 0$

Таблица 3. Скорость и давление в проточной полости, полученные в результате численного моделирования
Table 3. The speed and pressure in the flow cavity obtained as a result of numerical simulation

Velocity [m s ⁻¹]					Pressure [Pa] избыточное				
Inlet	Pitanie ypr	Ypr pit tang	Ypr ypr tang	Outlet	Inlet	Pitanie ypr	Ypr pit tang	Ypr ypr tang	Outlet
23,8281	118,764	109,077	89,1788	255,641	202309	223331	195923	198766	88267,4
27,8667	98,9008	109,077	89,1789	249,701	202184	209152	194118	191890	89098,8
31,4598	79,0383	109,077	69,2984	241,354	202057	193926	190752	183092	89936,1
33,4481	59,1772	109,077	49,4204	235,009	201980	183264	189719	177277	90138,6
38,6319	59,1772	34,52	49,4205	234,039	201757	182701	181524	176647	90304,3
19,216	138,626	109,077	89,1788	260,315	202427	239466	199065	204246	87644,1
11,8928	158,488	109,077	89,1788	267,037	202564	257176	202186	211701	86241,1
45,8807	118,762	109,075	89,1777	348,255	302724	289552	274555	264167	77688,8
56,3585	118,762	0,000471784	3,60331e-005	338,08	302081	271434	258216	242307	78926,7
50,9055	148,555	0,00178141	0,000123434	345,822	302429	293670	266238	249191	77531,4

ющего 3.1 и управляющего 3.2 потоков рабочей среды в вихревой торообразной камере образуется сложное спиралевидное течение рабочего тела, вследствие этого в вихревой камере создается градиент давлений: в центре вихря — минимальное давление, на периферии вихря — максимальное. При достижении давления рабочего тела на периферии вихря, равного давлению питания, происходит уменьшение расхода питания вплоть до его запираания.

Основные допущения при построении математической модели течения рабочего тела:

- отсутствие теплообмена с окружающей средой;

- ньютоновская вязкая жидкость.

В данном случае математическая модель описывает стационарное турбулентное течение сжимаемой ньютоновской вязкой жидкости.

Данная математическая модель аналогична математической модели, составленной для регулятора давления газа с сосредоточенной подачей питающего и управляющего потоков рабочей среды.

На следующем этапе численного моделирования расчетная область импортируется в расчетную среду программы и проводится её разбиение на сетку контрольных объемов (рис. 7).

Далее назначаются расчетные параметры и граничные условия (табл. 2).

Начальные условия: распределение давлений, скоростей в начальный момент времени:

$$t = 0 \mid p = p_{atm}; \vec{u} = 0.$$

В результате численного моделирования получено распределение поля скоростей (рис. 8).

Результаты

В результате численного расчета удалось установить, что триггеры работают в стабильном режиме (то есть не переключаются из канала 2.4 в 2.5) даже при отсутствии управляющих потоков на них. В вихревой камере регулятора действительно образуется сложное спиралевидное течение рабочей среды. На периферии вихревой камеры образуется область повышенного давления, которая и преграждает путь рабочей среде из канала питания. Максимальные скорости рабочей среды в проточной полости образуются в области закругления выходного патрубка. Данное явление в дальнейшем необходимо устранить, так как при увеличении перепада давлений на регуляторе возможно образование зон со свехзвуковым течением рабочей среды, а следовательно, образование газодинамического шума и пульсаций давления в выходном патрубке.

Результаты численного исследования рабочего процесса в проточной полости вихревого регулятора давления рабочей среды представлены в табл. 3.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали, что при наличии закрутки питающего потока рабочей среды, расход на выходе из регулятора уменьшается на треть по сравнению с исходным значением расхода, что подтверждает работоспособность конструкции. Наличие потока управления, а также его закрутки не способствовало снижению расхода на выходе из регулятора давления рабочей среды с распределенной подачей питающего и управляющего потоков рабочей среды.

Список источников

1. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152. P. 380–388. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.718.
2. Uss A. Yu., Chernyshyov A. V., Krylov V. I. Development of Gas Pressure Vortex Regulator // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845.
3. *Advanced spacecraft valve technology compilation*. Pasadena, California. 1970. Vol. 2. 321 p.
4. Рехтен А. В. Струйная техника: основы, элементы, схемы / пер. с нем. А. А. Левина. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
5. Václav Tesař, Zuzana Broučková, Jozef Kordík, Zdeněk Trávníček, Kazimierz Peszynski. Valves with flow control by synthetic jets // *The European Physical Journal Web of Conferences*. 2012. Vol. 25. 01092. 19 p. DOI: 10.1051/epjconf/20122501092.
6. Goldschmied F. R., Kalange M. A. Hydraulic Axisymmetric Focused-Jet Diverters with Pneumatic Control. NASA TM X-53554. Huntsville, Alabama, 1966. 247 p.

7. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники. М.: Наука, 1969. 508 с.

8. Лебедев И. В., Трескунов С. Л., Яковенко В. С. Элементы струйной автоматики. М.: Машиностроение, 1973. С. 289–314.

9. Бугаенко В. Ф. Пневмоавтоматика ракетно-космических систем / под ред. В. С. Будника. М.: Машиностроение, 1979. 168 с.

10. Исследование и расчет струйных элементов и цепей систем автоматического регулирования: сб. ст. // *Труды МВТУ* № 244 / под ред. Д. Н. Попова. М., 1977. 79 с.

11. Белова О. В., Стародубцев А. А., Чернышев А. В. Вихревой регулятор давления газа // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. № 5 (17). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-760.

12. Белова О. В., Стародубцев А. А., Чернышев А. В. Расчет вихревого регулятора давления газа // *Инженерный вестник*. 2014. № 10. С. 61–68.

УСС Александр Юрьевич, аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

SPIN-код: 1191-6254

AuthorID (РИНЦ): 925879

AuthorID (SCOPUS): 57191032158

ЧЕРНЫШЕВ Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

SPIN-код: 8978-8666

AuthorID (РИНЦ): 161131

ORCID: 0000-0003-4902-8314

AuthorID (SCOPUS): 57191038344

АТАМАСОВ Никита Владимирович, старший консультант, платформенная практика, ООО «Премиум Консалтинг».

SPIN-код: 1835-5740

AuthorID (РИНЦ): 793960

ORCID: 0000-0003-1376-9137

Адрес для переписки: uss25.ru@mail.ru

Для цитирования

Усс А. Ю., Чернышев А. В., Атамасов Н. В. Разработка метода расчета и создание вихревого струйного устройства для управления потоком газа // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2019. Т. 3, № 2. С. 78–86. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-78-86.

Статья поступила в редакцию 20.03.2019 г.

© А. Ю. Усс, А. В. Чернышев, Н. В. Атамасов

DEVELOPMENT OF CALCULATION METHOD AND CREATION OF VORTEX JET DEVICE TO CONTROL GAS FLOW

A. Yu. Uss¹, A. V. Chernyshev¹, N. V. Atamasov²

¹Bauman Moscow State Technical University,
Russia, Moscow, 2-nd Baumanskaya St., 5/1, 105005

²JSC «Premium Consulting,
Russia, Moscow, Leningradskiy prospekt St., 80/5, 125190

Based on the analysis performed and a preliminary numerical calculation of the gas flow in the regulator's working cavity, a new design of the vortex gas pressure regulator has been developed. With the use of additive technologies, an experimental sample of the device has been manufactured. A number of experiments are carried out on the basis of the developed stand for testing the vortex regulator. The results of experimental studies confirmed the efficiency of the structure. Numerical studies have been carried out and a new design of the vortex regulator has been developed with a distributed flow of the control flow of the working medium, as well as the regulation of the twist of the supply and control flows of the working medium.

Keywords: vortex regulator, vortex amplifier, vortex chamber, the control stream, locking knob.

References

1. Uss A. Yu., Chernyshev A. V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 152. P. 380–388. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.718. (In Engl.).

2. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Krylov V. I. Development of Gas Pressure Vortex Regulator // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1876. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845. (In Engl.).

3. Advanced spacecraft valve technology compilation. Pasadena, California. 1970. Vol. 2. 321 p. (In Engl.).

4. Rekhten A. V. *Struynaya tekhnika: osnovy, elementy, skhemy* [Inkjet technology: fundamentals, elements, schemes] / Trans. A. A. Levin. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1980. 237 p. (In Russ.).

5. Václav Tesař, Zuzana Broučková, Jozef Kordík, Zdeněk Trávníček and Kazimierz Peszynski. Valves with flow control by synthetic jets // *The European Physical Journal Web of Conferences*. 2012. Vol. 25. 01092. 19 p. DOI: 10.1051/epjconf/20122501092. (In Engl.).

6. Goldschmied F. R., Kalange M. A. Hydraulic Axisymmetric Focused-Jet Diverters with Pneumatic Control. NASA TM X-53554. Huntsville, Alabama, 1966. 247 p. (In Engl.).

7. Zalmanzon L. A. *Teoriya elementov pnevmoniki* [Pneumatic element's theory]. Moscow: Nauka Publ., 1969. 508 p. (In Russ.).

8. Lebedev I. V., Treskunov S. L., Yakovenko V. S. *Elementy struynoy avtomatiki* [Elements of jet automation]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1973. P. 289–314. (In Russ.).

9. Bugayenko V. F. *Pnevmoavtomatika raketno-kosmicheskikh sistem* [Pneumatic automation of space rocket systems] / Ed. B. S. Budnic. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1979. 168 p. (In Russ.).

10. Issledovaniye i raschet struynykh elementov i tsepey sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Research and calculation of inkjet elements and circuit of automatic control systems] // *Trudy MVTU № 244. Works MSTU No. 244* / Ed. D. N. Popov. Moscow, 1977. 79 p. (In Russ.).

11. Belova O. V., Starodubcev A. A., Chernyshev A. V. *Vikhrevoy regulyator davleniya gaza* [Vortex gas pressure

regulator] // *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013. No. 5 (17). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-760. (In Russ.).

12. Belova O. V., Starodubcev A. A., Chernyshev A. V. *Raschet vikhrevogo regulyatora davleniya gaza* [Calculation of the vortex gas pressure regulator] // *Inzhenernyy vestnik. Engineering Bulletin*. 2014. No. 10. P. 61–68. (In Russ.).

USS Aleksandr Yurievich, Graduate Student of Vacuum and Compressor Equipment Department, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU). SPIN-code: 1191-6254

AuthorID (RSCI): 925879

AuthorID (SCOPUS): 57191032158

CHERNYSHEV Andrey Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Vacuum and Compressor Equipment Department, BMSTU.

SPIN-code: 8978-8666

AuthorID (RSCI): 161131

ORCID: 0000-0003-4902-8314

AuthorID (SCOPUS): 57191038344

ATAMASOV Nikita Vladimirovich, Senior Consultant, Platform Practice, JSC «Premium Consulting».

SPIN-code: 1835-5740

AuthorID (RSCI): 793960

ORCID: 0000-0003-1376-9137

Address for correspondence: uss25.ru@mail.ru

For citations

Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Atamasov N. V. Development of calculation method and creation of vortex jet device to control gas flow // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 78–86. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-78-86.

Received 20 March 2019.

© A. Yu. Uss, A. V. Chernyshev, N. V. Atamasov