

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГАЗОРЕАКТИВНОГО ПРИВОДА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОЙ ПРИ ПОМОЩИ ВИХРЕВОГО КЛАПАНА

А. Ю. Усс<sup>1</sup>, А. В. Чернышев<sup>1</sup>, А. С. Пугачук<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Статья посвящена проектированию газореактивного привода с системой управления тягой при помощи вихревого клапана. Приведена схема и рассмотрен принцип работы вихревого струйного устройства, предназначенного для управления потоком газа. Выбрана схема вихревого струйного устройства с распределенной подачей питающего и сосредоточенной подачей управляющего потоков газа, предназначенная для управления тягой газореактивного привода. Проведено профилирование сопла Лаваля по упрощенной методике из книги Г. Н. Абрамовича «Прикладная газовая динамика». Проведены расчетно-теоретические исследования течения газа из газореактивного привода с вихревым клапаном в режиме максимальной тяги и в режиме управления тягой.

**Ключевые слова:** запорно-регулирующие устройства, вихревое струйное устройство, регулятор давления, регулятор расхода, вихревой клапан, газореактивный двигатель.

## Введение

В настоящее время во многих областях практической деятельности человека широко используются устройства, предназначенные для управления потоком рабочей среды (далее по тексту РС). Такой класс устройств принято называть запорно-регулирующими устройствами (ЗРУ). К ЗРУ относятся клапаны, вентили, задвижки, поворотные заслонки, регуляторы давления или расхода РС и т.д.

В данной работе речь пойдет о вихревом струйном устройстве, предназначенном для управления потоком РС. Вихревое струйное устройство используется в регуляторах давления или расхода РС и отличается тем, что в таких конструкциях отсутствуют подвижные элементы.

Повысить надежность работы ЗРУ можно за счет создания конструкций без подвижных элементов, принцип работы которых основан исключительно на газодинамических эффектах таких, как эффект Коанда, турбулизация потока РС, а также использование вихревого течения РС.

Устройства, в которых для управления потоком РС применяются перечисленные процессы и эффекты называются «вихревые струйные устройства» (далее по тексту ВСУ), которые могут использоваться в качестве исполнительного устройства. Классическая схема вихревого струйного устройства представлена на рис. 1а.

Принцип работы вихревого струйного устройства (далее ВСУ), представленного на рис. 1а, следующий: поток питания поступает в канал 2, затем в вихревую камеру 3, заполняет ее и проходит к выходному патрубку 4. При необходимости понижения давления/расхода в выходном патрубке 4 следует подать вспомогательный поток — поток

управления в канал управления 1. В результате взаимодействия питающей и управляющей струи происходит их слияние, так что масса результирующей струи представляет сумму масс отдельных струй. Направление результирующего потока определяется геометрической суммой количеств движений соударяющихся потоков.

После взаимодействия, питающего и управляющего потоков, результирующий поток под действием эффекта Коанда прилипает к цилиндрической стенке вихревой камеры. В результате этого в вихревой камере образуется вихревое течение РС. Основной принцип понижения давления в выходном патрубке заключается в создании существенного гидравлического сопротивления при спиральном движении РС от периферии вихревой камеры к центру. Сопротивление осуществляется за счет вихревого течения, в результате которого образуется поле центробежных сил, действующих на вращающуюся массу РС. Под действием центробежных сил РС отбрасывается на периферию вихревой камеры. В результате этого создается перепад давления: в центре вихря — пониженное давление; на периферии вихря — повышенное давление. В тот момент, когда на периферии вихревой камеры давление станет равным давлению в канале питания, расход из канала питания прекращается. Такой эффект называется эффектом запирания потока питания в вихревом струйном устройстве.

Исходя из принципа работы ВСУ, можем сделать вывод о том, что основное назначение потока управления — отклонить поток питания на 90° для образования в вихревой камере ВСУ вихревого течения РС.

Актуальность разработки регулирующих устройств с применением принципа вихревого те-

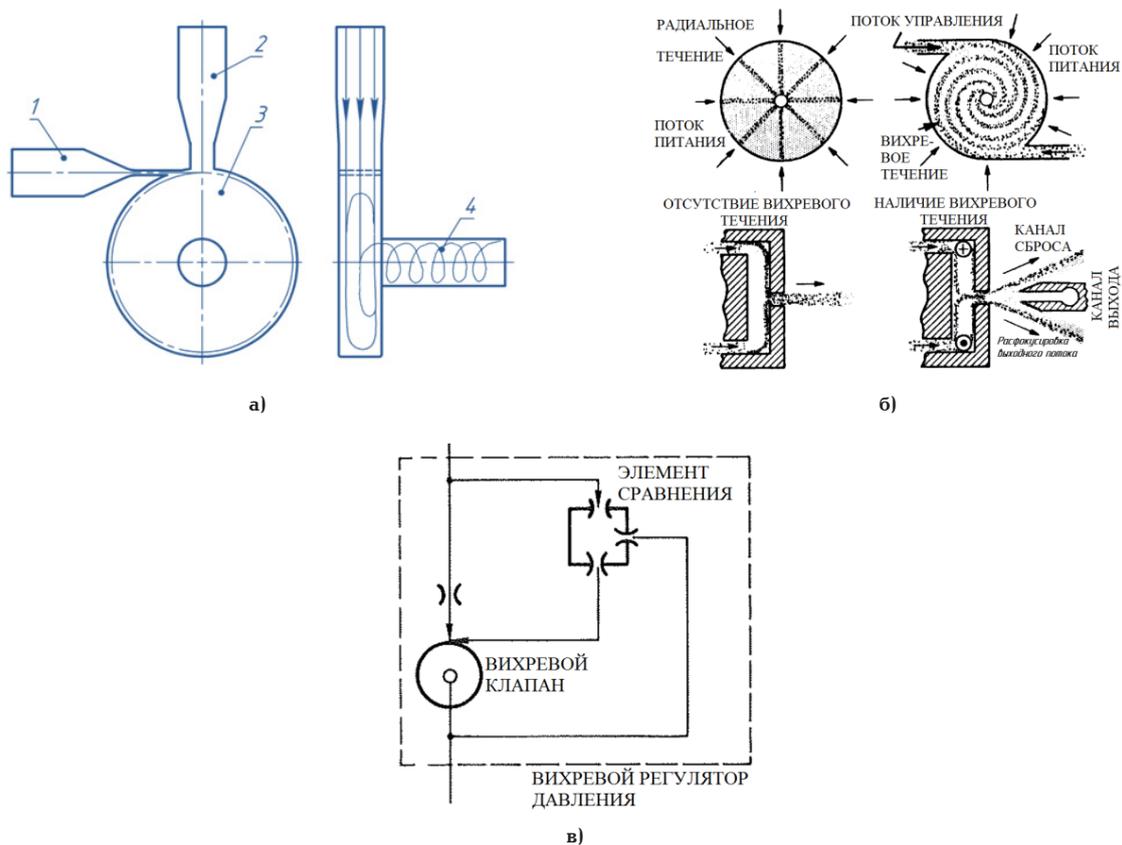


Рис. 1. а) схема вихревого струйного устройства с сосредоточенной подачей питающего и управляющего потоков РС; б) вихревое струйное устройство с распределенной по периферии вихревой камеры подачей питающего и сосредоточенной подачей управляющего потоков РС; в) применение вихревого струйного устройства в регуляторе давления РС  
 Fig. 1. a) diagram of the vortex jet device with a concentrated supply and controlling flows of RS; b) vortex fluidic device with distributed along the periphery of the vortex chamber supply and a concentrated supply of the control flows of RS; c) the application of vortex jet device pressure regulator RS

чения РС подтверждается множеством разработок подобных изделий в различных областях техники.

Математические зависимости выходных параметров (давление и расход на выходе из устройства) от параметров управления (давление и расход в канале управления), а также влияние изменения геометрических параметров проточной полости (диаметр вихревой камеры  $D$ , ширина вихревой камеры  $H$ , геометрические параметры каналов питания и управления, их число и расположение) на изменение значения газодинамических параметров изложены в работах [1–6]. Представленные математические модели основывались на эмпирических зависимостях, то есть на данных экспериментальных исследований, что на практике может быть применимо лишь в узком диапазоне газодинамических параметров РС и на начальном этапе расчета подобных конструкций.

Современные исследования авторов данной статьи по ВСУ: обзор научно-технической литературы, обзор конструкций вихревых клапанов, выявление достоинств и недостатков, численное исследование газодинамических процессов в проточной полости ВСУ в распределенных газодинамических параметрах, исследование эффекта запирания питающего канала, а также создание конструкции, проведение серии экспериментальных исследований и верификация математической модели рабочего процесса изложены в работах [7–9].

В качестве примера использования вихревых струйных устройств в качестве регулирующей арматуры для управления высокотемпературными потоками можно привести разработки исследователей из Китая [10–13].

Приборы и механизмы, в которых используются свойства течения воздуха, применяются в различных отраслях техники. Пневматические устройства применяются при управлении силовыми установками различного назначения. Для улучшения характеристик летательных аппаратов применяется управление потоками при помощи устройств без механически подвижных частей.

Идея управления вектором тяги при помощи вторичного впрыска известна еще с 60-х годов XX века. Активно подобными разработками занимались в NASA [14].

Конструктивно вихревой клапан [15] (рис. 2б) представлял собой композитную структуру из графита высокой плотности, с нанесенным асбестовым покрытием.

### Постановка задачи

Рассмотренный вихревой клапан (рис. 2б) обладает некоторым недостатком — коротким и непрофилированным соплом, что на практике не является оптимальной конструкцией с точки зрения обеспечения максимальной тяги. В связи с чем с целью

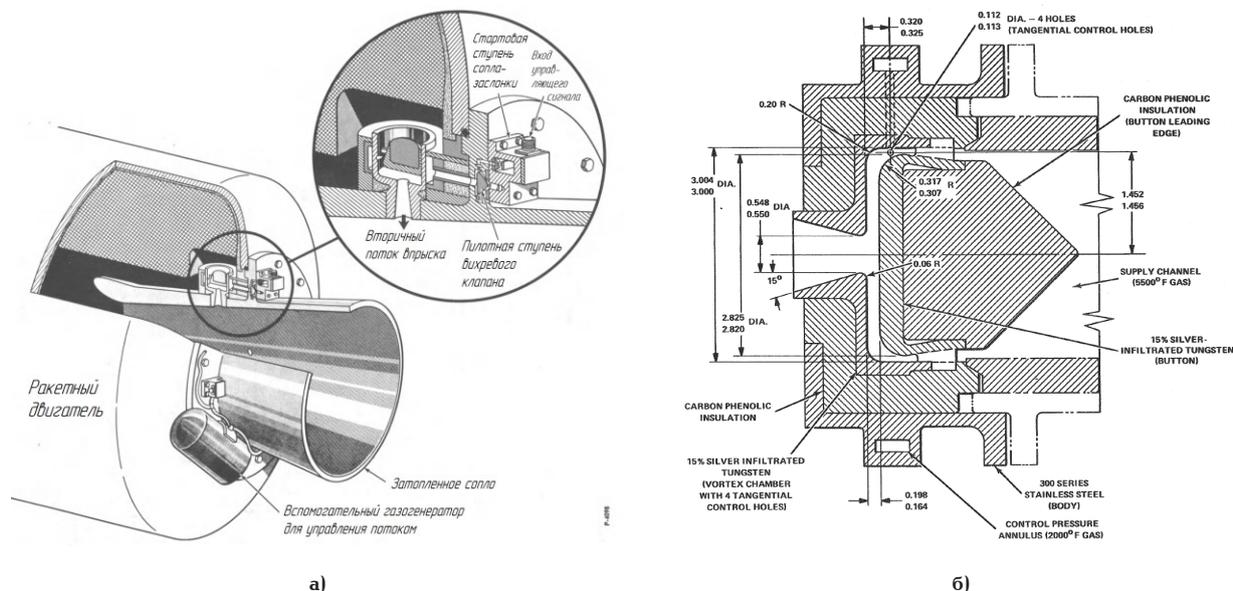


Рис. 2. а) вихревой клапан для управления вектором тяги в твердотопливном двигателе;  
 б) композитный вихревой клапан для управления вектором тяги твердотопливного ракетного двигателя  
 Fig. 2. а) a vortex valve for controlling the thrust vector in a solid-fuel engine;  
 б) a composite vortex valve for controlling the thrust vector of a solid-fuel rocket engine

апробации возможности применения вихревого клапана для управления тягой газореактивного привода и правомочности дальнейшего практического применения подобного конструктивного решения в данной работе предлагается разработать газореактивный привод с возможностью управления тягой на базе конструкции, приведенной на рис. 1б, с профилированным соплом.

Для управления тягой газореактивного привода выбрана схема вихревого струйного устройства с распределенной подачей питающего и сосредоточенной подачей управляющего потоков газа (рис. 2б).

По мнению И. В. Лебедева [5, с. 291] вихревое струйное устройство с радиальной подачей потока питания через сопло, т.е. подачей, сосредоточенной в одном месте периметра камеры (рис. 1а), может обладать существенным недостатком, заключающимся в том, что включение его в работу происходит скачкообразно. Это объясняется следующим. Первоначально при подаче потока управления происходит взаимодействие управляющего и питающего потоков. Более мощный поток питания под действием потока управления отклоняется, в результате чего в камере возникает несимметричное струйное течение и, как следствие этого, поперечный перепад давления. Под действием этого перепада поток питания быстро притягивается к боковой цилиндрической стенке камеры, после чего в камере возникает закрученное течение, т.е. вихревое струйное устройство включается в работу. При указанном быстром притяжении струи происходит скачкообразное изменение давления и расходов вихревого струйного устройства.

Чтобы избежать этого, применяется рассредоточенная по периметру камеры симметричная подача потока питания, достигаемая увеличением ширины и числа сопел питания. Количество каналов питания и управления может быть различным: два, четыре и более; в предельном случае имеет место быть

распределенная периферийная подача питающего и управляющего потоков рабочей среды. В данной работе в разрабатываемой конструкции газореактивного привода применяется распределенная по периферии подача потока питания и сосредоточенная по периферии (4 сопла управления) подача потока управления.

### Профилирование сопла газореактивного привода

Для профилирования сопла газореактивного привода использована упрощенная методика профилирования, изложенная в работе [16].

Профилированное сопло Лавала состоит из двух конусов, соединенных горловиной, которая описана дугой окружности. В связи с тем, что вихревой клапан, имеющий цилиндрическую вихревую камеру, обеспечивает запираание потока питания при меньшем значении давления управления, по сравнению с вихревым клапаном, имеющим коническую вихревую камеру, боковой угол сужающейся части сопла выбран  $90^\circ$ , расширяющейся части —  $30^\circ$ . По мнению автора методики такое конусное сопло дает (по экспериментальным данным) уменьшение импульса в сравнении с соплами специального профиля не более чем на 1–2%.

Проведем простой геометрический метод расчета сопла, дающий контуры, очень близкие к оптимальным. Горловина такого сопла описывается двумя окружностями; дозвуковая часть — радиусом  $0,4R_{kp} = 0,4 \cdot 3,5 = 1,4$  мм, где  $R_{kp} = 3,5$  мм — радиус критического сечения (рис. 3а). К отрезку дуги радиуса  $0,4R_{kp}$  под углом  $\Theta_N$  к оси сопла проводится касательная  $NQ$  до пересечения с отрезком  $Q_a$ , проходящим через срез сопла и наклоненным к оси под заданным углом  $\Theta_a$ . Отрезки  $NQ$  и  $Q_a$  разбиваются на равное число участков, причем точки деления линии  $Q_a$  соединяются с одноименными точками

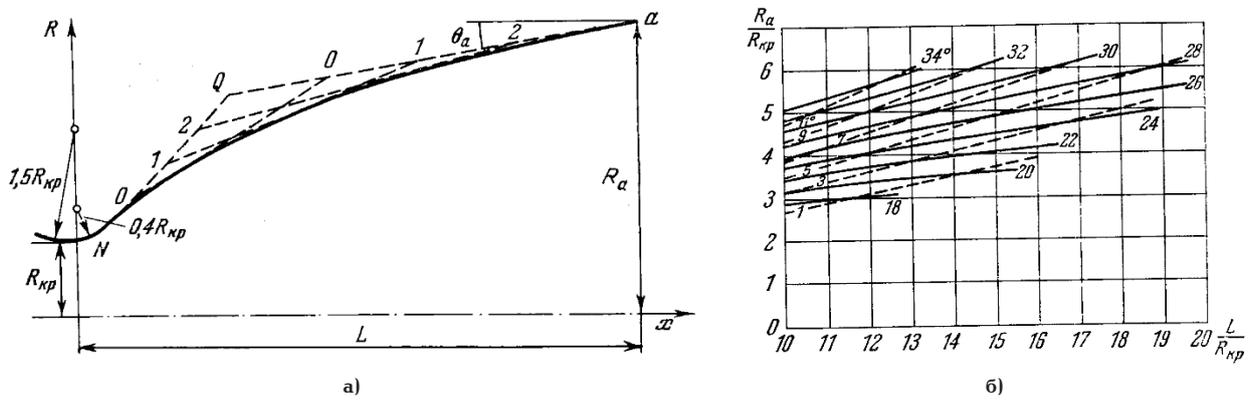


Рис. 3. Иллюстрации для упрощенной методики профилирования сопла: а) схема построения контура сопла; б) зависимость углов  $\theta_N$  (сплошные линии) и  $\theta_a$  (штриховые линии) от относительных значений длины и радиуса на срезе сопла  
 Fig. 3. Illustrations for the simplified method of nozzle profiling: a) diagram of the construction of the nozzle contour; б) the dependence of the angles  $\theta_N$  (solid lines) and  $\theta_a$  (dashed lines) on the relative values of the length and radius on the nozzle section

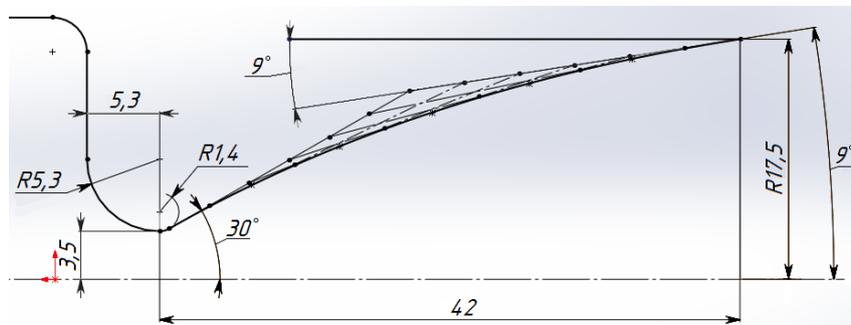


Рис. 4. Результат профилирования сопла.  
 Базовый эскиз для создания твердотельной модели газореактивного привода в SolidWorks  
 Fig. 4. The result of the nozzle profiling.  
 Basic sketch for creating a solid-state model of a gas-jet drive in SolidWorks

деления линии  $NQ$ ; огибающая полученной сетки прямых образует искомый контур сопла.

На рис. 3б приведены графики для определения углов наклона  $\theta_N$  (сплошные линии) и  $\theta_a$  (штриховые линии) по заданным значениям относительной длины сопла  $L/R_{кр}$  и относительного радиуса выходного сечения  $R_a/R_{кр}$ . О качестве описанного геометрического способа построения сопел можно судить по такому примеру: максимальное линейное отклонение контура от оптимального, рассчитанного по точной методике для сопла  $R_a = 5R_{кр}$ ,  $L = 12R_{кр}$ , составляет  $0,03R_{кр}$ .

В данной работе зададимся  $R_a = 5R_{кр} = 5 \cdot 3,5 = 17,5$  мм;  $L = 12R_{кр} = 12 \cdot 3,5 = 42$  мм. По графикам на рис. 3б определяем  $\theta_N = 30^\circ$ ,  $\theta_a = 9^\circ$ . Затем проводим профилирование сопла (рис. 4) по вышеизложенной методике.

### Теория

Для исследования рабочего процесса, протекающего в проточной полости газореактивного привода с вихревым клапаном, а также с целью проведения виртуального эксперимента по управлению тягой газореактивного привода с применением современ-

ных программных пакетов и на базе имеющейся компьютерной техники, создана методика расчета рабочего процесса, происходящего внутри проточной полости [7, 8].

Основоположниками создания и внедрения вихревых струйных устройств были д. т. н., профессор Л. А. Зааманзон, д. т. н., профессор И. В. Лебедев, В. Ф. Бугаенко и А. И. Эдельман, д. т. н., профессор МГТУ им. Н. Э. Баумана Д. Н. Попов. Из зарубежных исследователей и основоположников математических моделей можно выделить: Г. Г. Глетли, Р. Е. Боурс, Р. В. Уоррен, С. К. Тафт, П. А. Орнер, А. В. Рехтен, Н. М. Schaedel.

Исходными данными при исследовании характеристик вихревых струйных устройств являются представления о структуре струй и о процессах их взаимодействия, следующие из теории струй, разработанной Г. Н. Абрамовичем, Л. А. Вулисом и В. П. Кашкаровым, М. И. Гуревичем, А. С. Гиневским и др. Для рассматриваемой области важное значение имеют свойства пристеночных течений, общая теория которых была разработана Л. Г. Лойцянским, Г. Шлихтингом и другими учеными гидроаэродинамики. Вместе с тем ряд работ был посвящен изучению аэродинамических процессов,

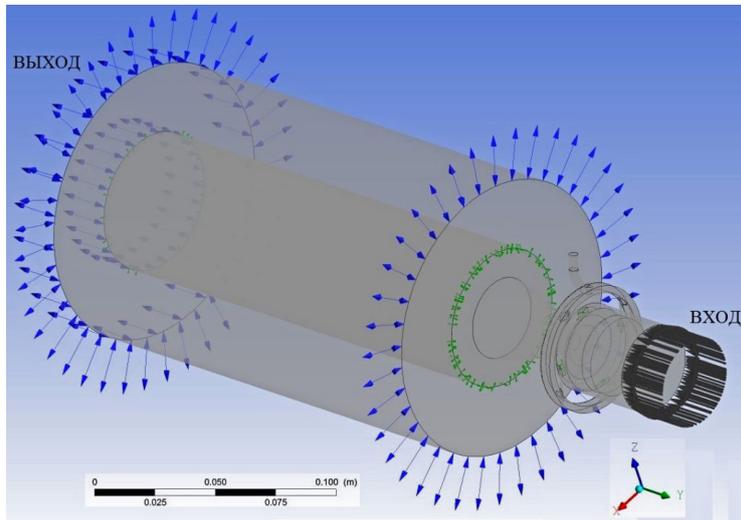


Рис. 5. Расчетная область  
Fig. 5. Calculation area

которыми определяются характеристики вихревых струйных устройств: И. В. Лебедев, Н. Н. Иванов, С. Л. Трескунов, Г. Коуэн, Р. Т. Кронин, П. Кийковский и др.

Предложенные ими математические модели, описывающие течение жидкости в вихревой камере, основывались на базовых законах физики, а самое главное — на эмпирических зависимостях, которые на практике могут использоваться в первом приближении для расчета параметров потока питания и управления.

### Математическая модель

Для разработки новых конструкций газореактивных приводов с вихревым клапаном с применением современных программных пакетов и на базе имеющейся компьютерной техники создана математическая модель процессов, происходящих внутри проточной полости [7].

Для разработки математической модели необходимо выбрать расчетную область, сформулировать допущения, записать систему уравнений, описывающих процессы в исследуемом устройстве, и условия однозначности (граничные и начальные условия).

Основу математической модели, описывающей стационарное турбулентное течение сжимаемой «ньютоновской» вязкой жидкости, составляют дифференциальные уравнения течения жидкости:

— уравнение неразрывности:

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

где  $t$  — время;  $\rho$  — плотность;  $\vec{u}$  — вектор скорости;

— закон сохранения количества движения (уравнение Навье — Стокса):

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

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;  $\tau_{ij}$  — 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  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $\mu$  — динамическая вязкость;  $\delta_{ij}$  — оператор Кронекера;

— закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho H u_j - k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_i} - \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + S_h,$$

где  $S_h$  — объемный источник тепла;  $H$  — полная удельная энтальпия жидкости, которая выражается суммой удельной энтальпии и кинетической энергии единицы массы жидкости:

$$H = h + (u_2 + v_2 + w_2)/2,$$

где  $h = c_p T$  — удельная энтальпия, с допущением, что удельная теплоемкость жидкости постоянна;  $u, v, w$  — проекции вектора скорости на направления  $x, y, z$  соответственно.

Данная система дополняется моделью турбулентности SST:

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

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

Система уравнений замыкается граничными условиями:

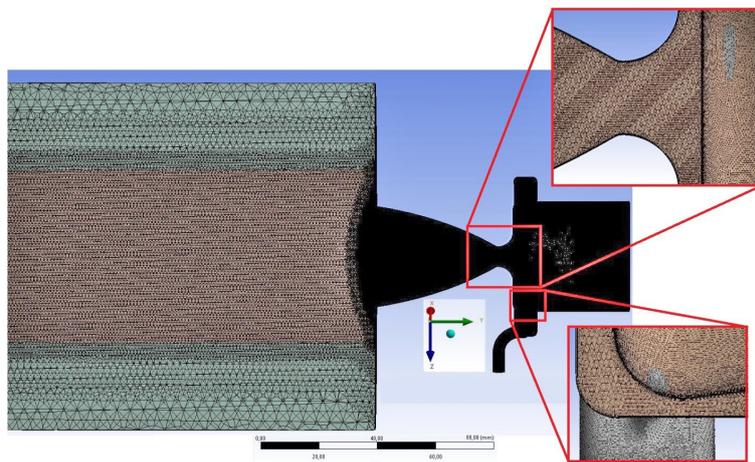


Рис. 6. Расчетная сетка  
Fig. 6. Calculation grid

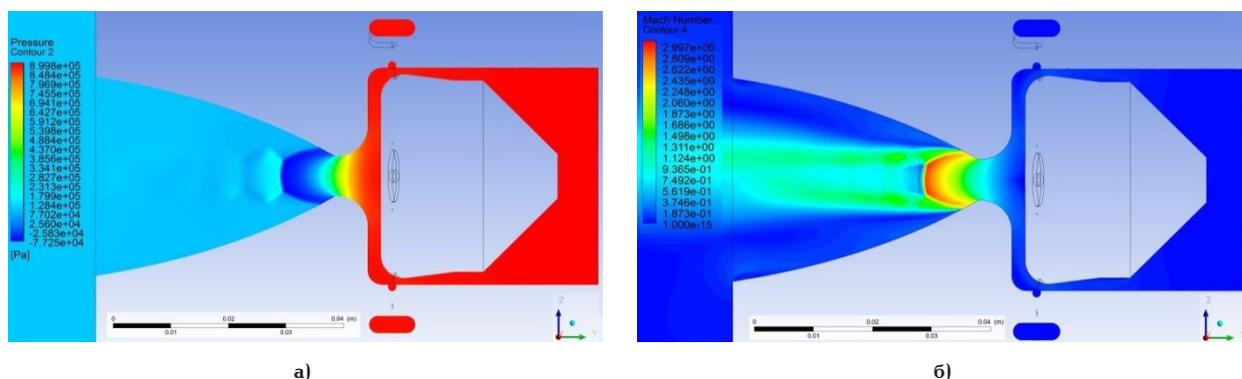


Рис. 7. Результаты расчета  
Fig. 7. The results of the calculation

— на входе в устройство задаются значения давления  $p_0$ ,  $p_1$ ; скорости потоков  $v_0$ ,  $v_1$ ; температуры потоков  $T_0$ ,  $T_1$ ;

— на выходе — массовый расход 90 г/с.

В общем случае система уравнений не имеет аналитического решения. Для получения приближенного решения используются численные методы решения. Сначала нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие непрерывный процесс, а также вспомогательные (граничные и начальные) условия преобразуются в дискретную систему линейных алгебраических уравнений (этап дискретизации). Далее формулируется итерационный алгоритм решения исходной системы дифференциальных уравнений.

#### Расчетное исследование

Для решения системы дифференциальных уравнений выбран метод контрольных объемов (МКО).

Алгоритм численного расчета течения газа в вихревом регуляторе включал в себя пять этапов:

1. Построение расчетной области в виде твердотельной модели проточной полости газореактивного привода, состоящей из вихревой камеры, сопла Лавала, а также входных и выходных патрубков.

2. Импортирование твердотельной модели в среду ANSYS CFX (рис. 5). Далее проводилось разбиение расчетной области на сетку контрольных объемов (рис. 6). Для решения использовался тетраэдрический тип сетки.

3. Назначение начальных и граничных условий.

Расчет проводился для стационарного режима течения. В канале питания массовый расход поддерживался постоянным  $M_{num} = 90$  г/с, а давление в канале управления  $p_{упр}$  изменялось в интервале от 0,5 МПа до 0,75 МПа с шагом 0,05 МПа. Выходной канал  $p_{вых}$  — открытого типа, величина давления 0,1 МПа. Значение температуры во всех каналах одинаково и равно 25 °С.

Расчетные параметры и граничные условия:

- тип расчета — стационарный;
- давление в канале управления,  $p_1$  — 0,5–0,75 МПа;
- массовый расход в канале питания,  $M_{num}$  — 90 г/с;
- давление в выходном канале,  $p_{вых}$  — 0,1 МПа;
- тип выходного канала — открытый;
- температура на входе канала управления,  $T_1$  — 25 °С;
- температура на входе канала питания,  $T_2$  — 25 °С;

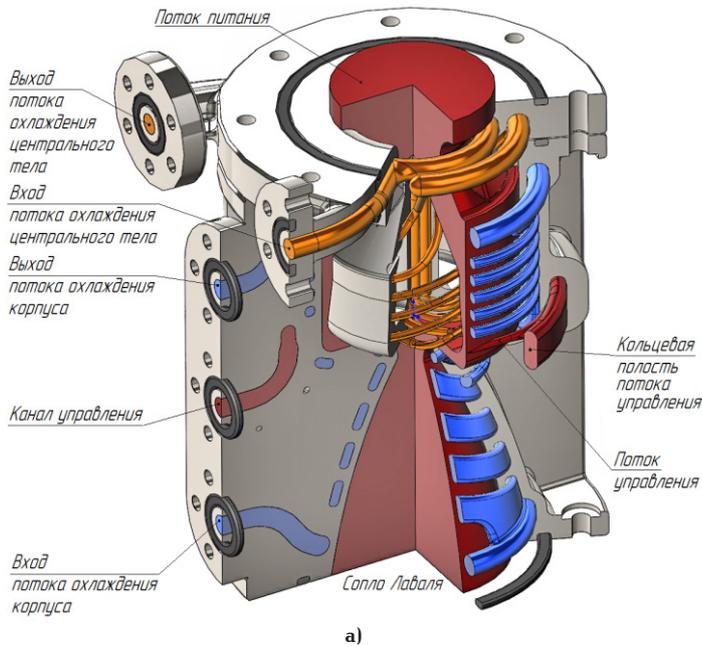


Рис. 8. а) трехмерная модель с разнесенным центральным телом; б) экспериментальный образец  
Fig. 8. a) a three-dimensional model with a spaced central body; b) an experimental sample

- температура за выходным каналом,  $T_{\text{вых}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- модель турбулентности — SST;
- на входе в расчетную область:

$$p(\vec{R}) = p_n;$$

$$\vec{R}(r, \theta_r, z, t) \in S_{\text{вх}};$$

- на выходе из расчетной области:

$$p(\vec{R}) = p_{\text{вых}};$$

$$\vec{R}(r, \theta_r, z, t) \in S_{\text{вых}}, \vec{u}(\vec{R}) \perp S_{\text{вых}};$$

- на внешних границах:

$$u_x(\vec{r}) = u_y(\vec{r}) = u_z(\vec{r}) = 0.$$

Начальные условия:

Распределение давлений, скоростей в начальный момент времени:

$$t = 0 \mid p = p_{\text{атм}};$$

$$\vec{u} = 0.$$

4. Основные допущения:

- течение газа трехмерное;
- процесс установившийся;
- не учитываются массовые силы (силы тяжести, действующие на рабочее тело);
- ньютоновская вязкая жидкость;
- отсутствие теплообмена с окружающей средой (адиабатная стенка).

На рис. 7а показано распределение давлений в проточной полости вихревого регулятора. На рис. 7б показано распределение Маха.

#### Результаты расчетного исследования

На базе данной математической модели проведены расчеты и определены основные конструк-

тивные параметры газореактивного привода с вихревым клапаном, на основе которых разработана трехмерная модель газореактивного привода с вихревым клапаном (рис. 8а).

Разработанный подход виртуального исследования рабочего процесса, протекающего в проточной полости газореактивного двигателя с вихревым клапаном, позволяет повысить эффективность проектирования подобного рода конструкций и сократить сроки на разработку за счет возможности внесения изменения в конструктивную схему еще на этапах проектирования газореактивного двигателя.

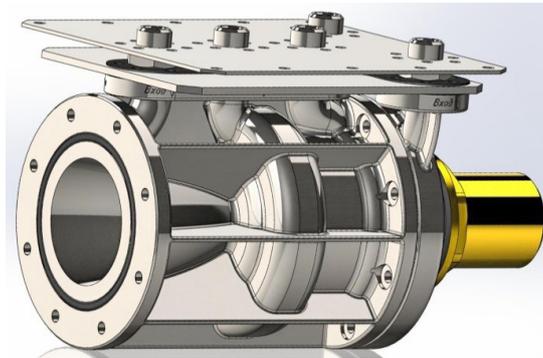
#### Экспериментальное исследование

С современным развитием аддитивных технологий имеется возможность изготавливать подобные конструкции ракетных двигателей из керамики или жаропрочной стали.

С целью верификации математической модели и экспериментального исследования рабочего процесса, протекающего в проточной полости газореактивного двигателя с вихревым клапаном, с применением метода аддитивных технологий в ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» на принтере «Uprint se plus» из ABS пластика изготовлен экспериментальный образец газореактивного двигателя с вихревым клапаном (рис. 8б).

Для проведения экспериментального исследования рабочего процесса, протекающего в проточной полости газореактивного двигателя с вихревым клапаном, в лаборатории запорно-регулирующей арматуры и пневмомеханики кафедры Э5 «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана изготовлена трехмерная модель сборки газореактивного двигателя (рис. 9а) и экспериментальный стенд (рис. 9б).

Экспериментальный стенд работает следующим образом. Поток питания поступает через быстро-



a)



б)

Рис. 9. Экспериментальный стенд: а) трехмерная модель сборки газореактивного привода; б) стенд для исследования рабочих процессов в газореактивном двигателе  
 Fig. 9. Experimental stand: a) three-dimensional model of the assembly of a gas-jet drive; б) a stand for the study of working processes in a gas-jet engine

разъемное соединение 1 в гибкий шланг 4, который соединен с проточной полостью газореактивного двигателя 9. Управление расходом питания осуществляется при помощи шарового крана 2. Поток управления поступает через гибкий шланг 5 в патрубков управления вихревым клапаном газореактивного двигателя 9. Изменение расхода управления осуществляется при помощи шарового крана 3. С целью пренебрежения массой конструкции в ходе эксперимента, газореактивный привод закреплен на платформе 8, которая имеет возможность перемещаться в горизонтальной плоскости на подвижных направляющих с линейными подшипниками 7. Таким образом масса конструкции газореактивного двигателя действует вертикально вниз на подвижные направляющие с линейными подшипниками 7,

что позволяет пренебречь массой всей конструкции. В ходе эксперимента пренебрегаем трением в подшипниковых опорах линейных направляющих, а также жесткостью питающего 4 и управляющего 5 патрубков. Тяга газореактивного двигателя измеряется при помощи электронного динамометра 6.

Эксперимент проводился в двух режимах. Первый режим — режим максимальной тяги двигателя, второй режим — режим управления тягой при помощи вихревого клапана.

Эксперимент проводится следующим образом. Нагнетается давление в пневмосеть до 7 атм. Включается динамометр 6. Плавно открывается шаровый кран 2 по линии питания так, чтобы давление в канале питания 4 достигло 4,5 атм. При помощи динамометра 6 измеряется максимальная тяга двигателя.

Затем плавно открывается шаровый кран 3, вихревой клапан включается в работу, изменяется расход на выходе газореактивного двигателя и, как следствие, уменьшается тяга, значение которой идентифицируем при помощи динамометра 6.

В результате эксперимента определена максимальная тяга, которая составила 1,7 кг. При режиме управления тяга уменьшилась до 0,75 кг. Сопоставление результатов расчетно-теоретических и экспериментальных исследований позволило сделать заключение об адекватности составленной математической модели и правомочности ее дальнейшего использования при разработке подобного рода конструкций.

### Выводы и заключение

Анализ проведенных в данной области исследований и обзор существующих технических решений позволяет сформулировать следующие выводы:

— рассмотрены конструкции регулирующей арматуры с использованием принципа вихревого течения РС;

— отличительной особенностью является простота их изготовления и высокая степень надежности в процессе эксплуатации;

— выбрана схема вихревого струйного устройства с распределенной подачей питающего и сосредоточенной подачей управляющего потоков газа, предназначенная для управления тягой газореактивного двигателя;

— проведено профилирование сопла Лаваля по упрощенной методике из [16];

— проведены расчетно-теоретические исследования течения газа из газореактивного привода с вихревым клапаном в режиме максимальной тяги и в режиме управления тягой;

— анализ современных технологий изготовления газореактивных приводов позволил сделать выбор в пользу аддитивных технологий изготовления;

— разработана трехмерная модель газореактивного привода с вихревым клапаном;

— при помощи метода аддитивных технологий изготовлен экспериментальный образец газореактивного привода с вихревым клапаном;

— разработан экспериментальный стенд и проведены экспериментальные исследования рабочего процесса газореактивного привода с вихревым клапаном в режиме максимальной тяги и в режиме управления тягой;

— сопоставление результатов расчетно-теоретических и экспериментальных исследований подтвердили адекватность составленной математической модели и правомочность использования вихревого клапана для управления тягой газореактивного двигателя.

### Благодарности

Выражаем благодарность компаниям Cybercom, Jetcom, Cubicprints, ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука» за их рекомендации по разработке дизайна геометрии деталей конструкции, а также за спонсорскую поддержку по изготовлению деталей конструкции.

### Список источников

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

2. Levitsky M. P., Levitsky S. P. On the development of a regulating valve design with improved cavitation characteristics // HAIT Journal of Science and Engineering B. 2006. Vol. 3. P. 1–16.

3. Levitsky M. Control vortex valve. Patent WO/2002/050456; filed July 19th, 2001; published June 27th, 2002.

4. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники. Москва: Наука, 1969. 507 с.

5. Лебедев И. В., Трескунов С. Л., Яковенко В. С. Элементы струйной автоматики / под общ. ред. И. В. Лебедева. Москва: Машиностроение, 1973. С. 289–314.

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

7. 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.

8. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Krylov V. I. Development of Gas Pressure Vortex Regulator // AIP Conf. Proc. 2017. Vol. 1876, Issue 1. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845.

9. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Atamasov N. V. Development of the Calculation Method and Designing of a Vortex Jet Device for Gas Flow Regulation Purposes // AIP Conf. Proc. 2019. Vol. 2141, Issue 1. 030028. DOI: 10.1063/1.5122078.

10. Wei X., He G., Li J. [et al.]. Experimental Investigation on Thrust Modulation of SRM based on vortex valve Effects of vortex valve // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (Cincinnati, 2007). DOI:10.2514/6.2007-5827.

11. Wei X., Li J., He G. Swirl characteristics of vortex valve variable-thrust solid rocket motor // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2018. Vol. 11, no. 1. P. 205–215. DOI: 10.18869/acadpub.jafm.73.244.27658.

12. Yu X., He G., Li J. [et al.]. Numerical Analysis of Flow in Variable Thrust SRM Based on Vortex Valve // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit. 2007. DOI: 10.2514/6.2007-5801.

13. Wei X., Li J., He G. Influence of Structural Parameters on the Performance of Vortex Valve Variable-Thrust Solid Rocket Motor // International Journal of Turbo & Jet-Engines. 2017. Vol. 34 (1). P. 1–9. DOI: 10.1515/tjj-2015-0047.

14. Dummer G. W. A., Robertson J. M. Fluidic components and equipment. 1st ed. Oxford: Pergamon Press, 1968. 848 p. ISBN 9781483147727.

15. Keranen T., Blatter A. Research and Development of a Vortex Valve for Flow Modulation of a 16-Percent Aluminized 5500° F Propellant Gas // NASA Scientific and Technical Reports (NASA CR-1091). 1968. 137 p.

16. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. В 2 т. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1991. Т. 1. 600 с.

**УСС Александр Юрьевич**, аспирант кафедры Э5 «Вакуумная и компрессорная техника» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана (национального исследовательского университета) (МГТУ им. Н. Э. Баумана). SPIN-код: 1191-6254

AuthorID (РИНЦ): 925879

ORCID: 0000-0003-2588-2057

AuthorID (SCOPUS): 57191032158

ResearcherID: P-8313-2017

Адрес для переписки: uss25.ru@mail.ru

**ЧЕРНЫШЕВ Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой Э5 «Вакуумная и компрессорная техника», МГТУ им. Н. Э. Баумана.

SPIN-код: 8978-8666

AuthorID (РИНЦ): 161131



ORCID: 0000-0003-4902-8314

AuthorID (SCOPUS); 57191038344

Адрес для переписки: av-chernyshev@yandex.ru

**ПУГАЧУК Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 10.1 — газотурбинных технологий Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва; доцент кафедры Э5 «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва.

SPIN-код: 8743-8198

AuthorID (РИНЦ): 778164

ORCID: 0000-0002-0200-6997

AuthorID (SCOPUS): 56957229800

ResearcherID: G-6478-2017

Адрес для переписки: pugachukalexandr@mail.ru

#### Для цитирования

Усс А. Ю., Чернышев А. В., Пугачук А. С. Проектирование газореактивного привода с системой управления тягой при помощи вихревого клапана // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 2. С. 47–58. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-47-58.

Статья поступила в редакцию 21.03.2021 г.

© А. Ю. Усс, А. В. Чернышев, А. С. Пугачук

# DESIGN OF GAS-JET DRIVE WITH VORTEX VALVE THRUST CONTROL SYSTEM

A. Yu. Uss<sup>1</sup>, A. V. Chernyshev<sup>1</sup>, A. S. Pugachuk<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,  
Russia, Moscow, Izhorskaya St., 13/2, 125412

The article is devoted to the design of a gas-jet drive with a traction control system using a vortex valve. A diagram is given and the principle of operation of a vortex jet device designed to control the gas flow is considered. The selected scheme of a vortex jet device with a distributed supply of a feed and a concentrated supply of control gas flows, designed to control the thrust of a gas-jet engine. The profiling of the Laval nozzle was carried out using a simplified technique from [G. N. Abramovich, *Applied Gas Dynamics*]. Computational and theoretical studies of the gas flow from a gas-jet drive with a vortex valve in the maximum thrust mode and in the thrust control mode have been carried out.

**Keywords:** vortex amplifier, vortex valve, swirl chamber, gas flow regulation, fluidics, gas jet engine.

## Acknowledgments

We express my gratitude to Cybercom, Jetcom, Cubicprints, PJSC Brook Institute for Electronic Control Machines for their recommendations on the design of the geometry of structural parts, as well as for sponsorship in the manufacture of structural parts.

## References

1. Bugayenko V. F. Pnevmoavtomatika raketno-kosmicheskikh system [Pneumoautomatics of rocket-space systems] / Ed. V. S. Budnik. Moscow, 1979. 168 p. (In Russ.).
2. Levitsky M. P., Levitsky S. P. On the development of a regulating valve design with improved cavitation characteristics // *HAIT Journal of Science and Engineering B*. 2006. Vol. 3. P. 1–16. (In Engl.).
3. Levitsky M. Control vortex valve. Patent WO/2002/050456; filed July 19th, 2001; published June 27th, 2002. (In Engl.).
4. Zalmanzon L. A. Teoriya elementov pnevmoniki [Theory of pneumonics elements]. Moscow, 1969. 507 p. (In Russ.).
5. Lebedev I. V., Treskunov S. L., Yakovenko V. S. Elementy struynoy avtomatiki [Elements of jet automation] / Ed. I. V. Lebedev. Moscow, 1973. P. 289–314. (In Russ.).
6. Trudy MVTU. Issledovaniye i raschet struynykh elementov i tsepey sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. Trudy MVTU. Issledovaniye i Raschet Struynykh Elementov i Tsepey Sistem Avtomaticheskogo Regulirovaniya / Ed. D. N. Popov. Moscow, 1977. No. 244. 79 p. (In Russ.).
7. 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.).
8. Uss A. Yu., Chernyshyov A. V., Krylov V. I. Development of Gas Pressure Vortex Regulator // *AIP Conf. Proc.* 2017. Vol. 1876, Issue 1. 020025. DOI: 10.1063/1.4998845. (In Engl.).
9. Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Atamasov N. V. Development of the Calculation Method and Designing of a Vortex Jet Device for Gas Flow Regulation Purposes // *AIP Conf. Proc.* 2019. Vol. 2141, Issue 1. 030028. DOI: 10.1063/1.5122078. (In Engl.).
10. Wei X., He G., Li J. [et al.]. Experimental Investigation on Thrust Modulation of SRM based on vortex valve Effects of vortex valve // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion

Conference & Exhibit (Cincinnati, 2007). DOI: 10.2514/6.2007-5827. (In Engl.).

11. Wei X., Li J., He G. Swirl characteristics of vortex valve variable-thrust solid rocket motor // *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 11, no. 1. P. 205–215. DOI: 10.18869/acadpub.jafm.73.244.27658. (In Engl.).

12. Yu X., He G., Li J. [et al.]. Numerical Analysis of Flow in Variable Thrust SRM Based on Vortex Valve // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit. 2007. DOI: 10.2514/6.2007-5801. (In Engl.).

13. Wei X., Li J., He G. Influence of Structural Parameters on the Performance of Vortex Valve Variable-Thrust Solid Rocket Motor // *International Journal of Turbo & Jet-Engines*. 2017. Vol. 34 (1). P. 1–9. DOI: 10.1515/tjj-2015-0047. (In Engl.).

14. Dummer G. W. A., Robertson J. M. Fluidic components and equipment. 1st ed. Oxford: Pergamon Press, 1968. 848 p. ISBN 9781483147727. (In Engl.).

15. Keranen T., Blatter A. Research and Development of a Vortex Valve for Flow Modulation of a 16-Percent Aluminized 5500° F Propellant Gas // *NASA Scientific and Technical Reports (NASA CR-1091)*. 1968. 137 p. (In Engl.).

16. Abramovich G. N. *Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics]*. In 2 vols. 5th ed. Moscow, 1991. Vol. 1. 600 p. (In Russ.).

---

**USS Aleksandr Yurievich**, Graduate Student, E-5 The Vacuum and Compressor Technics Department, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU). SPIN-code: 1191-6254

AuthorID (RSCI): 925879

ORCID: 0000-0003-2588-2057

AuthorID (SCOPUS): 57191032158

ResearcherID: P-8313-2017

Correspondence address: uss25.ru@mail.ru

**CHERNYSHEV Andrey Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of E-5 The Vacuum and Compressor Technics Department, BMSTU.

SPIN-code: 8978-8666

AuthorID (RSCI): 161131



ORCID: 0000-0003-4902-8314

AuthorID (SCOPUS): 57191038344

Correspondence address: av-chernyshev@yandex.ru

**PUGACHUK Alexander Sergeevich**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory No. 10.1 — Gas Turbine Technologies, Joint Institute for High Temperatures of the RAS; Associate Professor of E-5 The Vacuum and Compressor Technics Department, BMSTU.

SPIN-code: 8743-8198

AuthorID (RSCI): 778164

ORCID: 0000-0002-0200-6997

AuthorID (SCOPUS): 56957229800

ResearcherID: G-6478-2017

Correspondence address: pugachukalexandr@mail.ru

#### For citations

Uss A. Yu., Chernyshev A. V., Pugachuk A. S. Design of a gas jet drive with a swirl valve thrust control system // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 47–58. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-47-58.

**Received March 21, 2021.**

© A. Yu. Uss, A. V. Chernyshev, A. S. Pugachuk