

УДК 621.5

doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-43-58

Классификация вихревых струйных устройств, предназначенных для управления потоком газа в пневмогидравлических системах

А.Ю. Усс, А.В. Чернышев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Classification of Vortex Jet Devices for Gas Flow Control in Pneumo-Hydraulic Systems

A.Y. Uss, A.V. Chernyshev

Bauman Moscow State Technical University

Дан обзор научно-технической литературы по разработке и исследованию вихревых струйных устройств, применяемых в качестве регулирующей арматуры с использованием принципа вихревого течения рабочей среды. Рассмотрены вихревые клапаны без механических подвижных частей, а также полумеханические вихревые клапаны. Описан принцип работы вихревого струйного устройства. Впервые проведена классификация вихревых струйных устройств по конструктивным и функциональным признакам. Анализ технических решений позволил выявить преимущества и недостатки вихревых струйных устройств. Приведены рекомендации по выбору схемы вихревого струйного устройства.

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

This article presents a review and analysis of the literature on the development and study of vortex jet devices that are used as control valves employing the principle of the vortex flow of the working medium. The article discusses vortex valves without mechanically moving parts, as well as semi-mechanical vortex valves. The principle of operation of a vortex jet device is described and, for the first time, a classification of vortex jet devices by a number of structural and functional features is carried out. The analysis of technical solutions identifies the advantages and disadvantages of vortex jet devices. Recommendations are given for selecting a structure diagram of a vortex jet device.

Keywords: shut-off and control valves, vortex jet device, pressure control valve, gas flow regulator, vortex valve

Запорно-регулирующие устройства (ЗРУ), предназначенные для управления потоком рабочей среды (РС), получили широкое распространение в различных отраслях экономики. К ЗРУ относятся клапаны, вентили, задвижки, поворотные заслонки, регуляторы давления или расхода РС и т. д.

Особое место среди ЗРУ занимают регулирующие устройства. Регулятор давления или расхода РС включает в себя такие основные

элементы, как измерительное и задающее устройства, исполнительный механизм и линию обратной связи. Такой тип регуляторов давления или расхода РС является механическим.

Механические регуляторы давления РС часто определяют надежность и безотказность работы пневмогидравлических систем, в составе которых они функционируют. Это объясняется, прежде всего, наличием деформируемых

элементов и элементов, движущихся с большими скоростями, соударяющихся с деталями и узлами конструкции.

Подвижные элементы регуляторов давления РС подвержены воздействию нелинейных газостатических и газодинамических нагрузок, что в совокупности с действием сил, возникающих со стороны упругих элементов, часто вводит их в режим автоколебаний.

Кроме того, такие элементы регуляторов давления РС, как клапанные узлы, взаимодействуют с потоком рабочего тела, имеющим высокую скорость, под воздействием которого возможно частичное, а в некоторых случаях полное разрушение уплотнительного элемента.

В малорасходных регуляторах давления высота подъема клапанного узла в процессе регулирования выходного давления или расхода газа может находиться в диапазоне от нескольких микрометров до нескольких десятых долей миллиметра, что вызывает необходимость высокой степени очистки РС. Использование механических регуляторов давления в системах с загрязненными, агрессивными и/или высокотемпературными средами крайне затруднено, а часто и просто невозможно.

Повысить надежность работы ЗРУ можно путем создания конструкций без подвижных элементов, принцип работы которых основан на газодинамических эффектах (таких как эффект Коанда, турбулизация потока РС) и на использовании вихревого течения РС.

Технические средства, в которых для управления потоком РС применены перечисленные процессы и эффекты называют вихревыми струйными устройствами (ВСУ), и их можно использовать в качестве исполнительного устройства. Классическая схема ВСУ с сосредоточенной подачей питающего (ПП) и управляющего потоков (УП) РС приведена на рис. 1, а.

Принцип работы ВСУ, показанного на рис. 1, а, следующий. Поток питания поступает в канал 2, затем в вихревую камеру (ВК) 3, заполняет ее и проходит к выходному патрубку 4. Чтобы понизить давление/расход РС в выходном патрубке, необходимо подать вспомогательный УП в канал управления 1. В результате взаимодействия питающей и управляющей струй происходит их слияние, поэтому масса результирующей струи представляет сумму масс отдельных струй. Направление результирующего потока определяется геометрической суммой количества движений соударяющихся потоков.

В.Ф. Бугаенко в работе «Пневмоавтоматика ракетно-космических систем» предложил ввести следующие обозначения: α — угол отклонения ПП; β — угол между осями питающего и управляющего каналов; $I_1 = F_1 v_1^2 Q$ — импульс силы управляющей струи, $I_0 = F_0 v_0^2 Q$ — импульс силы питающей струи, где F_1 и F_0 — площади проходного сечения канала управления и питания соответственно; v_1 и v_0 — скорости потока в каналах управления и питания соответственно; Q — объемный расход.

Тогда уравнение, описывающее отклонение результирующего потока, можно представить в виде

$$\alpha = \eta \arctg \frac{(I_1/I_0) \sin \beta}{1 + (I_1/I_0) \cos \beta}, \quad (1)$$

где η — коэффициент отклонения результирующей струи от первоначального направления струи питания.

Известно, что для вихревых регуляторов, имеющих каналы с круглым проходным сечением, коэффициент $\eta \approx 0,8$. Формула (1) основана на предположении о постоянстве статического давления в поле взаимодействия струй и о том, что в каналах питания и в результирующей струе распределение скоростей по сечению равномерное.

После взаимодействия ПП и УП результирующий поток под действием эффекта Коанда прилипает к цилиндрической стенке ВК, и в ней образуется вихревое течение РС. Основной принцип понижения давления в выходном патрубке заключается в создании существенного гидравлического сопротивления при спиральном движении РС от периферии ВК к центру. Сопротивление возникает из-за вихревого течения, в результате которого образуется поле центробежных сил, действующих на вращающуюся массу РС. Под действием центробежных сил РС отбрасывается на периферию ВК. Вследствие этого создается перепад давления: в центре вихря — пониженное давление, на периферии вихря — повышенное. В тот момент, когда на периферии ВК давление станет равным давлению в канале питания, расход РС из него прекращается. Такой эффект называют запирающим потоком питания в ВСУ. Исходя из принципа работы ВСУ, можно сделать вывод, что основное назначение УП — отклонить поток питания на 90° для образования в ВК вихревого течения РС.

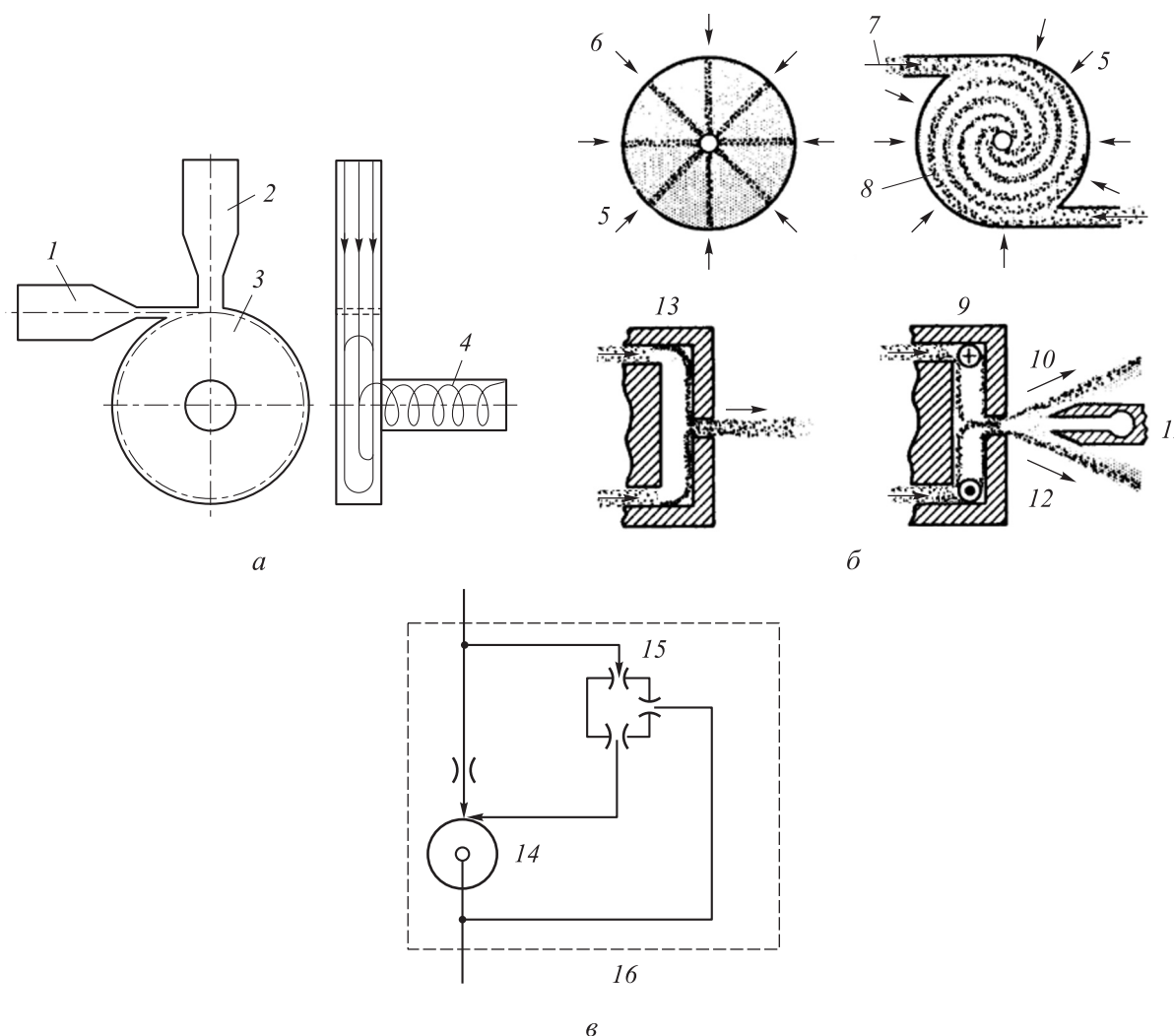


Рис. 1. Схемы ВСУ с сосредоточенной подачей ПП и УП РС (а), ВСУ с распределенной по периферии ВК подачей ПП и сосредоточенной подачей УП РС (б) и применения ВСУ в вихревом регуляторе давления РС (в):

1 и 2 — канал управления и питания; 3 — ВК; 4 — выходной патрубок; 5 — ПП;
6 и 8 — радиальное и вихревое течение; 7 — УП; 9 и 13 — наличие и отсутствие вихревого течения;
10 и 11 — канал сброса и выхода; 12 — расфокусировка выходного потока;
14 — вихревой клапан; 15 — элемент сравнения;
16 — вихревой регулятор давления РС

Анализ формулы (1) позволяет заключить, что для отклонения ПП импульс силы УП должен быть больше, чем таковой у ПП.

Для обеспечения отклонения ПП можно использовать два конструкторских решения:

- выполнить проходное сечение канала управления меньшим, чем у канала питания; при этом необходимо увеличить давление в канале управления для повышения импульса силы потока управления;

- спроектировать управляющий и питающий каналы с равными проходными сечениями; при этом давление и расход в каналах управления и

питания остаются равными; в такой конфигурации эффект запирания невозможен, а ВСУ будет выступать в качестве вихревого дросселя; рассмотренная концепция реализована в работах [1, 2].

Актуальность разработки регулирующих устройств с применением принципа вихревого течения РС подтверждена большим количеством разработок подобных изделий в различных областях техники.

Математические зависимости выходных параметров (давления и расхода на выходе из устройства) от параметров управления (давление

ния и расхода в канале управления), а также влияние геометрических параметров проточной полости (диаметра и ширины ВК, геометрических параметров каналов питания и управления, их числа и расположения) на газодинамические параметры, приведены в работах [3–5].

Предложенные в них математические модели основаны на эмпирических зависимостях, т. е. на данных экспериментальных исследований, что на практике можно применить лишь в узком диапазоне газодинамических параметров РС и на начальном этапе расчета таких конструкций.

Современные исследования ВСУ, включающие в себя обзор научно-технической литературы, обзор конструкций вихревых клапанов, выявление их достоинств и недостатков, численное исследование газодинамических процессов в проточной полости ВСУ с распределенными газодинамическими параметрами, исследование эффекта запирающего питающего канала, а также создание конструкции, проведение серии экспериментальных исследо-

ваний и верификация математической модели рабочего процесса, приведены в публикациях [6–10].

Однако ни в одной работе до сих пор не была предложена классификация ВСУ по конструктивным и функциональным признакам, что затрудняет выбор схемы при разработке новых конструкций.

Классификация ВСУ. Обзор научно-технической литературы по разработке конструкций вихревых клапанов выявил широкую область применения вихревых ЗРУ. Зачастую многие разработчики не могут принять решения по выбору варианта конструкции.

Цель работы — провести классификацию существующих ВСУ по конструктивным и функциональным признакам, позволяющую сократить сроки на разработку нового технического решения.

Предлагаемая классификация ВСУ по конструктивным и функциональным признакам приведена в табл. 1.

Таблица 1

Классификация ВСУ по конструктивным и функциональным признакам

Признак классификации	Описание
Функциональные признаки	
Тип регулирования потока РС	Вихревые клапаны Вихревые регуляторы давления/расхода РС Вихревые дроссели
Режим работы	Двухпозиционные Пропорциональные
Исходное состояние	Нормально открытые Нормально закрытые
Назначение	Запорные Регулирующие Отсечные
Тип РС	Сжимаемые (однофазные, многофазные) Несжимаемые (однофазные, многофазные)
Конструктивные признаки	
Тип подачи РС	Сосредоточенная подача ПП и ПУ РС Распределенная подача ПП и сосредоточенная подача ПУ Сосредоточенная подача ПП РС и распределенная подача ПУ РС Распределенная подача ПП и ПУ РС
Количество каскадов	Однокаскадные Многокаскадные

Окончание таблицы 1

Признак классификации	Описание
Конструктивные признаки	
Последовательность соединения вихревых элементов	Выход i -го вихревого элемента соединен с управлением $(i + 1)$ -го вихревого элемента Выход i -го вихревого элемента соединен с питанием $(i + 1)$ -го вихревого элемента
Тип ВК	Цилиндрические Профилированные
Тип воздействия на поток питания	С помощью УП РС Посредством внешнего электрического или магнитного поля С помощью поворотных лопаток
Геометрия проточной полости	Изменяемая геометрия ВК Изменяемая геометрия канала питания или управления
Тип организации потока РС на выходе из ВК	РС поступает в канал сброса РС поступает в выходной канал
Состав РС в выходном канале	Смесь РС питания и РС управления Поток управления (отсутствие ПП РС) Отсутствие РС (РС поступает в канал сброса)
Тип выходного патрубка	С тарельчатым диффузором С выпрямителем потока
РС потока управления	РС потока питания: – с тем же давлением, что и в канале питания – с большим давлением, чем в канале питания Вспомогательная РС: – с тем же давлением, что в канале питания – с большим давлением, чем в канале питания

Под каскадом понимают законченный тип ВСУ, имеющего собственный вход ПП и УП.

Рассмотрим более подробно некоторые признаки классификации ВСУ.

По типу рабочей среды ВСУ подразделяют на две группы, которые работают:

- на сжимаемых РС (рис. 2) [11–13];
- на несжимаемых РС [14].

При этом РС могут быть как однофазными, так и многофазными (ПП — нефть, УП — морская вода; ограничитель притока нефти (рис. 3), РС — нефть/вода/газ [15, 16], управление потоком хладагента РС жидкость/газ).

Под типом подачи РС подразумевается организация подвода РС к ВК устройства. При сосредоточенной подаче РС поступает в ВК через каналы в виде сопел, при распределенной — через кольцевой канал по всему периметру ВК.

По типу подачи РС ВСУ подразделяют на четыре группы:

- с сосредоточенной подачей ПП и УП РС; количество каналов питания и управления, расположенных по периметру ВК, может быть различным (1, 2 ...). Пример таких конструкций (см. рис. 1, а) приведен в работах [3, 4];
- с распределенной подачей ПП и сосредоточенной подачей УП РС (рис. 1, б; 2, а и 4); известны конструкции ВСУ, в которых организована распределенная подача ПП (РС обтекает центральное тело и через кольцевой канал, организованный между центральным телом и боковой стенкой ВК устройства и попадает в ВК), в то время как УП подается сосредоточенно через сопла, расположенные по периметру ВК [15];
- с сосредоточенной подачей ПП и распределенной подачей УП РС (рис. 5); принцип работы такой конструкции вихревого клапана

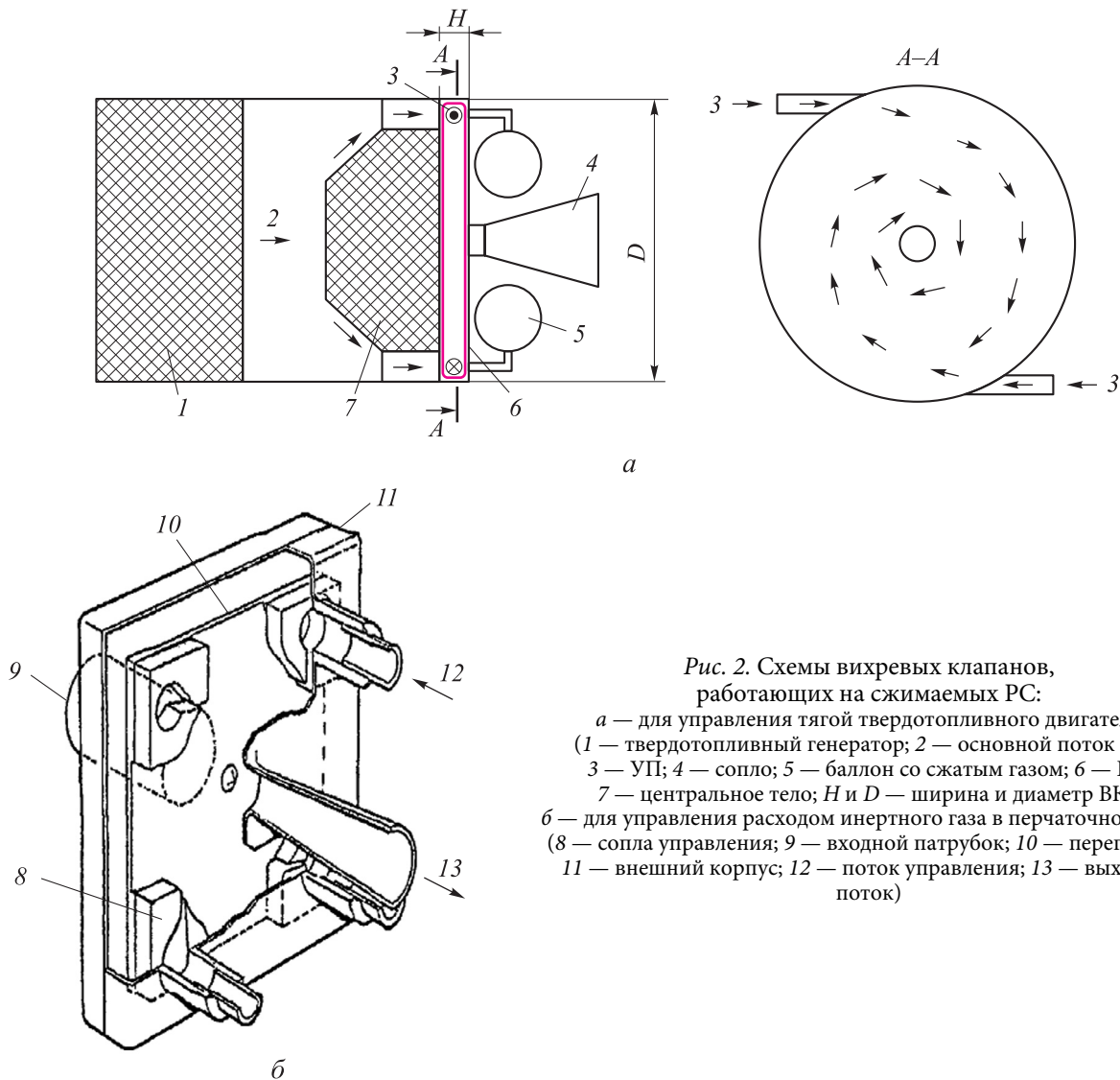


Рис. 2. Схемы вихревых клапанов, работающих на сжимаемых РС:

а — для управления тягой твердотопливного двигателя (1 — твердотопливный генератор; 2 — основной поток газа; 3 — УП; 4 — сопло; 5 — баллон со сжатым газом; 6 — ВК; 7 — центральное тело; H и D — ширина и диаметр ВК);
б — для управления расходом инертного газа в перчаточном боксе (8 — сопла управления; 9 — входной патрубок; 10 — перегородка; 11 — внешний корпус; 12 — поток управления; 13 — выходной поток)

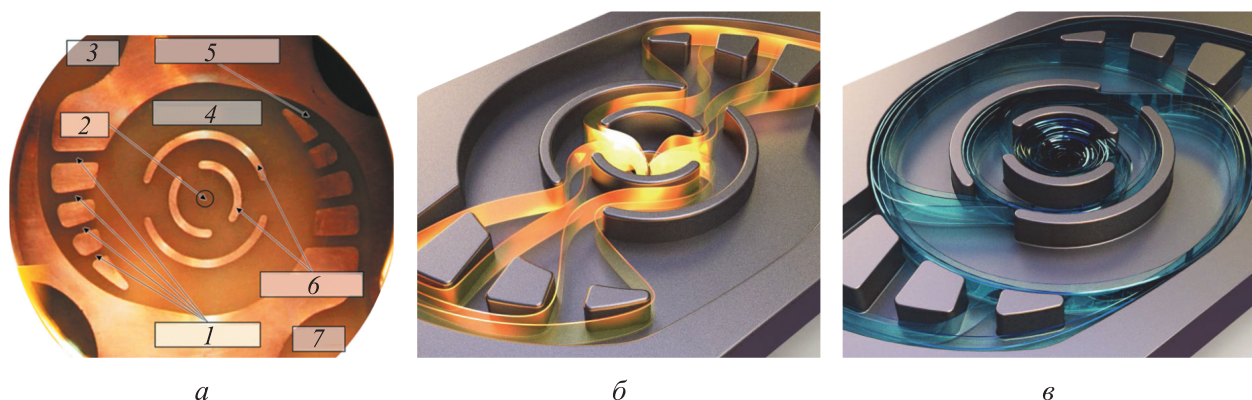


Рис. 3. Ограничитель притока нефти:

а — экспериментальный образец (1 — радиальные каналы; 2 — выход; 3 и 7 — первый и второй вход; 4 — ВК; 5 — тангенциальный канал; 6 — круговые лопасти);
б — схема, указывающая на отсутствие вихревого течения, и, как следствие, на максимальный расход нефти через вихревой ограничитель притока;
в — схема, указывающая на наличие вихревого течения, и, как следствие, на минимальный расход воды и попутного нефтяного газа через вихревой ограничитель притока

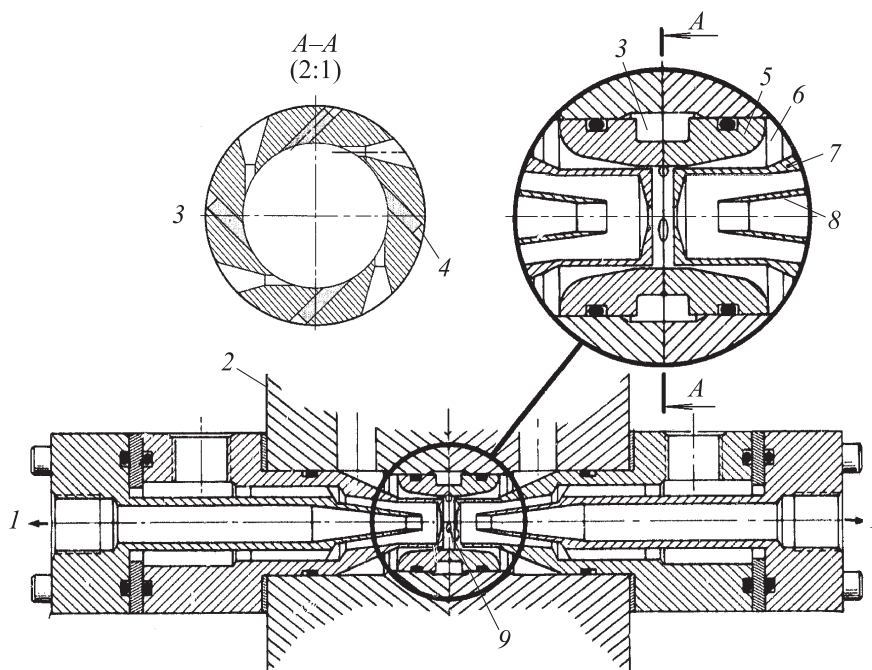


Рис. 4. Конструктивная схема вихревого клапана с распределенной по периферии ВК подачей ПП и сосредоточенной подачей УП:

1 — выход (приемное сопло); 2 — тестовый блок; 3 — коллектор управления; 4 — заглушка;
5 — камера управления; 6 — полость ПП; 7 — центральное тело; 8 — приемное сопло;
9 — сопло управления

изложен в работе [17]; такая конструкция вихревого клапана может быть использована для управления потоком сжимаемой жидкости, а также для управления газодинамическими параметрами высокоэнергетических потоков РС, к которым можно отнести высокоэнтальпийные потоки РС, а также потоки РС, имеющие высокие давление и расход;

- с распределенной подачей ПП и УП РС (рис. 6) [8, 18]; принцип работы регулятора давления газа с распределенной подачей ПП и УП рабочего газа и с регулировкой закруткой ПП и УП изложен в работе [8].

Отличительной особенностью принципа работы конструкции, приведенной на рис. 6, является то, что ПП 2.1 через сечение S_2 поступает в питающий патрубок, а затем, обтекая центральное тело, — в коллектор из шести триггеров $\Omega_{2.1}$. Стрелки 2.1–2.3 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 чего результирующий поток движется в радиальном направлении 2.5. Для отклонения ПП в тангенциальном направлении РС (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 торообразную камеру, где взаимодействует с УП 3.2. Управляющий поток, как и ПП, может быть предварительно закручен с помощью коллектора из шести триггеров $\Omega_{1.1}$ на канале управления.

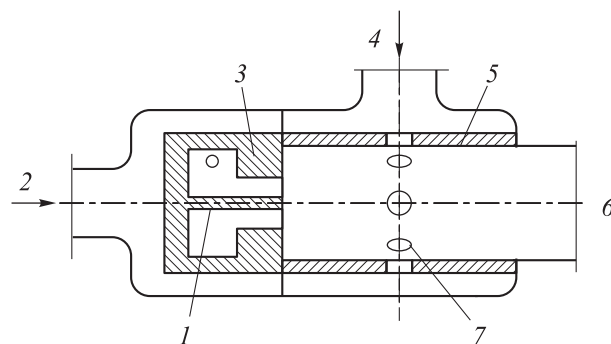


Рис. 5. Принципиальная схема вихревого клапана с сосредоточенной подачей ПП и распределенной подачей УП РС:

1 — центральный стержень; 2 и 4 — канал управления и питания; 3 — втулка; 5 — ВК; 6 — выходной патрубок;
7 — сопла питания

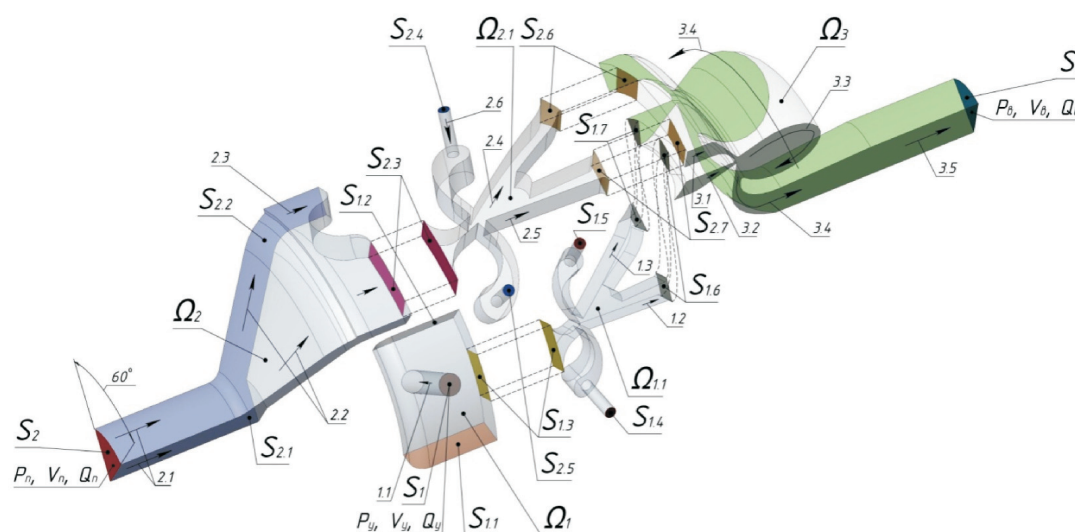


Рис. 6. Расчетная область вихревого клапана с распределенной подачей ПП и УП РС, а также с возможностью их закрутки

Принцип работы коллектора управления такой же, как и у коллектора, установленного на ПП. Для подачи УП 1.1 в радиальном направлении рабочее тело (под давлением, равным давлению управления) поступает в сечение $S_{1.5}$. Для подачи УП в тангенциальном направлении рабочее тело поступает в сечение $S_{1.4}$.

При взаимодействии ПП 3.1 и УП 3.2 в вихревой торообразной камере образуется сложное спиралевидное течение рабочего тела, вследствие чего 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 запаривания.

В статье отмечено [4], что ВСУ с радиальной подачей ПП через сопло, т. е. с подачей, сосредоточенной в одном месте периметра ВК (см. рис. 1, а), может иметь такой существенный недостаток, как скачкообразное включение в работу.

Это объясняется следующим. Первоначально при подаче УП происходит его взаимодействие с ПП. Более мощный ПП под воздействием УП отклоняется, в результате чего в ВК возникает несимметричное струйное течение и, как следствие, поперечный перепад давления.

Вследствие этого перепада ПП быстро притягивается к боковой цилиндрической стенке

ВК, после чего в камере возникает закрученное течение, т. е. ВСУ начинает работать. При таком быстром притяжении струи происходит скачкообразное изменение давления и расхода РС устройства.

Чтобы избежать этого, применяют рассредоточенную по периметру ВК симметричную подачу ПП, достигаемую увеличением ширины и числа сопел питания. Количество каналов питания и управления может быть различным (2, 4 ...); в предельном случае имеет место распределенная периферийная подача УП и ПП (см. рис. 1, б).

При распределенной подаче ПП РС статическое давление на срезе сопла питания p_n , как правило, мало отличается от давления в канале питания p_n^* даже при работе только линии питания, т. е. при закрытом канале управления. Поэтому рассредоточенная подача ПП РС может привести к увеличению начального давления управления, а следовательно, к сокращению диапазона регулирования по давлению.

Также применение схемы с распределенной подачей ПП усложняет конструкцию и ухудшает технологичность изготовления (повышает себестоимость изделия), что в некоторых случаях (например, при крупносерийном или массовом производстве) может иметь решающее значение при выборе схемы с сосредоточенной подачей ПП и УП РС.

По типу регулирования потока РС ВСУ подразделяют на три группы:

- вихревые клапаны, которые могут служить в качестве рабочего органа вихревых регуляторов давления/расхода РС [6] (см. рис. 1, а);

- вихревые регуляторы давления/расхода РС — тип регулирующей арматуры, состоящей из исполнительного органа (вихревого клапана), линии обратной связи, элемента сравнения текущего давления и давления настройки, задающего элемента (рис. 1, в) [19];

- вихревые дроссели — регулирующие устройства, имеющие различное гидравлическое сопротивление при прохождении РС в прямом и обратном направлениях (рис. 4, б) [15, 16, 20].

По режиму работы ВСУ подразделяют на две группы:

- двухпозиционные, функционирующие в режиме триггера, т. е. вихревой клапан работает в двух положениях: полностью открыт (отсутствие УП), частично или полностью закрыт (наличие УП);

- с регулированием РС, что соответствует режиму работы вихревого клапана, когда плавное изменение газодинамических параметров УП оказывает влияние на газодинамические параметры в выходном патрубке регулятора.

По типу вихревых камер ВСУ подразделяют на четыре группы:

- с цилиндрическими ВК (см. рис. 1, а) [5];
- с профилированными ВК;

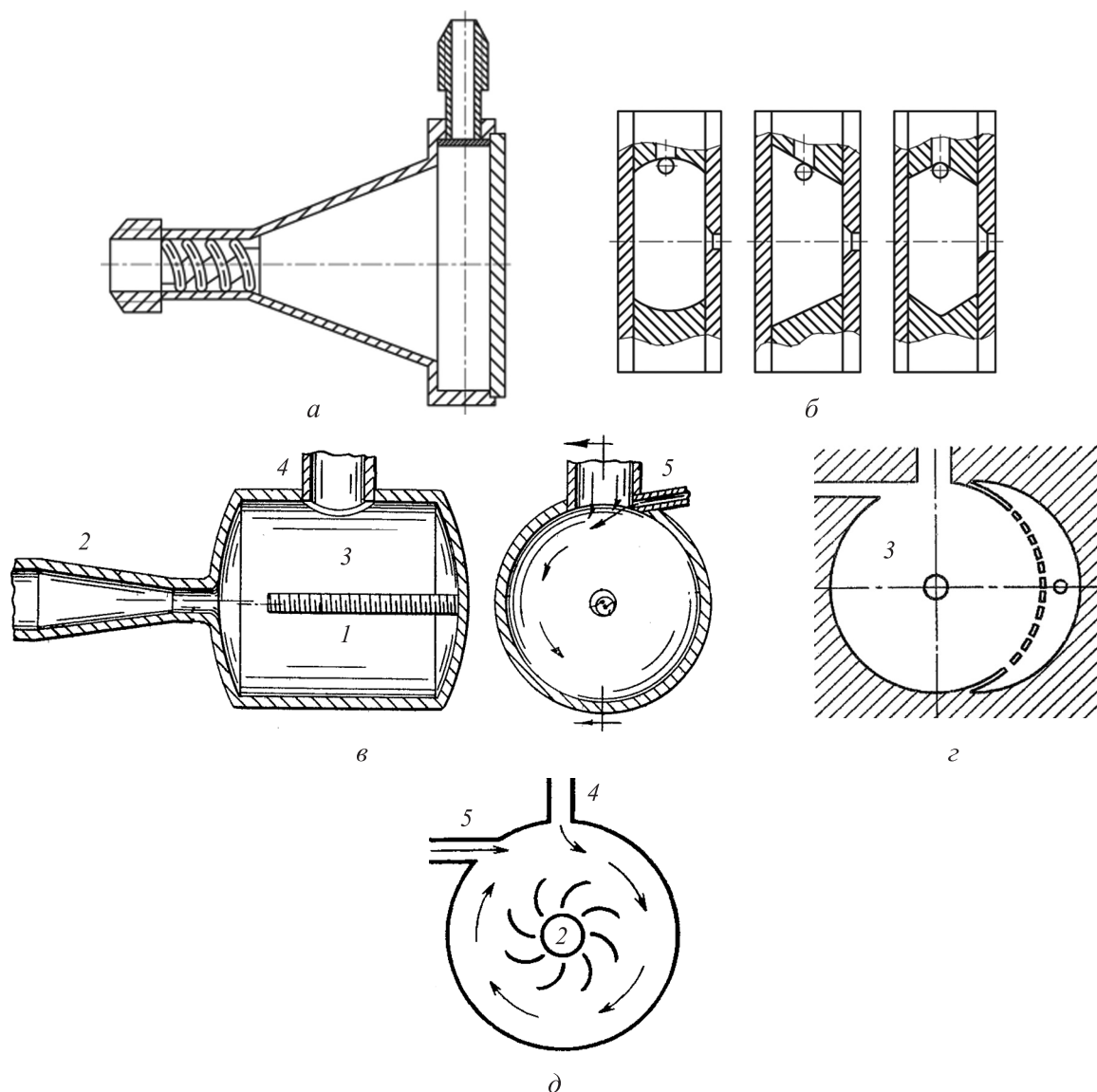


Рис. 7. Схемы вихревых камер разного типа:

а — конической; б — профилированных; в — с центральным стержнем; г — с перфорированной стенкой; д — с лопатками; 1 — центральное тело; 2 — выходной канал; 3 — ВК; 4 — канал питания; 5 — канал управления

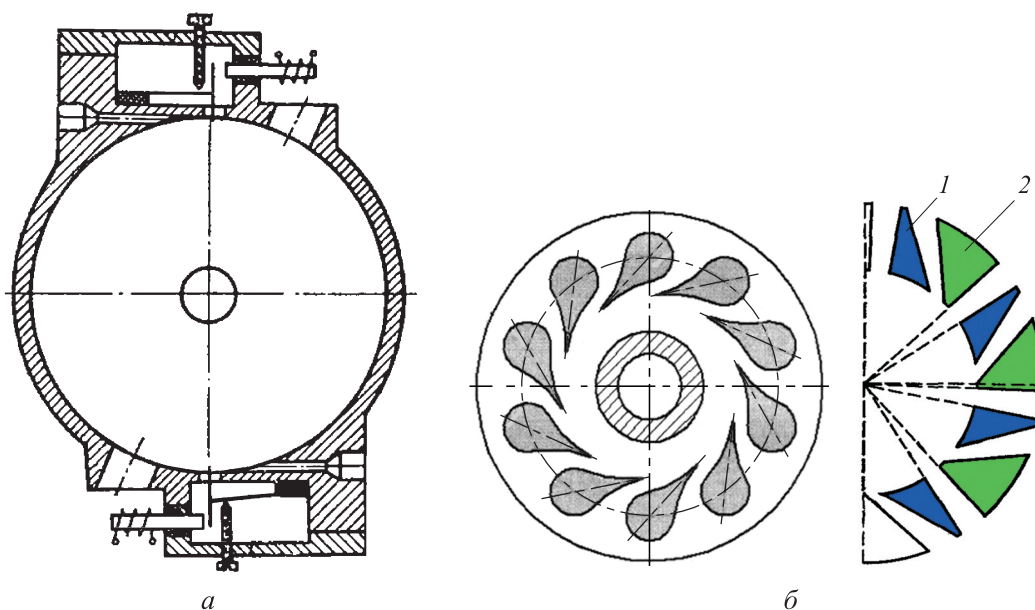


Рис. 8. Схемы отклонения ПП с помощью радиально расположенной лопатки (а) и поворота лопаток (б):
1 и 2 — подвижный и неподвижный блок

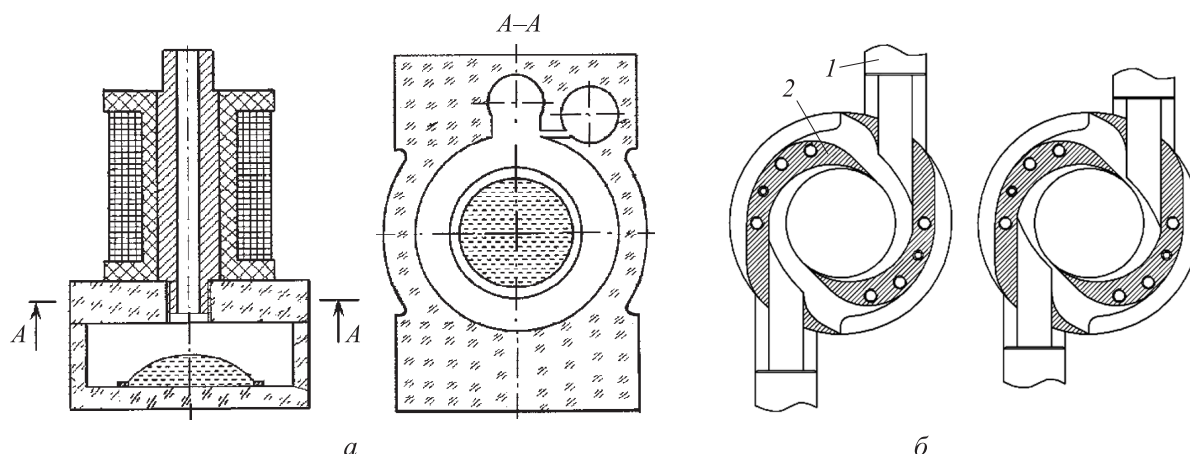


Рис. 9. Схемы элементов проточной полости с изменяемой геометрией:
а — вихревой камеры за счет выпячивания полости с магнитными частицами под действием электромагнитного поля;
б — каналов управления за счет ввода клина (1 — клин; 2 — завихритель)

- с коническими ВК (рис. 7, а) [21–23];
- ВК со скруглением в виде гиперболы или параболы для устранения образования застойных зон в углах ВК (рис. 7, б):
 - с центральным телом (например, со стержнем) в ВК (рис. 7, в);
 - с перфорированной стенкой ВК (рис. 7, г) [24];
 - с лопатками, установленными в ВК (рис. 7, д).

По типу воздействия на ПП РС ВСУ подразделяют на две группы:

- с немеханическим воздействием, при котором отклонение ПП в тангенциальном направлении осуществляется с помощью:
 - УП (см. рис. 1, а, б) [3];

- электрогидродинамического метода, т. е. происходит частичная или полная ионизация РС и отклонение ее в тангенциальном направлении посредством электрического и магнитного полей [25];
- коллектора из триггеров, управляемых импульсной подачей УП (см. рис. 6) [26–28];
- с механическим воздействием, при котором отклонение ПП в тангенциальном направлении осуществляется с помощью:

- лопатки, расположенной радиально к ВК (рис. 8, а);
- системы механически подвижных лопаток (рис. 8, б) [29, 30].

По геометрии элементов проточной полости ВСУ подразделяют на две группы:

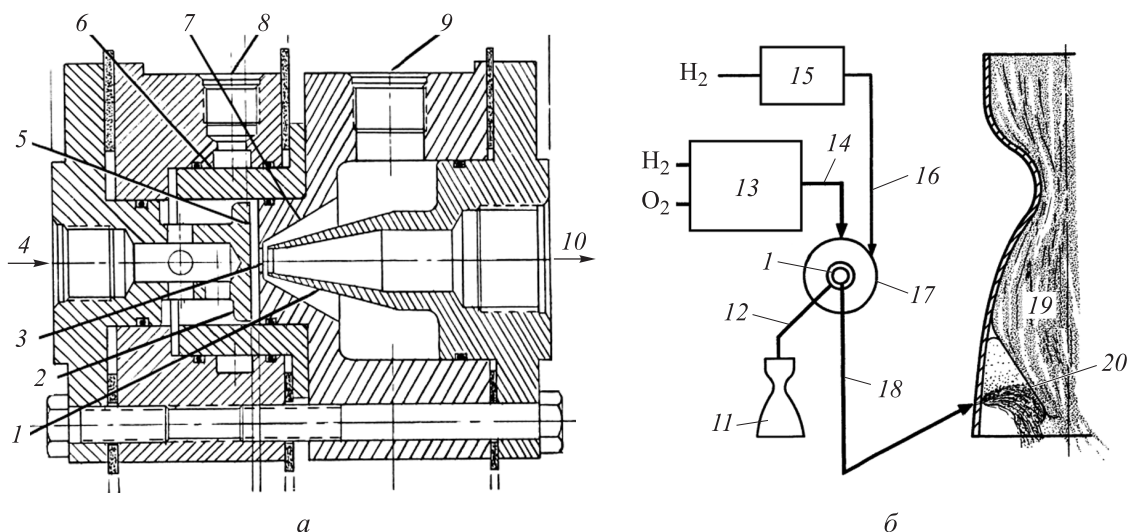


Рис. 10. Схемы вихревого клапана с распределенной подачей ПП, сосредоточенной подачей УП и сбросом РС в окружающую среду через канал сброса (а) и управлением вектором тяги (б):

1 — приемное сопло; 2 — центральное тело; 3 — выходное отверстие; 4 — канал питания; 5 — ВК; 6 — кольцевая проточка канала управления; 7 — диффузор; 8 и 9 — канал управления и сброса; 10 — выходной канал; 11 — вспомогательное сопло; 12 — поток сброса; 13 — водородно-кислородный газогенератор; 14 — ПП; 15 — сервоклапан; 16 — УП; 17 — вихревой клапан; 18 — вторичный поток впрыска; 19 — сопло тяги; 20 — отклонение вектора тяги

• с изменяемой геометрией ВК (рис. 9, а) [31–33];

• с изменяемой геометрией канала управления (рис. 9, б) [34–36].

По типу организации потока РС на выходе из ВК ВСУ подразделяют на две группы:

• без сброса РС в окружающую среду; РС в процессе регулирования выходного давления/расхода остается в проточной полости ВСУ (см. рис. 1, а; 2, б; 7, в) [37];

• со сбросом РС в окружающую среду; РС с помощью УП отклоняется и сбрасывается в атмосферу (рис. 10, а, б).

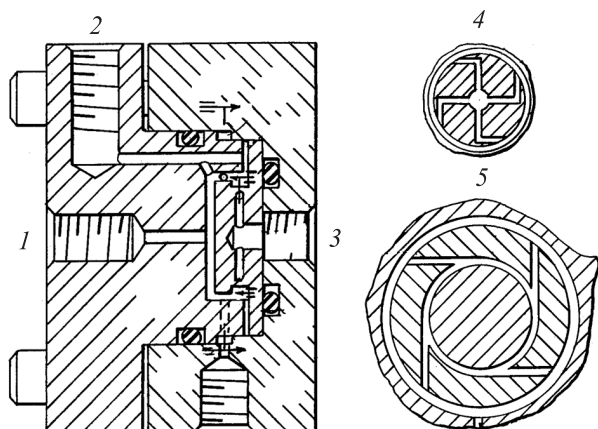


Рис. 11. Схема нормально закрытого клапана (при отсутствии/наличии УП клапан принимает положение закрыт/открыт соответственно):

1 — вход; 2 — канал управления; 3 — выход; 4 — центральное тело; 5 — сопла управления

Таблица 2

Достоинства и недостатки ВСУ

Достоинства	Недостатки
Простое конструктивное исполнение (отсутствие подвижных элементов)	Наличие внешнего источника сжатого газа для питания УП РС
Долговечность	При эффекте запирания на выходе присутствует расход управления
Невосприимчивость к воздействию электромагнитных полей	Газодинамический шум при работе вихревого регулятора
Возможность работы с высокотемпературными и загрязненными газами	Нестационарные процессы, связанные с прецессией вихревого ядра, приводящие к возникновению пульсаций в выходном патрубке (этот недостаток устраняется введением выпрямителя потока)
Низкая стоимость изготовления	Возникновение обратного потока по линии питания
Низкие эксплуатационные затраты	Присутствие гистерезиса (неодинаковость статических характеристик при повышении/понижении давления управления)

По типу выходного патрубка ВСУ подразделяют на две группы:

- с выходным патрубком в виде плоского тарельчатого диффузора [4];
- с выпрямителем потока в выходном патрубке (см. рис. 7, а) [38].

По исходному положению ВСУ подразделяют на две группы:

- нормально открытые (см. рис. 1, а, б);
- нормально закрытые (рис. 11).

Проведенный обзор научно-технической литературы позволил выявить достоинства и недостатки ВСУ (табл. 2).

Выводы

1. Рассмотрены конструкции регулирующей арматуры с использованием принципа вихревого течения РС, отличительной особенностью которых является простота изготовления и высокая степень надежности в процессе эксплуатации.

2. Анализ технических решений позволил выявить преимущества и недостатки ВСУ.

3. Впервые проведена классификация ВСУ по конструктивным и функциональным признакам.

Литература

- [1] 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, pp. 1–16.
- [2] Levitsky M. *Control vortex valve*. Patent no. WO 02/050456 A2, 2002.
- [3] Залманзон Л.А. *Теория элементов пневмоники*. Москва, Наука, 1969. 508 с.
- [4] Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. *Элементы струйной автоматики*. Москва, Машиностроение, 1973, с. 289–314.
- [5] Попов Д.Н. Исследования и расчет струйных элементов и цепей систем автоматического регулирования. *Труды МВТУ*, 1977, № 244. 79 с.
- [6] Uss A.Yu., Chernyshev A.V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 152, pp. 380–388, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.718
- [7] Uss A.Yu., Chernyshyov A.V., Krylov V.I. Development of Gas Pressure Vortex Regulator. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1876, no. 020025, doi: 10.1063/1.4998845
- [8] Uss A.Yu., Atamasov N.V., Chernyshev A.V. Development of the Calculation Method and Designing of a Vortex Jet Device for Gas Flow Regulation Purposes. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, no. 030028, doi: 10.1063/1.5122078
- [9] Белова О.В., Стародубцев А.А., Чернышев А.В. Расчет вихревого регулятора давления газа. *Инженерный вестник*, 2014, № 10. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/740398.html> (дата обращения 15 февраля 2020).
- [10] Белова О.В., Стародубцев А.А., Чернышев А.В. Вихревой регулятор давления газа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 5. URL: <http://www.engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/760.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-5-760
- [11] Shyi S., Deepu M., Kumar N.A., Jayachandran T. Numerical Studies on Thrust Augmentation in High Area Ratio Rocket Nozzles by Secondary Injection. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2017, vol. 10(6), pp. 1605–1614, doi: 10.29252/jafm.73.245.27309
- [12] Yu X., He G., Li J., Liu Y., Wei X. Numerical analysis of flow in variable thrust SRM based on vortex valve. *Collection of Technical Papers – 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2007, vol. 8, pp. 7865–7870.
- [13] Francis J., Birch M.J., Parker D. Computational Fluid Dynamic Studies of Vortex Amplifier Design for the Nuclear Industry-II Transient Conditions. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2012, vol. 134(2), no. 021103, doi: 10.1115/1.4005950
- [14] Belforte G., Bertetto A.M., Mazza L. Semi-Empirical Study of Water Flow through Vortex Triodes and Performance Optimization. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2015, vol. 137(12), no. 121203, doi: 10.1115/1.4031017
- [15] Farbos de Luzan C., Villalva R., Felten F., Gutmark E. Computational Study of the Velocity Fields and Pressure Differential in a Reynolds-Number-Sensitive Fluidic Resistor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2018, vol. 102(1), pp. 221–234, doi: 10.1007/s10494-018-9952-0

- [16] Zhang F., Li H., Li N., Zhang N., Lv W., Cui X. A Novel Automatic Phase Selection Device: Design and Optimization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 108(3), no. 032021, doi: 10.1088/1755-1315/108/3/032021
- [17] Левицкий М.П., Левицкая И.М. Об одном решении струйного управления расходом. *Трубопроводная арматура и оборудование*, 2018, № 5, с. 38–41.
- [18] Tanney J.W. Fluidics. *Progress in Aerospace Sciences*, 1970, vol. 10, pp. 401–509, doi: [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(70\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0376-0421(70)90008-4)
- [19] Tesar V. Superquadratic behaviour of vortex diodes. *Proceedings of the IF AC Symposium*, 20–23 May 1980, Warsaw, Poland, Pergamon Press, 1980, pp. 79–95.
- [20] Yoder Jr. Graydon L., Elkassabgi Yousri M., De Leon Gerardo I., Fetterly Caitlin N., Ramos Jorge A., Cunningham Richard Burns. *Vortex Diode Analysis and Testing for Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactors*. URL: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub32971.pdf> (дата обращения 15 февраля 2020), doi: 10.2172/1036568
- [21] Kotowski A., Wójtowicz P. Analysis of Hydraulic Parameters of Conical Vortex Regulators. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2010, vol. 19(4), pp. 749–756.
- [22] Wójtowicz P., Kotowski A. Influence of design parameters on throttling efficiency of cylindrical and conical vortex valves. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, vol. 47(5), pp. 559–565, doi: 10.3826/jhr.2009.3449
- [23] Tesar V. Fluidic Control of Molten Metal Flow. *Acta Polytechnica*, 2003, vol. 43, no. 11, pp. 15–22.
- [24] Соколовский Г.П., Левицкий М.П., Федяков А.Е. *Вихревой усилитель*. Авторское свидетельство СССР № 1305457 А1, бюл. № 15, 1987.
- [25] Денисов А.А., Нагорный В.С., Лимарев В.П., Власов В.В. *Вихревой усилитель*. Авторское свидетельство СССР № 744155, бюл. № 24, 1980.
- [26] Tesar V. Airfoil cascades with bistable separation control. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2010, vol. 69, pp. 331–343, doi: 10.2495/AFM100291
- [27] Tesar V., Broučková Z., Kordík J., Trávníček Z., Peszynski K. Valves with flow control by synthetic jets. *EPJ Web of Conferences*, 2012, vol. 25, no. 01092, doi: 10.1051/epjconf/20122501092
- [28] Tesar V. *Pressure-Driven Microfluidics. Chapter 4*. Norwood, Artech house, 2007. 224 p.
- [29] Гусенцова Я.А., Иващенко Е.А., Коваленко А.А., Соколов В.И., Андрейчук Н.Д. *Вихревые устройства в системах вентиляции*. Луганск, ВНУ им. В. Даля, 2006. 259 с.
- [30] Ловцов А.В., Носков А.С., Сыропятов В.П., Хаит А.В. *Вихревая труба*. Патент № 2533590С2 РФ, 2014, бюл. № 32.
- [31] Мефедова Ю.А. *Магнитоожидкостный вихревой элемент для электрогидравлических систем управления*. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов, СГТУ, 2008.
- [32] Мефедова Ю.А., Власов А.В., Власов В.В. Электрогидравлический вихревой регулирующий элемент с магнитоожидкостным сенсором. *Вестник Саратовского государственного технического университета*, 2007, № 1(21), с. 63–69.
- [33] Мефедова Ю.А., Власов А.В., Власов В.В. *Вихревой клапан*. Патент № 2347117С2 РФ, 2009, бюл. № 5, 5 с.
- [34] Пархимович А.Ю., Соловьев А.А. Исследование экспериментальных характеристик вихревого регулятора. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 2006, т. 8, № 4, с. 13–15.
- [35] Гурин С.В., Соловьев А.А. Исследование возможности получения изотермического процесса при дросселировании в вихревом регуляторе давления газа. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 2006, т. 8, № 4, с. 3–6.
- [36] Бакиров Ф.Г., Ахметов Ю.М., Соловьев А.А., Гурин С.В., Пархимович А.Ю. Опыт реализации квазиизотермического редуцирования в вихревых регуляторах давления энергетических систем. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*, 2007, т. 9, № 6, с. 66–74.
- [37] Cho J.O., Lee J.I., Bang Y.S., Yoob S.H. Comparison of Different Safety Injection Tank Models in MARS-KS. *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea*, 18–19 May, 2017.
- [38] Бондаренко В.В., Мельников В.С., Макеев В.А. *Гидравлический вихревой регулятор*. Патент № 54441 РФ, 2006.

References

- [1] 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, pp. 1–16.
- [2] Levitsky M. *Control vortex valve*. Patent no. WO 02/050456 A2, 2002.
- [3] Zalmanzon L.A. *Teoriya elementov pnevmoniki* [Pneumatic elements theory]. Moscow, Nauka publ., 1969. 508 p.
- [4] Lebedev I.V., Treskunov S.L., Yakovenko V.S. *Elementy struynoy avtomatiki* [Elements of jet automation]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1973, pp. 289–314.
- [5] Popov D.N. Research and calculation of inkjet elements and circuits of automatic control systems. *Trudy MVTU*, 1977, no. 244. 79 p (in Russ.).
- [6] Uss A.Yu., Chernyshev A.V. The Development of the Vortex Gas Pressure Regulator. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 152, pp. 380–388, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.718
- [7] Uss A.Yu., Chernyshyov A.V., Krylov V.I. Development of Gas Pressure Vortex Regulator. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1876, no. 020025, doi: 10.1063/1.4998845
- [8] Uss A.Yu., Atamasov N.V., Chernyshev A.V. Development of the Calculation Method and Designing of a Vortex Jet Device for Gas Flow Regulation Purposes. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2141, no. 030028, doi: 10.1063/1.5122078
- [9] Belova O.V., Starodubtsev A.A., Chernyshev A.V. Calculation of the vortex gas pressure regulator. *Engineering Bulletin*, 2014, no. 10 (in Russ.). Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/740398.html> (accessed 15 February 2020).
- [10] Belova O.V., Starodubtsev A.V., Chernyshev A.V. Vortex gas pressure regulator. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 5. Available at: <http://www.engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/760.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2013-5-760
- [11] Shyji S., Deepu M., Kumar N.A., Jayachandran T. Numerical Studies on Thrust Augmentation in High Area Ratio Rocket Nozzles by Secondary Injection. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2017, vol. 10(6), pp. 1605–1614, doi: 10.29252/jafm.73.245.27309
- [12] Yu X., He G., Li J., Liu Y., Wei X. Numerical analysis of flow in variable thrust SRM based on vortex valve. *Collection of Technical Papers – 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2007, vol. 8, pp. 7865–7870.
- [13] Francis J., Birch M.J., Parker D. Computational Fluid Dynamic Studies of Vortex Amplifier Design for the Nuclear Industry-II Transient Conditions. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2012, vol. 134(2), no. 021103, doi: 10.1115/1.4005950
- [14] Belforte G., Bertetto A.M., Mazza L. Semi-Empirical Study of Water Flow through Vortex Triodes and Performance Optimization. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2015, vol. 137(12), no. 121203, doi: 10.1115/1.4031017
- [15] Farbos de Luzan C., Villalva R., Felten F., Gutmark E. Computational Study of the Velocity Fields and Pressure Differential in a Reynolds-Number-Sensitive Fluidic Resistor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2018, vol. 102(1), pp. 221–234, doi: 10.1007/s10494-018-9952-0
- [16] Zhang F., Li H., Li N., Zhang N., Lv W., Cui X. A Novel Automatic Phase Selection Device: Design and Optimization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 108(3), no. 032021, doi: 10.1088/1755-1315/108/3/032021
- [17] Levitskiy M.P., Levitskaya I.M. About One Inkjet Flow Control Solution. *Truboprovodnaya armatura i oborudovaniye*, 2018, no. 5, pp. 38–41.
- [18] Tanney J.W. Fluidics. *Progress in Aerospace Sciences*, 1970, vol. 10, pp. 401–509, doi: [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(70\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0376-0421(70)90008-4)
- [19] Tesar V. Superquadratic behaviour of vortex diodes. *Proceedings of the IF AC Symposium*, 20–23 May 1980, Warsaw, Poland, Pergamon Press, 1980, pp. 79–95.
- [20] Yoder Jr. Graydon L., Elkassabgi Yousri M., De Leon Gerardo I., Fetterly Caitlin N., Ramos Jorge A., Cunningham Richard Burns. *Vortex Diode Analysis and Testing for Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactors*. Available at: <https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub32971.pdf> (accessed 15 February 2020), doi: 10.2172/1036568
- [21] Kotowski A., Wójtowicz P. Analysis of Hydraulic Parameters of Conical Vortex Regulators. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2010, vol. 19(4), pp. 749–756.

- [22] Wójtowicz P., Kotowski A. Influence of design parameters on throttling efficiency of cylindrical and conical vortex valves. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, vol. 47(5), pp. 559–565, doi: 10.3826/jhr.2009.3449
- [23] Tesar V. Fluidic Control of Molten Metal Flow. *Acta Polytechnica*, 2003, vol. 43, no. 112003, pp. 15–22.
- [24] Sokolovskiy G.P., Levitskiy M.P., Fedyaev A.E. *Vikhrevoy usilitel'* [Vortex amplifier]. Copyright Certificate USSR no. 1305457 A1, 1987.
- [25] Denisov A.A., Nagornyy V.S., Limarev V.P., Vlasov V.V. *Vikhrevoy usilitel'* [Vortex amplifier]. Copyright Certificate USSR no. 744155, 1980.
- [26] Tesar V. Airfoil cascades with bistable separation control. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2010, vol. 69, pp. 331–343, doi: 10.2495/AFM100291
- [27] Tesar V., Broučková Z., Kordík J., Trávníček Z., Peszynski K. Valves with flow control by synthetic jets. *EPJ Web of Conferences*, 2012, vol. 25, no. 01092, doi: 10.1051/epjconf/20122501092
- [28] Tesar V. *Pressure-Driven Microfluidics. Chapter 4*. Norwood, Artech house, 2007. 224 p.
- [29] Gusentsova YA.A., Ivashchenko E.A., Kovalenko A.A., Sokolov V.I., Andreychuk N.D. *Vikhrevyye ustroystva v sistemakh ventilyatsii* [Vortex devices in ventilation systems]. Lugansk, VNU im. V. Dal'ya publ., 2006. 259 p.
- [30] Lovtsov A.V., Noskov A.S., Syropyatov V.P., Khait A.V. *Vikhrevaya truba* [Vortex tube]. Patent RF no. 2533590 S2, 2014.
- [31] Mefedova Yu.A. *Magnitohidkostnyi vikhrevoy element dlya elektrogidravlicheskikh sistem upravleniya*. Kand. Diss. [Magnetoliquid vortex element for electro-hydraulic control systems. Cand. Diss.]. Saratov, SSTU publ., 2008.
- [32] Mefedova Yu.A., Vlasov A.V., Vlasov V.V. Electrohydraulic vortical regulating element with the magnetic liquid sensor control. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, no. 1(21), pp. 63–69 (in Russ.).
- [33] Mefedova Yu.A., Vlasov A.V., Vlasov V.V. *Vikhrevoy klapán* [Swirl valve]. Patent RF no. 2347117 S2, 2009. 5 p.
- [34] Parkhimovich A.Yu., Solov'yev A.A. Study of the experimental characteristics of the vortex controller. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 8, no. 4, pp. 13–15 (in Russ.).
- [35] Gurin S.V., Solov'yev A.A. Investigation of the possibility of obtaining an isothermal process during throttling in a vortex gas pressure regulator. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 8, no. 4, pp. 3–6 (in Russ.).
- [36] Bakirov F.G., Akhmetov Yu.M., Solov'yev A.A., Gurin S.V., Parkhimovich A.Yu. Experience of the quasi isothermal reduction realization in vortex pressure regulators of energetic systems. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, vol. 9, no. 6, pp. 66–74 (in Russ.).
- [37] Cho J.O., Lee J.I., Bang Y.S., Yoob S.H. Comparison of Different Safety Injection Tank Models in MARS-KS. *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea*, 18–19 May, 2017.
- [38] Bondarenko V.V., Mel'nikov V.S., Makeyev V.A. *Gidravlicheskii vikhrevoy regul'yator* [Hydraulic swirl regulator]. Patent RF no. 54441, 2006.

Статья поступила в редакцию 17.02.2020

Информация об авторах

УСС Александр Юрьевич — аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: uss25.ru@mail.ru).

ЧЕРНЫШЕВ Андрей Владимирович — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: av-chernyshev@yandex.ru).

Information about the authors

USS Aleksandr Yuryevich — Postgraduate, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: uss25.ru@mail.ru).

CHERNYSHEV Andrei Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: av-chernyshev@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Усс А.Ю., Чернышев А.В. Классификация вихревых струйных устройств, предназначенных для управления потоком газа в пневмогидравлических системах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 7, с. 43–58, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-43-58

Please cite this article in English as:

Uss A.Y., Chernyshev A.V. Classification of Vortex Jet Devices for Gas Flow Control in Pneumo-Hydraulic Systems. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 7, pp. 43–58, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-43-58



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет 2-е издание учебника А.А. Гурова, П.В. Слитикова, Ж.Н. Медных

«Химия: теория и практика. Металлы и сплавы»

Учебник является оригинальным изданием и не имеет аналогов среди литературы по химии, используемой в учебном процессе технических университетов и вузов. По содержанию и структуре книга представляет собой совокупность учебника, задачника и практикума и состоит из трех разделов. Первый посвящен современным вопросам классификации, строения, получения и очистки металлов. Во втором разделе рассмотрены основные физические и химические свойства металлов. Третий раздел содержит материал, охватывающий сплавы и растворы в металлических системах.

Материал учебника изложен в доступной, но в то же время достаточно строгой форме. Некоторые темы в нем освещены более глубоко, чем в существующих учебниках, и, главное, методически удачнее. Приведенные на форзацах современные формы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева отражают существование проблем классификации, получения и изучения свойств некоторых элементов-металлов. Указана коррозионная стойкость большинства металлов-веществ, которая является одним из важнейших требований, предъявляемых к конструкционным металлическим материалам. Периодические системы с такой информацией в современных учебниках практически не приводились.

Учебник соответствует государственному образовательному стандарту по химии для технических направлений и специальностей и предназначен для студентов 1-3-го курсов.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru