

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:  $\alpha$  — угол отклонения ПП;  $\beta$  — 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

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

где  $\eta$  — 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  $90^\circ$  для образования в ВК вихревого течения РС.

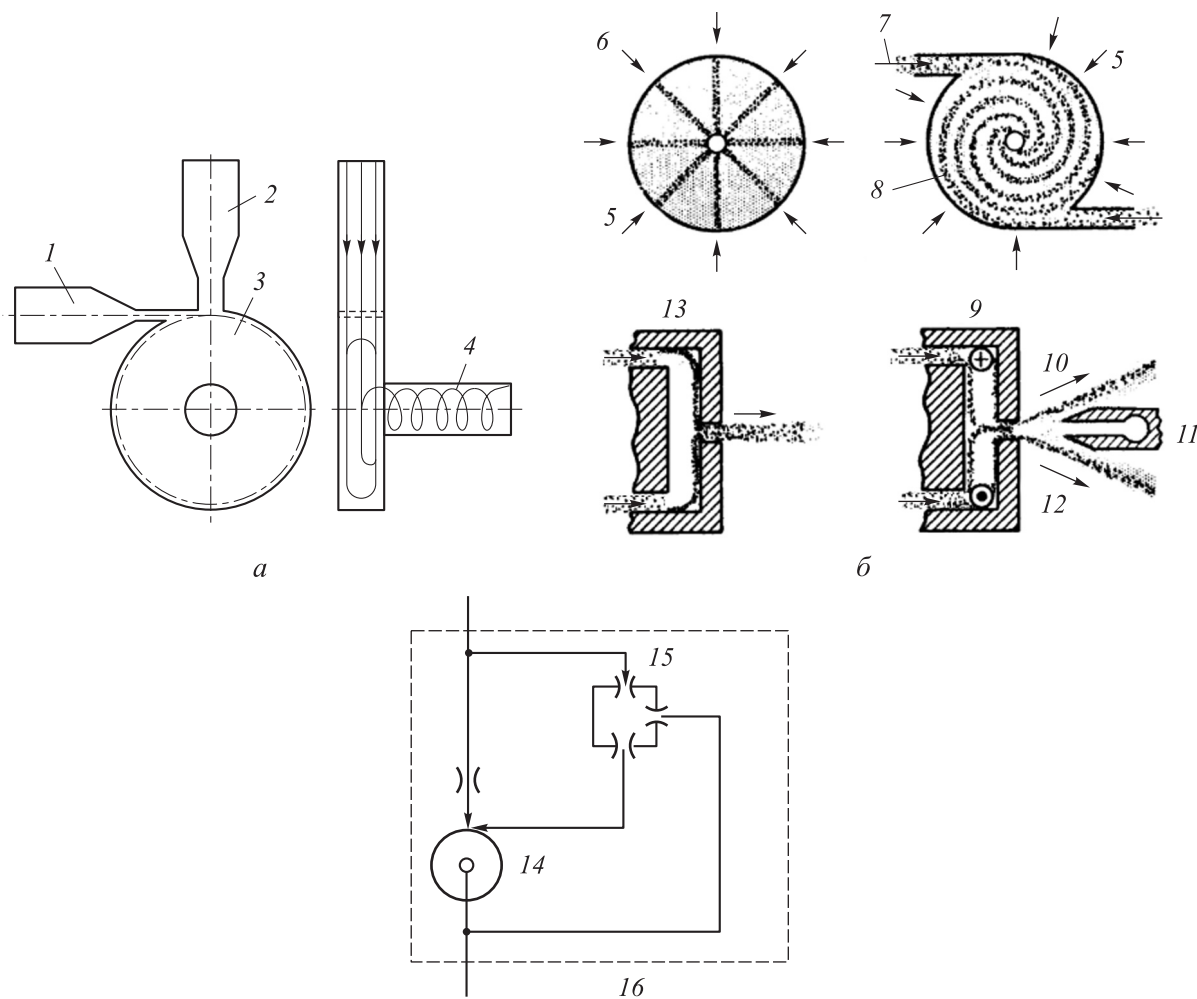


Рис. 1. Схемы ВСУ с сосредоточенной подачей ПП и УП РС (а), ВСУ с распределенной по периферии ВК подачей ПП и сосредоточенной подачей УП РС (б) и применения ВСУ в вихревом регуляторе давления РС (в):

- 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
<b>Функциональные признаки</b>	
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)
<b>Конструктивные признаки</b>	
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 Многokаскадные

Окончание таблицы 1

Признак классификации	Описание
<b>Конструктивные признаки</b>	
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:

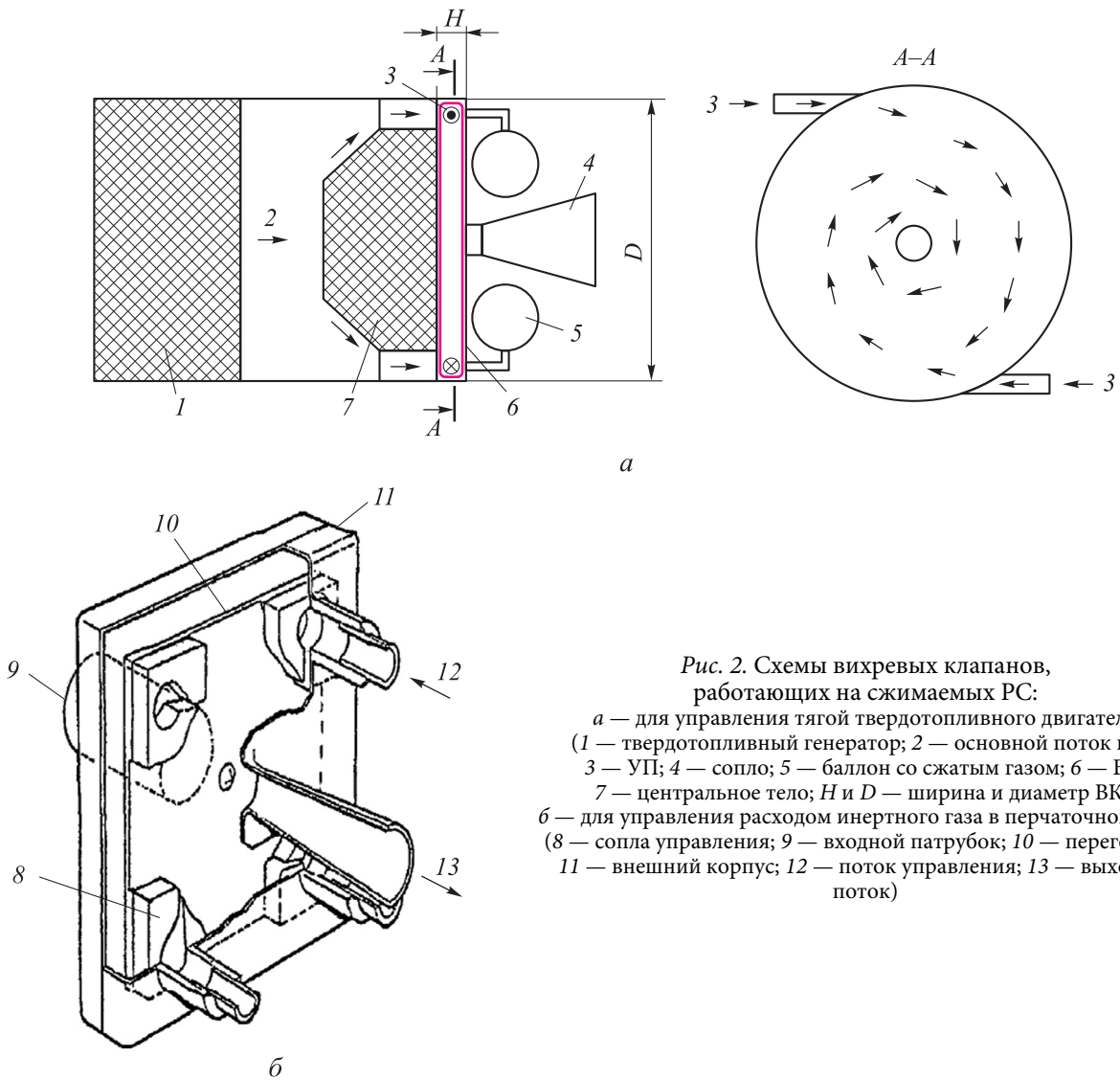
- на сжимаемых РС (рис. 2) [11–13];
- на несжимаемых РС [14].

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.

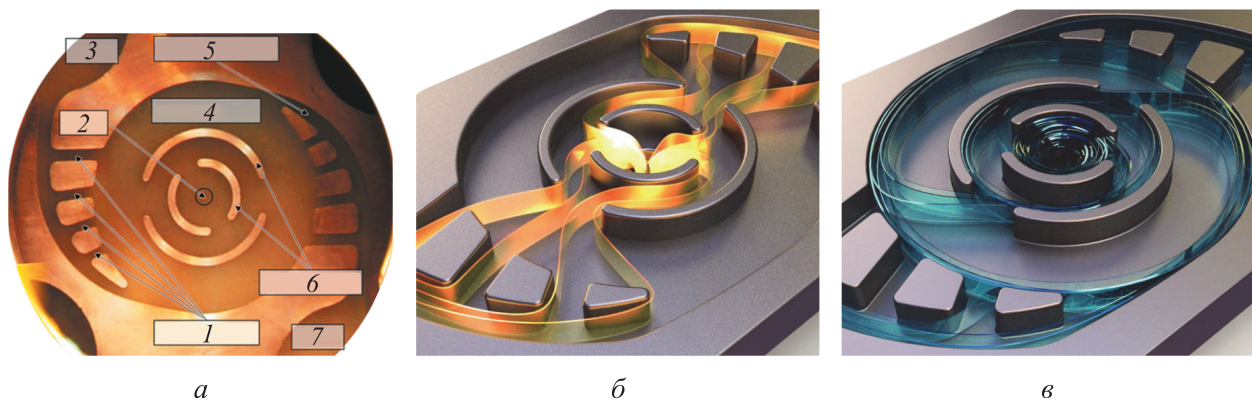
**По типу подачи РС** ВСУ подразделяют на четыре группы:

- 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:**

*a* — 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:**

*a* — экспериментальный образец (1 — радиальные каналы; 2 — выход; 3 и 7 — первый и второй вход; 4 — ВК; 5 — тангенциальный канал; 6 — круговые лопатки);  
*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

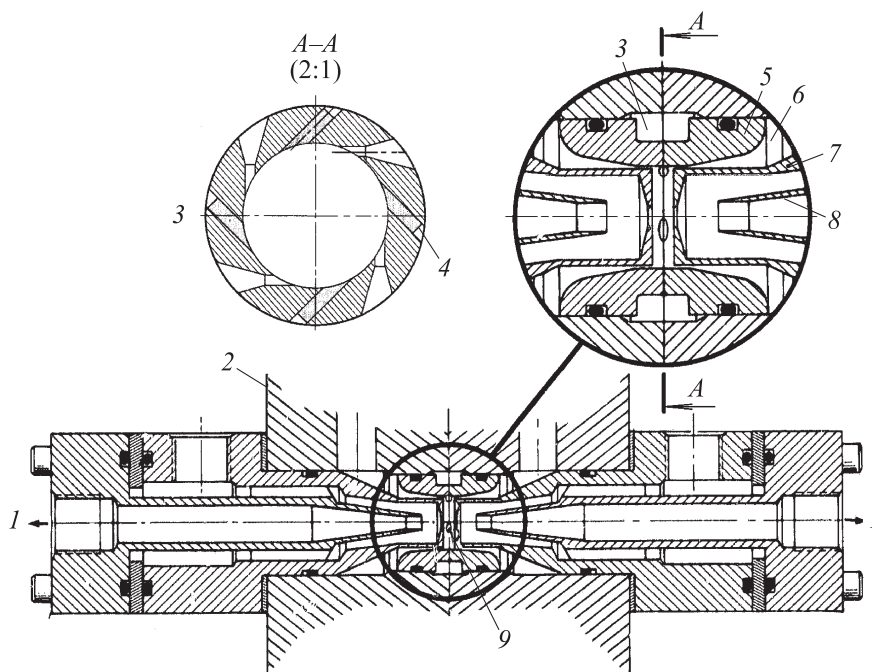


Рис. 4. Конструктивная схема вихревого клапана с распределенной по периферии ВК подачей ПП и сосредоточенной подачей УП:

- 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 высокоэнthalпийные 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.

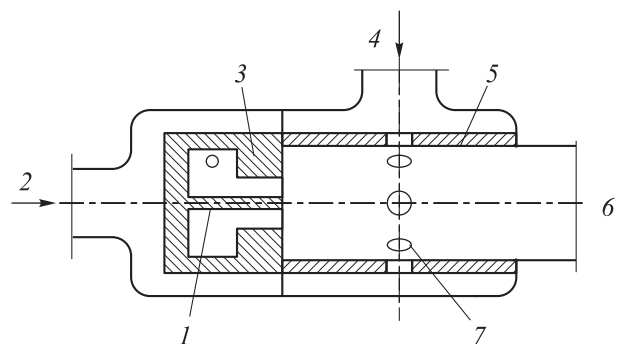


Рис. 5. Принципиальная схема вихревого клапана с сосредоточенной подачей ПП и распределенной подачей УП РС:

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



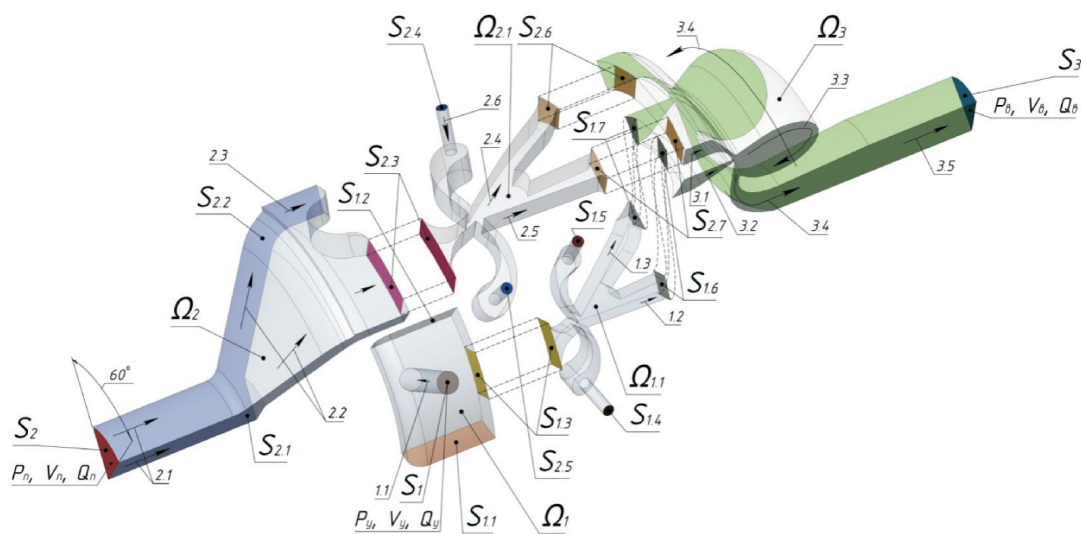


Рис. 6. Расчетная область вихревого клапана с распределенной подачей ПП и УП РС, а также с возможностью их закрутки

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 (отсутствии 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;

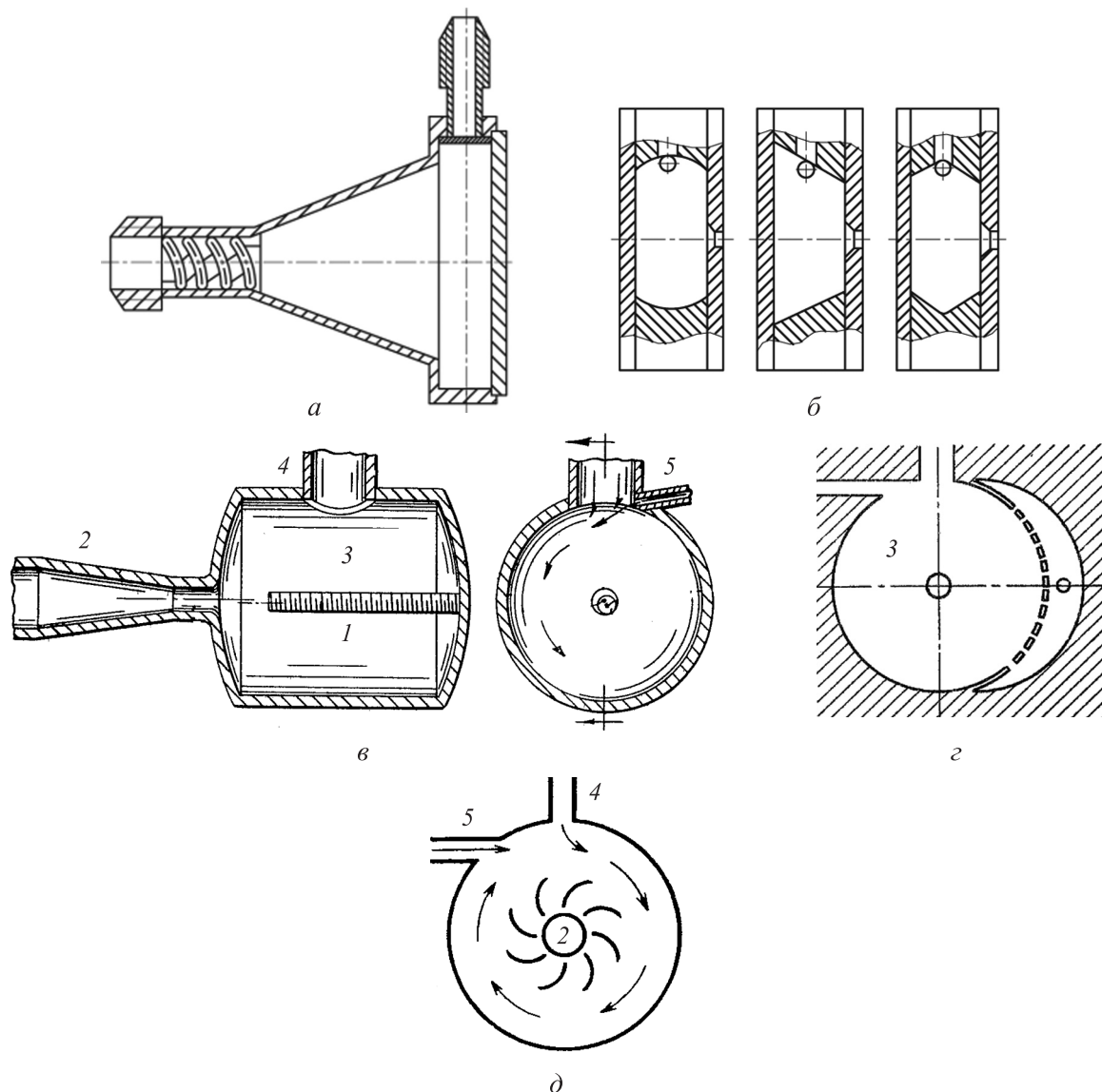


Рис. 7. Схемы вихревых камер разного типа:  
 а — конической; б — профилированных; в — с центральным стержнем; г — с перфорированной стенкой;  
 д — с лопатками; 1 — центральное тело; 2 — выходной канал; 3 — ВК; 4 — канал питания;  
 5 — канал управления

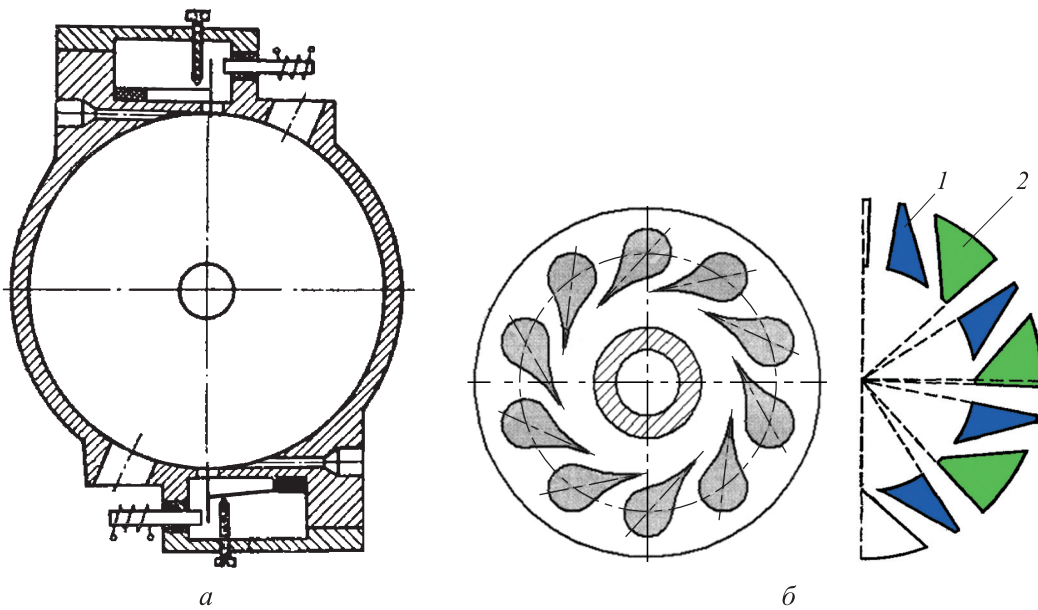


Рис. 8. Схемы отклонения ПП с помощью радиально расположенной лопатки (а) и поворота лопаток (б):  
1 и 2 — подвижный и неподвижный блок

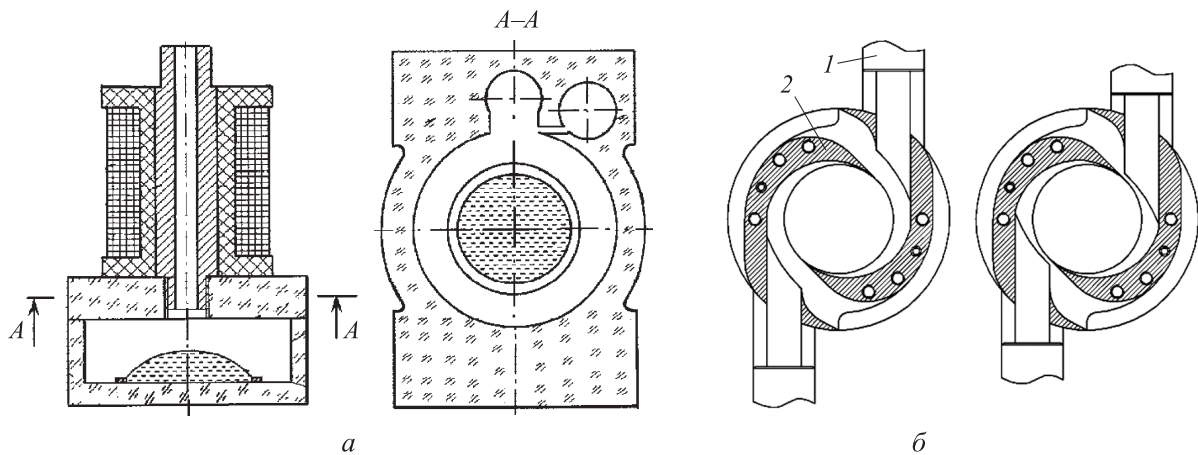


Рис. 9. Схемы элементов проточной полости с изменяемой геометрией:  
а — вихревой камеры за счет выпячивания полости с магнитными частицами под действием электромагнитного поля;  
б — каналов управления за счет ввода клина (1 — клин; 2 — завихритель)

- 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:

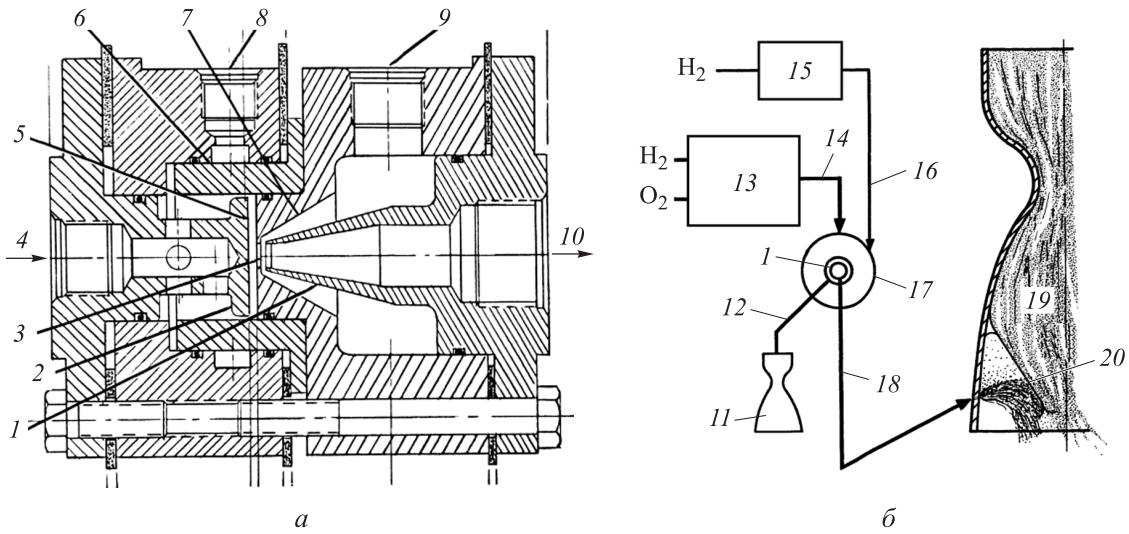


Рис. 10. Схемы вихревого клапана с распределенной подачей ПП, сосредоточенной подачей УП и сбросом РС в окружающую среду через канал сброса (а) и управлением вектором тяги (б):

- 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).

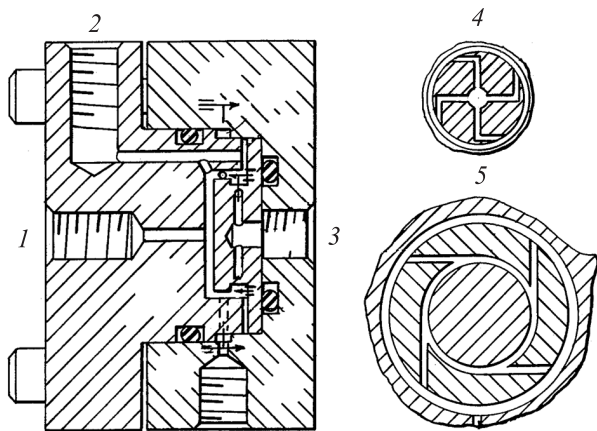


Рис. 11. Схема нормально закрытого клапана (при отсутствии/наличии УП клапан принимает положение закрыт/открыт соответственно):

- 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] 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 – 43<sup>rd</sup> 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 – 43<sup>rd</sup> 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., Fedyakov 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. Dalya 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. *Magnitohidkostnyy vikhrevoy element dlya elektrogidravlicheskih 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. *Gidravlicheskiy vikhrevoy regulyator* [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).

### 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

## Information about the authors

**USS Aleksandr Yuryevich** — Postgraduate, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> 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, 2<sup>nd</sup> Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: av-chernyshev@yandex.ru).



## 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

# Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 662.998.3:666.189

doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-59-68

## Оценка эксплуатационных характеристик коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции при криогенных температурах

М.А. Комков<sup>1</sup>, М.П. Тимофеев<sup>1</sup>, А.В. Ларионова<sup>2</sup><sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана<sup>2</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

## An Evaluation of Performance Characteristics of Short-Fiber Basalt Insulation at Cryogenic Temperatures

M.A. Komkov<sup>1</sup>, M.P. Timofeev<sup>1</sup>, A.V. Larionova<sup>2</sup><sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University<sup>2</sup> Baikov Institute of metallurgy and materials science of the Russian Academy of Sciences

Показана перспективность применения высокопористой теплоизоляции криогенных трубопроводов из коротких базальтовых супертонких волокон, измельченных по жидкостной технологии. На основе учета радиационного переноса тепла определены эффективный коэффициент теплопроводности, предельно допустимые пористость и плотность теплоизоляции из коротких базальтовых волокон со средним диаметром 1,88 мкм и длиной 1,0...1,5 мм. Приведены результаты испытаний на сжатие высокопористых плоских образцов теплоизоляции из коротких базальтовых волокон со связующим из  $Al_2O_3$  и без него. Установлено, что у теплоизоляционного материала со связкой прочность, модуль упругости и упругие деформации при сжатии в 2 раза лучше, чем у образцов без минеральной связки.

**Ключевые слова:** криогенная температура, высокопористая теплоизоляция, короткие базальтовые волокна, фильтрационное осаждение, прочность на сжатие

This work shows the potential of highly porous thermal insulation made of short basalt super-thin fibers chopped using liquid technology for insulating cryogenic piping. The effective heat conductivity coefficient, maximum-permissible porosity and insulation density were determined for short basalt fibers with a mean diameter of 1.88 μm and a length of 1.0–1.5 mm, taking into account radiation heat transfer. The results of compression tests are presented for highly porous flat insulation samples made of short basalt fibers without binding agents and those reinforced with  $Al_2O_3$ . It is established that the thermal insulation material containing a binding agent has the strength, elasticity modulus and elastic compression deformation two times higher than samples without a mineral binding agent.

**Keywords:** cryogenic temperature, high-porosity thermal insulation, short basalt fibers, filtrational settling, compression strength

Перспективным топливом разгонных блоков и воздушно-космических самолетов следующего поколения [1–3] являются криогенные топлива: жидкий водород, метан и кислород [4]. Первые опытные полеты самолетов на жидком водороде (ТУ-155 [5]), жидком метане и забортом кислороде (ТУ-156) были выполнены в СССР в 1986–1989 гг. прошлого века. Подача криогенного горючего проводилась по топливопроводам типа «термокейс» диаметром 50...150 мм [6, 7], в которых межтрубное вакуумированное пространство заполнялось экранно-вакуумной теплоизоляцией.

С одной стороны, приведенная масса таких трубопроводов при наличии на борту самолета систем вакуумирования и контроля чрезвычайно велика (5...9 кг/м) [1, 7]. С другой стороны, если в качестве теплоизоляции использован пенополиуретан типа Викорт-3М плотностью 250 кг/м<sup>3</sup> с внешней защитно-герметичной оболочкой из полимерной пленки, то в нем после многоциклового захлаживания и отогрева образуются трещины [8], что резко повышает теплопроводность материала изделия.

Анализ работ, выполненных М.А. Комковым, М.П. Тимофеевым, В.А. Тарасовым, Ю.В. Баданиной [9–12] и другими авторами, по применению коротких базальтовых супертонких волокон (БСТВ), измельченных и очищенных от неволоконистых включений с помощью жидкостной технологии [13], показывает, что они могут быть использованы в качестве теплоизоляционных покрытий в криогенных трубопроводах [14–17], насосно-компрессорных трубах [10–12] и других изделиях, работающих в диапазоне температур –260...700 °С.

Однако предельно допустимые значения плотности и пористости теплоизоляционных материалов (ТИМ) из коротких базальтовых волокон исследованы недостаточно полно.

Цель работы — определение максимальной пористости коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции при учете лучистого переноса тепла, обеспечивающей ей минимальную массу и допустимую прочность на сжатие.

**Постановка задачи и проведение экспериментов.** Снизить теплопроводность, а следовательно, и массу теплоизоляции криогенного трубопровода из коротких БСТВ в виде цилиндрических скорлуп [9] можно путем увеличения пористости волокнистого материала

$m = V_{\text{пор}}/V_{\text{ТИМ}}$ , где  $V_{\text{пор}}$  — объем пор;  $V_{\text{ТИМ}}$  — объем ТИМ.

Однако в случае высокой пористости становится заметным лучистый перенос тепла, который зависит от диаметра волокон и будет резко возрастать при  $m \rightarrow 1$ . Эффективная теплопроводность волокнистой теплоизоляции в межтрубном пространстве будет определяться выражением

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{конд}} + \lambda_{\text{рад}} = \lambda_{\text{б.в}} + \lambda_{\text{возд}} + \lambda_{\text{рад}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{конд}}$  и  $\lambda_{\text{рад}}$  — коэффициенты кондуктивной и радиационной теплопроводности;  $\lambda_{\text{б.в}}$  и  $\lambda_{\text{возд}}$  — коэффициенты теплопроводности материала БСТВ и сухого воздуха.

Анализ экспериментальных данных, полученных для коэффициентов теплопроводности материала БСТВ диаметром 1,5...3,0 мкм [18], показывает, что они могут быть усреднены и аппроксимированы линейной зависимостью (рис. 1)

$$\lambda_{\text{б.в}}(T) = \lambda_{0\text{б}} [1 + a(T - T_0)], \quad (2)$$

где  $T$  — текущая температура;  $\lambda_{0\text{б}}$  — коэффициент теплопроводности материала БСТВ при температуре  $T_0 = 20$  °С,  $\lambda_{0\text{б}} = 0,032$  Вт/(м·К);  $a$  — коэффициент аппроксимации,  $a = 1/170$  К<sup>-1</sup>.

Для спокойного воздуха экспериментальные значения коэффициента теплопроводности

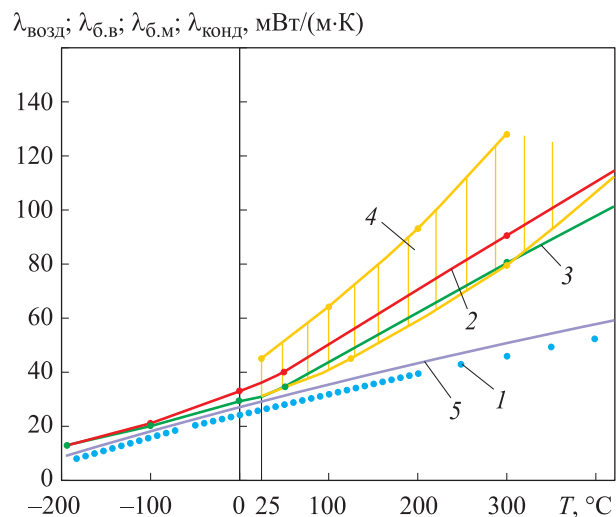


Рис. 1. Зависимость коэффициентов теплопроводности сухого воздуха  $\lambda_{\text{возд}}$  (1), материала БСТВ  $\lambda_{\text{б.в}}$  диаметром 3 (2) и 1,5 мкм (3), базальтового прошивного мата  $\lambda_{\text{б.м}}$  из штапельных волокон плотностью 95...125 кг/м<sup>3</sup> (4) и расчетного коэффициента кондуктивной теплопроводности  $\lambda_{\text{конд}}$  (5) от температуры  $T$  для базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции пористостью  $m = 0,94$

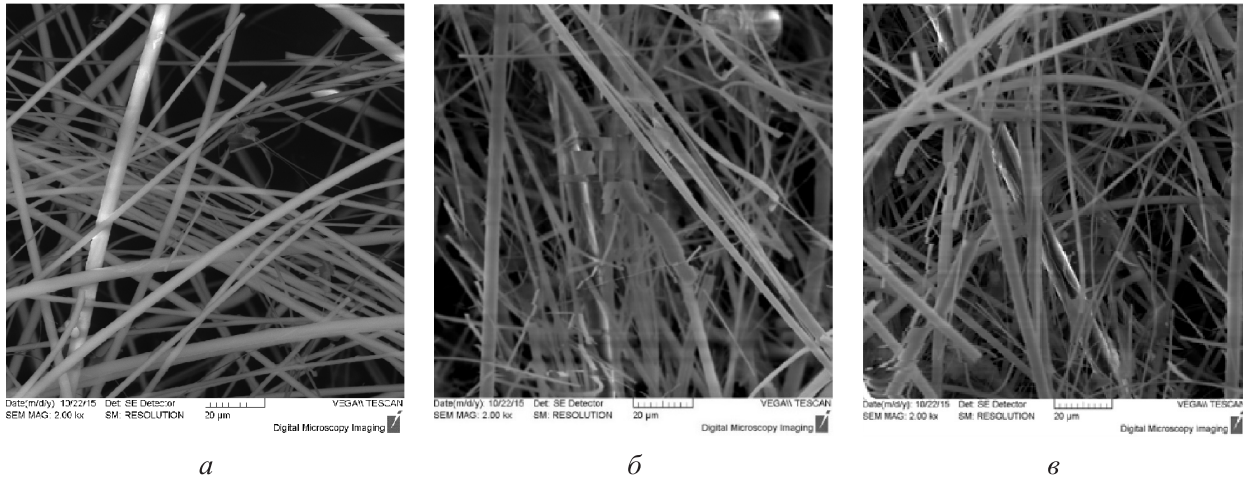


Рис. 2. Электронные снимки в трех (а–в) разных областях одного плоского образца теплоизоляции из БСТВ со связкой из  $Al_2O_3$ , использованные для анализа диапазона их диаметров

сухого воздуха (см. рис. 1) также можно выразить линейной зависимостью

$$\lambda_{\text{возд}}(T) = \lambda_{0\text{в}} [1 + b(T - T_0)], \quad (3)$$

где  $\lambda_{0\text{в}}$  — коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{0\text{в}} = 0,0257 \text{ Вт/(м·К)}$ ;  $b = 1/380 \text{ К}^{-1}$ .

Средние значения коэффициентов теплопроводности сухого воздуха  $\lambda_{\text{возд}}^{\text{ср}} = 0,02063 \text{ Вт/(м·К)}$  и материала БСТВ  $\lambda_{\text{б.в}}^{\text{ср}} = 0,0301 \text{ Вт/(м·К)}$  в интервале температур  $T = -196 \dots 60^\circ\text{C}$  получены на основании графиков, приведенных на рис. 1 [9].

На этом рисунке показана зависимость коэффициентов теплопроводности сухого воздуха  $\lambda_{\text{возд}}$ , материала БСТВ  $\lambda_{\text{б.в}}$  диаметром 3 и 1,5 мкм [18], базальтового прошивного мата  $\lambda_{\text{б.м}}$  [19] из штапельных волокон плотностью  $95 \dots 125 \text{ кг/м}^3$  от температуры  $T$  для базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции пористостью  $m = 0,94$ .

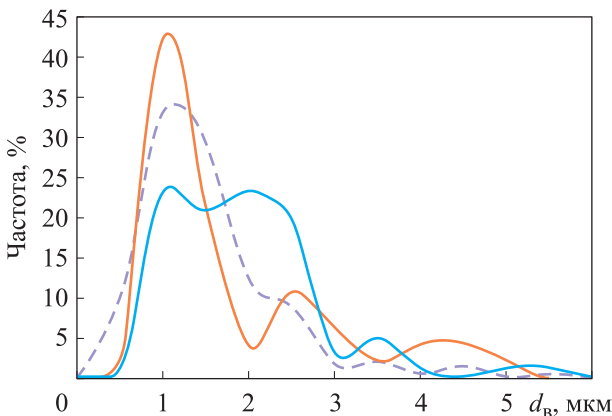


Рис. 3. Частотное распределение диаметров БСТВ, полученных с трех снимков, показанных на рис. 2, а (—), б (—) и в (---)

стостью  $m = 0,94$ . Точки являются экспериментальными данными, кривые 2 и 3 — результатом их аппроксимации. Заштрихованная между двумя кривыми зона 4 — область изменения коэффициентов теплопроводности прошивного мата  $\lambda_{\text{б.м}}$  из базальтовых волокон. Там же показана расчетная (полученная на основе правила суммирования) зависимость коэффициента кондуктивной теплопроводности  $\lambda_{\text{конд}}$  от температуры для базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции пористостью  $m = 0,94$  (кривая 5).

Для исследования теплоизоляционных покрытий криогенных трубопроводов выбраны БСТВ фирмы MINOL [19, 20] с волокнами диаметром  $0,5 \dots 3,5 \text{ мкм}$  и длиной  $50 \dots 60 \text{ мм}$ . После жидкостной дезинтеграции (измельчения) волокон до длины  $1,0 \dots 1,5 \text{ мм}$ , очистки их от мусора (корольков, игл и т. п.) были изготовлены плоские образцы размером  $160 \times 160 \text{ мм}$  и сделаны электронные снимки материала в плоскости осаждения коротких волокон (рис. 2, а–в).

Диаметры волокон, показанных на рис. 2, а–в, измерены с помощью программы по обработке изображений. Установлено, что среднее значение диаметра волокон  $d_b = 1,88 \text{ мкм}$ . На рис. 3 приведено семейство частотных распределений, соответствующих обработанным изображениям.

**Обсуждение результатов.** Без учета тепловых потерь на радиационный перенос тепла и при спокойном состоянии воздуха в порах ТИМ коэффициент кондуктивной теплопроводности на основании правила смесей и выражений (1)–(3) можно представить в виде



$$\lambda(m, T) = \lambda_{\text{конд}} = m \lambda_{\text{возд}}^{\text{сп}} + (1-m) \lambda_{\text{б.в}}^{\text{сп}}, \quad (4)$$

где  $m = 1 - \rho_{\text{ТИМ}} / \rho_{\text{б.в}}$ ,  $\rho_{\text{ТИМ}}$  — плотность ТИМ;  $\rho_{\text{б.в}}$  — плотность материала БСТВ,  $\rho_{\text{б.в}} = 2750 \text{ кг/м}^3$ .

Для нахождения коэффициента радиационной теплопроводности воспользуемся следующими соотношениями [21]:

$$\lambda_{\text{рад}} = \frac{\sigma_0 T_m^3}{K_{\text{осл}}} \frac{\pi d_b}{(1-m)}; \quad (5)$$

$$K_{\text{осл}} = 70 m d_b T_m + 5 \cdot 10^3 (1-m) / T_m; \quad (6)$$

$$T_m = (T_1 + T_2) / 2, \quad (7)$$

где  $\sigma_0$  — постоянная Больцмана,  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $T_m$  — средняя температура теплоизоляции,  $T_m = 176,5 \text{ К}$ ;  $K_{\text{осл}}$  — коэффициент ослабления (связанный с коэффициентом черноты и отражательной способностью БСТВ);  $T_1$  — температура теплоизоляционного покрытия топливопровода,  $T_1 = 333 \text{ К}$ ;  $T_2$  — температура жидкого водорода,  $T_2 = 20 \text{ К}$ .

По формулам (5)–(7) проведен расчет коэффициента радиационной теплопроводности волокнистой теплоизоляции  $\lambda_{\text{рад}}$  для максимального, среднего и минимального диаметров волокон (см. рис. 2 и 3). Графическая зависимость радиационной теплопроводности от пористости материала теплоизоляции  $m$  при диаметре волокна  $d_b = 5,50; 3,50; 1,88$  и  $0,50 \text{ мкм}$ , приведена на рис. 4.

Анализ графиков рис. 4 показывает, что при пористости, выше  $0,95$ – $0,96$  коэффициента ра-

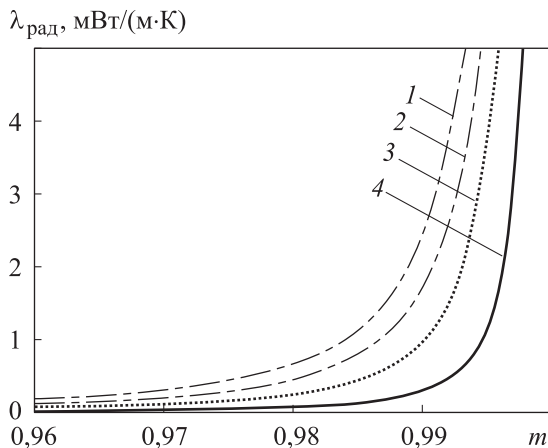


Рис. 4. Зависимость радиационной теплопроводности  $\lambda_{\text{рад}}$  от пористости  $m$  при диаметре волокна  $d_b = 5,50$  (1),  $3,50$  (2),  $1,88$  (3) и  $0,50 \text{ мкм}$  (4)

диационной теплопроводности, а следовательно, и лучистый перенос тепла резко возрастают, особенно для больших диаметров базальтовых волокон.

После определения коэффициентов кондуктивной и радиационной теплопроводности по формулам (4) и (5) и подстановки их в соотношение (1) с учетом данных, приведенных на рис. 1 и 4, получаем зависимость коэффициента эффективной теплопроводности базальтовой коротковолокнистой теплоизоляции от пористости материала в диапазоне температур  $T = -253 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 5, а, б).

Из рис. 5 следует, что оптимальным значением пористости можно считать  $m = 0,960 \dots 0,950$ , при котором разница между коэффициентами теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$  и  $\lambda_{\text{конд}}$  находится в пределах  $0,2 \dots 0,3 \%$ . Следовательно, радиационная теплопроводность, определенная по формуле (5), оказывает существенное влияние на коэффициент  $\lambda_{\text{эф}}$  лишь при очень малой плотности материала теплоизоляции и высокой пористости  $m \geq 0,960$ .

При пористости волокнистой структуры  $m \leq 0,940$  радиационная теплопроводность намного меньше кондуктивной, поэтому в выражении (1) ее можно не учитывать.

Определим минимальное значение плотности ТИМ для коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции пористостью  $m = 0,950 \dots 0,960$ . С учетом указанной пористости и плотности БСТВ  $\rho_{\text{б.в}} = 2750 \text{ кг/м}^3$  итоговая плотность базальтовой теплоизоляции

$$\rho_{\text{ТИМ}} = (1-m) \rho_{\text{б.в}} = 110 \dots 137,5 \text{ кг/м}^3.$$

На практике минимальное значение пористости обычно не превышает  $0,930 \dots 0,940$ . При этом плотность теплоизоляции будет составлять  $165,0 \dots 192,5 \text{ кг/м}^3$ .

Однако если пористость высока, то возникает проблема увеличения прочности материала теплоизоляции на сжатие при циклических нагрузках. Для повышения прочности и упругих деформаций на сжатие при воздействии вибрационных, акустических и ударных нагрузок в процессе транспортирования и полета изделия в ТИМ покрытий криогенных трубопроводов или других изделий вводят неорганическую связку из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в количестве  $5,5 \dots 6,5 \%$  по массе [9, 13].

Анализ современных недорогих неорганических связок, применяемых в производстве ТИМ, показал, что окись алюминия, получаемая из солей сернокислого алюминия, удовле-



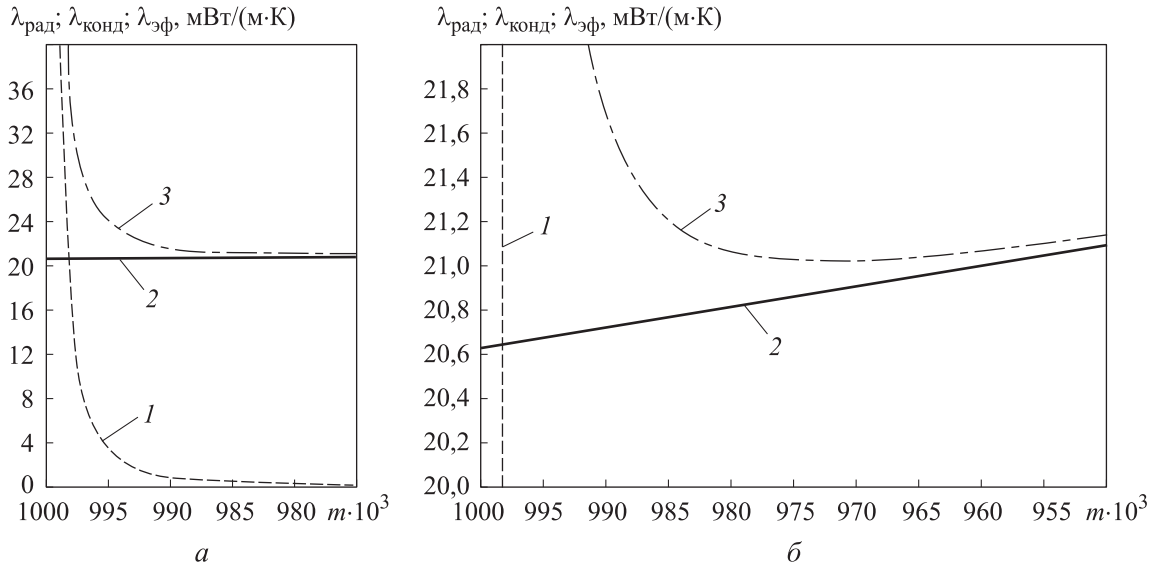


Рис. 5. Зависимость коэффициентов радиационной  $\lambda_{\text{рад}}$  (1), кондуктивной  $\lambda_{\text{конд}}$  (2) и эффективной  $\lambda_{\text{эф}}$  (3) теплопроводности от пористости материала  $m$  в диапазоне температур  $T = -253...60\text{ }^\circ\text{C}$  (а) и ее увеличенный фрагмент (б)

творяет работоспособности базальтовой теплоизоляции во всем интервале температур  $T = -253,15...700,00\text{ }^\circ\text{C}$ .

При изготовлении изделий из высокопористых волокнистых материалов методом фильтрационного осаждения связку вводят в виде

свежеосажденной гидроокиси алюминия, которая представляет собой объемистый студенистый осадок белого цвета, практически нерастворимый в воде и полностью осаждаемый на волокна при кислотности (водородном показателе) суспензии  $\text{pH} = 7,5...8,5$  [22–24].

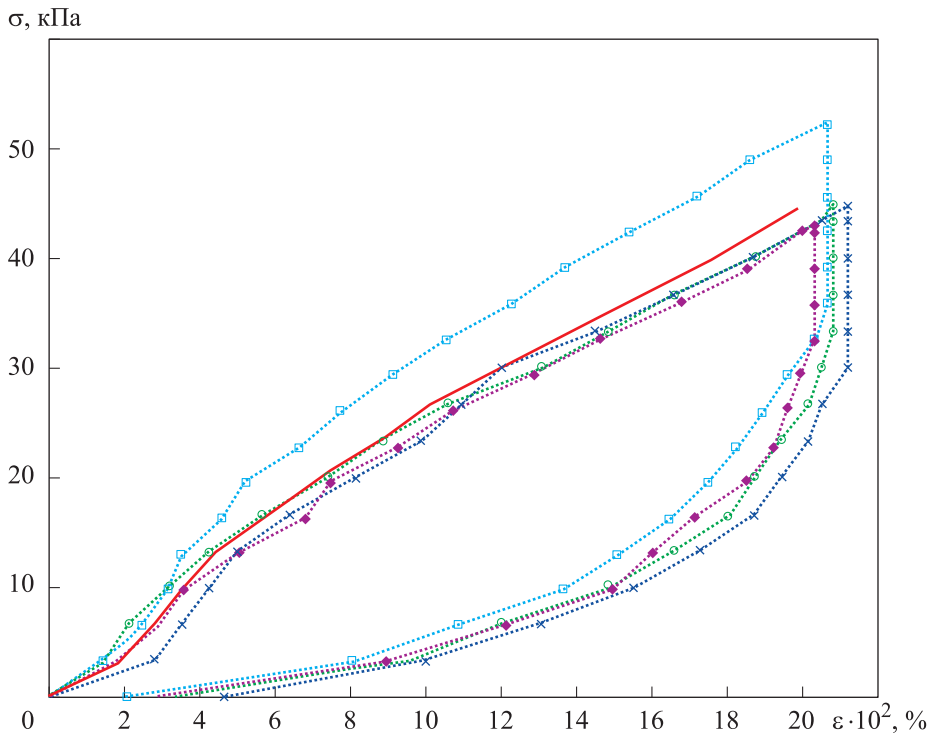


Рис. 6. Изменение напряжения сжатия образцов со связкой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и восстановление их толщины после снятия нагрузки:

№ 2-1; № 2-2; № 2-3; № 2-4

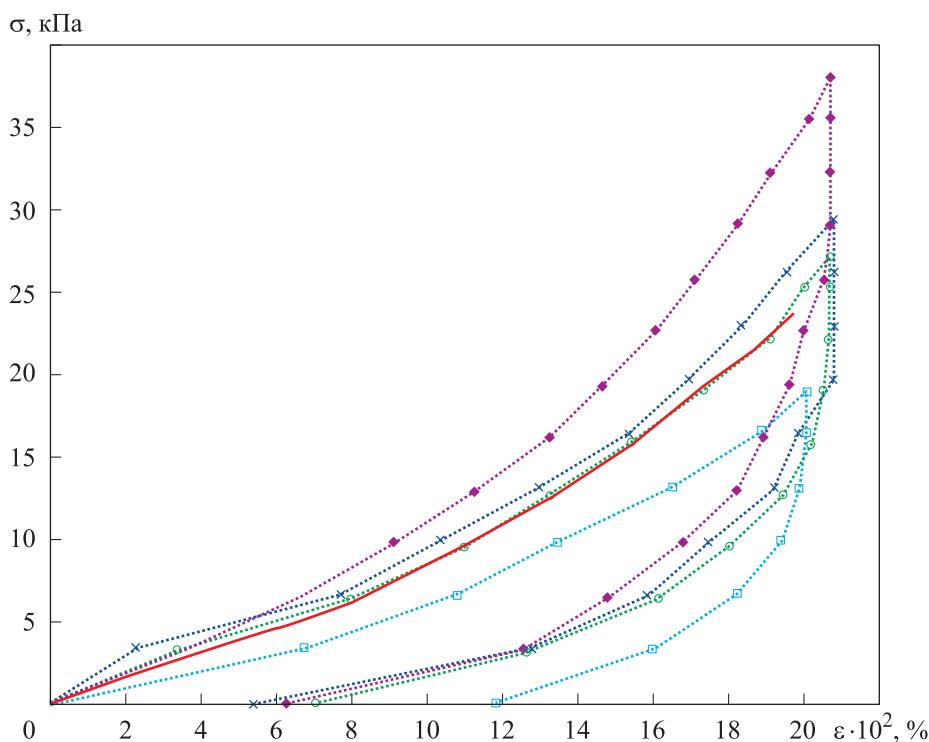


Рис. 7. Изменение напряжения сжатия образцов без связки и восстановление их толщины после снятия нагрузки:

—×— № 5-1; —□— № 5-2; —○— № 5-3; —◆— № 5-4

Для испытаний на сжатие высокопористого ТИМ изготовили плоские образцы размером 160×160 мм из коротких БСТВ со связкой  $Al_2O_3$  и без нее, которые разрезали на четыре равные части. Опыты проводили на испытательной машине FP 10/1 с использованием реверсивного устройства. На поверхности образцов, к которым прикладывалась нагрузка при сжатии, установили стеклянные пластинки, что позволило снизить трение волокнистого материала по торцам образцов.

На рис. 6 показаны зависимости напряжения сжатия  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  для каждого из четырех образцов № 2-1...2-4 толщиной 28 мм с исходной плотностью 146 кг/м<sup>3</sup> и содержанием связки из  $Al_2O_3$  5,5 %. Там же приведена осредненная по четырем образцам зависимость напряжения  $\sigma$  от деформации на участке активного нагружения (сплошная красная кривая). По осредненной диаграмме при деформации  $\epsilon = 20$  % напряжение сжатия составляет 0,044 МПа, а секущий модуль упругости материала — 0,220 МПа.

На рис. 7 показаны зависимости напряжения сжатия  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$  для каждого из четырех образцов № 5-1...5-4 толщиной 56 мм с исходной плотностью 196 кг/м<sup>3</sup> из коротких

базальтовых волокон без связки. По осредненной диаграмме при деформации  $\epsilon = 20$  % (сплошная красная кривая) напряжение составляет 0,024 МПа, а секущий модуль упругости материала при деформации 12 % равен 0,0933 МПа. Таким образом, полученные значения прочности и модуля упругости теплоизоляционного материала без связки при сжатии образцов почти в 2 раза меньше, чем такие же показатели для образцов со связкой из  $Al_2O_3$ . Кроме того, для образцов без связки, после снятия сжимающей нагрузки, толщина образцов не восстанавливается, а остаточная деформация составляет 6...8 %.

## Выводы

1. Изучены цифровые фотографии ТИМ из БСТВ. Получено распределение волокон по диаметрам, определен средний, максимальный и минимальный диаметры волокон.

2. Рассчитаны коэффициенты радиационной теплопроводности теплоизоляции при различной пористости для разных диаметров волокон: указанного производителем (0,5...3,5 мкм), среднего (1,88 мкм) и максимального (3,5 мкм). Показано, что при повышении пористости и

увеличении диаметра волокон более предельных значений этот коэффициент резко возрастает.

3. Установлено, что максимально допустимое значение пористости для исследуемого ТИМ из БСТВ находится в интервале 0,95...0,96. При этом плотность материала теплоизоляции лежит в пределах 110,0...137,5 кг/м<sup>3</sup>.

4. Определено, что при сжатии плоские образцы высокопористой теплоизоляции из коротких БСТВ со связкой из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> упруго деформируются вплоть до 20 % и практически полностью восстанавливаются после снятия сжимающей нагрузки.

## Литература

- [1] Андреев В.А., Борисов В.Д., Климов В.Т. *Внимание: газы. Криогенное топливо для авиации: Справочник-воспоминание для всех*. Москва, Московский рабочий, 2001. 223 с.
- [2] Мохов В. Первый разгонный блок 12КРБ отправлен в Индию. *Новости космонавтики*, 1998, № 21/22, с. 42–43.
- [3] Журавин Ю. «Море» планов «Ангары». *Новости космонавтики*, 1999, № 3(194), с. 48–49.
- [4] Патрунов Ф.Г. *Ниже 120 градусов по Кельвину*. Москва, Знание, 1989. 176 с.
- [5] Федоров Г., Максимович Г. Самолет завтрашнего дня — Ту-155 на водородном топливе: АНТК им. А.Н. Туполева. *Крылья Родины*, 1989, № 6.
- [6] Архаров А.М., Кунис И.Д. *Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 252 с.
- [7] Кряковкин В.П., Клеблеев Т.И., Ленский А.Б. Криогенные трубопроводы: от разработки до ввода в эксплуатацию. *Технические газы*, 2014, № 4, с. 67–71.
- [8] Комков М.А., Баданина Ю.В., Потапов Д.А., Новикова А.С. Криогенный трубопровод с коротковолокнистой базальтовой теплоизоляцией. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 11. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1825>, doi: 10.18698/2308-6033-2018-11-1825
- [9] Баданина Ю.В. *Технологическое проектирование высокопористых теплоизолирующих конструкций из коротких базальтовых волокон на основе метода жидкостной фильтрации*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 16 с.
- [10] Баданина Ю.В., Комков М.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П., Моисеев А.В. Моделирование и экспериментальное определение технологических параметров жидкостного формования базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб. *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 04, с. 13–28, doi: 10.7463/0315.0761820
- [11] Комков М.А., Моисеев В.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П. Уменьшение негативного влияния на биосферу при добыче тяжелой нефти и экологически чистая технология закачки пара сверхкритических параметров в нефтяные пласты за счет создания новых насосно-компрессорных труб с экологически чистым теплозащитным покрытием. *Геофизические процессы и биосфера*, 2015, т. 14, № 1, с. 70–79.
- [12] Комков М.А., Баданина Ю.В., Тарасов В.А., Филимонов А.С. Анализ структурных и теплофизических характеристик высокопористой базальтовой теплоизоляции насосно-компрессорных труб. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, № 1(61). URL: <http://engjournal.ru/eng/catalog/msm/smme/1575.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2017-1-1575
- [13] Тимофеев М.П. *Разработка и исследование фильтрационной технологии изготовления изделий из волокнистых неорганических материалов*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 16 с.
- [14] Комков М.А., Потапов Д.А., Кудрявцев А.А. Оптимизация угла намотки на металлический лейнер криогенного трубопровода. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1673>, doi: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673
- [15] Буланов И.М., Комков М.А. Применение жестких полимерных пленок в криогенных топливных системах аэрокосмической техники. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1992, № 1, с. 14–24.
- [16] Сабельников В.В., Комков М.А., Саморядов А.В. Технология склеивания элементов криогенного трубопровода. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2005, № 1, с. 16–20.

- [17] Комков М.А., Сабельников В.В., Баслык К.П. Конструктивно-технологический анализ трубопроводов, изготовленных из полиимидной пленки методом намотки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, спец. вып. № 3, с. 78–86.
- [18] Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. *Основы производства базальтовых волокон и изделий*. Москва, Теплоэнергетик, 2002. 411 с.
- [19] *Маты прошивные из базальтового супертонкого волокна (МПБСТВ) по ТУ 5762-002-47897055-2003*. URL: <https://bztm.su/catalog/teploizolyatsiya/maty-proshivnye/> (дата обращения 15 сентября 2019).
- [20] *Базальтовое супертонкое волокно «MINOL»*. Завод БСТВ «MINOL». URL: <http://uteplitel-minol.ru/products> (дата обращения 05 сентября 2019).
- [21] *Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов. МДС 41-7.2004*. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/MDS4172004Metodikaocenkiiv.html> (дата обращения 25 сентября 2019).
- [22] Тарасов В.А., Смирнов Ю.В., Тимофеев М.П., Филимонов А.С. Режимы фильтрационного осаждения элементов теплозащиты РКТ. *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*, 2007, № 5, с. 52–55.
- [23] Баданина Ю.В., Комков М.А., Тарасов В.А., Тимофеев М.П. Исследование влияния кислотности на процесс фильтрации и осаждения гидроокиси алюминия на коротковолокнистую базальтовую теплоизоляцию. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2018, № 8, с. 23–28, doi: 10.31044/1994-6260-2018-0-8-23-28
- [24] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. Analysis of the Effect of Hydromass Acidity on the Process of Filtration and Precipitation of Aluminum Oxide in Short-Fiber Basalt Heat Insulation. *Polymer Science – Series D*, 2019, vol. 12, iss. 1, pp. 72–76, doi: 10.1134/S1995421219010027

## References

- [1] Andreyev V.A., Borisov V.D., Klimov V.T. *Vnimanije: gazy. Kriogennoye toplivo dlya aviatsii: Spravochnik-vospominaniye dlya vseh* [Caution: gases. Cryogenic Fuel for Aviation: A Handbook for All]. Moscow, Moskovskiy rabochiy publ., 2001. 223 p.
- [2] Mokhov V. The first 12KRB overclocking unit sent to India. *Novosti kosmonavtiki*, 1998, no. 21/22, pp. 42–43 (in Russ.).
- [3] Zhuravin Yu. The Sea of Angara Plans. *Novosti kosmonavtiki*, 1999, no. 3(194), pp. 48–49 (in Russ.).
- [4] Patrunov F.G. *Nizhe 120 gradusov po Kel'vinu* [Below 120 degrees Kelvin]. Moscow, Znaniye publ., 1989. 176 p.
- [5] Fedorov G., Maksimovich G. The plane of tomorrow — Tu-155 on hydrogen fuel: ANTK named after A.N. Tupolev. *Kryl'ya Rodiny*, 1989, no. 6.
- [6] Arkharov A.M., Kunis I.D. *Kriogennyye zapravochnyye sistemy startovykh raketno-kosmicheskikh kompleksov* [Cryogenic refueling systems of launch rocket and space complexes]. Moscow, Bauman Press, 2006. 252 p.
- [7] Kryakovkin V.P., Klebleyev T.I., Lenskiy A.B. Cryogenic pipelines: from designing to putting into operation. *Tekhnicheskoye gazety*, 2014, no. 4, pp. 67–71 (in Russ.).
- [8] Komkov M.A., Badanina Yu.V., Potapov D.A., Novikova A.S. Cryogenic pipeline with short fiber basalt insulation. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 11 (in Russ.). Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1825>, doi: 10.18698/2308-6033-2018-11-1825
- [9] Badanina Yu.V. *Tekhnologicheskoye proyektirovaniye vysokoporistykh teploizoliruyushchikh konstruktivnykh iz korotkikh bazal'tovykh volokon na osnove metoda zhidkostnoy fil'tratsii*. Kand. Diss. [Technological design of highly porous insulating structures made of short basalt fibers based on the liquid filtration method. Cand. Diss.]. Moscow, Bauman Press, 2017. 16 p.
- [10] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeyev M.P., Moiseyev A.V. Simulation and Experimental Determination of Technological Liquid Molding Parameters of Tubing Basalt Insulation. *Science and Education of BMSTU*, 2015, no. 04, pp. 13–28 (in Russ.), doi: 10.7463/0315.0761820

- [11] Komkov M.A., Moiseyev V.A., Tarasov V.A., Timofeyev M.P. Minimization of negative influence on the biosphere in heavy oil extraction and ecologically clean technology for injection of steam with supercritical parameters on the basis of new ecologically clean tubing pipes with heat-resistant coatings. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 70–79 (in Russ.).
- [12] Komkov M.A., Badanina Yu.V., Tarasov V.A., Filimonov A.S. Analysis of structural and thermal-physical characteristics of high-porosity basalt thermal insulation for tubing. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 1(61) (in Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/msm/smme/1575.html>, doi: 10.18698/2308-6033-2017-1-1575
- [13] Timofeyev M.P. *Razrabotka i issledovaniye fil'tratsionnoy tekhnologii izgotovleniya izdeliy iz voloknistykh neorganicheskikh materialov*. Kand. Diss. [Development and research of filtration technology for manufacturing products from fibrous inorganic materials. Cand. Diss.]. Moscow, Bauman Press, 2007. 16 p.
- [14] Komkov M.A., Potapov D.A., Kudryavtsev A.A. Optimizing the angle of winding carbon fiber reinforced plastic on the metal liner of the cryogenic pipeline. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9 (in Russ.). Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1673>, doi: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673
- [15] Bulanov I.M., Komkov M.A. The use of hard polymer films in cryogenic fuel systems of aerospace engineering. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 1992, no. 1, pp. 14–24 (in Russ.).
- [16] Sabel'nikov V.V., Komkov M.A., Samoryadov A.V. Bonding technology for cryogenic pipeline elements. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2005, no. 1, pp. 16–20 (in Russ.).
- [17] Komkov M.A., Sabel'nikov V.V., Baslyk K.P. Structural and technological analysis of pipelines made of polyimide film by winding. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, spec. iss. 3, pp. 78–86 (in Russ.).
- [18] Dzhigiris D.D., Makhova M.F. *Osnovy proizvodstva bazal'tovykh volokon i izdeliy* [Basics of the production of basalt fibers and products]. Moscow, Teploenergetik publ., 2002. 411 p.
- [19] *Maty proshivnyye iz bazal'tovogo supertonkogo volokna (MPBSTV) po TU 5762-002-47897055-2003* [Stitched mats from basalt superthin fiber (MPBST) according to TU 5762-002-47897055-2003]. Available at: <https://bztm.su/catalog/teploizolyatsiya/maty-proshivnyye/> (accessed 15 September 2019).
- [20] *Bazal'tovoye supertonkoye volokno "MINOL". Zavod BSTV "MINOL"* [Basalt superthin fiber "MINOL". Factory BSTV "MINOL"]. Available at: <http://www.bztm.su/bstv.php> (accessed 05 September 2019).
- [21] *Metodika otsenki vliyaniya vlazhnosti na effektivnost' teploizolyatsii oborudovaniya i truboprovodov. MDS 41-7.2004* [Methodology for assessing the effect of humidity on the efficiency of thermal insulation of equipment and pipelines. MDS 41-7.2004]. Available at: <http://www.gosthelp.ru/text/MDS4172004Metodikaoceniv.html> (accessed 25 September 2019).
- [22] Tarasov V.A., Smirnov Yu.V., Timofeyev M.P., Filimonov A.S. Modes of filtration deposition of thermal protection elements of the RCT. *All-Russian Scientific-Technical Journal Flight*, 2007, no. 5, pp. 52–55 (in Russ.).
- [23] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeyev M.P. Study of the effect of acidity on the process of filtration and deposition of aluminum hydroxide on short-fiber basalt insulation. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2018, no. 8, pp. 23–28 (in Russ.), doi: 10.31044/1994-6260-2018-0-8-23-28
- [24] Badanina Yu.V., Komkov M.A., Tarasov V.A., Timofeev M.P. Analysis of the Effect of Hydromass Acidity on the Process of Filtration and Precipitation of Aluminum Oxide in Short-Fiber Basalt Heat Insulation. *Polymer Science – Series D*, 2019, vol. 12, iss. 1, pp. 72–76, doi: 10.1134/S1995421219010027

## Информация об авторах

**КОМКОВ Михаил Андреевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: m\_komkov@list.ru).

**ТИМОФЕЕВ Михаил Петрович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sm5-3@yandex.ru).

**ЛАРИОНОВА Анастасия Владимировна** — сотрудник. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119334, Москва, Российская Федерация, Ленинский пр-т, д. 49, e-mail: mlarionov@imet.ac.ru).

## Information about the authors

**KOMKOV Mikhail Andreevich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: m\_komkov@list.ru).

**TIMOFEEV Mikhail Petrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sm5-3@yandex.ru).

**LARIONOVA Anastasiya Vladimirovna** — Faculty Member. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (119334, Moscow, Russian Federation, Leninskiy Ave., Bldg. 49, e-mail: mlarionov@imet.ac.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Комков М.А., Тимофеев М.П., Ларионова А.В. Оценка эксплуатационных характеристик коротковолокнистой базальтовой теплоизоляции при криогенных температурах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 7, с. 59–68, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-59-68

### Please cite this article in English as:

Komkov M.A., Timofeev M.P., Larionova A.V. An Evaluation of Performance Characteristics of Short-Fiber Basalt Insulation at Cryogenic Temperatures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 7, pp. 59–68, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-59-68



## В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие П.П. Телепнева, Д.А. Кузнецова «Основы проектирования виброзащиты космических аппаратов»

Рассмотрены основы проектирования виброзащиты прецизионных космических аппаратов для улучшения разрешающей способности устанавливаемой на борту целевой аппаратуры при влиянии динамических источников возмущений. Представлены методы и средства виброзащиты, а также принципы работы, математические модели и практические примеры создания виброзащитных устройств. Приведен инженерный алгоритм в виде структурной схемы обеспечения виброзащиты космических конструкций для практической реализации.

### 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