

**ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВОГО СТРУЙНОГО УСТРОЙСТВА
ПРИ РАЗРАБОТКЕ АКТИВНЫХ ГИДРОПНЕВМОДЕМПФЕРОВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ
РЕАБИЛИТАЦИИ**

А.Ю. Усс

uss25.ru@mail.ru

А.В. Чернышев

chernyshev@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены обзор и анализ текущего состояния вопроса по разработке и исследованию активных гидропневмодемпферов, используемых в технических средствах реабилитации, в которых в качестве регулирующей арматуры могут применяться вихревые струйные устройства. Рассмотрены вихревые струйные устройства, отличительной особенностью которых является отсутствие механически подвижных частей. Описан принцип работы вихревого струйного устройства. Приведено обоснование использования вихревого струйного устройства в активном гидропневмодемпфере протеза коленного модуля. Из обзора научно-технической литературы следует, что активные гидропневмодемпферы используются не только в технических средствах реабилитации, но и в амортизаторах транспортных средств. Накопленный опыт при проектировании и разработке активных гидропневмодемпферов для амортизаторов транспортных средств применен при проектировании и разработке активного гидропневмодемпфера коленного модуля. В целях выявления преимуществ и недостатков рассмотрены некоторые конструкции активных гидропневмодемпферов для амортизаторов транспортных средств. Анализ технических решений показал преимущество вихревых струйных устройств (высокая надежность, возможность работы с различными рабочими средами, низкие стоимость изготовления и эксплуатационные затраты), в силу чего рекомендовано использовать вихревое струйное устройство в качестве исполнительного органа (вихревого клапана) в клапанном узле активного гидропневмодемпфера. Применение вихревого струйного устройства повышает

Ключевые слова

Запорно-регулирующее устройство, вихревое струйное устройство, регулятор давления, регулятор расхода, вихревой клапан, гидропневмодемпфер

надежность конструкции и снижает энергозатраты на управление конструкцией. Предложенная конструкция гидropневмодемпера позволяет применить интерактивное управление демпфированием. Впервые представлена концепция и описан принцип работы активного гидropневмодемпера с использованием вихревого струйного устройства

Поступила 20.03.2020

Принята 12.08.2020

© Автор(ы), 2021

Введение. В настоящее время из общего числа людей с ограниченными возможностями (сегодня это более 16 млн человек) ~ 10 % имеют ампутации верхних и нижних конечностей и показания к протезированию.

Причиной ампутации конечностей в 48 % случаев является травма (бытовая, производственная, огнестрельные ранения), в 42 % — сосудистые заболевания, в 10 % — опухоли и врожденные деформации. Среди больных с ампутационными дефектами пациенты с ампутациями нижних конечностей составляют 92 %, с ампутациями верхних конечностей — 8 %.

Протезирование — важный этап комплексного процесса реабилитации при утрате конечности и во многом определяет его результаты и возможность адаптации человека с ограниченными возможностями в обществе.

В связи с этим разработка протезов коленного модуля — актуальная и социально значимая задача, позволяющая пациенту в кратчайшие сроки адаптироваться физически, морально и социально.

Коленный модуль предназначен для замещения функций утраченного вследствие ампутации коленного сустава человека и применяется в протезах нижних конечностей при ампутациях на уровне колена и выше.

Коленный модуль представляет собой коромыслово-кулисный механизм (рис. 1, а), преобразующий вращательное движение пирамидки и жестко скрепленной с ней качалки в поступательное движение штока гидropневмодемпера (ГПД). Коленный модуль (рис. 1, б) состоит из корпуса и подвижных звеньев, ГПД, электронной системы управления активным ГПД.

К нижней части корпуса крепится пирамидка с внешней резьбой, с помощью которой к коленному модулю можно прикреплять компоненты, предназначенные для построения протеза нижней конечности (несущий модуль, регулировочно-соединительные устройства, модуль стопы и т. д.).

Внутри корпуса вставляется обеспечивающий кинематику движения коленного модуля ГПД, который крепится к проушине, соединенной с качалкой через ось штока. На внутренней стороне корпуса приклеены тензорезисторы, отслеживающие деформацию корпуса. На основе этих данных система управления строит силомоментную картину.

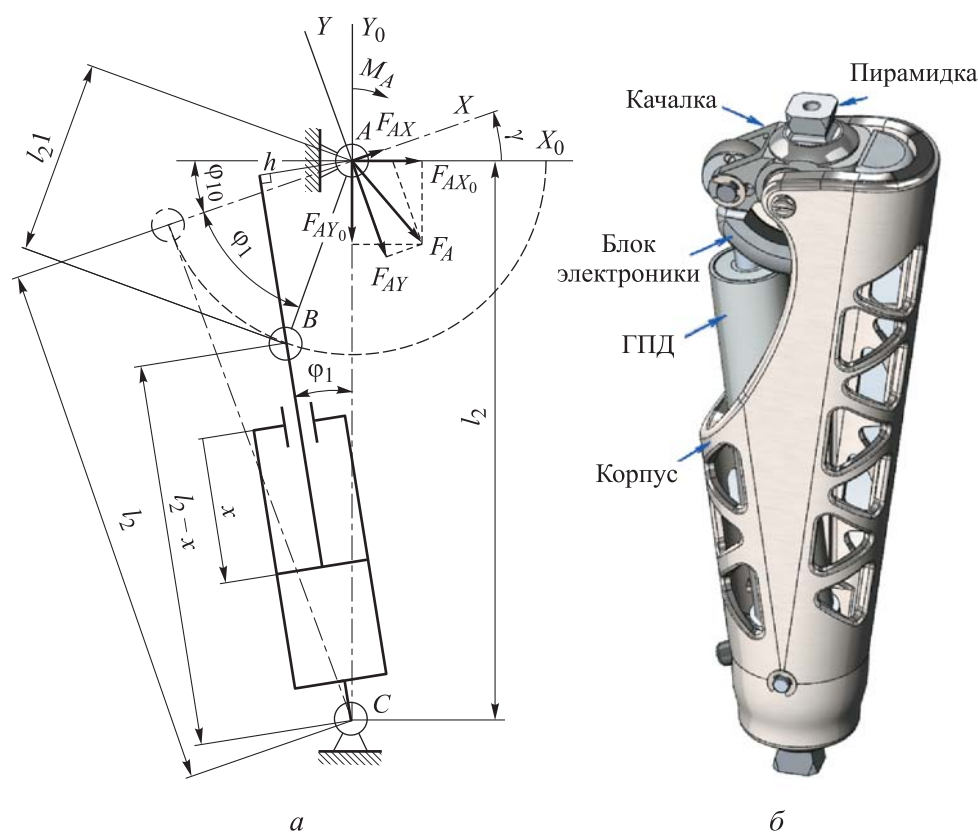


Рис. 1. Протез коленного модуля:

а — кинематическая расчетная схема механизма; *б* — внешний вид протеза

Обоснование разработки протеза с активным ГПД. Одним из критериев походки человека с ограниченными возможностями является болевое ощущение, вызываемое возникновением момента сил между приемной гильзой протеза и культей. Большой момент силы приводит к образованию ложного сустава между гильзой и культей и вызывает болевые ощущения. Для устранения этих болевых ощущений человек с ограниченными возможностями вырабатывает компенсаторные движения, ухудшающие параметры ходьбы, что необходимо учитывать при разработке протеза. Поэтому задача разработки протезов с активным ГПД является актуальной. Это также связано с необходимостью создания устройства, способного позволить человеку с ограниченными возможностями минимизировать эти ограничения и жить полноценной жизнью, насколько это возможно.

Фазы ходьбы. При соударении пятки и стопы о пол должны быть уменьшены большие кратковременные ударные силы, также при этом

необходимо обеспечить надежное удержание веса тела человека. Простейшим способом реализации подобной стратегии является создание зависимости коэффициента демпфирования сустава от суставного угла. При малых углах демпфирование мало и обеспечивает амортизацию, а при больших углах коэффициент демпфирования b увеличивается вплоть до полной блокировки сустава при некотором критическом угле θ_c , т. е.

$$b(\theta) = b_c \frac{\theta^3}{\theta_c - \theta} \text{ при } \theta < \theta_c,$$

и производит полную блокировку при $\theta \geq \theta_c$. Значение критического угла θ_c может настраиваться в пределах до 16° , а значение константы демпфирования b_c пропорционально весу тела человека с ограниченными возможностями.

Зависимость коэффициента демпфирования от суставного угла в этих состояниях имеет вид

$$b(\theta) = b_e \frac{\theta_e - \theta}{\theta} \text{ при } \theta < \theta_e,$$

где критический угол θ_e и константа демпфирования b_e определяются моментом инерции голени и стопы протеза относительно оси сгибания его коленного сустава.

При свободном движении колена угол сгибания протеза выходит за нормальный физиологический диапазон здоровой ноги (70°), в результате колено не успевает выпрямиться для соударения пятки о пол в начале следующей фазы опоры. Поэтому без системы электронного управления человек с ограниченными возможностями не может менять скорость ходьбы. Стандартное решение, использующееся в коммерческих протезах, — это увеличение коэффициента демпфирования при увеличении темпа ходьбы.

Современная ортопедическая промышленность выпускает множество различных конструкций коленных модулей, причем более современные типы конструкций не заменяют предыдущие, а дополняют их. Как правило, протезы с широким спектром функциональности обеспечивают меньшую устойчивость, чем протезы с ограниченной функциональностью, и наоборот. Люди с ограниченными возможностями для выполнения различных задач нередко приобретают протезы нескольких типов.

Протез с электронным управлением позволяет имитировать работу различных, в том числе и чисто механических протезов. У человека с ограниченными возможностями появляется возможность, переключая режи-

мы работы, выбирать между функциональностью и устойчивостью. При чем смена режима протеза не требует времени в отличие от смены протеза.

Все отечественные серийно выпускаемые коленные модули не имеют в составе никаких систем управления. Отсутствуют даже опытные разработки.

В настоящее время существует множество коммерческих коленных модулей с электронным управлением, созданных ведущими мировыми производителями: Ottobock SE & Co. KGaA (Германия), Chas. A. Blatchford & Sons Ltd (Великобритания), ООО «ЭНДОЛАЙТ ЦЕНТР» (Россия), Össur UK Ltd (Исландия). Несмотря на то что механика этих модулей различна, цель электронной системы управления в таких модулях схожа. Она заключается в управлении коэффициентом демпфирования сустава в зависимости от типа и параметров движения. Эти модули не могут сами создавать активный момент сил в суставе. Сегодня существует единственный коммерческий модуль (Power Knee фирмы Össur UK Ltd) с активной генерацией момента сил. Хотя университетские разработки активных коленных модулей ведутся (например, Vanderbilt Leg), коммерческого успеха они пока не достигли.

Настоящая работа посвящена разработке концепции ГПД с активной системой управления коэффициентом демпфирования сустава коленного модуля.

В настоящее время активные ГПД используются не только в технических средствах реабилитации, но и в амортизаторах транспортных средств (рис. 2). Накопленный опыт при проектировании и разработке активных ГПД для амортизаторов транспортных средств применен при проектировании и разработке активного ГПД коленного модуля. В целях выявления преимуществ и недостатков, а также анализа технических решений, в настоящей работе рассмотрены некоторые конструкции активных ГПД для амортизаторов транспортных средств.

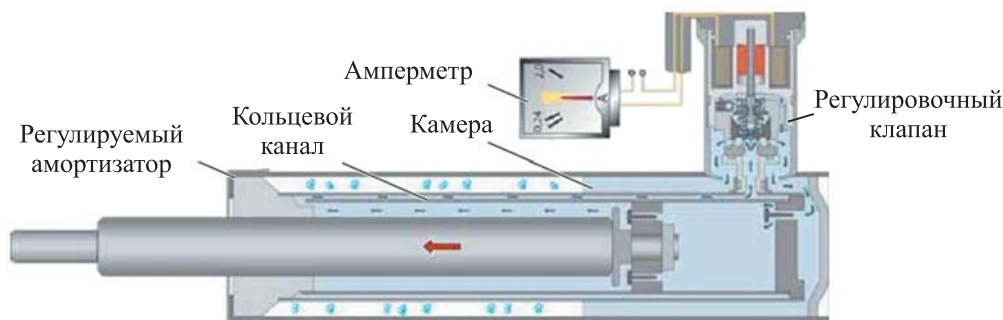


Рис. 2. Схема активного демпфера с электронным управлением

Задача активных амортизаторов заключается в быстром снижении энергии вибрации кузова и колебаний колеса транспортного средства. Приведенная на рис. 2 концепция ГПД адаптирует демпфирование к массе транспортного средства. Также благодаря наличию электроуправления имеется возможность быстрого реагирования и управления демпфированием в течение миллисекунд в соответствии с текущей ситуацией при вождении.

Принцип действия активного ГПД с электронным управлением следующий. При поступательном движении поршня масло из поршневой полости (полость под поршнем) перетекает через регулирующий клапан, расположенный в основании ГПД, в штоковую полость (полость над поршнем), обеспечивая необходимый коэффициент демпфирования. Регулирующий клапан определяет давление в камере и, следовательно, демпфирование. Камера частично заполнена маслом. Над маслом расположена газовая подушка со спиралью пеногасителя. Камера используется для компенсации изменения объема масла. Поток масла регулируется блоками демпфирующих клапанов на поршне, в основании камеры и в регулирующем клапане.

Электрогидроклапаны, применяемые в активных ГПД транспортных средств и технических средств реабилитации, во многом определяют надежность и безотказность работы конструкции в целом.

Повысить надежность работы существующих запорно-регулирующих устройств (ЗРУ), используемых в активных демпферах с электронным управлением, можно за счет создания конструкций ЗРУ без подвижных элементов, принцип работы которых основан исключительно на аэродинамических эффектах, таких как эффект Коанда, турбулизация потока рабочей среды (РС), а также на использовании вихревого течения РС. Устройства, в которых для управления потоком РС применяются перечисленные процессы и эффекты, называются вихревыми струйными устройствами (ВСУ), которые могут использоваться в качестве исполнительного устройства.

Классическая схема ВСУ приведена на рис. 3. Принцип работы ВСУ следующий: поток питания поступает в канал 2, затем в вихревую камеру 3, заполняет ее и проходит к выходному патрубку 4. При необходимости понижения давления/расхода в выходном патрубке 4 вспомогательный поток (поток управления) подается в канал управления 1. В результате взаимодействия питающей и управляющей струй происходит их слияние, так что масса результирующей струи представляет собой сумму масс отдельных струй. Направление результирующего потока определяется геометрической суммой количеств движений соударяющихся потоков.

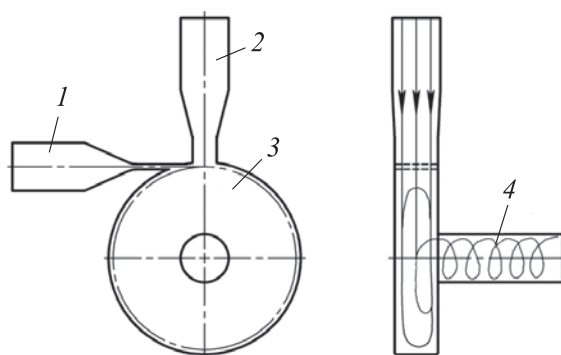


Рис. 3. Схема ВСУ:

1, 2 — каналы управления и питания; 3 — вихревая камера;
4 — выходной патрубок

Профессор В.Ф. Бугаенко в работе [1] предложил ввести следующие обозначения: α — угол отклонения питающего потока; 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 (F_1 и F_0 — площади проходного сечения канала управления и питания); v_1 и v_0 — скорости потока в каналах управления и питания; Q — объемный расход.

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

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

где η — коэффициент отклонения результирующей струи от первоначального направления струи питания. Из научно-технической литературы известно [1], что для ВСУ, имеющих каналы с круглым проходным сечением, $\eta \approx 0,8$. Данное уравнение основано на предположении о постоянстве статического давления в поле взаимодействия струй и о том, что в каналах питания и результирующей струе распределение скоростей по сечению равномерное.

После взаимодействия питающего и управляющего потоков результирующий поток под действием эффекта Коанда прилепляется к цилиндрической стенке вихревой камеры 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 вихревой камеры к центру.

Сопротивление осуществляется за счет вихревого течения, в результате которого образуется поле центробежных сил, действующих на вращающуюся массу РС. Под действием центробежных сил РС отбрасывается на периферию вихревой камеры. В результате этого создается перепад давления: в центре вихря — пониженное давление, на периферии — повышенное. В тот момент, когда на периферии вихревой камеры давление станет равным давлению в канале питания, расход из канала питания прекращается. Такой эффект называется эффектом запирания потока питания в ВСУ.

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

Математические зависимости выходных параметров (давления и расхода на выходе из устройства) от параметров управления (давления и расхода в канале управления), а также влияние изменения геометрических параметров проточной полости (диаметра D и ширины H вихревой камеры, геометрических параметров каналов питания и управления, их числа и расположения) на изменение значения термодинамических параметров приведены в работах [2–6]. Математические модели основаны на эмпирических зависимостях, т. е. на данных экспериментальных исследований, что на практике может быть применимо лишь в узком диапазоне термодинамических параметров РС и на начальном этапе расчета подобных конструкций.

Основные результаты исследования авторов настоящей статьи по ВСУ изложены в работах [7–10].

Наряду с активными ГПД, имеющими механически подвижные клапанные узлы, есть ряд разработок активных ГПД, в которых для управления силовым потоком рабочего тела используются ВСУ [11–21].

В работе [21] для замены клапана обычного амортизатора, а также в целях улучшения рабочих характеристик и повышения комфортности управления транспортным средством предложена реализация клапанного узла на основе элементов струйной техники (Fluidics). Концепция активного ГПД с вихревым клапаном приведена на рис. 4, а, пакет плат клапана — на рис. 4, б. В жидкостном клапанном блоке установлен датчик ускорения (инерционная масса), который отслеживает вертикальное ускорение и определяет коэффициент демпфирования как функцию ускорения. Целью изменения коэффициента демпфирования данной конструкции ГПД является уменьшение потребляемой энергии и увеличение долговечности демпфера.

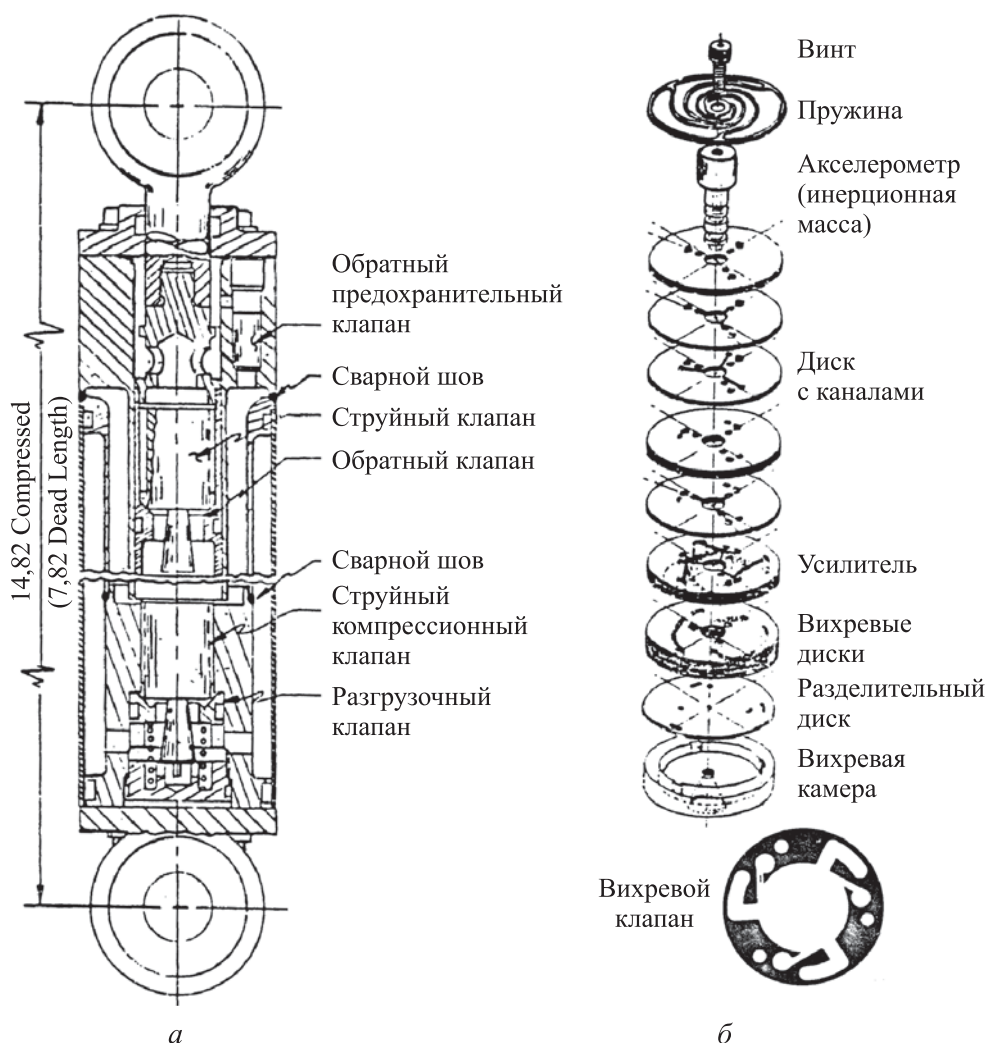


Рис. 4. Активный ГПД с клапанным узлом, включающим в себя вихревой клапан:

a — концепция активного ГПД; *б* — пакет плат клапана

Методы изготовления жидкостного клапана включают в себя операцию фототравления стальных дисков усилителя, которые затем диффузионно свариваются.

Диски сложены в пакет, который формирует гидравлические контуры, содержащие усилители, для управления потоком масла. Вихревой клапан и диски подачи жидкости необходимы для взаимодействия с золотником, который смещается относительно стопки дисков за счет ускорения инерционной массы. На большую цилиндрическую массу, которая является составной частью золотника, воздействует ускорение. Инерци-

онная масса золотника подвешена с помощью спиральной пружины дискового типа.

Разработка активного ГПД с вихревым клапаном. Поскольку ВСУ имеют высокую надежность, они могут быть использованы при разработке новых конструкций ГПД. В настоящей работе предложена схема активного ГПД с клапанным узлом с ВСУ. Основная идея использования ВСУ заключается в управлении большим расходом РС с помощью малого расхода (потока управления). Изменение расхода потока управления осуществляется электрогидроклапаном, имеющим малый расход по сравнению с основным потоком (потоком питания), что позволяет снизить энергетические затраты на управление и повысить энергоэффективность всей конструкции. Таким образом, конструкция получается надежной, энергоэффективной и с электронным управлением, что является актуальным при современном активном развитии цифровых технологий.

В настоящее время существует два типа демпферов: одноцилиндровый и двухцилиндровый. В одноцилиндровом демпфере при поступательном движении поршня РС из поршневой полости (полость А) перетекает через дроссель, расположенный в поршне, в штоковую полость (полость В), обеспечивая определенный коэффициент демпфирования (рис. 5). В двухцилиндровом демпфере РС перетекает через дроссель, который расположен в основании конструкции.

Чтобы создать активный демпфер, в конструкцию необходимо ввести дроссель с управляемым дросселированием (блок клапанов). Поршень в таком случае цельный, РС при движении поршня вниз перетекает из поршневой полости (рис. 5, а, полость А), через дроссельный блок в штоковую полость (полость В). Такой узел может быть реализован с использованием струйной техники (струйный блок клапанов). Предложенная авторами схема (рис. 5, б) работает следующим образом. При движении поршня вниз РС перетекает из поршневой полости (полость А) в штоковую (полость В), проходя через обратный клапан 2. Поскольку поток питания должен иметь давление меньше, чем давление в канале управления, в целях снижения давления в канале питания РС проходит через вихревой дроссель 7 и поступает в канал питания вихревого клапана. Поток управления проходит через обратный клапан 1, затем поступает в полость С, откуда подается в канал управления путем открытия электрогидроклапана 9 типа сопла-заслонки. Изменяя величину открытия электрогидроклапана 9, устанавливаются необходимые в текущий момент времени сопротивления всей схемы. На выходе из ВСУ РС попадает через обратный клапан 6 в полость В. Аналогичным образом осуществляется течение РС из полости В в полость А при движе-

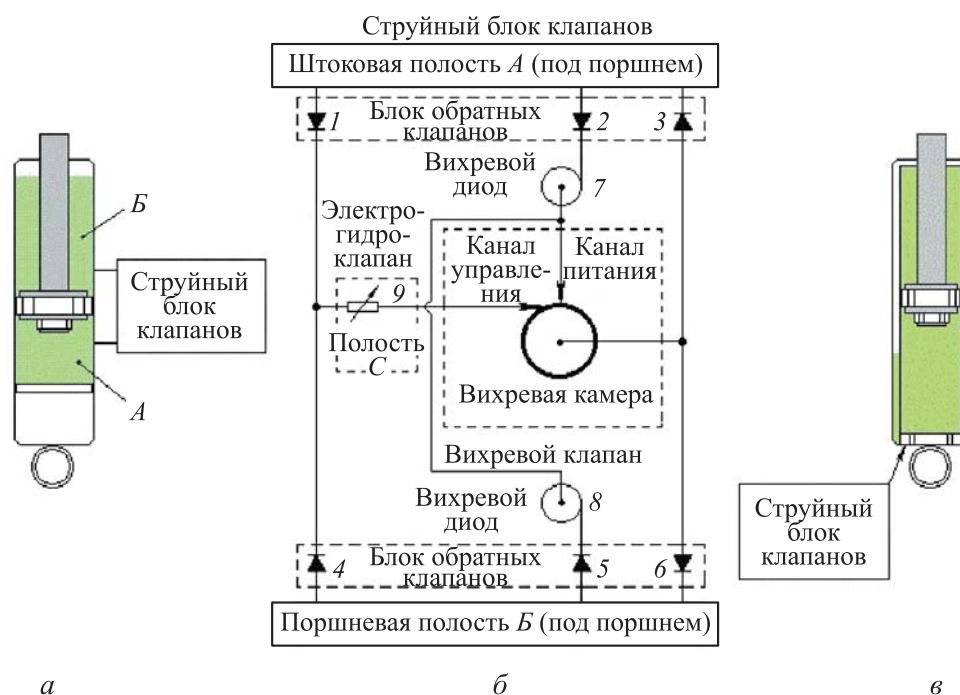


Рис. 5. Схемы:

- a* — ГПД с поршнем-разделителем и дросселирующим клапаным узлом в поршне;
- б* — флюидный клапаный узел для конструкции активного ГПД;
- в* — ГПД с клапаным узлом в основании корпуса

нии поршня вверх. Блоки обратных клапанов могут быть организованы как на основе механических клапанов, так и на основе струйных вихревых дросселей.

Концепция активного ГПД с вихревым клапаным узлом приведена на рис. 6.

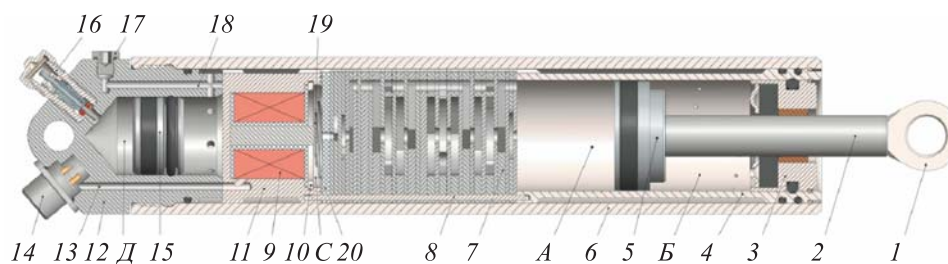


Рис. 6. Общий вид активного ГПД

Гидропневмодемпфер представляет собой гидроцилиндр со встроенным в него аккумуляторным узлом 12 или аккумулятором — для компенсации разности объемов полостей ГПД, штоковой (полость Б) и поршне-

вой (полость *A*) и для предотвращения возможности кавитации при движении поршня. В качестве устройства регулирования скорости движения и управления ГПД использован блок с вихревым клапаном, управление которым осуществляется электрогидроклапаном типа сопла-заслонки.

Гидропневмодемпер состоит из корпуса *6*, цилиндра *4*, штока *2* с проушиной *1*, верхнего уплотнительного узла *3* цилиндра, разделительного поршня *15*, ниппеля *16*, заправочной пробки *17*, поршня *5* ГПД в сборе, клапанного блока *7*. Штифты *8* фиксируют клапанный блок *7* от поворота относительно оси ГПД. Катушка *9* фиксируется относительно корпуса *11* электрогидроклапана стопорным кольцом *10*.

Поршень *5* ГПД соединен со штоком *2* и вместе с ним движется относительно цилиндра *4*. Гидропневмодемпер разделен на четыре полости: *A* и *B* — под и над поршнем (поршневая и штоковая), *C* — полость электрогидроклапана, *D* — газовая полость под поршнем-разделителем. Поршень ГПД расположен в верхней части гидроцилиндра и отделяет две верхние полости: штоковую и поршневую.

В нижней части ГПД расположена пневмокамера *D*, заполненная газом. Разделителем сред газа и масла служит разделительный поршень. Пневмокамера необходима для компенсации разности объемов штоковой и поршневой полостей гидроцилиндра и создания необходимого подпора разделителя сред газа и масла при обратном ходе (выдвигении) поршня гидроцилиндра. Накачка газа или воздуха осуществляется через ниппель *16*, вкрученный в нижнюю крышку *12* ГПД.

Тарель электрогидроклапана типа сопла-заслонки выполнена в виде плоской спиральной пружины, в центре которой расположена площадка (тарель *19*). Седло *20* выполнено из диэлектрика, например фторопласта. Питание катушки клапана осуществляется через разъем *14*. Провода, соединяющие разъем *14* с катушкой *9*, проходят через кабель — канал *13*. Заправка ГПД маслом осуществляется через заправочный канал *18*.

В исходном положении тарель *19* клапана прилегает к седлу *20*, таким образом, поток управления на вихревом клапане отсутствует, соответственно вихревой клапан полностью открыт и поршень со штоком движется с минимально возможным сопротивлением. Для увеличения сопротивления движению поршня со штоком подается сигнал на электрогидроклапан, тарель которого отходит от седла *20*. Таким образом подается поток управления на вихревой клапан, вихревой клапан включается в работу, осуществляя сопротивление движению поршня со штоком.

Методика расчета и выбор размеров ГПД. Расчет нагрузок при ходьбе пациента. На рис. 1, а приведена кинематическая схема механизма коленного модуля. Введем системы координат. Абсолютная система координат связана с земной поверхностью; ось X направлена горизонтально, а ось Y — вертикально. Относительная система координат связана с корпусом коленного модуля; ось Y_0 проходит через центры шарниров A и C и при вертикальном положении корпуса совпадает с осью Y , а ось X_0 при вертикальном положении модуля совпадает с осью X . Начало координат обеих систем совпадает с центром шарнира A . В процессе ходьбы системы отсчета поворачиваются относительно друг друга на угол γ .

С точки зрения биомеханики ходьбы наиболее предпочтительно располагать ось коленного шарнира в том же месте, где у здорового человека расположен центр вращения сустава. Из научно-технической литературы [22] известны значения сил и моментов, действующих на коленный сустав здорового человека массой $m_{\text{ч}} = 57,6$ кг (вес человека $G_{\text{ч}} = m_{\text{ч}}g = 565$ Н). В соответствии с техническим заданием масса пациента может достигать 125 кг, тогда вес $G_{125} = 125 \cdot 9,81 = 1226$ Н.

При расчете принято допущение о прямой пропорциональной зависимости между весом пациента и значениями сил и моментов, возникающих при ходьбе, с учетом которого введен коэффициент пересчета силовых факторов $k_{\text{п.с}} = G_{125} / G_{\text{ч}} = 2,16$.

Из научно-технической литературы [22] известны значения углов поворота бедра θ_{hip} и колена θ_{knee} относительно нейтрального положения, при котором колено распрямлено, а человек стоит в вертикальном положении, тогда угол γ определяется как $\gamma = \theta_{\text{hip}} + \theta_{\text{knee}}$.

На ось коленного шарнира действует сила F , значения проекций которой на оси X и Y можно записать как F_X и F_Y . Применительно к разрабатываемому коленному модулю сила прикладывается к шарниру в точке A , а ее значение $F_A = k_{\text{п.с}}F$, тогда ее проекции

$$F_{AX} = k_{\text{п.с}}F_X;$$

$$F_{AY} = k_{\text{п.с}}F_Y.$$

Для удобства выполнения прочностных расчетов узлов модуля коленного сустава целесообразно определять значения проекций силы F_A на оси X_0 и Y_0 :

$$F_{AX_0} = F_{AX} \cos \gamma - F_{AY} \sin \gamma;$$

$$F_{AY_0} = F_{AX} \sin \gamma + F_{AY} \cos \gamma.$$

Радиальная сила, действующая на шарнир A , принимает значение $F_A = \sqrt{F_{AX_0}^2 + F_{AY_0}^2}$.

При нормальной ходьбе испытуемого в его коленном суставе создается момент M , под воздействием которого сгибается и разгибается колено. Применительно к рассматриваемому случаю $M_A = Mk_{п.с}$.

Данный момент создается в коленном модуле путем воздействия гидроцилиндра с силой $F_{ц}$ на качалку. При этом сила цилиндра принимает значение $F_{ц} = M/h$, где h — плечо силы $F_{ц}$. Как следует из рис. 1, a , $h = (l_2 - x) \sin \varphi_2$, где $l_2 - x$ — длина гидроцилиндра.

В соответствии с теоремой косинусов запишем

$$l_2 - x = \sqrt{l_1^2 + l_0^2 - 2l_1l_0 \cos \left[\frac{\pi}{2} - (\varphi_1 + \varphi_{10}) \right]},$$

где $\varphi_{10} = 17,71^\circ$, а φ_1 — угол сгибания коленного сустава.

В рассчитываемом коленном модуле $l_0 = 225$ мм, $l_1 = 29$ мм, $l_2 = 215$ мм. Угол между осью гидроцилиндра и осью Y_0 равен

$$\varphi_2 = \arcsin \left(\frac{l_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_{10})}{l_2 - x} \right).$$

Определение приведенной нагрузки (усилия) на штоке ГПД. Из результатов следует, что движение и параметры ходьбы человека можно описать функциональными зависимостями. Оценка массы и момента инерции протеза ниже коленного сустава позволяет определить требуемый вращающий момент в коленном суставе, скорость и ускорение. Из научно-технической литературы [22] известны зависимости изменения углов в коленном суставе и в механизме, включающем ГПД.

Расчет и выбор размеров ГПД. При разработке гидроцилиндра расчет ведут следующим образом:

- находят расчетное значение внешней нагрузки, приведенной к штоку цилиндра и действующей вдоль его оси;
- по условиям компоновки определяют максимально допустимые габаритные размеры цилиндра;
- вычисляют силу, потребную для преодоления внешней нагрузки в обе стороны движения штока;
- выбирают схему цилиндра и способ его крепления;
- назначают основные геометрические размеры цилиндра (рекомендуется назначать размеры в соответствии с ГОСТ 6540–68);

- находят величину рабочего давления в цилиндре;
- определяют потребные площади поршня по найденным значениям потребной силы и рабочего давления;
- вычисляют диаметры цилиндра D и штока d (рекомендуемое отношение $d \approx (0,5...0,7)D$). Полученные значения D и d округляют до ближайших значений по ГОСТ 6540–68;
- согласно заданной скорости перемещения штока определяют расход масла;
- предварительно прорабатывают конструкцию цилиндра по прикидочным расчетам на прочность и устойчивость с увязкой основных размеров;
- проводят расчеты, связанные с гидромеханикой ГПД.

На основании предложенной в работах [7–10] математической модели рабочего процесса, протекающего в проточной полости ВСУ, проведены расчетно-теоретические исследования ВСУ, в результате которых определены основные геометрические параметры проточной полости и изготовлен макетный образец ВСУ для управления расходом РС. Планируется проведение экспериментальных исследований работы вихревого клапана, а также сопоставление результатов экспериментальных и расчетно-теоретических исследований.

В результате выполненной работы сформулированы следующие выводы:

- анализ технических решений показал преимущество ВСУ (высокая надежность, возможность работы с различными РС, низкая стоимость изготовления и эксплуатационных затрат), в силу чего рекомендовано использовать ВСУ в качестве исполнительного органа (вихревого клапана) в клапанном узле активного ГПД;
- предложено применять ВСУ в активных ГПД технических средств реабилитации;
- использование ВСУ повышает надежность конструкции и снижает энергозатраты на управление конструкцией;
- предложенная конструкция ГПД позволяет применить интерактивное управление демпфированием;
- впервые представлена концепция и описан принцип работы активного ГПД с использованием вихревого клапана.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бугаенко В.Ф. Пневмоавтоматика ракетно-космических систем. М., Машиностроение, 1979.

- [2] Levitsky M.P., Levitsky S.P. On the development of a regulating valve design with improved cavitation characteristic. *HAIT J. Sc. Eng. B*, 2006, vol. 3, pp. 1–16.
- [3] Levitsky M. Control vortex valve. Patent WO 02/50456 A2, PCT/IL01/00666. Appl. 19.07.2002, publ. 27.06.2002.
- [4] Залманзон Л.А. Теория элементов пневмоники. М., Наука, 1969.
- [5] Лебедев И.В., Трескунов С.Л., Яковенко В.С. Элементы струйной автоматики. М., Машиностроение, 1973.
- [6] Попов Д.Н., ред. Исследование и расчет струйных элементов и цепей систем автоматического регулирования. М., МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977.
- [7] Uss A.Yu., Chernyshev A.V. The development of the vortex gas pressure regulator. *Procedia Eng.*, 2016, vol. 152, pp. 380–388.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.718>
- [8] Uss A.Yu., Chernyshyov A.V., Krylov V.I. Development of gas pressure vortex regulator. *AIP Conf. Proc.*, 2017, vol. 1876, no. 1, art. 020025. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4998845>
- [9] Белова О.В., Стародубцев А.А., Чернышев А.В. Вихревой регулятор давления газа. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 5.
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-760>
- [10] Белова О.В., Стародубцев А.А., Чернышев А.В. Расчет вихревого регулятора давления газа. *Инженерный вестник: электронный научно-технический журнал*, 2014, № 10, с. 61–68. URL: <http://ainjournal.ru/doc/740398.html>
- [11] Boender J. A hydraulic prosthetic joint. Patent 2339995 EP. Appl. 27.09.2009, publ. 06.05.2010.
- [12] Dixon J.C. The shock absorber handbook. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [13] Мартынов Н.В. Способ демпфирования колебаний и вихревой гидравлический амортизатор. Патент РФ 2120389. Заявл. 22.04.1993, опублик. 20.10.1998.
- [14] Fukushima N., Iwata K., Hidaka K. Vortex flow valve with pressure relief means for shock absorber. Patent 0053378 B1 EP. Appl. 27.11.81, publ. 02.10.85.
- [15] Mayer E.A., Teitelbaum B.R. Fluid flow device for a shock absorber. Patent 3672474 US. Appl. 16.02.1970, publ. 27.06.1972.
- [16] Smith D.H. Vortex valve shock absorber. Patent 3743222 US. Appl. 17.02.1972, publ. 03.07.1973.
- [17] Bowles R.E. Acceleration controlled fluidic shock absorber. Patent 4082169A US. Appl. 12.12.1975, publ. 04.04.1978.
- [18] Michael J.G., Schmidlin A.E. Fluidic recoil buffer for small arms. Patent 4335644 US. Appl. 07.05.1981, publ. 22.06.1982.
- [19] Hidaka K., Fukushima N., Iwata K. Piston stroke responsive vortex-flow shock absorber. Patent 4515252 US. Appl. 25.05.1983, publ. 07.05.1985.
- [20] Dourson S.E., Johnston G.L. Vortex valving assembly for a hydraulic damper. Patent 5070972 US. Appl. 18.06.1990, publ. 10.12.1991.

[21] Cooper D.R. A fluidic adaptive damper — breadboard design, fabrication and test. *Laboratory Technical Report. Taradcom.* Warren, Michigan, 1979.

[22] Труханов К.А., Прокопенко Р.А. Анализ кинематики коленного модуля с гидравлическим исполнительным механизмом и сопоставление результатов расчета с поведением коленного сустава человека при ходьбе. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 11. DOI: 10.7463/1114.0736399

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

Чернышев Андрей Владимирович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Усс А.Ю., Чернышев А.В. Применение вихревого струйного устройства при разработке активных гидропневмодемпферов, используемых в технических средствах реабилитации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 1 (136), с. 185–204.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-1-185-204>

A VORTEX JET DEVICE APPLIED IN THE DEVELOPMENT OF ACTIVE HYDRO-PNEUMATIC DAMPERS USED IN REHABILITATION EQUIPMENT

A.Yu. Uss

uss25.ru@mail.ru

A.V. Chernyshev

chernyshev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper overviews and analyses the current status of the development and research of active hydro-pneumatic dampers, which are used in rehabilitation equipment, where vortex jet devices can be applied as control valves. The study focuses on a vortex jet device whose distinctive feature is the absence of mechanically moving parts, describes the principle of its operation, and gives the rationale for using it in the active hydro-pneumatic damper of the knee module prosthesis. From a review of scientific and technical literature, a conclusion is drawn that active hydro-pneumatic dampers are used not only in rehabilitation equipment

Keywords

Shut-off and control devices, vortex jet device, pressure regulator, flow regulator, vortex valve, hydro-pneumatic damper

but also in vehicle shock absorbers. The experience gained in the design and development of active hydro-pneumatic dampers for vehicle shock absorbers was applied in the design and development of an active hydro-pneumatic damper for the knee module. In order to identify the advantages and disadvantages, we examined some designs of active hydro-pneumatic dampers for vehicle shock absorbers. Analysis of technical solutions showed the advantage of vortex jet devices, e.g. high reliability, the ability to work with various working environments, low manufacturing and operating costs; enabled us to recommend a vortex jet device to be used as an actuator, i.e., a vortex valve, in the valve assembly of an active hydro-pneumatic damper. The use of a vortex jet device increases the reliability of the structure and reduces the energy consumption for the control of the structure. The proposed design of the hydro-pneumatic damper allows the use of interactive damping control. The study is the first to introduce the concept and describe the principle of operation of an active hydro-pneumatic damper using a vortex jet device

Received 20.03.2020

Accepted 12.08.2020

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Bugaenko V.F. Pnevmoavtomatika raketno-kosmicheskikh sistem [Pneumatic automation of space rocket systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979.
- [2] Levitsky M.P., Levitsky S.P. On the development of a regulating valve design with improved cavitation characteristic. *HAIT J. Sc. Eng. B*, 2006, vol. 3, pp. 1–16.
- [3] Levitsky M. Control vortex valve. Patent WO 02/50456 A2, PCT/IL01/00666. Appl. 19.07.2002, publ. 27.06.2002.
- [4] Zalmanzon L.A. Teoriya elementov pnevmoniki [Pneumatic element's theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969.
- [5] Lebedev I.V., Treskunov S.L., Yakovenko V.S. Elementy strujnoj avtomatiki [Elements of jet automation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973.
- [6] Popov D.N. Issledovanie i raschet strujnyh elementov i cepej sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Research and calculation of jet elements and circuits of automatic control systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1977.
- [7] Uss A.Yu., Chernyshev A.V. The development of the vortex gas pressure regulator. *Procedia Eng.*, 2016, vol. 152, pp. 380–388.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.718>
- [8] Uss A.Yu., Chernyshyov A.V., Krylov V.I. Development of gas pressure vortex regulator. *AIP Conf. Proc.*, 2017, vol. 1876, no. 1, art. 020025.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4998845>

- [9] Belova O.V., Starodubtsev A.A., Chernyshev A.V. Vortex gas pressure regulator. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, vol. 5 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-5-760>
- [10] Belova O.V., Starodubtsev A.A., Chernyshev A.V. Calculation of the vortex gas pressure regulator. *Inzhenernyy vestnik: elektronnyy nauchno-tekhnicheskyy zhurnal* [Engineering Bulletin: Electronic Publishing], 2014, vol. 10, pp. 61–68 (in Russ.). Available at: <http://ainjournal.ru/doc/740398.html>
- [11] Boender J. A hydraulic prosthetic joint. Patent 2339995 EP. Appl. 27.09.2009, publ. 06.05.2010.
- [12] Dixon J.C. The shock absorber handbook. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [13] Martynov N.V. Sposob dempfirovaniya kolebaniy i vihrevoy gidravlicheskiy amortizator [Vibration damping method and vortex hydraulic shock absorber]. Patent 2120389 RF. Appl. 22.04.1993, publ. 20.10.1998 (in Russ.).
- [14] Fukushima N., Iwata K., Hidaka K. Vortex flow valve with pressure relief means for shock absorber. Patent 0053378 B1 EP. Appl. 27.11.81, publ. 02.10.85.
- [15] Mayer E.A., Teitelbaum B.R. Fluid flow device for a shock absorber. Patent 3672474 US. Appl. 16.02.1970, publ. 27.06.1972.
- [16] Smith D.H. Vortex valve shock absorber. Patent 3743222 US. Appl. 17.02.1972, publ. 03.07.1973.
- [17] Bowles R.E. Acceleration controlled fluidic shock absorber. Patent 4082169A US. Appl. 12.12.1975, publ. 04.04.1978.
- [18] Michael J.G., Schmidlin A.E. Fluidic recoil buffer for small arms. Patent 4335644 US. Appl. 07.05.1981, publ. 22.06.1982.
- [19] Hidaka K., Fukushima N., Iwata K. Piston stroke responsive vortex-flow shock absorber. Patent 4515252 US. Appl. 25.05.1983, publ. 07.05.1985.
- [20] Dourson S.E., Johnston G.L. Vortex valving assembly for a hydraulic damper. Patent 5070972 US. Appl. 18.06.1990, publ. 10.12.1991.
- [21] Cooper D.R. A fluidic adaptive damper — breadboard design, fabrication and test. *Laboratory Technical Report. Taradcom*. Warren, Michigan, 1979.
- [22] Truhanov K.A., Prokopenko R.A. Analysis of the kinematics of the knee module with a hydraulic actuator and comparison of the calculation results with the behavior of the human knee joint when walking. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 11 (in Russ.). DOI: 10.7463/1114.0736399

Uss A.Yu. — Post-Graduate Student, Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Chernyshev A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Vacuum and Compressor Equipment, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Uss A.Yu., Chernyshev A.V. A vortex jet device applied in the development of active hydro-pneumatic dampers used in rehabilitation equipment. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 1 (136), pp. 185–204 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-1-185-204>

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
press@bmstu.ru <https://bmstu.press>

Подписано в печать 11.03.2021

Формат 70×108/16

Усл.-печ. л. 17,9

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
baumanprint@gmail.com
