

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ЧАСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА СПОРТИВНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

*Докт. техн. наук, доц. КАЧАНОВ И. В.,
канд. техн. наук, доц. ПАВЛОВИЧ А. Э., асп. ШЕЛЕГ А. А.*

Белорусский национальный технический университет

Использование современных технологий на основе спортивной инженерии как специального раздела науки и техники по исследованию и созданию эффективных тренажеров является одним из путей совершенствования физической культуры и спорта.

Любой спортивный тренажер имеет главный элемент – нагрузочное устройство. Традиционно это блок грузов, пружина, эластомер, инерционный маховик или фрикционное устройство. Эффективность работы тренажеров с такими нагрузочными устройствами недостаточна из-за высокой инерционности создаваемой нагрузки, которая может привести к травмам и не позволяет пользователю достигнуть желаемого результата. Опыты показывают, что в обычных тренажерах инерционные силы искажают показатели сопротивления, особенно при высоких скоростях. Даже при использовании эксцентриков данные тренажеры должным образом работать могут только с медленными контролируруемыми движениями.

В то же время биомеханика движений тренирующегося имеет свою специфику, которая заключается в том, что постоянно возникают быстротечные изменения векторов скорости и усилий, создаваемых спортсменами. Это влияет на условия проектирования специальных средств по отработке техники выполнения приемов в определенном виде спорта. Для решения этой проблемы предлагается в качестве нагрузочных устройств применять силовые цилиндры с гидро- или пневмоприводом.

По конструкции и условиям обслуживания проще пневмопривод, поэтому он был принят за основу при проектировании тренажеров для профессиональной подготовки спортсменов, занимающихся атлетическими видами спорта и силовыми единоборствами. В результате осна-

щения тренажеров пневматической системой их работа, в сравнении со спортивными тренажерами, в которых применены другие системы нагружения, становится бесшумной. Существенно возрастает максимально создаваемое на тренажере усилие, уменьшаются его вес и габариты, появляется возможность плавного и комфортного изменения нагрузки, и, что самое важное, пневмопривод обеспечивает безынерционность этой нагрузки.

Научно-творческой группой первичной организации ОО «БРСМ» БНТУ на базе научно-исследовательских лабораторий кафедры «Гидравлика» был разработан и исследован спортивный тренажер на основе пневмопривода для специальной тренировки и отработки технических приемов в армрестлинге (борьбе на руках) [1]. Тренажер позволяет отрабатывать различные технические приемы с созданием необходимой нагрузки и сопротивления, динамики и направления воздействия на биозвено. Конструкция тренажера и способ создания нагрузки и сопротивления на нем запатентованы [2, 3]. Сущность такой конструкции показана на принципиальной схеме (рис. 1). «Рука соперника» представляет собой регулируемую по высоте стойку 1 с двумя шарнирами – 2 «локоть» и 3 «кисть», которые поджаты фрикционными поршнями 4 и 5. Шарнир 2 закреплен в блоке 6, соединенном с пневмоцилиндром 7, а шарнир 3 жестко связан с рукояткой 8. Регулировка нагрузки на штоке пневмоцилиндра 7, на поршне 4 шарнира 2 и на поршне 5 шарнира 3 осуществляется с помощью редукторов давления 9, 10, 11 и отслеживается с помощью силовых датчиков 12. Для экспериментальных исследований рабочих характеристик тренажера в схему введены тензометрические датчики 14, которые встроены в рукоятку 8, фрикционные поршни

4, 5 и в эластичную опору 15. Давление в пневмоприводе регистрируется с помощью потенциометрических датчиков 16, а биометрические параметры руки тренирующегося – с помощью специальных повязок 17. Съем необходимых электросигналов проводится с помощью измерительного устройства 18.

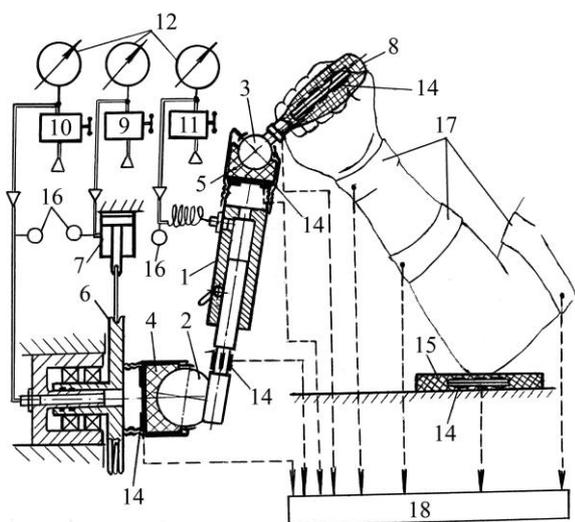


Рис. 1. Принципиальная схема спортивного тренажера с пневматическим приводом для армрестлинга: 1 – стойка регулируемая; 2 – шарнир «локоть»; 3 – шарнир «кисть»; 4, 5 – фрикционные поршни; 6 – блок; 7 – пневмоцилиндр; 8 – рукоятка; 9–11 – редукторы давления; 12 – силоизмерители; 14 – тензодатчики; 15 – опора; 16 – датчики давления; 17 – повязки для измерения биометрических показателей мышц руки; 18 – регистрирующая аппаратура

Затем устанавливают максимальное значение давления редукторами 9, 10 для стопорения блока 6 и шарнира 2 от перемещений. После этого редуктором 11 устанавливают необходимую нагрузку сопротивления перемещению рукоятки и, воздействуя на нее, осуществляют отработку необходимых движений. При этом в процессе выполнения упражнений можно изменять силовой режим сопротивления рукоятки тем же редуктором 9.

Для отработки кистевых движений предварительно задают необходимые высоту и положение стойки, а также положение рукоятки.

Для отработки движений предплечья манипуляции с редукторами 9–11 аналогичны, только здесь «стопорят» шарнир 3 рукоятки, а шарнир 2 освобождают от фиксации. Для имитации

сопротивления руки соперника это делают для блока 6, фиксируя шарниры 2 и 3.

Другое применение пневмопривода представлено на принципиальной схеме (рис. 2) тренажера по совершенствованию движений и развитию силы, силовой выносливости спортсменов. Выполнение упражнений на таком тренажере заменяет традиционные жимы, толкания штанги из различных положений (лежа, сидя и стоя).

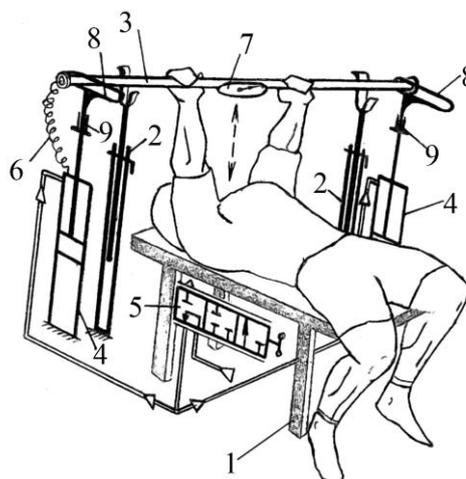


Рис. 2. Принципиальная схема тренажера с пневмоприводом для отработки жимов в атлетических видах спорта: 1 – скамья; 2 – стойки регулируемые по высоте; 3 – гриф; 4 – пневмоцилиндры; 5 – редуктор давления; 6 – соединительный шланг; 7 – силоизмеритель; 8 – направляющие грифа 3; 9 – ограничители хода штоков цилиндров 4

Тренажер с пневмоприводом позволяет плавно изменять нагрузочный режим на грифе 3 через регулирование редуктором 5 давления сжатого воздуха в силовых пневмоцилиндрах 4 с отслеживанием величины нагрузки через силоизмеритель 7. При этом за счет регулируемых по высоте ограничителей 9 обеспечиваются безопасность выполнения жимов лежа, а также начальное нижнее положение снятого грифа со стоек. Кроме того, сам спортсмен при необходимости может уменьшить величину нагрузки, даже во время выполнения упражнения, за счет нажатия пальцем на кнопку сброса атмосферного клапана, встроенного в гриф.

Еще одним примером применения пневмопривода является использование его в конструкции тренажера (рис. 3, 4) для развития силы мышц ног, который заменяет травмоопас-

ное упражнение «приседание со штангой на плечах».

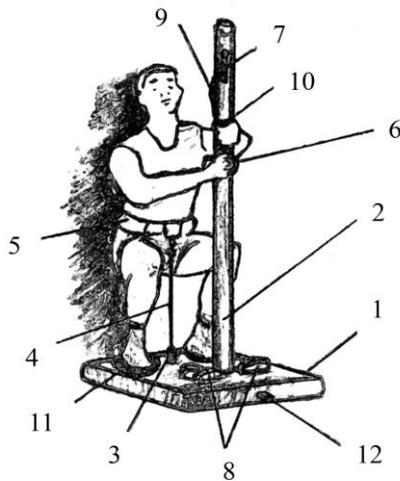


Рис. 3. Общее устройство тренажера с пневмоприводом для тренировки ног: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – тяга; 4 – тросовая система; 5 – ремень с зацепом; 6 – маховичок редуктора давления; 7 – рукоятка крана переключения; 8 – зацепы устройства для развития свода стоп; 9 – шкала прибора усилий; 10 – контактное кольцо источника биопотенциалов; 11 – тензоплощадка; 12 – штуцер подвода сжатого воздуха

При работе на таком тренажере позвоночник тренирующегося практически разгружен, так как через тросовую систему 4 осуществляется преодоление снизу сопротивления пневмоцилиндра 14 (рис. 4).

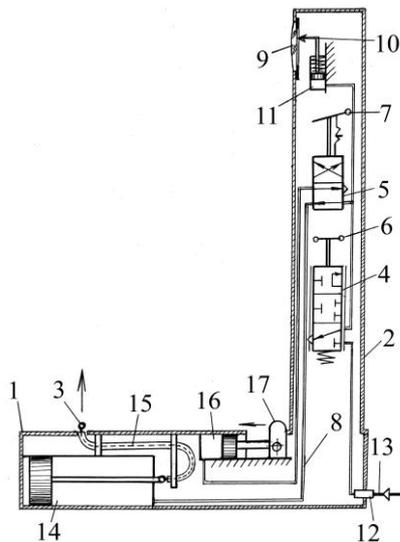


Рис. 4. Принципиальная схема тренажера с пневмоприводом для тренировки ног: 1 – основание; 2 – стойка; 3 – трос; 4 – редуктор давления; 5 – кран разобщительный; 6 – штувал; 7 – рукоятка; 8 – пневмолинии; 9 – шкала; 10 – стрелка; 11 – пневмоцилиндр шкалы; 12 – штуцер подвода сжатого воздуха; 13 – соединительный шланг; 14 – большой силовой пневмоцилиндр; 15 – гибкая

направляющая троса; 16 – малый силовой пневмоцилиндр;

17 – зацеп для пальцев стопы

Кроме того, имеется возможность тренировки свода стопы через пневмозацепы 8 (рис. 3), 17 (рис. 4).

Таким образом, пневмопривод может применяться в разнообразных тренировочных устройствах, служащих как для общего оздоровления, так и для профессиональной подготовки в различных видах спорта.

Характер движения биозвеньев спортсмена на таких тренажерах – от медленного и плавного до взрывного. Поэтому при моделировании процессов, происходящих в пневмоприводе, необходимо учитывать его следящее действие и быстродействие.

При анализе результатов теоретических исследований [4–6] были выявлены математические модели, которые подходят для определения статических и динамических характеристик пневмопривода спортивных тренажеров. Наиболее точной при определении быстродействия срабатывания пневмопривода является модель [6] на основе электропневмоанalogии, математического описания разветвленных пневмоцепей и уравнения расхода воздуха через местные сопротивления с учетом переходных характеристик ДЕ-звеньев. На основе этого исследования были позднее составлены математические модели [7, 8], которые позволяют также определять с достаточной степенью точности статические характеристики пневмопривода и его элементов на основе уравнений равновесия элементов следящего пневмоаппарата с отрицательной обратной связью. В этих моделях применены простые операторы булевой алгебры.

Точность рассмотренных математических моделей [6–8] основана на результатах статистических данных многочисленных экспериментов по продувке клапанов пневмоаппаратов и трубопроводов ранее широко известных конструкций пневмоприводов.

Так как отечественные конструкции спортивных тренажеров с пневмоприводом существуют в единственном числе, а зарубежные аналоги не нашли широкого распространения

в нашей стране из-за их дороговизны и узкой специфики применения, для создания математической модели пневмопривода спортивных тренажеров теоретические выкладки [6–8] не могут быть задействованы в полной мере.

Проанализировав известные методики [4–8] определения рабочих характеристик пневмопривода, было выявлено, что в теоретических исследованиях [6] применялась гиперболическая функция расхода воздуха без учета наличия критического режима его течения в отличие от теоретических исследований [4, 5], которые не требуют трудоемких многочисленных экспериментов по определению коэффициентов расхода пневмосопровитлений.

Поэтому в разработанной математической модели пневмопривода спортивных тренажеров заимствовано разбиение переходного процесса течения сжатого воздуха на два режима (докритический и надкритический). При этом определяется момент перехода этих режимов при достижении критического режима с учетом операторов булевой алгебры, которые применялись также при определении переходных режимов впуска-выпуска сжатого воздуха через редуктор давления или иной пневмоаппарат следящего действия.

При проектировании описанных выше конструкций тренажеров применялись два варианта расчетной схемы регулирования давления в силовых пневмоцилиндрах 7 (рис. 1), 4 (рис. 2), 14 и 16 (рис. 4):

- традиционная система регулирования через редуктор давления 2 (рис. 5);

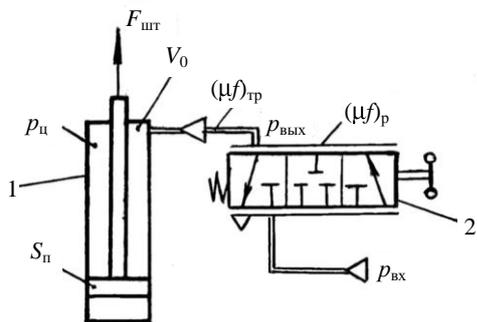


Рис. 5. Расчетная схема управляющей части пневмопривода с традиционной схемой регулирования нагрузки: 1 – пневмоцилиндр; 2 – редуктор давления

- запатентованная система [3], которая позволяет обеспечить автоматическое регулирование нагрузки на спортивном тренажере через

переменные пневмодрессели 3, 4 в циклическом режиме или по определенному заданному закону (рис. 6).

В математической модели, с помощью которой определяются рабочие характеристики пневматического привода и выбираются конструктивные параметры элементов тренажера, применяется известная методика по расчету пневмоприводов в машиностроении [5] на основе дифференциальной формы характеристического уравнения состояния

$$V_0 dp = RTdQ, \quad (1)$$

где V_0 – текущий заполняемый объем в пневмоприводе тренажера, складывающийся из штоковой полости пневмоцилиндра и объемов трубопроводов; dp – приращение давления сжатого воздуха; R – газовая постоянная; T – температура сжатого воздуха; dQ – приращение массы сжатого воздуха в пневмоприводе.

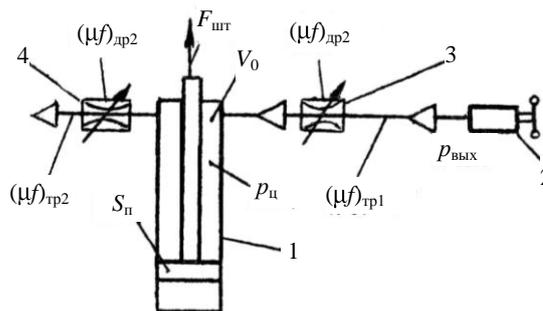


Рис. 6. Расчетная схема управляющей части пневмопривода с запатентованной системой [3] регулирования нагрузки: 1 – пневмоцилиндр; 2 – редуктор давления; 3, 4 – пневмодрессели

Реализация математической модели по определению статических и динамических характеристик пневмопривода осуществляется с помощью элементов булевой алгебры в Excel или в MathCAD для итоговых уравнений заполнения и опорожнения текущего объема V_0 :

$$t_n = V_0 p_{цн} / RTG; \quad (2)$$

$$t_0 = \ln(p_{цн0} / p_{ц0}) V_0 / RTG, \quad (3)$$

где t_n и t_0 – время наполнения и опорожнения текущего объема до необходимого давления; $p_{цн}$ и $p_{ц0}$ – текущее значение давления сжатого воздуха в штоковой полости цилиндра при ее наполнении и опорожнении; $p_{цн0}$ – исходное

значение давления сжатого воздуха перед опорожнением штоковой полости цилиндра 1; G – расход сжатого воздуха через редуктор давления, трубопроводы (рис. 5, 6) и пневмодроссели 3, 4 (рис. 6).

Уравнения расхода сжатого воздуха G составлялись по известной методике [4] с учетом скорости распространения звука в воздухе, а также значений газовой постоянной, давления в системе питания, коэффициента расхода, проходного сечения трубопроводов и редукторов давления, а также с учетом характера течения сжатого воздуха по отношению к критическому режиму его течения ($p_{\text{вых}}/p_{\text{вх}} = 0,528$). При этом расход воздуха через редуктор в пневмоцилиндр происходит с показателем политропы, равным 1,4, в докритическом ($p_{\text{вых}}/p_{\text{вх}} > 0,528$) и надкритическом турбулентных режимах ($p_{\text{вых}}/p_{\text{вх}} < 0,528$) на основе формул Сен-Венана и Ванцеля [9]:

$$G_1 = (\mu f)_3 p_{\text{вх}} \sqrt{\frac{2}{RT} \left[\frac{p_{\text{ц}}}{p_{\text{вых}}} \left(1 - \frac{p_{\text{ц}}}{p_{\text{вых}}} \right) \right]}; \quad (4)$$

$$G_2 = (\mu f)_3 p_{\text{вх}} \sqrt{\frac{1}{2RT}}, \quad (5)$$

где G_1, G_2 – расход воздуха в докритическом и надкритическом режимах истечения; $(\mu f)_3$ – эквивалентное пневмосопротивление (произведение коэффициента расхода и площади проходного сечения) редуктора и соединительного трубопровода (рис. 5), а также дросселей 3, 4 (рис. 6); $p_{\text{вых}}, p_{\text{ц}}$ – текущие значения давления на выходе из редуктора и в штоковой полости пневмоцилиндра.

Задающими нагрузку элементами разработанной конструкции пневматического привода являются редукторы 9–11 (рис. 1), 5 (рис. 2) и 4 (рис. 4). Это пневматические аппараты с отрицательной обратной связью [10], в которых следящее действие обеспечивается за счет равновесия сил на их диафрагменно-клапанной системе.

Результаты расчетных характеристик пневмопривода спортивного тренажера выявили некоторые недостатки упомянутых редукторов – сравнительно большой гистерезис статической характеристики, значительные приводные усилия на органах управления и плохое быстродействие срабатывания всего привода.

Поэтому вместо традиционных конструкций редукторов давления была разработана оригинальная конструкция пневматического следящего элемента с улучшенными характеристиками, принципиальная схема которого приведена на рис. 7.

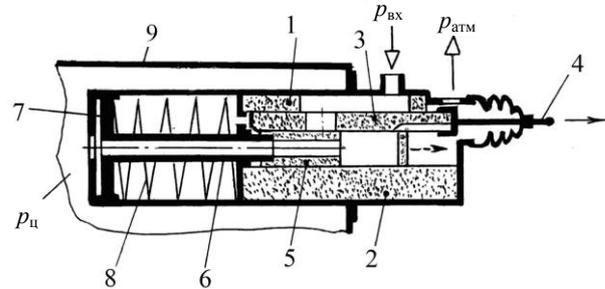


Рис. 7. Принципиальная схема усовершенствованной конструкции пневмоаппарата следящего действия: 1, 2 и 3, 5 – соответственно неподвижные и подвижные пластины из технической керамики; 4 – тяга; 6 – шток; 7 – поршень; 8 – следящая пружина; 9 – силовой пневмоцилиндр; $p_{\text{вх}}, p_{\text{ц}}$ – давления сжатого воздуха на входе в аппарат и в штоковой полости силового пневмоцилиндра

Принцип действия такого пневмоаппарата основан на взаимном перемещении подвижных пластин 3 и 5 относительно друг друга. За счет высокого качества обработки соприкасающихся поверхностей этих пластин, выполненных из технической керамики, усилие перемещения тяги 4 составляет не более 10 Н, что удобно для ее дистанционного управления с помощью троса Баудена или электромагнита следящего действия. Поэтому такой пневмоаппарат может быть установлен непосредственно в штоковой полости силового цилиндра в отличие, например, от редуктора 4 (рис. 4), который сообщается с силовым цилиндром 14 с помощью удлиненного трубопровода. Это направлено на повышение быстродействия срабатывания пневмопривода спортивного тренажера.

Процесс слежения изменения давления $p_{\text{ц}}$ в штоковой полости силового цилиндра от перемещения тяги 4 обеспечивается при условии достижения равновесия сил, действующих с двух сторон на поршень 7 пневмоаппарата (рис. 7), когда прекращается движение штока 6.

На основе такого же принципа устроена конструкция любого из электропневматических дросселей 3, 4 (рис. 6). Принципиальная схема (рис. 8) управляющей части пневмопривода

с запатентованной системой [3] регулирования нагрузки упростится, а быстродействие срабатывания самого пневмопривода улучшится, что необходимо для оперативного и комфортного выполнения упражнений на спортивных тренажерах.

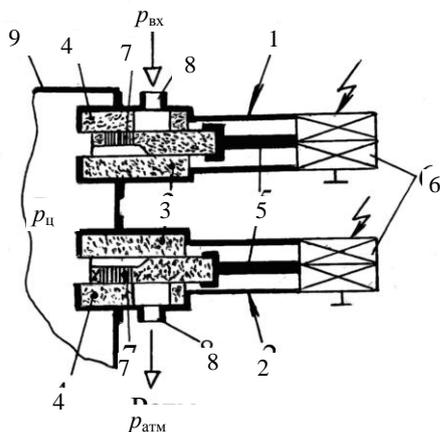


Рис. 8. Принципиальная схема электроуправляемых дросселей: 1 – дроссель впуска; 2 – то же выпуска; 3, 4 – неподвижные пластины из технической керамики; 5 – тяга; 6 – электромагниты следящего действия; 7 – капиллярные каналы; 8 – штуцеры; 9 – силевой пневмоцилиндр; $P_{вх}$ и $P_{ц}$ – давления сжатого воздуха на входе в дроссель 1 и в штоковой полости силового пневмоцилиндра; $P_{атм}$ – атмосферное давление на выпуске из дросселя 2

ВЫВОДЫ

1. Для повышения управления возникающими быстротечными изменениями векторов скорости и усилий, создаваемых на спортивных тренажерах профессиональной направленности, предлагается применять следящий пневматический привод, в частности для тренировки тяжелоатлетов, армрестлингистов и атлетов, занимающихся пауэрлифтингом или силовым троеборьем.

2. При проектировании новых конструкций спортивных тренажеров с пневматическим приводом необходимо выбирать технические схемы и средства, направленные не только на повышение спортивного мастерства, но и на снижение травматизма и повышение комфортности выполнения упражнений.

3. Для повышения эффективности участия тренера в тренировочном процессе, а также для обеспечения этого процесса по заданной программе предлагается применение запатентованной схемы (рис. 6 [3]) регулирования давления сжатого воздуха в силовом цилиндре.

4. Снижение усилий на органах управления пневматическим приводом, а также дистанционное регулирование давления сжатого воздуха в силовом цилиндре могут быть обеспечены за счет применения новых конструкций пневмоаппаратов (рис. 7, 8).

5. На основе дифференциальной формы характеристического уравнения состояния (1) определяется время заполнения и опорожнения штоковой части силового цилиндра пневматического привода спортивного тренажера. При этом удобнее всего расход воздуха принимать с показателем политропы 1,4 в докритическом и надкритическом турбулентных режимах течения воздуха через местные сопротивления. Причем переход критического режима такого течения при моделировании рекомендуется отслеживать с помощью элементов булевой алгебры, реализуемых в электронных таблицах или численными методами на базе MathCAD.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлович, А. Э. Армрестлинг: человек против машины. Инновации и здоровый образ жизни / А. Э. Павлович, И. В. Качанов, А. А. Шелег // Белорусская думка. – 2008. – № 3. – С. 100–103.
2. Устройство для тренировки армрестлеров: пат. 2580U Респ. Беларусь, МПК А63В 21/00, приоритет 13.07.2005, опубл. 30.04.2006 // И. В. Качанов, И. В. Бельский, А. Э. Павлович, А. А. Шелег.
3. Способ регулирования силовой нагрузки на спортивном тренажере: пат. 10565С1 Респ. Беларусь, МПК А63В 21/008, приоритет 30.11.2005, опубл. 30.08.2007 // А. А. Шелег.
4. Хользунов, А. Г. Основы расчета пневматических приводов / А. Г. Хользунов. – М.: Машгиз, 1959.
5. Герц, Е. В. Расчет пневмопривода / Е. В. Герц, Г. В. Крейнин. – М.: Машиностроение, 1975.
6. Метлюк, Н. Ф. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей / Н. Ф. Метлюк, В. П. Автушко. – М.: Машиностроение, 1980.
7. Павлович, А. Э. Улучшение характеристик пневматического тормозного привода прицепных МТА путем совершенствования пневмоаппаратов: автореф. ... дис. канд. техн. наук / А. Э. Павлович. – Минск: Белорусский политехнический институт, 1985.
8. Гиль, С. В. Динамика следящих пневматических аппаратов мобильных машин: автореф. ... дис. канд. техн. наук / С. В. Гиль. – Минск: Белорусская государственная политехническая академия, 2000.
9. Погорелов, В. И. Газодинамические расчеты пневматических приборов / В. И. Погорелов. – Л.: Машиностроение, 1971.
10. Дмитриев, В. Н. Основы пневмоавтоматики / В. Н. Дмитриев, В. Г. Градецкий. – М.: Машиностроение, 1973.

Поступила 11.11.2008