

ВЯЧЕСЛАВ КАЛЕКИН¹

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПОРШНЕВЫХ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЕЙ

AREAS TO IMPROVE DESIGN OF PISTON AIR MOTOR

Аннотация

Приведены сведения о принципах функционирования, результаты экспериментальных и численных исследований, рекомендации по созданию поршневых пневмодвигателей нового типа – с самодействующим газораспределением, способствующим упрощению конструкций, повышению давления сжатого воздуха на входе и обеспечивающим интенсификацию работ, производимых с использованием пневматической энергии.

Ключевые слова: поршневой пневмодвигатель, нормально открытый самодействующий клапан, программное средство

Abstract

The information on the principles of operation, the results of experimental and numerical investigations, recommendations for the creation of the piston air motor of a new type – with self-gas distribution, contributing to the simplification of structures, increasing air pressure at the inlet and providing an intensification of work produced with the use of airpower.

Keywords: piston air motor, self-acting valve is normally open, a software tool

¹ Д.т.н., профессор Вячеслав Степанович Калекин, Омский государственный технический университет.

Основным направлением обеспечения безопасности работ, проводимых в пожаро-взрывоопасных производствах химической, нефтехимической, газовой и горнодобывающей промышленности, является использование силового пневмопривода вместо электрического, допускающего искробразование.

Самое широкое распространение в перечисленных отраслях промышленности получили поршневые пневматические двигатели с принудительным воздухораспределением. В сравнении с пневмодвигателями других типов поршневые пневмодвигатели отличаются хорошей пусковой характеристикой, допускают перегрузку, имеют меньшие утечки сжатого воздуха. В качестве источника для пневмодвигателей используется сжатый воздух с давлением на входе $0,4 \div 0,63$ МПа [1, 2].

Основным производителем поршневых пневмодвигателей в России в настоящее время является ЗАО «Родниковский машиностроительный завод» (г. Родники, Ивановской области).

Таблица 1

Поршневые пневмодвигатели

Пневмодвигатели	Технические данные				
	1	2	3	4	5
Фирма, завод, страна	Рабочее давление МПа	Мощность моделей конструктивного ряда, кВт	Число оборотов выходного вала, об/мин	Удельный расход воздуха м ³ /кВт·мин	Удельная металлоёмкость, кг/кВт
Россия, П8-12	0,63	8	750	1,02	13,13
Россия, П12-12	0,5	12	720	1,05	10,5
Россия, П13-16	0,63	13	996	1,02	8,5
Россия, П16-25	0,5	16	1500	1,3	6,25
Завод Острой, Чехия	0,4	5,9÷55,1	700÷1200	0,95÷1,16	13,6
Заводы Петровицкой и Рыбницкий, ПНР	0,4	5,5	800	1,02	16,3
«Atlas Copco», Швеция	0,63	1,8÷9,6	250÷1300	0,95÷1,09	10,9÷14,96
«Holman», «Broom and Wade», BID, Англия	0,38÷0,56	2,2÷36,8	500÷1200	0,8÷1,08	15,4÷40,8

В табл. 1 приведены основные сравнительные характеристики пневмодвигателей с кривошипно-шатунным механизмом, выпускаемых заводом и поршневых пневмодвигателей зарубежных стран.

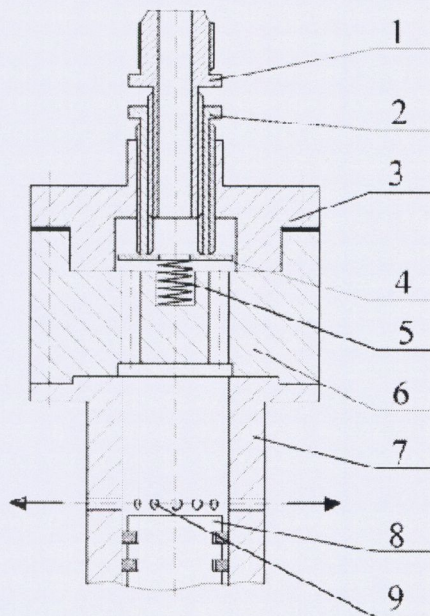


Рис. 1. Поршневой однорядный прямоточный пневмодвигатель:
 1 – штуцер подачи воздуха, 2 – ограничитель подъема, 3 – крышка клапана, 4 – кольцевой запорный элемент, 5 – пружина сжатия, 6 – крышка цилиндра, 7 – цилиндр, 8 – поршень, 9 – выхлопные окна

Fig. 1. Piston-row ram air motor:
 1 – fitting of air, 2 – lift limiter, 3 – valve cover, 4 – ring-closing device, 5 – compression spring, 6 – cylinder cover, 7 – cylinder, 8 – piston, 9 – box exhaust

Как следует из табл. 1 по удельным показателям – удельному расходу сжатого воздуха и удельной металлоёмкости отечественные пневмодвигатели не уступают лучшим зарубежным образцам.

Для интенсификации производимых работ, внедрения и использования высокопроизводительного пневмооборудования требуется дальнейшее увеличение давления сжатого воздуха.

Однако наличие принудительного золотникового газораспределения не способствует повышению экономичности работы поршневых пневмодвигателей на повышенном давлении.

Одним из путей совершенствования конструкций поршневых пневмодвигателей является замена принудительного воздухораспределения на самодействующие клапаны. Это позволит значительно упростить конструкцию пневмодвигателя, уменьшить и даже исключить утечки рабочей среды, повысить эффективность работы за счёт снижения потерь на трение, обеспечить эффективное функционирование с незначительным изменением КПД на нерасчетных режимах, увеличить частоту вращения коленчатого вала [3].

В связи с упрощением конструкций поршневых пневмодвигателей может быть расширена область их применения в химической и газовой промышленности для сбережения потенциальной энергии газообразных сред повышенного избыточного давления (отходов, побочных и промежуточных продуктов), покидающих технологическое оборудование перед последующей стадией использования [4].

Прямоточная схема движения рабочего тела в пневмодвигателе обеспечивается установкой впускных нормально открытых клапанов и выполнением выхлопных окон в стенке цилиндра в конце хода поршня. На рис. 1 представлен продольный разрез поршневого прямоточного пневмодвигателя.

Клапанная головка двигателя, включающая крышки клапана 3 и крышки цилиндра 6, присоединена к цилиндру 7.

Внутри головки размещен нормально-открытый самодействующий впускной клапан, содержащий кольцевой запорный элемент 4, ограничитель подъема 2, способный перемещаться по резьбе относительно крышки 3 для изменения максимальной высоты подъема запорного элемента, и пружины сжатия 5. Подача сжатого воздуха в двигатель производится через штуцер 1, ввернутый по резьбе в ограничитель подъема 2.

Теоретическая индикаторная диаграмма прямоточного поршневого пневмодвигателя с самодействующим впускным клапаном приведена на рис.2.

Точка 1 соответствует началу цикла. Поршень находится в верхней «мертвой» точке (ВМТ). Давление воздуха в цилиндре равно $p_{нач}$, впускной клапан открыт. Под действием газовой силы, обусловленной разностью давлений со стороны крышки и вала, поршень перемещается по направлению к нижней «мертвой» точке (НМТ), совершает механическую работу, передаваемую на вал кривошипно-шатунного механизма. В процессе 1-2-2' происходит наполнение цилиндра пневмодвигателя сжатым воздухом. В точке 2' запорный элемент клапана начинает перемещаться к седлу. В точке 2 впускной клапан закрывается. При расширении воздуха в процессе 2-3 газовая сила, действующая на поршень, обеспечивает его движение к НМТ.

В точке 3 поршнем открываются выхлопные окна, рабочая камера сообщается с полостью выпуска или атмосферой. В процессе выхлопа воздуха 3-4 механическая энергия также воспринимается механизмом движения. Давление воздуха в точке 4 выше $p_{кон}$, т.к. не вся поступившая масса воздуха успевает покинуть цилиндр. При обратном ходе поршня за счет энергии, накопленной маховиком (однорядная машина), часть воздуха выталкивается из цилиндра. В точке 5 выхлопные окна перекрываются поршнем, начинается процесс сжатия воздуха, оставшегося в цилиндре. Сжатие происходит до давления p_6 , достаточного для открытия впускного клапана.

Дальнейшее движение поршня сопровождается повышением давления в цилиндре (процесс 6-6') за счет притока воздуха из клапанной полости.

Повышение давления в процессе нагнетания воздуха из цилиндра в клапанную полость (6'-6"-1) обусловлено газодинамическими сопротивлениями клапана и величиной мертвого пространства.

Непрямоточная схема движения воздуха может быть реализована в пневмодвигателе с нормально открытыми впускными и выпускными клапанами. При положении поршня в ВМТ впускной клапан открыт, выпускной клапан закрыт под действием давления воздуха в цилиндре.

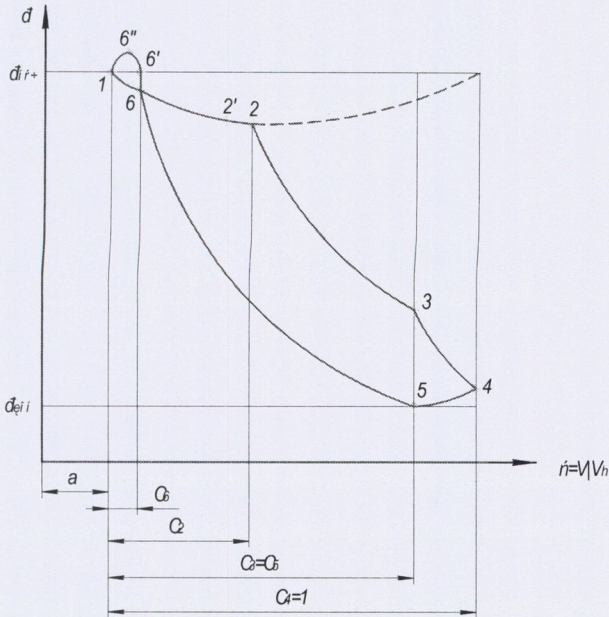


Рис. 2. Теоретический рабочий процесс прямооточного пневмодвигателя (диаграмма давление-относительный ход поршня)

Fig. 2. Theoretical workflow ram air motor (figure relative pressure-stroke)

Под давлением свежей порции воздуха $p_{нач}$, поступающей в цилиндр, поршень совершает движение в сторону НМТ, происходят процессы 1-2 наполнения и 2-3 расширения (рис. 3).

В выпускной клапан открывается в точке 3 под действием сил упругих элементов клапана, действующих на запорный элемент, при давлении несколько большим конечного (атмосферного). При обратном ходе поршня в процессе (3-4-5) отработанный воздух выталкивается из цилиндра через открытый выпускной клапан.

После закрытия клапана начинается обратное сжатие, которое завершается при подходе поршня к ВМТ.

В поршневой машине с *комбинированной* схемой движения воздуха установлены нормально открытые впускные и выпускные клапаны, а в стенке цилиндра выполнены выхлопные окна.

При прямом ходе поршня происходят процессы наполнения и расширения. Процесс расширения короче, чем в непрямоточной схеме движения воздуха из-за открытия поршнем выхлопных окон. В процессе выхлопа открывается выпускной клапан. Выхлоп происходит через выхлопные окна и открытый выпускной клапан до более низкого давления, чем в прямооточной схеме, ближе к $p_{кон}$ (рис. 4).

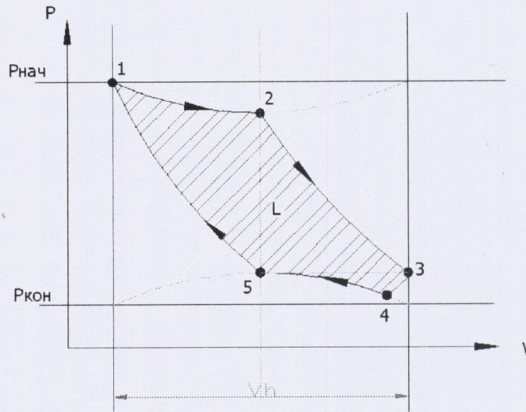


Рис. 3. Теоретический процесс пневмодвигателя с не прямоточной схемой движения воздуха

Fig. 3. The theoretical process of an air motor straight-flow pattern with no air movement

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны и созданы экспериментальные стенды поршневых пневмодвигателей с прямоточной системой газораспределения на унифицированных компрессорных базах: вертикального, одноцилиндрового компрессора с ходом поршня 0,038 м и диаметром цилиндра 0,06 м; одноступенчатого, трёхцилиндрового Ш-образного с диаметрами цилиндров 0,09 м, ходом поршня 0,068 м [6].

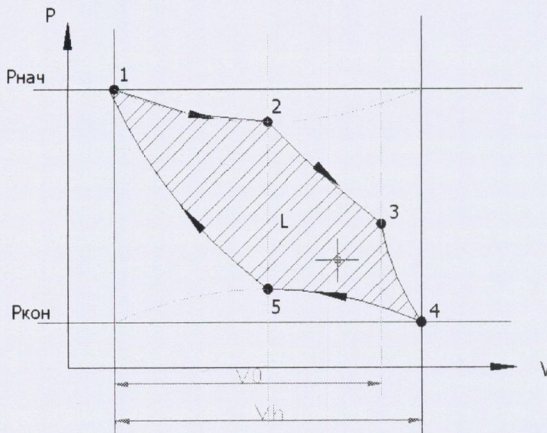


Рис. 4. Теоретический процесс пневмодвигателя с комбинированной схемой движения воздуха

Fig. 4. The theoretical process of an air motor with a combined scheme of air movement

Штатные компрессорные клапаны были заменены на нормально открытые впускные кольцевые клапаны, а в нижней части цилиндров в конце хода поршней были выполнены выхлопные окна.

Для автоматизации экспериментальных исследований рабочих процессов пневмодвигателя использовался измерительный комплекс Power на базе IBM PC. Производилась регистрация быстроменяющихся давлений в цилиндре пневмодвигателя, впускной полости, отметка верхней и нижней мертвых точек, диаграмм движения запорного элемента клапана. Измерялись внешние параметры: давление, температура и расход сжатого воздуха (ротаметр KROHNE) на входе, температура отработанного воздуха на выходе.

На основе математических моделей рабочих процессов, совмещённых с динамикой механизмов движения пневмодвигателей, и разработанного программного средства [7] произведён анализ влияния конструктивных параметров однорядного и Ш-образного пневмодвигателей с самодействующими клапанами при различных схемах воздухораспределения, внешних нагрузках, начальных давлениях сжатого воздуха в установившихся и неустойчивых режимах функционирования.

В результате экспериментальных и теоретических исследований было установлено, что:

- характеристики пневмодвигателя (мощность, частота вращения вала, КПД), обусловленные изменением давления сжатого воздуха на входе при соответствующей внешней нагрузке, определяются соотношением конструктивных параметров элементов впускного клапана, изменение их при установленных жёсткостях пружин обеспечивается регулированием высоты подъёма запорных элементов;
- непрямочная схема воздухораспределения может быть рекомендована для применения в условиях строго ограниченного подбора конструктивных параметров нормально открытых впускного и выпускного клапанов;
- наилучшие показатели работы пневмодвигателей обеспечиваются с прямочной и комбинированной схемами движения воздуха. Эти схемы сопоставимы по удельному расходу, но комбинированная схема имеет более широкий устойчивый диапазон функционирования до 30% в сторону увеличения и уменьшения начального давления в сравнении с диапазоном, характерным для прямочной схемы;
- для повышенных давлений, начиная от 0,8 МПа, отношение хода поршня к диаметру цилиндра S/D при сохранении объёма, описываемого поршнем за один оборот, должно составлять $0,8 \div 0,85$, для меньших давлений это отношение следует принимать равным $0,6 \div 0,7$. Отклонения S/D от рекомендованных значений на 0,1 в меньшую сторону приводит к увеличению удельного расхода сжатого воздуха на $60 \div 70\%$, а в большую сторону – на $20 \div 30\%$;
- величина относительного мертвого пространства a для прямочной и комбинированной схем составляет $0,3 \div 0,4$. При уменьшении $a \leq 0,2$ удельный расход возрастает в $2 \div 2,5$ раза. Увеличение a до 0,6 приводит к уменьшению мощности на $7 \div 10\%$ и увеличению удельного расхода сжатого воздуха на $5 \div 10\%$;

- поршневые пневмодвигатели нового типа способны развивать более высокие частоты вращения вала (в 2-2,5 раза), чем двигатели с принудительным воздухораспределением.

Важным фактором, обеспечивающим ускорение внедрения конструкций пневмодвигателей нового типа является использование имеющихся унифицированных единиц и создание на их основе типоразмерных рядов новых конструкций. Это обстоятельство позволяет считать целесообразным применение унифицированных компрессорных баз для разработки пневмодвигателей нового типа. Использование серийно выпускаемых унифицированных компрессорных баз будет способствовать сокращению сроков и затрат на проектирование и изготовление.

Были выполнены расчеты по разработке типоразмерного ряда пневмодвигателей на унифицированной базе поршневого холодильного компрессора ФУ-12. Компрессор представляет собой четырехрядную У-образную машину простого действия с номинальными диаметрами цилиндров 0,068 м, ходом поршня 0,05 м, частотой вращения 25 с^{-1} , массой 90 кг.

Рекомендуемый типоразмерный ряд пневмодвигателей может быть создан в пределах диаметров цилиндров от 0,068 м (номинальное значение) до 0,11 м (определен из условия не превышения номинальной поршневой силы в ряду).

При разработке машин руководствовались следующими соображениями. За номинальное давление сжатого воздуха на входе было принято $p_{нач} = 0,63 \text{ МПа}$. Проходные сечения в седлах впускных клапанов f_c вычислялись из принятого для всех машин постоянного соотношения f_c/F_n (F_n – площадь поршня). Максимальные высоты подъема запорных элементов клапанов h_{max} определялась из условия равенства проходных сечений в щели $f_{щ}$ (при полностью открытом клапане) и в седле клапана f_c . Жесткость пружин и сечение выходных окон устанавливались индивидуально для каждой машины по результатам оптимизации рабочего процесса. Жесткость пружин подбиралась так, чтобы обеспечить закрытие клапана при $\varphi_2 = 100 \div 110^\circ$. Площадь проходных сечений выхлопных окон устанавливалась из условия обеспечения минимальной разности давлений в цилиндре пневмодвигателя в конце процесса выхлопа и атмосферным давлением.

В табл. 2 приведены расчётные технические характеристики пневмодвигателей для номинальных режимов работы, выполненных на базе холодильного компрессора ФУ-12.

Из анализа данных табл. 1 и табл. 2 следует, что предложенный ряд поршневых пневмодвигателей, выполненных на унифицированных базах холодильных компрессоров, может обеспечить достаточно высокие технико-экономические показатели и превзойти отдельные российские и зарубежные аналоги с принудительным воздухораспределением.

Типоразмерный ряд пневмодвигателей на базе компрессора ФУ12

Фактическая поршневая сила, кН	2,2	3,2	4,0	5,0	6,0
Число рядов	4	4	4	4	4
Ход поршня, м	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Диаметр цилиндра, м	0,068	0,080	0,090	0,100	0,110
Отношение S/D	0,735	0,625	0,556	0,5	0,455
Давление на входе в пневмодвигатель, МПа	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Номинальная мощность на валу, кВт	4,7	6,6	8,5	10,6	13
Удельный расход воздуха, м ³ /(мин·кВт)	0,95	0,94	0,93	0,91	0,89
Удельная металлоемкость, кг/кВт	19,2	13,6	10,6	8,5	7,0

Обозначения

$A = V_m/V_h$	– величина относительного мёртвого пространства	[–]
V_m	– мёртвое пространство	[м ³]
V_h	– объём, описываемый поршнем за один оборот коленчатого вала	[м ³]
$C = S_i/S$	– текущий относительный ход поршня	[–]
S_i	– текущий ход поршня	[м]
S	– полный ход поршня	[м]
C_1	– относительный ход поршня в положении ВМТ	[–]
C_2	– относительный ход поршня в момент закрытия впускного клапана	[–]
C_3	– относительный ход поршня в момент открытия поршнем выхлопных окон	[–]
C_4	– относительный ход поршня в положении НМТ	[–]
C_6	– относительный ход поршня в момент открытия впускного клапана	[–]
$p_{нач}$	– давление воздуха на входе	[Мпа]
p_k	– конечное давление воздуха в цилиндре	[Мпа]

Литература

- [1] Кусницын Г. И.: *Пневматические двигатели горных машин и механизмов*, Углетехиздат, 1953.
- [2] Зиневич В. Д., Гешлин Л. А.: *Поршневые и шестеренные пневмодвигатели горно-шахтного оборудования*, Недра, 1982.
- [3] Калекин В. С., Бычковский Е. Г., Ваняшов А. Д., Калекин В. В.: *Поршневой пневмодвигатель с самодействующим впускным клапаном*, Химическая техника, № 1, (2002), 27-29.
- [4] Прилуцкий А. И.: *Применение поршневых расширительных машин в установках утилизации энергии сжатого природного газа*, Химическое и нефтегазовое машиностроение, № 3, (2008), 26-30.
- [5] Калекин В. С., Калекин Д. В.: *Поршневые пневмодвигатели с самодействующими клапанами*, Актуальные проблемы химической технологии и подготовки кадров. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Уфа УГНТУ, (2006), 253-258.
- [6] Калекин В. С., Калекин Д. В.: *Поршневой пневмодвигатель с впускным самодействующим клапаном*, Компрессорная техника и пневматика, - № 2, (2011), 20-25.
- [7] Загородников А. П., Калекин В. С., Калекин Д. В.: *Программное средство для рационального конструирования поршневых пневмодвигателей и агрегатов*, Компрессорная техника и пневматика, № 1, (2012) 34-40.