

УДК 62.522:62.387

**РАСЧЕТ УЗЛОВ ТРЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО ПНЕВМОМОТОРА****© Виктор Маирович Бозров, Владимир Исаакович Ивлев***Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия*[vmbzrv@bk.ru](mailto:vmbzrv@bk.ru)

***Аннотация.** Представлена детализированная математическая модель пластинчатого пневмомотора. Расчетным путем определены нагрузки и скорости в основных узлах трения – подшипниках ротора и пластинах при взаимодействии со статором и пазами ротора. Результаты расчета позволили обоснованно подойти к выбору подшипников и полимерного композиционного материала пластин, обеспечивающего их работу в режиме сухого трения.*

Сжатый воздух является вторым по значимости после электричества энергоносителем в промышленности, а различные механизмы с пневмомоторами имеют массовое применение в горнопроходческом оборудовании, подъемно – транспортных устройствах взрывоопасных производств, в ручном механизированном инструменте (пневмодрели, гайковерты, миксеры, отрезные и шлифовальные машины). Подавляющее большинство ручного инструмента (более 90% при мощности до 2 кВт) оснащены пластинчатыми пневмомоторами, в том числе со встроенными редукторами. Их преимущества по сравнению с аналогичными электроинструментами – лучшая эргономика и энерговооруженность, долговечность и надежность, особенно при работе в условиях агрессивной среды, способность работать при длительных перегрузках, не перегреваясь.

Одной из важнейших проблем при создании новых пластинчатых пневмомоторов (как, впрочем, и других типов пневмодвигателей) является переход на использование сжатого воздуха без распыления масел для смазывания трущихся деталей пневмоустройств. Это масло в мелкодисперсном состоянии вместе с отработанным воздухом выбрасывается в окружающую среду. Поэтому перевод пневматики на так называемый сухой воздух позволит исключить загрязнение маслом рабочих мест и вредное воздействие на здоровье персонала. Ведущие мировые производители пневматики проводят интенсивные работы в этом направлении, а фирма AtlasCopco (Швеция) уже выпускает небольшой типоразмерный ряд пластинчатых пневмомоторов мощностью до 0,4 кВт, не нуждающихся в смазке и не отличающихся по параметрам от пневмомоторов со смазкой. В России за последние годы выпуск пневмомоторов сократился в разы, а технология производства и конструктивное исполнение остались на уровне двадцатилетней давности.

Ниже рассматриваются некоторые вопросы модификации пластинчатых пневмомоторов для обеспечения их функционирования на сухом сжатом воздухе.

На рис.1 представлена конструктивная схема нереверсивного пластинчатого пневмомотора. К основным деталям, нуждающимся в постоянной или периодической смазке, относятся пластины, трущиеся о поверхность статора и пазы ротора, а также подшипники ротора.

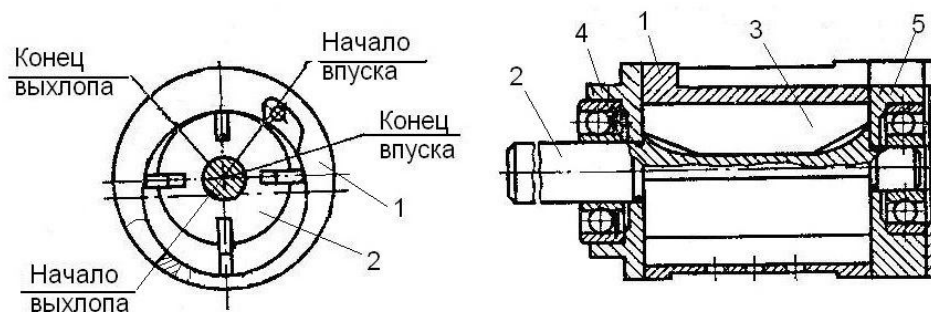


Рис. 1

В настоящее время выпускается большой ассортимент шарикоподшипников, в том числе в герметичном исполнении, с консистентной смазкой, сохраняющей свои свойства в течение всего времени работы подшипника, например, фирмы NSK (Япония) серии SPACEA. Задача заключается в правильном выборе типоразмера подшипника, его несущей способности. Для этого необходимо знать величины действующих на него нагрузок, которые возникают из-за изменения давления сжатого воздуха в рабочих полостях пневмомотора. В полостях нагнетания и расширения, где совершается положительная работа, давление всегда больше, чем в полостях выхлопа. Равнодействующая от сил давления воздуха, действующая на ротор и направленная к его центру по оси симметрии  $i$ -ой полости будет равна  $F_i = 2 p_i r_p l \sin(\pi/z)$ , где:  $p_i$  - давление в  $i$ -ой полости,  $r_p$  - радиус ротора,  $l$  - длина ротора,  $z$  - число пластин. Радиальная нагрузка в опоре ротора будет равна половине векторной суммы сил  $F_i$  от всех полостей, а среднее ее значение за оборот равно:

$$F_c = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{i=1}^z F_i(\alpha) d\alpha,$$

где:  $\alpha$  - текущий угол поворота ротора.

Здесь мы не рассматриваем возможные технологические нагрузки, которые зависят от конкретного случая и, как правило, действуют уже на выходной вал редуктора, не нагружая опоры ротора. Схема подачи сжатого воздуха симметрична относительно торцевых поверхностей ротора.

Для определения текущих значений давлений в полостях пневмомотора была составлена математическая модель, включающая уравнения, описывающие термодинамические процессы изменения давления и температуры воздуха в полостях, основанные на законах сохранения энергии и массы сжатого воздуха, проходящего через полость, и уравнение движения ротора [1]. Для установившегося движения ротора модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dP_i}{d\alpha} &= \frac{k}{\omega V_i} \left[ R (T G_{im} - T_i G_i) - P_i \omega \frac{dV_i}{d\alpha} \right], \\ \frac{dT_i}{d\alpha} &= \frac{T_i}{\omega P_i V_i} \left[ P_i \omega \frac{dV_i}{d\alpha} + \omega V_i \frac{dP_i}{d\alpha} - R T_i (G_{im} - G_i) \right], \\ M_{\text{ос}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sum_{i=1,z} P_i \frac{dV_i}{d\alpha} d\alpha - M_{mp}, \end{aligned}$$

где  $k$  - показатель адиабаты,  $\omega$  - угловая скорость вала пневмомотора,  $V_i$  - текущий объем  $i$ -й камеры,  $R$  - газовая постоянная для воздуха,  $T$  - температура воздуха в магистрали, откуда он поступает в  $i$ -ю камеру,  $G_{im}$  - секундный расход воздуха поступающего в  $i$ -ую камеру из магистрали (если она сообщается с магистралью,  $T_i$  -

температура воздуха в  $i$ -й камере,  $G_i$  - секундный расход воздуха из  $i$ -й камеры,  $M_{дв}$  - движущий момент,  $Z$  - число камер (равно числу пластин),  $M_{тр}$  - момент от сил трения пластин о статор, зависящая от угловой скорости ротора,  $G_{пм}$  - секундный расход сжатого воздуха, поступающего в мотор из магистрали. Вычисление расхода проводится по формуле Сен-Венана [1]. Степень открытия и закрытия впускных и выхлопных каналов в функции угла поворота ротора задается дополнительными алгебраическими и логическими соотношениями, которые здесь не приводятся.

Для выполнения расчетов были взяты данные типоразмерного ряда четырех пластинчатых нереверсивных пневмомоторов, соответствующих нормали МН4656-63. Ряд включает 24 модели мощностью от 0,4 до 2,5 л.с. В таблице 1 приведены основные параметры моторов, которые были выбраны для проведения расчетов, соответственно малой, средней и максимальной мощности.

На рис.2 представлены зависимости средней за оборот радиальной нагрузки на ротор, испытываемой в результате давления сжатого воздуха в полостях, в функции установившейся угловой скорости для мотора согласно табл.1. На каждую опору ротора приходится половина этой нагрузки. Снижение нагрузки с ростом угловой скорости объясняется тем, что при больших оборотах в полости нагнетания успевает поступить меньшее количество сжатого воздуха, а в полостях выхлопа давление не успевает достичь значения атмосферного.

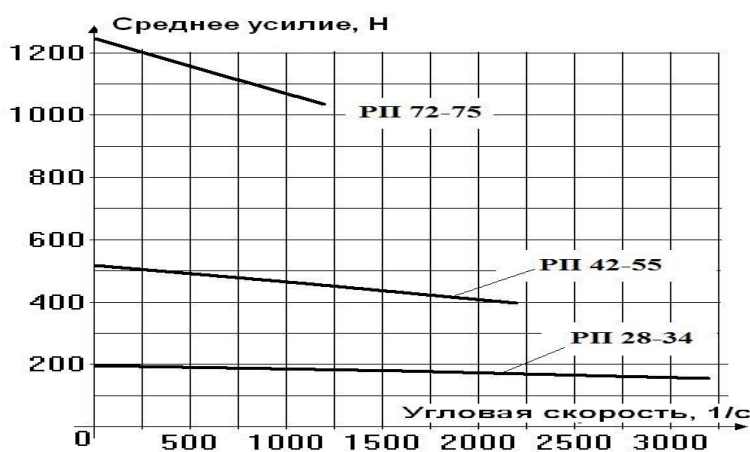


Рис. 2

Таблица 1

Модель	Длина статора, мм	Диаметр ротора, мм	Диаметр ротора, мм	Эксцентриситет, мм	Высота/толщина пластины мм	Мощность maxN <sub>м</sub> л.с.	Обороты при N <sub>м</sub> об/мин
РП28-34	34	20	16,6	1,7	6,6/1,2	0,4	15500
РП42-55	55	32	26,6	2,7	10,7/2,5	1	11000
РП72-75	75	56	46,4	4,8	19/4	2,5	5750

На рис.3 показаны кривые мгновенного значения радиального усилия, действующего на ротор, в функции угла его поворота для пневмомотора РП28-34 при трех значениях угловой скорости.

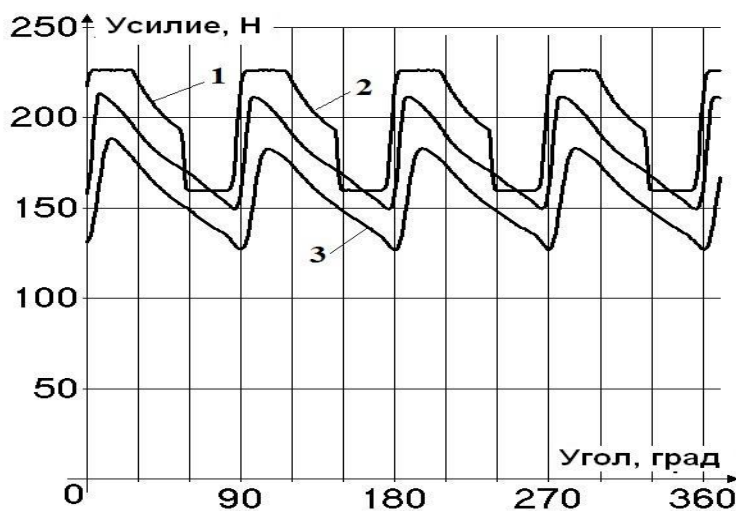


Рис. 3

На рис.4 дана зависимость угла поворота радиус-вектора радиального усилия от угла поворота ротора для тех же значений угловых скоростей. Видно, что нагрузка на подшипник опоры ротора имеет пульсирующую составляющую, а направление этой нагрузки меняется в пределах примерно 50 угловых градусов. Таким образом, имеются все данные по нагрузкам для обоснованного выбора подшипников ротора.

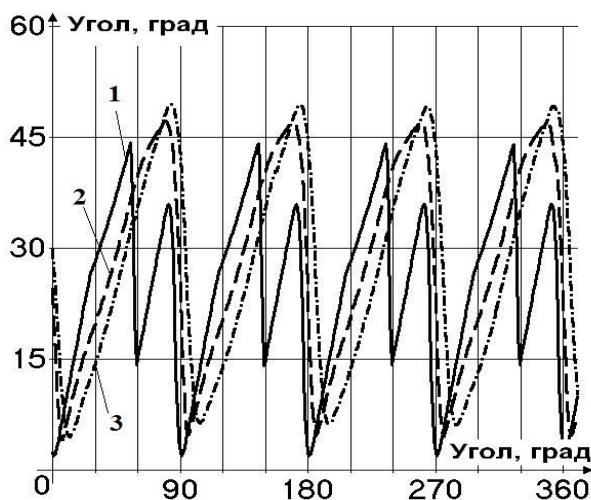


Рис. 4

Для обеспечения работы пластин в режиме сухого трения можно использовать для их изготовления антифрикционные полимерные композиционные материалы на основе полиимидов. Соответственно должны быть обработаны рабочая поверхность статора и пазы ротора, чтобы обеспечить минимальное трение и износ материала пластин. Основным критерием для определения работоспособности антифрикционных полимерных материалов является показатель  $pv$  (давление – скорость или мощность трения) в контакте пары трения [2].

Максимальная линейная скорость торца пластины относительно поверхности статора (см. рис.1) будет в нижнем положении (пластина максимально выдвинута из паза ротора):  $v = \omega(r_p + 2e)$ , а минимальная скорость в верхней точке (вся пластина находится в пазу ротора):  $v = \omega r_p$ . Соответственно средняя скорость за оборот равна  $v = \omega(r_p + e)$ . Аналогично вычисляется средняя скорость пластины относительно пазов ротора, которая равна  $e\omega/\pi$ .

Давление в контакте определяется центробежной силой, прижимающей пластину к поверхности статора  $F = m \omega^2 R_l$ , где  $R_l$  – средняя за оборот координата центра тяжести

пластины,  $m$  – масса пластины, равная:  $m = \rho hbL$ ;  $\rho$  – плотность материала, из которого планируется изготовление пластин,  $b$  – толщина пластины.

Для полиимидных композиционных материалов плотность равна  $\rho = 1,4 - 1,5 \text{ г/см}^3$ . Давление в контакте пластины и статора определяется как  $p = F/(Lb)$ .

Давление в контакте «пластина – паз ротора» вычисляется на основе баланса сил трения, инерционных (в том числе кориолисовой) нагрузок и сил от перепада давления между полостями. В таблице 2 приведены результаты соответствующих вычислений для номинального режима работы указанных моделей моторов.

Как видно из табл. 2, показатель  $pv$  для контакта «пластина – статор» почти на порядок больше, чем для контакта «пластина – ротор». Поэтому ресурс пластин определяется износом в первой паре, что подтверждается литературными данными [3].

Для оценки ресурса пластин, работающих в режиме сухого трения, мы использовали данные по трибологическим характеристикам композиционного полиимидного материала VespelSP21 фирмы DuPont (США) [4]. Близким российским аналогом является материал ПАМ-50-67.

Таблица 2.

Модель	Скорость по статору, м/с	Скорость в пазах ротора, м/с	Давление на статор, МПа	Давление на паз ротора, МПа	Показатель $pv$ для статора	Показатель $pv$ для ротора
РП28-34	16,2	0,88	0,19	0,16	3,1	0,14
РП42-55	18,5	0,98	0,24	0,22	4,4	0,21
РП72-75	16,8	0,92	0,2	0,44	3,4	0,4

Как видно из данных табл.2, значения давлений и скоростей в контакте «пластина – статор» лежат достаточно близко к предельной кривой «давление – скорость» для материала VespelSP21, но находятся внутри допустимой зоны, при условии, что температура в контакте не превышает  $395^\circ\text{C}$ . Это условие при интенсивном воздухообмене в полостях ПМ гарантированно соблюдается. Для материала VespelSP21 [4] величина износа при температуре менее  $395^\circ\text{C}$  приблизительно пропорциональна величине  $pv$  и может быть вычислена по формуле  $\Delta L = k_1 k_2 K p v t$ , где:  $K$  – коэффициент износа (для VespelSP21 равен  $0,63 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм}$ ),  $k_1$  и  $k_2$  – мультипликативные коэффициенты, учитывающие величину шероховатости поверхности и твердость контртела – т.е. поверхности статора. В частности, для стального статора с  $R_a \leq 0,15 \text{ мкм}$  и покрытием из нитрида титана значения этих коэффициентов [4] будут  $k_1=0,7$ ;  $k_2=0,6$ . При допустимом износе пластины в 1-1,5 мм получаем ресурс ее работы порядка 250 – 300 часов. Этот показатель существенно превышает ресурс обычных текстолитовых пластин, работающих со смазкой (износ пластины порядка 1мм за 100 часов работы) [3]. Коэффициент трения материала VespelSP21 по стали без смазки составляет 0,12-0,08. Следовательно, механические потери в ПМ, работающего без смазки, не должны превышать потери в обычном ПМ, работающем со смазкой.

В данной работе мы остановились на анализе работоспособности полиимидных материалов, т.к. они по своим механическим и физико-химическим показателям существенно превосходят другие полимерные материалы, но и выше по стоимости в 2,5-3 раза. Но доля стоимости пластин в общей цене пневмомотора крайне незначительна, поэтому замена материала пластин практически не должно сказаться на стоимости изделия. Повышение качества поверхности статора приведет к небольшому росту стоимости, но это должно компенсироваться увеличением периода межсервисного обслуживания и тем, что изделия с новым пневмомотором будут отвечать более жестким экологическим требованиям.

Применение новых конструкционных материалов является одним из основных направлений совершенствования эксплуатационных характеристик и конструкций

пневмомоторов. В качестве примера укажем на разработку немецкой фирмы “DepragSchulz” пластинчатого пневмомотора, используемого в магниторезонансном томографе для работы в среде высоких магнитных полей [5]. В данном пневмомоторе мощностью 150 Вт при 14000 об/мин все детали выполнены из технической керамики и полимерных композитов, т.е. мотор не содержит металлических деталей.

В заключение можно констатировать, что на сегодняшний день существуют материалы и технологии, позволяющие изготавливать пластинчатые пневмомоторы, способные работать на сжатом воздухе без распыления смазки и имеющие эксплуатационные характеристики даже выше традиционных моторов.

### Список литературы

1. Герц Е.В. Динамика пневматических систем машин. М. Машиностроение. 1985. -256с.
2. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ и смазка)// под ред. Ю.Н. Дроздова. –М. Эко-Пресс. 2010. -604с.
3. Зеленецкий С.Б., Рябков Е.Д., Микеров А.Г. Ротационные пневматические двигатели. –Л. Машиностроение. 1976. -240с.
4. Рекомендации по конструированию из материалов VespelDuPont. -55с.  
[www.ftorotex.com/user/Vespel-konst](http://www.ftorotex.com/user/Vespel-konst).
5. Сжатый воздух в качестве топлива для High-Tech двигателя. Kaeserreport. Межотраслевой корпоративный журнал. 2010, №1, с.22.