РАЗДЕЛ VI. МАШИНОСТРОЕНИЕ

Кузнецов Ю.П., Химич В.Л., Хрунков С.Н., Чуваков А.Б., Погодин Р.А.
Тенденции и перспективы развития ручных шлифовальных пневматических машин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)

doi: 10.18411/sr-10-08-2021-17

Аннотация

Проанализированы результаты эволюции параметров пневматических шлифовальных машин на протяжении значительного интервала времени. Выявлены тенденции изменения удельной мощности и удельного расхода машин. Проведен сравнительный анализ перспектив развития машин с ротационным и турбинным приводом. Сделан вывод о большей перспективности применения многоступенчатых турбин в качестве привода. Обоснована конструктивная схема радиальных многоступенчатых турбин для привода машин.

Ключевые слова: Многоступенчатая турбина, пневматическая шлифовальная машина, удельная мощность, удельный расход.

Ручные шлифовальные пневматические машины широко применяются во многих отраслях промышленности для выполнения различных работ подготовительного цикла: зачистки сварных швов, удалении сварочного грата и литейного облоя, при доводке прессформ и штампов и т.д. Первые машины появились еще в конце 19 века и длительное время их параметры оставались практически неизменными. Однако в течение последних нескольких десятков лет произошло стремительное развитие большинства отраслей техники, что отразилось и на такой традиционной, даже консервативной отрасли, как производство пневмоинструмента. Современные шлифовальные машины намного легче, мощнее и экономичнее своих предшественниц. В настоящее время мировыми лидерами в производстве шлифовальных пневмомашин являются крупные корпорации, такие как Atlas Copco, Ingersall Rand, Daewoo, а также специализированные фирмы – Air Turbine Tools, Deprag, Biax, ATA-group и многие другие.

Выявить тенденции развития шлифовальных машин можно, отследив их эволюцию на протяжении значительного интервала времени. С этой целью сопоставим параметры современных машин с требованиями ГОСТ 12634-80 «Машины ручные шлифовальные пневматические. Технические условия» [1], в котором фактически зафиксированы характеристики машин, достигнутые в отрасли к 1980 году. Для сравнения машин будем использовать три параметра:

- удельную мощность $\frac{N_e}{m}$, кВт/кг, где N_e – эффективная мощность привода, m – масса машины;
- удельный расход воздуха $q = \frac{Q}{N_e}$, м³/мин*кВт, где Q – объемный расход воздуха при нормальных условиях;
- частота вращения ротора машины $n = \frac{60}{\pi} * \frac{U}{D}$, где U , м/с – скорость резания шлифовального круга; D – диаметр шлифовального круга, м.

Параметры рассматриваемых машин внесены в таблицу 1, в порядке возрастания номинальной мощности. Дополнительно вычислены среднеарифметические значения

указанных параметров для каждого модельного ряда, а также для совокупности представленных машин.

Таблица 1

№ п/п	Индекс модели машины	Наименование параметров		
		Удельная мощность, кВт/кг	Удельный расход, м ³ / (мин*кВт)	Частота вращения, об/мин
		N_e/m	$q = Q/N_e$	n
	1	2	3	4
Данные ГОСТ 12634-80 [1, с.2].				
В качестве индекса машины использована мощность N_e , кВт				
1	0,03	0,03/0,3 = 0,10	3,00	79583
2	0,16	0,16/0,8 = 0,20	1,55	29844
3	0,25	0,25/1,0 = 0,25	1,90	19100
4	0,35	0,35/1,4 = 0,25	2,00	19100
5	0,50	0,50/1,9 = 0,26	2,04	12127
6	0,70	0,70/2,6 = 0,27	1,75	9550
7	0,85	0,85/3,5 = 0,24	1,55	7640
8	1,3	1,30/4,8 = 0,27	1,40	6112
9	1,5	1,50/5,4 = 0,28	1,35	5093
10	1,7	1,70/7,0 = 0,24	1,30	3820
Среднеарифм. значение параметров модельного ряда		0,24	1,78	-
Фирма Air Turbine Tools [2, с. 3-5, 9], машины с турбинным приводом				
1	201SV	0,15/0,17 = 0,88	0,20/0,15 = 1,32	40...90000
2	204XSV	0,30/0,23 = 1,30	0,26/0,30 = 1,17	30...50000
3	525SV	0,34/0,40 = 0,85	0,56/0,34 = 1,63	30...40000
4	202DM	0,41/0,37 = 1,11	0,57/0,41 = 1,36	30...65000
5	525XDM	0,68/0,58 = 1,17	0,85/0,68 = 1,25	30...40000
Среднеарифм. значение параметров модельного ряда		1,06	1,35	0,32
Фирма Biah [3, с. 4, 8, 10, 12], машины с ротационным приводом				
1	TSD 385	0,10/0,19 = 0,53	0,17/0,10 = 1,7	85000
2	SARD 830	0,26/0,50 = 0,52	0,40/0,26 = 1,5	30000
3	SRD 8-20/2	0,30/0,57 = 0,53	0,50/0,30 = 1,7	20000
4	SRH 10-15/2	0,40/0,97 = 0,41	0,70/0,40 = 1,8	15000
Среднеарифм. значение параметров модельного ряда		0,50	1,68	-
Фирма ATA-group [4, с. 5, 7, 8, 10, 11], машины с ротационным приводом				
1	SP75R	0,11/0,15 = 0,73	0,20/0,11 = 1,8	75000
2	SD45R	0,15/0,24 = 0,63	0,23/0,15 = 1,5	45000
3	S50	0,19/0,36 = 0,53	0,45/0,19 = 2,4	50000
4	SD37L	0,30/0,46 = 0,65	0,57/0,30 = 1,9	37000
5	S22L	0,63/0,93 = 0,68	0,85/0,63 = 1,4	22000
6	SV27LR	0,75/0,85 = 0,88	0,92/0,75 = 1,2	25000
Среднеарифм. значение параметров модельного ряда		0,68	1,7	-
Фирма Atlas Copco [5, с. 22, 28, 30], машины с ротационным приводом				
1	LSF19 S300-1	0,50/0,50 = 1,00	0,68/0,50 = 1,4	30000
2	LSF28 S250	0,86/0,80 = 1,08	1,11/0,86 = 1,3	25000
3	LSF38 S250E-01	1,35/1,50 = 0,90	1,68/1,35 = 1,2	25000
4	LSR48 S090-CW	1,50/2,30 = 0,65	1,70/1,50 = 1,1	9000
5	LSR48 S060-15	2,30/5,40 = 0,43	2,46/2,30 = 1,1	6000
6	LSR64 S100-15	2,90/5,80 = 0,50	3,18/2,90 = 1,1	10000
Среднеарифм. значение параметров		0,76	1,20	-

модельного ряда			
Обобщенное среднеарифм. значение параметров	0,76	1,44	-

Оценим величину изменения параметров модельных рядов машин, представленных в таблице 1, по отношению к требованиям [1]:

- Фирма Air Turbine Tools, шлифмашины с турбинным приводом. Тип турбины – центробежная реактивная турбина. Удельная мощность машин увеличилась в среднем в 4,4 раза; удельный расход воздуха снизился в среднем на 24%.
- Фирма Biah, шлифмашины с ротационным приводом. Удельная мощность увеличилась в среднем в 2,1 раза; удельный расход воздуха снизился в среднем на 5,6%.
- Фирма ATA-group, шлифмашины с ротационным приводом. Удельная мощность увеличилась в среднем в 2,8 раза; удельный расход воздуха снизился в среднем на 4,5%.
- Фирма Atlas Copco, шлифмашины с ротационным приводом. Удельная мощность увеличилась в среднем в 3,2 раза; удельный расход воздуха снизился в среднем на 32%.

Полученные результаты выявили два наиболее значимых направления в эволюции параметров пневматических машин — повышение удельной мощности и снижение удельного расхода воздуха. Удельный расход воздуха за рассматриваемый интервал времени снизился в среднем на 20%, а удельная мощность - выросла в среднем в 3 раза. Третий параметр, выбранный для сравнения машин – это частота вращения ротора n . Вычисление средней величины частоты вращения ротора для всего рассматриваемого модельного ряда машин не имеет физического смысла. Тем не менее, ретроспективный обзор изменения этого параметра позволил выявить одно из перспективных направлений развития шлифовальных машин, что обусловлено периодическим появлением на рынке шлифовальных кругов с увеличенной скоростью резания.

В ручных пневматических шлифовальных машинах применяются различные типы приводов: ротационно-пластинчатый, турбинный, аксиально-поршневой, шестеренный и т.д. Характеристики ротационно-пластинчатых двигателей хорошо коррелируются с параметрами шлифкругов на керамической связке, скорость резания которых (25...40 м/с) остается неизменной в течение уже многих десятилетий. В результате машины с ротационным приводом заняли доминирующее положение в отрасли, составляя более 99% от всего парка машин.

В настоящее время абразивная промышленность освоила серийное производство шлифкругов со скоростями резания 65...120 м/с [6], применение которых способно существенно повысить производительность процесса шлифования. Для высокоскоростных шлифкругов потребовались машины с повышенной частотой вращения и, одновременно, с увеличенной мощностью привода. Производители отреагировали на эту тенденцию созданием более высокооборотных шлифмашин, но сохранили в качестве привода ротационно-пластинчатый двигатель. Так, в каталогах фирмы Atlas Copco появились ротационные машины LSF12 S400-1 с частотой вращения 40 000 мин⁻¹ при мощности 0,36 кВт и LS F19 S460E-1/R с частотой вращения 46 000 мин⁻¹ при мощности 0,51 кВт [5, с.28]. В ГОСТ [1] машин с подобными соотношениями скорости вращения и мощности не предусматривались.

Для эффективной работы высокоскоростных шлифкругов при частоте вращения машины 40...45 000 мин⁻¹ требуется повысить мощность до 0,7...1,1 кВт. В настоящее время ни одна фирма в мире не имеет ротационных машин с таким сочетанием

параметров. Следует отметить, что одновременное увеличение частоты вращения и мощности для ротационно-пластинчатого двигателя в принципе весьма проблематично, поскольку для повышения мощности требуется увеличение диаметра ротора, а для повышения частоты вращения, наоборот, его уменьшение. В то же время достижение таких параметров в машинах с турбинным приводом не вызывает серьезных затруднений. Так, машина 210SV (фирма Air Turbine Tools) при 40 000 мин⁻¹ имеет мощность 0,66 кВт [2, с.7], а машина 230XDM при 40 000 мин⁻¹ – мощность 1,04 кВт [2, с.8].

Таким образом, можно констатировать, что ротационные машины не используют в полной мере преимущества высокоскоростных шлифкругов, что, естественно, сдерживает их производство и широкое применение.

Признанным мировым лидером в производстве пневмоинструмента является шведская фирма Atlas Copco. Анализ данных из каталогов пневмоинструмента Atlas Copco за 2001, 2011 и 2020 год показал, что параметры машин с ротационным приводом в течение последних 20 лет практически не изменились. Это дает основания считать, что машины с ротационно-пластинчатым приводом приблизились к пику своего развития и дальнейшие вложения в их совершенствование в настоящее время не актуальны. На рисунке 1 представлен график выражающий соотношение мощности и частоты вращения машин модельного ряда по ГОСТ [1]. На нем можно выделить большую область сочетания параметров, не встречающихся в существующих моделях машин. Такая ситуация характерна для подавляющего большинства производителей ручных пневматических шлифовальных машин с ротационным приводом.

Рисунок 1 - График соотношения мощности и частоты вращения машин модельного ряда по ГОСТ [1]

Занять свободную нишу (рисунок 1) могут модели с турбинным приводом.

Машины с турбинным приводом имеют более благоприятные перспективы развития, поскольку одновременное повышение мощности и частоты вращения для них не представляет особых трудностей: для повышения мощности турбины достаточно увеличить площадь сопел, а увеличение частоты вращения ротора ограничено только быстроходностью подшипников. Одновременно с этим, применение турбинного привода способно уменьшить вес и габариты машин и снизить уровень вибрации.

Указанные преимущества турбинного привода делают его наиболее перспективным для применения в ручных шлифовальных пневматических машинах. В настоящее время серийный выпуск машин с турбоприводом освоен фирмами Air

Turbine Tools (США) и Deprag (Германия-Чехия), однако их доля в парке ручных шлифовальных пневматических машин не превышает одного процента. Проведенный анализ показал, что, несмотря на использование этими фирмами различных типов турбоприводов: фирма Air Turbine Tools использует центробежную реактивную турбину, а фирма Deprag – осевую турбину с двумя ступенями скорости, в обоих случаях основным барьером на пути продвижения машин является именно тип турбины. Далее рассмотрим конкретные причины, препятствующие широкому распространению машин с турбоприводом этих фирм.

Единственная фирма, специализирующаяся на выпуске шлифовальных пневматических машин исключительно с турбинным приводом – это фирма Air Turbine Tools. В качестве привода применяется центробежная реактивная турбина типа «сегнерово колесо» [7], которая имеет самую пологую характеристику крутящего момента среди всех известных типов турбин. В результате увеличение нагрузки на ротор приводит к остановкам машины, несмотря на наличие регулятора частоты вращения. Это затрудняет работу оператора, особенно на операциях чернового (грубого) шлифования, когда требуется снимать большой объем металла. При этом фирма поддерживает достаточно высокий уровень продаж, обусловленный низкой стоимостью машин, достигаемой, в первую очередь, за счет изготовления основных элементов турбопривода из пластмассы литьем в прессформах.

В шлифмашинах фирмы Deprag используется осевая турбина с двумя ступенями скорости (рисунок 2), изготовление лопаточных венцов которой выполняется методом пятикоординатного фрезерования в диске рабочего колеса. Для достижения высокого КПД в осевой турбинной ступени необходимо обеспечивать предельно малые радиальные зазоры между лопаточными венцами и прилегающими к ним цилиндрическими поверхностями. Указанные факторы обуславливают высокую стоимость машин (порядка \$ 1000), что препятствует их широкому распространению.

Рисунок 2 – Осевая турбина шлифмашины фирмы Deprag

Проанализируем возможность создания турбинного привода для ручных пневматических шлифовальных машин, свободного от рассмотренных выше недостатков. Решением этой проблемы может быть применение многоступенчатых турбин с осевым расположением радиальных ступеней. Многоступенчатые турбины со ступенями давления, в принципе, могут быть скомпонованы как из одноступенчатых турбин, так и из турбин с двумя ступенями скорости. При равной частоте вращения ротора во втором варианте общее число всех лопаточных венцов будет в два раза меньше. Поэтому, оптимальной для достижения заданной частоты вращения является многоступенчатая турбина, в которой ступени давления представляют собой турбины с двумя ступенями скорости.

Основными задачами создания такой турбины являются:

- разработка эффективной и технологичной базовой ступени;
- разработка эффективных уплотнений между ступенями.

Реализовать поставленные задачи возможно путем использования в качестве базовой ступени турбины по патенту на полезную модель (ПМ) [8].

Основной отличительной особенностью турбины является установка центробежного 2 и центростремительного 4 рабочих лопаточных венцов на двух сторонах единого диска рабочего колеса (рисунок 3). Внутри кольцевой решетки рабочего колеса 2 установлен сопловой аппарат 3. Промежуточный направляющий аппарат (ПНА) 1 размещен концентрично рабочему колесу с охватом его по периферии.

а) – ПНА (продольное сечение); б) – вид со стороны неподвижного соплового аппарата; в) – вид со стороны венца центростремительных рабочих лопаток;

1 – ПНА; 2, 4 – рабочие лопаточные венцы; 3 – сопловой аппарат

Рисунок 3 – Базовая ступень турбины [8]

Преимущества базовой ступени, фотография которой представлена на рисунке 4, обусловлены следующими конструктивными особенностями:

- применение турбинных ступеней радиального типа позволяет изготавливать их высокотехнологичными методами литья под давлением в прессформе;
- имеется конструктивная возможность крепления к рабочим лопаткам бандажного кольца, дополнительно снижающего утечки потока из лопаток;
- течение газа через рабочие лопатки происходит в одной плоскости, что определяет низкие потери течения;
- Рабочее колесо располагается концентрично внутри кольца ПНА, что обеспечивает простую и высокотехнологичную процедуру сборки.

Рисунок 4 – Фотография базовой ступени турбопривода

Задача создания высокоэффективного уплотнения между ступенями может быть решена на базе применения конструктивной схемы по патенту на ПМ [9], предусматривающей центрирование заостренных гребней уплотнения непосредственно по валу. В разработанной конструкции (рисунок 5) диафрагма 1, содержащая каналы для прохода воздуха 2 между ступенями, прижата к уступу корпуса шлифовальной машины. К диафрагме крепится диск 3 с заостренным гребнем, сопряженным с поверхностью вала 4. Конструкция позволяет добиться минимально возможного по условиям машиностроительного производства зазора между гребнем и валом, величина которого не превышает нескольких сотых долей миллиметра.

Рисунок 5 – Уплотнения диафрагмы [9]

Применение многоступенчатых турбин значительно расширяет перспективы использования шлифовальных машин за счет возможности создания модельной линии машин с диапазоном изменения частоты вращения $20\,000 \dots 90\,000 \text{ мин}^{-1}$ и мощности $0,2 \dots 2,0 \text{ кВт}$, удовлетворяющей большинству потребностей обрабатывающей промышленности.

1. ГОСТ 12634-80. Машины ручные шлифовальные пневматические. Технические условия. Официальное издание М.: Издательство стандартов, 1985 год, 6 с.
2. Air turbine tools. Ручные пневматические шлифовальные машинки.// vetki.ru: официальный дилер в России: сайт. 2020. URL: http://www.vetki.ru/assets/files/PDFs/Vendors/AirTurbine_HandToolsSeries_RUS.pdf (дата обращения: 30.11.2020).
3. BIAХ Professional Power. Шлифовальные машины, напильники, машинки для удаления грата. Каталог// s-t-group.com: официальный дилер в России: сайт. 2020. URL: https://www.s-t-group.com/catalogs/stock/biax/Catalog_01.pdf (дата обращения: 30.11.2020)
4. Ata tools. Пневматический инструмент// instek.ru: дистрибьютер инструмента в России: сайт. 2020. URL: <https://instek.ru/f/katalog-pnevmoinstrumenta-ata-2011.pdf> (дата обращения 30.11.2020)
5. Atlas Copco. Промышленный инструмент для производства, технического обслуживания и ремонта. Каталог // Производитель инструмента: сайт. 2020. URL: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/russia/documents/9833-2001-01-f-m-bolting-2020-rus-web.pdf> (дата обращения: 30.11.2020).
6. PFERD. Инструмент для обработки поверхностей и отрезки материалов // Производитель инструмента: сайт. 2020. URL: <https://www.pferd.com/ru-ru/> (дата обращения 30.11.2020)

7. Ю.П. Кузнецов, В.Л. Химич, С.Н. Хрунков, А.Б. Чуваков, Р.А. Погодин. Исследование характеристик радиальной реактивной турбины // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. №4.
8. Кузнецов Ю.П., Чуваков А.Б. Многовенечная радиальная турбина // Патент на полезную модель RU 110132, U1. Оpubл. 10.11.2011, бюл. № 31
9. Кузнецов Ю.П., Чуваков, А.Б., Погодин Р.А. Турбомашина // Патент на полезную модель RU 193118, U1. Оpubл. 15.10.2019, бюл. № 29

Кузьмин М.В.

Теоретические основы и методика аналитического прогнозирования (на основе математической теории отношений толерантности)

*Российский государственный аграрный заочный университет
(Россия, Балашиха)*

doi: 10.18411/sr-10-08-2021-18

Аннотация

На основе математической теории отношений толерантности разработан метод прогнозирования форм рабочих органов машин до разработки законченных технических решений (на допатентном уровне), позволяющий выявить их преимущества и доказательно констатировать их работоспособность. Разработана методика прогнозирования. Прогнозирование может проводиться тремя методами: применением теории графов, использованием прототипов объектов, использованием теоремы Кальмара – Якубович. Методами аналитического прогнозирования определены перспективные рабочие органы, в том числе с.-х. машин. Экспериментально доказано, что повышение удельной производительности у решетной очистки составляет 2,5 – 3 раза, у триера 5 и более раз.

Ключевые слова: прогнозирование, толерантность, математическая теория отношений, рабочий орган, теория, прототип, методика, удельная производительность.

Abstract

Based on the mathematical theory of tolerance relations, a method has been developed for predicting the shapes of working bodies of machines before developing legal technical solutions (at the pre-patent level), which allows to reveal their advantages and to establish their operability with evidence. A forecasting technique has been developed. Forecasting can be carried out by three methods: using graph theory, using prototypes of objects, using the Kalmar-Yakubovich theorem. The methods of analytical forecasting have identified promising working bodies, including agricultural machines. It is experimentally proved that the increase in the specific productivity of sieve cleaning is 2.5-3 times, for trier 5 or more times.

Keywords: forecasting, tolerance, mathematical theory of relations, working body, theory, prototype, methodology, specific productivity.

Теоретические основы прогнозирования. Для ускорения разработки принципиально новых способов и устройств разработан метод прогнозирования, который позволяет определять общие формы рабочих органов машин до разработки законченных технических решений (на допатентном уровне), позволяющий выявить их преимущества и доказательно констатировать их работоспособность.

Поставить на научную основу решение этой задачи позволяет наличие основополагающих (фундаментальных) общностей в формах рабочих органов, являющихся (как установил В.П. Горячкин) развитием пространственного трехгранного клина [1]. С учетом этого даже принципиально новые рабочие органы находятся с известными в определенных отношениях, поэтому для решения указанной