

УДК 628.83

В.Т. Парахневич, канд. техн. наук, доц., Е.Н. Антонова**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПНЕВМОЦЕНТРОБЕЖНОГО ШАРИКОВОГО РАСКАТНИКА**

В статье дан анализ энергетических характеристик пневмоцентробежного шарикового раскатника совместно с конструктивно-технологическими решениями.

В основе конструирования любого инструмента важное значение имеют его энергетические характеристики. Анализ этих характеристик позволяет оценить его возможности, экономичность, а в отдельных случаях провести и его совершенствование. Энергетический анализ необходимо проводить совместно с конструктивно-технологическими решениями.

При анализе данного инструмента не рассматривается влияние подводящих (питающих) трубопроводов. Параметры подводящей системы постоянны (известно минимальное проходное сечение этой системы), давление воздуха в осевой полости инструмента контролируется манометром, поэтому её влияние, в данном случае, носит второстепенный характер.

Каждый килограмм поступающего воздуха обладает запасом энергии E . В инструменте она будет растрачиваться на преобразование потенциальной энергии давления в кинетическую энергию в соплах. Суммарную кинетическую энергию сопел обозначим через E_c . При этом некоторая часть преобразованной энергии будет безвозвратно потеряна ΔE_c . Кинетическая энергия струй сопел частично передаётся шарикам, которые совершают обработку детали $E_{ш}$, частично снова преобразуется в потенциальную энергию давления рабочей камеры E_k , а частично теряется за счёт этих преобразований ΔE_k . Энергия давления рабочей камеры E_k уходит на проталкивание воздуха $E_{пр}$ из рабочей камеры в атмосферу через кольцевой зазор между обрабатываемой деталью и инструментом. Описанный энергетический процесс можно представить в виде следующих уравнений сохранения энергии:

$$E = E_c + \Delta E_c,$$

где E - подведенная энергия сжатого воздуха; E_c - кинетическая энергия струй; ΔE_c - потеря энергии на преобразование энергии давления в кинетическую энергию.

В свою очередь, кинетическую энергию струй можно рассмотреть как

$$E_c = E_{ш} + E_k + \Delta E_k,$$

где $E_{ш}$ - кинетическая энергия шариков (часть ее уходит на обработку детали); ΔE_k - потери энергии в рабочей камере; E_k - кинетическая энергия давления рабочей камеры, причем $E_k = E_{пр}$; $E_{пр}$ - энергия, которая тратится на проталкивание воздуха через кольцевой зазор в атмосферу, тогда:

$$E = E_{ш} + E_{пр} + \Delta E_k + \Delta E_c. \quad (1)$$

Часть кинетической энергии шара $E_{ш}$ уходит на трение и другие потери в камере расширения $E_{тр}$, а ее основная часть - на смятие неровностей поверхности $E_{см}$.

$$E_{ш} = E_{тр} + E_{см}.$$

Для наглядности представляем графически схему преобразования энергии (рис. 1).

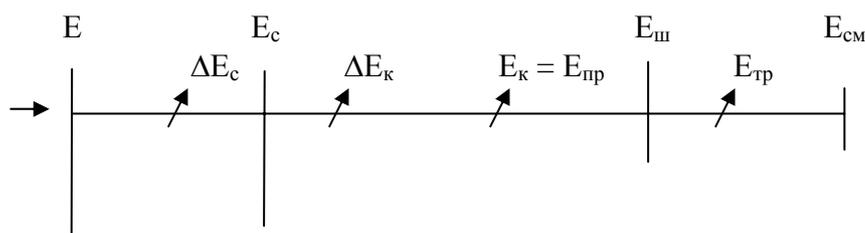


Рис. 1. Схема преобразования энергии

Если рассмотреть этот процесс в единицу времени, то получим баланс мощностей.

Поскольку необходимо получение максимального значения E_ш и наиболее эффективного воздействия на обрабатываемую деталь, то остановимся на оценке баланса энергии инструмента поэтапно.

Преобразование потенциальной энергии в кинетическую. Пренебрегая кинетической энергией подводящего воздуха в сравнении с потенциальной энергией давления и принимая процесс адиабатным, скорость выхода струи из сопла выразится известной формулой [1]:

$$U_c = \varphi \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot P \cdot \nu \cdot \left(1 - \left(\frac{P_k}{P} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right)}, \quad (2)$$

где φ - коэффициент скорости (учитывает потери энергии на её преобразование и зависит от конструкции канала (сопла)), $\varphi = 0,95 \dots 0,82$; $\kappa = 1,4$ - показатель адиабаты (для воздуха), P - давление в осевой полости инструмента, Па; ν - удельный объём поступающего воздуха, м³/кг; P_k - давление в рабочей камере, Па.

Максимальная скорость струи возникает при P_k = 0,5P.

Секундный расход воздуха Q_m, кг/с, через единичное сопло можно определить по формуле

$$Q_m = \mu \cdot S_2 \cdot \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{P_k}{\nu} \left(\left(\frac{P_k}{P} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_k}{P} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa}} \right)}, \quad (3)$$

где S₂ - выходное сечение сопла; μ - коэффициент расхода сопла ($\mu = \varphi = 0,82$ - для цилиндрических сопел).

В случае политропного процесса принимается $\kappa = n$, где n - показатель политропы. Как правило, показатель истечения через сопла принимается как адиабатный процесс. При этом наблюдается баланс массового расхода воздуха через подающий (питающий) трубопровод и через сопла:

$$Q_{m,тр} = \sum Q_{m,сопл}. \quad (4)$$

В случае критического истечения (P_k = 0,5·P) рассмотренные выше формулы (2), (3) упрощаются:

- скорость выхода струи из сопла U_{c,кр}, м/с:

$$U_{c,кр} = \varphi \sqrt{2 \left(\frac{\kappa}{\kappa} + 1 \right) \cdot P \cdot \nu}, \quad (5)$$

- максимальный массовый расход одного сопла Q_{m,кр}, кг/с:

$$Q_{m.кр} = \mu \cdot S_2 \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa+1} \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}} \cdot \frac{P}{\nu}} \quad (6)$$

Удельный объём воздуха ν , м³/кг, можно определить из уравнения Клапейрона:

$$P \cdot \nu = R \cdot T,$$

откуда

$$\nu = \frac{R \cdot T}{P} = \frac{287 \cdot 293}{0,3 \cdot 10^6} = 0,28, \quad \rho = \frac{1}{\nu} = 3,57 \text{ кг/м}^3, \quad (7)$$

где $R = 287$ Дж/(кг · К) - универсальная газовая постоянная для воздуха; $T = 293$ К ($t = 20$ °С) – абсолютная температура; P - абсолютное давление ((рассчитано для 0,2 МПа избыточного давления) $P = P_{атм} + P_{изб} = 0,1 + 0,2 = 0,3$ МПа).

Аналогично удельный объём ν_{κ} , ν_o , м³/кг, и плотность для рабочей камеры и окружающей среды ρ_{κ} , ρ_o , кг/м³:

$$\nu_{\kappa} = \frac{287 \cdot 293}{0,2 \cdot 10^6} = 0,42; \quad \rho_{\kappa} = 2,38; \quad (8)$$

$$\nu_o = \frac{287 \cdot 293}{0,1 \cdot 10^6} = 0,84; \quad \rho_o = 1,19. \quad (9)$$

Истечение через кольцевой зазор. Сопротивление кольцевого зазора должно обеспечить давление в рабочей камере, равное половине давления в подводящем (питающем) трубопроводе. Отклонение в ту или другую сторону приводит к уменьшению скорости воздуха, выходящего из сопла.

По характеру уравнения истечение через щель можно в некотором приближении принять адекватным при истечении через сопла. Характеристики воздуха при истечении через щель будут отличаться от характеристик при истечении через сопла. Давление уменьшилось в два раза, удельный объём возрос (с 0,28 до 0,42 м³/кг) в полтора раза. Следовательно, массовый расход не изменится, а объёмный расход возрастет.

Ввиду постоянства массового расхода можно записать

$$Q_m = \frac{S_1 \cdot V_1}{\nu_1} = \frac{S_2 \cdot V_2}{\nu_2}, \quad (10)$$

где S_1 и S_2 – площади сечений, м²; V_1 и V_2 – скорость в этих сечениях, м/с; ν_1 и ν_2 – удельные объёмы в этих сечениях, м³/кг; $S_1 \cdot V_1 = Q_1$ - объёмный расход в первом сечении; $S_2 \cdot V_2 = Q_2$ - объёмный расход во втором сечении.

$$\frac{Q_1}{\nu_1} = \frac{Q_2}{\nu_2} \quad \text{или} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2}. \quad (11)$$

Объёмные расходы прямо пропорциональны удельным расходам.

При допущении, что скорость истечения через кольцевой зазор будет такая же, как и через сопла, сечения будут пропорциональны удельным объёмам (обратно пропорциональны плотности):

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{или} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (12)$$

При истечении через кольцевой зазор необходимо обеспечить потери давления в нём, равные $0,5P$ (половине исходного давления), для пропуска одинакового массового расхода, как и через сопла. Это можно достичь или за счёт изменения площади щели ($S = \pi \cdot D \cdot \delta$, где D – диаметр заготовки; δ – величина зазора), точнее величины зазора δ , или за счёт изменения сопротивления щели (истечение через насадки, малое отверстие, лабиринт).

Процессы, происходящие в камере расширения. Сжатый воздух из центрального отверстия корпуса инструмента, попадая в камеру расширения из сопел, воздействует на деформирующие шары и передает им кинетическую энергию. Шары получают орбитальное вращательное движение, перекачиваясь по обрабатываемой поверхности.

Кроме вращательного движения, шары совершают осциллирующее и радиальное перемещение по отношению к обрабатываемой поверхности в пределах осевого и радиального зазоров между шарами и кольцами, образующими камеру расширения. Кинематика данного процесса представлена в работе [3].

Часть энергии шаров расходуется на смятие неровностей обрабатываемой поверхности, а часть на трение как между самими шарами, так и между шарами и кольцами, образующих камеру расширения и др.

Экономические характеристики инструмента, на наш взгляд, можно оценить по величине снятия неровностей поверхности, т.е. с помощью показателей шероховатости поверхностей.

Характер взаимодействия шаров с обрабатываемой поверхностью будет зависеть:

1) от расположения сопел относительно орбитальной оси вращения шаров и относительно оси инструмента.

При максимально допустимом расстоянии от оси сопла до оси инструмента (L) для рассматриваемой конструкции инструмента тангенциальные составляющие вектора абсолютной угловой скорости и вектора силы, с которой шар воздействует на обрабатываемую поверхность, также имеют максимальное значение.

При увеличении осевого зазора между шарами и кольцами с соплами или смещении осей сопел в осевом направлении от плоскости движения шаров увеличиваются осевые осциллирующие движения шаров, способствующие большему выглаживающему эффекту в процессе обработки поверхностей и большим энергетическим потерям на трение [3].

При уменьшении расстояния L увеличиваются радиальные составляющие рассматриваемых векторов и при L , равном нулю, они имеют максимальное значение, а тангенциальные составляющие в этом случае равны нулю, т.е. вращение шаров отсутствует;

2) от соотношения диаметра сопел и диаметра шаров (при постоянном подводящем давлении).

Давление струи сопла определяется согласно зависимости:

$$P_s = \frac{V_1^2}{2 \cdot v_1},$$

где V_1 – скорость потока воздуха на выходе из сопел, м/с; v_1 – удельный объем воздуха в некотором сечении, м³/кг;

3) от формы и количества сопел. Обычно рассматривается кинематика сопел для получения максимального расхода. Это, как правило, сопла, где происходит увеличе-

ние скорости с уменьшением давления и увеличение плотности и удельного объема.

Каналы, где скорость уменьшается, а давление растет, называются диффузорами, именно они характерны для нашего случая [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Башта, Т. М.** Гидропривод и гидропневмоавтоматика : учебник для специальности «Гидропневматика и гидропривод» вузов / Т. М. Башта. - М. : Машиностроение, 1972. - 320 с. : ил.
2. **Юшкин, В. В.** Гидравлика и гидравлические машины / В. В. Юшкин. - Мн. : Выш. шк., 1974. - 265 с. : ил.
3. **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под. ред. П. И. Ящерицына. – Мн. : Навука и тэхніка, 1995. – 304 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 04.11.2005

V.T. Parakhnevich, E.N. Antonova
Power analysis of the pneumocentrifugal ball rolling
Belarusian-Russian University

In the article the analysis of power characteristics of the pneumocentrifugal ball rolling together with the design and technological solutions is given.