РАЗДЕЛ V. ЭНЕРГЕТИКА

Герасимова О.А., Пяткин Д.Б., Турбаевский С.А.

Теоретическое обоснование влияния параметров впускного отверстия в насосе на его выходные характеристики*ФГБОУ ВО «Великолукская ГСХА» кафедра «Механизация животноводства и применение электрической энергии в сельском хозяйстве»
(Россия, Великие Луки)*

doi: 10.18411/lj-06-2020-42

ids: lj-06-2020-42

Аннотация

Процесс создания разрежения вакуумным насосом характеризуется непостоянными по времени, сложными газодинамическими явлениями, которые не поддаются строгому аналитическому описанию. Только при сочетании теории с экспериментом возможен подход к пониманию полной физической картины этого процесса. На первом этапе нашего исследования мы остановили свое внимание на конструкции пластинчато-роторного вакуумного насоса и теперь нам предстоит более детальное изучение всех процессов с целью уточнения методики расчета и определения оптимальных значений рабочих параметров, улучшающих его характеристику. Несмотря на ряд собственных преимуществ, следует не забывать о том, что эффективность функционирования и динамика данных машин зависит от целого ряда технико-технологических факторов. Здесь следует отметить такие факторы, как, например, характер термодинамических процессов в камерах привода, параметры сжатого воздуха на его входе, трение пластин о статор, конструктивные размеры и т.д. Однако особый интерес представляют те факторы, которые наименее исследованы. В нашем случае мы остановились на теоретическом исследовании влияния законов воздушного распределения, а именно величины площадей поперечного сечения и формы подводящих каналов входных отверстий насоса пластинчатого типа на механические и энергетические показатели. Так же в работе рассмотрен один из основных рабочих параметров насоса – частота вращения вала ротора, оказывающая значительное влияние на его характеристику.

Ключевые слова: вакуумпровод, вакуум-силовая установка частота вращения вала ротора, термодинамика.

Abstract

The process of creating a vacuum vacuum pump is characterize by time-varying, complex gas-dynamic phenomena that do not lend themselves to a strict analytical description. Only by combining theory with experiment is an approach possible to understand the full physical picture of this process. At the first stage of our research, we focused on the design of the plate-rotor vacuum pump and now we have to study all the processes in more detail in order to clarify the calculation method and determine the optimal values of operating parameters that improve its performance. Despite a number of its own advantages, we should not forget that the performance and dynamics of these machines depends on a number of technical and technological factors. Here it is necessary to note such factors as, for example, the nature of thermodynamic processes in the drive chambers, the parameters of compressed air at its inlet, the friction of the plates on the stator, the design dimensions, etc. However, the factors that are least studied are of particular interest. In our case, we focused on the theoretical study of the influence of the laws of air distribution, namely, the size of the cross-section area and the shape of the supply channels of the inlet holes of the plate-type pump on the mechanical and energy indicators. The paper also considers one of the main operating

parameters of the pump-the speed of rotation of the rotor shaft, which has a significant impact on its characteristics.

Keywords: vacuum line, vacuum power plant rotation speed of the rotor shaft, thermodynamics.

Для начала разберемся, как влияет форма и сечение впускного отверстия на давление всасывания насоса и непосредственно на коэффициент подачи и производительность системы. Для этого рассмотрим режимы течения газов через отверстия.

В вакуумной технике, как и в гидродинамике, рассматривается несколько режимов течения газа, зависящих от степени создаваемого разрежения. Чаще всего это вязкостный, молекулярный и молекулярно-вязкостный режимы.

Степень вакуума принято определять значением безразмерного параметра K_{Π} , называемым критерием Кнудсена [1]

$$K_{\Pi} = \frac{\bar{\lambda}}{d}, \quad (1)$$

где $\bar{\lambda}$ – средняя длина свободного пути молекул воздуха, м;

d – диаметр входного элемента, м.

В нашем случае состояние воздуха при $K_{\Pi} \ll 1$ соответствует низкому вакууму. Исходя из этого условия в дальнейшем был рассмотрен вязкостный режим.

Основным параметром любого проводящего элемента вакуумной системы является его проводимость U , зависящая от степени вакуума. При повышении давления проводимость элементов в низком вакууме растет.

В качестве отверстия рассмотрим отрезок трубопровода, длина которого, значительно меньше диаметра ($l \leq 0,01d$). Трубопровод расположен в стенке, разделяющей бесконечно большие объемы (рисунок 1 а).

а) – соединение бесконечных объемов; б) – соединение бесконечного и ограниченного объемов
Рисунок 1 – Формы отверстий вакуум-проводящей системы

Запишем закон сохранения энергии для вязкостного режима течения воздуха при адиабатическом процессе. Выражение можно представить в виде равенства приращения кинетической энергии воздуха к изменению его энтальпии [2]

$$G \frac{v_{\text{газ.2}}^2}{2} = G(I_1 - I_2), \quad (2)$$

где G – поток воздуха, протекающий через отверстие, $\text{м}^3/\text{Па} \cdot \text{с}$;

$v_{\text{газ.2}}$ – скорость воздуха на выходе из отверстия, м/с ;

I_1 и I_2 – энтальпии воздуха до и после прохождения отверстия.

Исходя из того, что

$$I = c_p \cdot T, \quad (3)$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, К ;

T – температура воздуха, К .

Уравнение сохранения энергии (3) можно записать как

$$v_{\text{газ.2}}^2 / 2 = c_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right), \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – температура воздуха до и после прохождения отверстия, К .

С учетом того, что

$$pV = RT/M, \quad (5)$$

$$R/M = c_p - c_v, \quad (6)$$

$$\gamma = c_p / c_v, \quad (7)$$

$$V_1 / V_2 = (p_2 / p_1)^{1/n}, \quad (8)$$

где p – давление воздуха, Па ;

V – удельный объем воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$;

R – универсальная газовая постоянная, $R=8,31 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$;

M – молекулярная масса воздуха, $M = 29 \text{ кг}/\text{кмоль}$;

c_v – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, К ;

n – показатель адиабаты (для воздуха $n = 1,4$ [2]).

Преобразуем уравнение сохранения энергии (8)

$$v_{\text{газ.2}} = \sqrt{\frac{2n}{n-1} p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]}, \quad (9)$$

где p_1 и p_2 – давление воздуха до и после прохождения отверстия, Па .

Поток воздуха через отверстие (кг/с) с учетом записанного выражения для $v_{\text{газ.2}}$

$$G = v_{\text{газ.2}} A / V_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]} \cdot \sqrt{p_1 / V_1} \cdot A, \quad (10)$$

где A – площадь сечения отверстия м^2 .

Выражение (10) можно переписать в следующем виде

$$G = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]} \cdot A \cdot p_1 \sqrt{M/(RT_1)}. \quad (11)$$

В условных единицах массы $\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ выражения (11) для газового потока будет иметь следующий вид

$$Q = (GRT_1)/M = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/n} \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]} \cdot A \cdot p_1 \sqrt{(RT_1)/M}. \quad (12)$$

При вязкостном режиме течения воздуха происходит уменьшение отношений давления p_2/p_1 до критического значения (скорости звука) и постепенное увеличение

скорости воздуха после прохождения отверстия. Для адиабатического процесса. Для воздуха при $n = 1,4$ получим

$$U_{\text{О.Вяз.}} = 241 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0,7} \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0,3}} \cdot \frac{A}{1 - (p_2 / p_1)} . \quad (13)$$

Если в полученное выражение ввести функцию [3]

$$F(r) = \frac{\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0,7} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0,3} \right)^{0,5}}{1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)} , \quad (14)$$

то можно построить следующий график для расчета проводимостей отверстий при вязкостном режиме (рисунок 2).

Рисунок 2 – График функции $F(p_2/p_1)$ для расчета проводимостей отверстий при вязкостном режиме течения воздуха [3]

В нашем случае (для воздуха, при температуре 293К и $M=29$ кг/кМоль), проводимость отверстия будет

$$U_{\text{О.Вяз.}} = 766 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0,7} \sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0,3}} \frac{A}{1 - (p_2 / p_1)} , \text{ при } \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \geq 0,528; \quad (14)$$

Если отношение $(p_2/p_1) < 0,1$, то расчет ведется методом последовательных приближений. При проектировочном расчете с большим запасом можно принять, в первом приближении, что $U_{\text{Вяз.}}=200A$.

Энергетическая характеристика пластинчатого вакуумного насоса зависит не только от его технологических и конструктивных параметров, но и от качества изготовления деталей, выполнения монтажных работ и теплового зазора.

1. Яковенко Н.А. Использование водокольцевых вакуумных насосов для доильных установок / Н.А. Яковенко, А.И. Оберемченко, И.К. Хлебников А.И. // Техника в сельском хозяйстве. - 1985. - №9. - с.22 - 24.
2. Вагин Б.И. Расчет вакуумных систем доильных установок / Б.И. Вагин, Д.Б. Пяткин // Сельский механизатор. 2007. № 1. с. 20.
3. Прокофьев Ю.В. О расчете внешней характеристики жидкостнокольцевого вакуумного насоса / Ю.В. Прокофьев // Физика и техника вакуума. Сб. науч. статей. Издательство Казанского университета, 1974. – 209-216.