

Среднее повышение температуры жидкости, выходящей из насоса, определяется из соотношения:

$$cm_0\Delta t = p_в S_n P_{н.н} \left( \frac{1}{p_в - P_{н.н}} - \frac{1}{P_n - P_{н.н}} \right) t_{раб},$$

где  $m_0$  – расход жидкости в насосе, кг/с.

Находим повышение температуры порции жидкости, проходящей через насос:

$$\Delta t = \frac{p_в S_n P_{н.н} \left( \frac{1}{p_в - P_{н.н}} - \frac{1}{P_n - P_{н.н}} \right) t_{раб}}{cm_0}.$$

Тогда объем жидкости в водосборнике:

$$V = \frac{m_t p_в S_n P_{н.н} \left( \frac{1}{p_в - P_{н.н}} - \frac{1}{P_n - P_{н.н}} \right) t_{раб}^2}{\rho c m_0 (t_{дон} - t_{oc})}.$$

Подставляя данные из таблицы 1, при максимальной температуре окружающей среды 30 °С, водокольцевого насоса – 70 °С получим:

$$V_{30}^{70} = \frac{0,1 \cdot 0,02 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 4000 \left( \frac{1}{50000 - 4000} - \frac{1}{100000 - 4000} \right) \cdot (10^4)^2}{1000 \cdot 4190 \cdot 12 \cdot (70 - 30)} \rightarrow V = 0,250 \text{ м}^3.$$

Объем емкости для оборотной воды для эффективной работы водокольцевого вакуумного насоса ВВН-70 в процессе доения коров в течение трех часов в летнее время должен составлять не менее 250 литров.

### Заключение

Разработана математическая модель водосборника водокольцевого вакуумного насоса, учитывающая режимы работы доильных установок (величину рабочего вакуума, температуру окружающей среды и продолжительность дойки) и конструктивные параметры (быстроту действия и расход жидкости) насоса.

01.07.2016

### Литература

1. Использование водокольцевых вакуумных насосов для доильных установок / Н.А. Яковенко [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 1985. – № 9. – С. 22–24.
2. Яковенко, Н.А. Использование водокольцевых вакуумных насосов для доильных установок / Н.А. Яковенко, А.И. Оберемченко, И.К. Хлебников // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – № 3.
3. Вакуумная техника. Справочник / Е.С. Фролов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 359 с.

УДК 637.118

**М.В. Колончук, Г.Г. Тычина, Ф.Д. Сапожников**  
(УО «БГАТУ»,  
г. Минск, Республика Беларусь)  
**В.К. Клыбик**  
(РУП «НПЦ НАН Беларуси  
по механизации сельского хозяйства»,  
г. Минск, Республика Беларусь)

**РАСЧЕТ ДЛИНЫ РОТОРА  
ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ  
ДЛЯ ДОИЛЬНЫХ  
УСТАНОВОК**

### Введение

При конструировании вакуумных насосов практическое значение имеет правильный выбор длины ротора [1–4]. Быстрота действия ротационного вакуумного

насоса пропорциональна длине ротора. Основным критерием, определяющим длину ротора, является его диаметр [2–4]. Границы соотношения длины и диаметра ротора для вакуумных насосов, предназначенных для работы с доильными установками, составляют широкий диапазон [4]:

$$L/D = 0,5 \dots 1,8,$$

где  $L$  – длина ротора, м;  
 $D$  – диаметр ротора, м.

При выборе этого отношения для пластинчатых вакуумных насосов малой производительности придерживаются нижнего предела. Отношение  $L/D = 1,0$ , рекомендуемое для пластинчатых вакуумных насосов производительностью  $40 \text{ м}^3/\text{ч}$ , окупается меньшей металлоемкостью. Однако при уменьшении длины ротора повышается относительная величина утечек в торцах ротора. Увеличение отношения  $L/D$  повышает также вероятность защемления пластины в пазу ротора.

Рекомендуют при конструировании водокольцевых насосов отношение длины ротора и его диаметра принимать равным  $1,25 \dots 1,40$  [3]. При выборе длины ротора тоже приходится сталкиваться с рядом ограничений. Во-первых, при большом диаметре ротора увеличивается момент, изгибающий лопатку ротора. Во-вторых, при малейшем перекосе ротора концы лопаток начинают задевать боковые крышки вакуумного насоса. В-третьих, с увеличением диаметра ротора увеличивается окружная скорость концов лопаток, что вызывает вспенивание жидкостного кольца. Поэтому приходится снижать угловую скорость ротора, и, как следствие, производительность насоса. Большие значения отношения  $L/D$  увеличивают металлоемкость вакуумных насосов [4]. При постоянном диаметре ротора ротационных насосов с увеличением его длины производительность возрастает, но непропорционально длине. Причиной этого является сопротивление в нагнетательном окне – сжатый воздух не успевает выходить при выталкивании из ячеек ротора и частично перетекает из полости нагнетания во всасывающую полость [1–3]. Обоснованные критерии и методика расчета длины ротора вакуумных насосов отсутствуют. Решение же этой проблемы имеет большое значение при конструировании насосов. Цель работы – обоснование критерия рациональной длины ротора ротационных вакуумных насосов (выявить истинный вид зависимости длины ротора от основного принятого критерия – диаметра ротора).

### Основная часть

Одним из критериев для расчета длины ротора принимают среднюю скорость воздушного потока, которая должна составлять  $20 \text{ м}^3/\text{с}$  [3]. Средняя скорость воздушного потока определяется выражением:

$$g = \frac{L}{t}, \quad (1)$$

где  $g$  – средняя скорость движения воздуха;  
 $L$  – длина ротора, м;  
 $t$  – время выталкивания воздуха из ячейки ротора, с.  
 Отсюда

$$L = g t .$$

Продолжительность выталкивания воздуха определяется величиной угла нагнетания. Этот угол определяется как

$$\varphi_{\text{нагн}} = \omega t , \quad (2)$$

где  $\varphi_{\text{нагн}}$  – угол нагнетания, рад.;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора, рад./с.

Подставляя значение формулы (2) в формулу (1), получим:

$$L = g \frac{\varphi_{\text{нагн}}}{\omega} .$$

Таким образом, длина ротора определяется величиной угла нагнетания (пропорционально) и частотой вращения ротора (обратно пропорционально). Подставляя в полученное выражение значение  $\omega = 2\pi n$ , получим:

$$L = g \frac{\varphi_{\text{нагн}}}{2\pi n},$$

где  $n$  – частота вращения ротора,  $c^{-1}$ .

Угол нагнетания определяется зависимостью:

$$\varphi_{\text{нагн}} = \pi - \varphi_{\text{сж}} - \varphi_{\text{защм}},$$

где  $\varphi_{\text{сж}}$  – угол сжатия, *рад.*;

$\varphi_{\text{защм}}$  – угол заземленного пространства, *рад.*

Угол заземленного пространства равен углу между лопатками:

$$\varphi_{\text{защм}} = \frac{2\pi}{z},$$

где  $z$  – число лопаток, *шт.*

При угле сжатия, равном 90 градусов:

$$\varphi_{\text{нагн}} = \pi - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{z} \rightarrow \varphi_{\text{нагн}} = \pi \left( \frac{z-4}{2z} \right) \rightarrow \varphi_{\text{нагн}} = \frac{3}{8}\pi.$$

Тогда, учитывая, что частота вращения ротора ротационных насосов для доильных установок составляет  $25 c^{-1}$ , число лопаток насоса ВВН-70 равно 16 и скорость воздушного потока  $25 м/с$ , получим:

$$L = g \frac{3}{2 \cdot 8 \cdot n} \rightarrow L = \frac{25}{2 \cdot 25} \cdot \frac{3}{8} \rightarrow L = 0,19 \text{ м}.$$

При угле сжатия, равном 75 градусов:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{нагн}} &= \pi - \frac{5\pi}{12} - \frac{2\pi}{z} \rightarrow \varphi_{\text{нагн}} = \frac{1}{12}\pi \left( \frac{7z-24}{z} \right) \rightarrow \\ &\rightarrow \varphi_{\text{нагн}} = \frac{1}{12}\pi \left( \frac{7 \cdot 16 - 24}{16} \right) \rightarrow \varphi_{\text{нагн}} = \frac{11}{24}\pi. \end{aligned}$$

Тогда длина ротора

$$L = \frac{11}{48} \rightarrow L = 0,22 \text{ м}.$$

При угле сжатия 60 градусов:

$$\varphi_{\text{нагн}} = \pi - \frac{\pi}{3} - \frac{2\pi}{z} \rightarrow \varphi_{\text{нагн}} = \frac{2}{3}\pi \left( \frac{z-3}{z} \right) \rightarrow \varphi_{\text{нагн}} = \frac{13\pi}{24}.$$

Тогда длина ротора

$$L = \frac{13}{48} \rightarrow l = 0,27 \text{ м}.$$

Таким образом, зная скорость воздушного потока, можно оценить длину ротора. Однако ее численное значение можно определить, лишь зная быстроту действия насоса и площадь сечения нагнетательного канала. Эти данные можно получить только после эксперимента.

Поэтому критерием определения длины ротора принято минимальное значение функции

$$S + U \rightarrow \min,$$

где  $S$  – быстрота действия насоса,  $м^3/с$ ;

$U$  – проводимость нагнетательного канала,  $м^3/с$ .

Быстрота действия вакуумного насоса определяется по выражению:

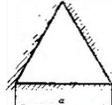
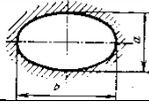
$$S = 4\pi eRLn, (Bm),$$

где  $R$  – радиус корпуса пластинчатого насоса или внутренней поверхности жидкостного кольца ( $m$ );

$e$  – эксцентриситет,  $m$ .

Нагнетательное окно и, соответственно, нагнетательный канал насоса, имеют серповидную форму. Проводимость трубопровода с молекулярным режимом течения воздуха зависит от его конфигурации. Она прямо пропорциональна третьей степени диаметра трубопровода (таблица 1) и обратно пропорциональна длине ротора. Математически определены лишь проводимости нескольких форм трубопроводов – круглого, прямоугольного, треугольного и овального сечений (таблица 1).

**Таблица 1. – Формулы для расчета проводимости трубопроводов ( $U$  выражено в  $m^3/c$ ; геометрические размеры  $d, a, b$  – в метрах;  $f$  – коэффициент)**

Виды сечений трубопроводов	Рисунок	Формула
Круг диаметром $d$		$U = 121 \frac{d^3}{L}$
Прямоугольник $a \geq b$		$U = 398f \frac{a^2b^2}{L}$
Равносторонний треугольник; $a$ – сторона треугольника		$U = 48,1 \frac{a^3}{L}$
Эллипс; $a$ – большая, $b$ – малая оси эллипса		$U = 171 \frac{a^2b^2}{\sqrt{a^2 + b^2}L}$

Поэтому нагнетательный канал представлен в виде трубопровода круглого сечения. Площадь поперечного сечения этого цилиндрического канала принята равной площади поперечного сечения канала с серповидным сечением. Для круглых трубопроводов с молекулярным течением воздуха проводимость определяется из выражения:

$$U = 121 \frac{D^3}{L}.$$

Подставляя математические выражения составляющих, получим:

$$4\pi eRLn + 121 \frac{D^3}{L} \rightarrow \min.$$

Дифференцируя, получим:

$$4\pi eRn = \frac{121D^3}{L^2}.$$

Откуда

$$L = \sqrt{\frac{121 \cdot D^3}{4\pi eRn}}.$$

Расчет геометрического параметра серповидного сечения нагнетательного окна представляет трудности. Чтобы каким-то образом упорядочить размер и форму сечения для возможности дальнейших расчетов, принято заменять серповидную форму нагнетательного окна цилиндрической, сохраняя равенство площадей. Площадь серповидного треугольника

$$S = \frac{1}{2}(r\varphi_{нагн}) \cdot e \rightarrow S = \frac{1}{2} \left( 4e \cdot \frac{\pi}{2} \right) e \rightarrow S = \pi e^2,$$

где  $r$  – радиус втулки ротора водокольцевого насоса,  $m$ .

Площадь сечения цилиндрического канала

$$S = \frac{\pi D^2}{4}.$$

Приравнивая, получим:

$$\pi e^2 = \frac{\pi D^2}{4} \rightarrow D^2 = 4e^2 \rightarrow D = 2e.$$

Или

$$L = \sqrt{\frac{121D^3}{4\pi e R n}} \rightarrow L = \sqrt{\frac{121(2e)^3}{4\pi e R n}} \rightarrow L = 11\sqrt{2}e\sqrt{\frac{1}{\pi R n}}. \quad (3)$$

Таким образом, видно, что длина ротора пропорциональна величине эксцентриситета и обратно пропорциональна корню квадратному из величины частоты вращения ротора. Очевидно, что тихоходные ротационные насосы требуют более длинных роторов, а высокооборотные – коротких. Учитывая, что у водокольцевого вакуумного насоса  $R \approx 4e$ , подставив это соотношение в формулу (3), получим при  $n = 25 \text{ с}^{-1}$ :

$$L = 11e\sqrt{\frac{2}{\pi 4en}} \rightarrow L = \frac{11}{5} \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) \sqrt{\frac{e}{\pi}} \rightarrow L \approx \sqrt{e}.$$

Подставив значение эксцентриситета ( $e \approx 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ) для насоса ВВН-70, получим (таблица 2):

$$L \approx \sqrt{e} \rightarrow L \approx \sqrt{15 \cdot 10^{-3}} \rightarrow L \approx 1,25 \cdot 10^{-1} \text{ м} \rightarrow L \approx 125 \text{ мм}.$$

**Таблица 2. – Длины роторов насосов**

Марка насоса	Эксцентриситет, м	Расчетная длина ротора, м	Фактическая длина ротора, м
РМК-2	$15 \cdot 10^{-3}$	125	110
РМК-3	$27 \cdot 10^{-3}$	160	160
РМК-4	$48 \cdot 10^{-3}$	220	260
ВВН-70	$15 \cdot 10^{-3}$	125	120

Как видно из таблицы 2, рациональная длина ротора для насоса ВВН-70 составляет 125 мм.

### Заключение

Разработана математическая модель длины ротора ротационного вакуумного насоса, учитывающая режимы работы (частоту вращения ротора) и конструктивные параметры (угол нагнетания и эксцентриситет) насоса. Длина ротора пропорциональна корню квадратному из величины эксцентриситета насоса.

01.07.2016

### Литература

1. Вакуумная техника: справочник / Е.С. Фролов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 359 с.
2. Ротационные компрессоры / А.Г. Головинцов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1964. – 315 с.
3. Тетерюков, В.И. Ротационные вакуум-насосы и компрессоры с жидкостным поршнем / В.И. Тетерюков. – М.: Машгиз, 1960. – 251 с.
4. Мжельский, Н.И. Вакуумные насосы для доильных установок / Н.И. Мжельский – М.: Машиностроение, 1974. – 152 с.