

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. Жидкостно-кольцевая машина: а.с. 1756634 МКИ 5F 04 C7/00 / И.С. Бодик; заявитель Всесоюзный научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт компрессорного машиностроения Сумского научно-производственного объединения им. М.В. Фрунзе. – № 4857737/29; заявл. 06.08.90; опубл. 23.08.92. // Открытия. Изобретения. – № 31.

УДК 637.118

**В.И. Передня, С.А. Антошук,
Э.П. Сорокин, М.В. Колончук**
*(РУП «НППЦ НАН Беларуси по
механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь)*

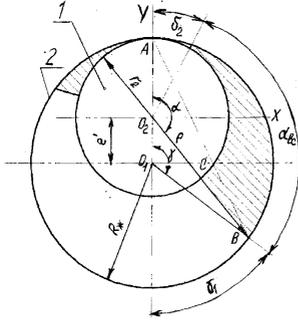
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГЛОВЫХ ПОЛОЖЕНИЙ КРОМОК ВСАСЫВАЮЩЕГО И НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ОКОН ВОДОКОЛЬЦЕВОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

Введение

В настоящее время многие фирмы изготавливают ротационные вакуумные насосы. Своевременное начало сжатия, нагнетания, обратного расширения и всасывания достигается в результате соответствующего расположения кромок нагнетательного и всасывающего окон. Эти параметры определяют торцовую площадь окон. Малая площадь всасывающего окна, например, снижает быстроту действия насоса, а большая – усиливает перетекание воздуха со стороны нагнетания на сторону всасывания. Поэтому положение кромок всасывающего окна выбирают, с одной стороны, из условия равенства давления воздуха в ячейке и во всасывающем патрубке в начальный момент всасывания и, с другой стороны, из условия достижения ячейкой максимального объема в момент ее разобшения с всасывающим патрубком. Для нагнетательного окна положения кромок выбирают, с одной стороны, из условия равенства давления в ячейке и в патрубке в начальный момент нагнетания и, с другой стороны, из условия минимального значения объема ячейки в конечный момент нагнетания. В настоящее время лучшие результаты получают лишь экспериментально. Правильный расчет и конструирование водокольцевых вакуумных насосов позволит существенно повысить их производительность и коэффициент полезного действия.

Цель работы – теоретическое обоснование рациональных диапазонов угла всасывания и нагнетания.

Основная часть



1 – внутренняя поверхность жидкостного кольца; 2 – втулка рабочего колеса; r_2 – радиус втулки колеса; R – радиус внутренней поверхности жидкостного кольца; e – эксцентриситет жидкостного кольца

Рисунок 38 – Область воздушных потоков вакуумного насоса

вакующего отверстия должны находиться в пределах угла поворота, при котором ячейка перестает соединяться с ним при наибольшем ее наполнении воздухом (рисунок 38).

$$\alpha_{ac} = \pi - \delta_2 - \delta_1.$$

При угле δ_2 (рисунок 38) совершается процесс расширения воздуха, перенесенного из полости нагнетания. Рекомендуют принимать угол обратного расширения

$$\delta_2 = \beta \div 2\beta,$$

где α_{ac} – угол всасывания, рад.;

δ_1 – угол между нижней кромкой впускного окна и биссектрисой, рад.;

δ_2 – угол обратного расширения, рад.;

β – угол между лопатками, рад.

Утечку сжатого воздуха через зазор между колесом и лобовиной насоса можно рассматривать как течение через узкую длинную щель. Щель характеризуется тремя параметрами – высотой, длиной по фронту и глубиной. Главным размером, подлежащим назначению конструктором, считается высота зазора. Зазор между рабочим колесом и крышкой корпуса с всасывающими и нагнетательными окнами для всех типоразмеров насосов изменяется в узких пределах и составляет $0,1 \div 0,2$ мм. Его величина определяется качеством изготовления, чистотой поверхности и

точностью сборки. Поэтому параметрами, определяющими перетечки воздуха, являются глубина щели и ее длина по фронту. Всасывающее отверстие малых размеров увеличивает сопротивление прохождению воздуха в насос и, следовательно, уменьшает его производительность.

Рациональный угол всасывания обуславливают длина контура всасывающего окна и количество лопаток, загромаждающих его проходное сечение.

$$\alpha_{\text{рац}} = \alpha_{\text{опт}} + \Delta\alpha_{\text{лон}},$$

где $\alpha_{\text{опт}}$ – оптимальный угол всасывания, рад.;

$\Delta\alpha_{\text{лон}}$ – угол загромаждения всасывающего окна лопатками, расположенными на угле всасывания, рад.

В качестве оптимизационной функции $\alpha_{\text{опт}}$ принята функция:

$$l(\alpha) = l_1(\alpha) + l_2(S, \alpha) \rightarrow \min,$$

где l_1 – длина кромок всасывающего окна по фронту, м;

l_2 – приведенная глубина щели, м;

α – угол поворота колеса, рад.;

S – торцовая площадь воздушной полости за вычетом площади всасывающего окна, м².

Принимая условно, что кривая внутренней поверхности жидкостного кольца представляет собой окружность, описанную каким-то постоянным радиусом $R_{\text{жс}}$ (см. рисунок 38) из центра O_1 , отстоящего на расстоянии e от центра колеса O_2 , составляем уравнение окружности относительно осей координат с началом в точке O_2 :

$$(y + e)^2 + x^2 = R_{\text{жс}}^2.$$

Из чертежа (см. рисунок 38) составляем систему уравнений:

$$y = \rho \cos \alpha;$$

$$x = \rho \sin \alpha.$$

Решая эту систему уравнений, получаем квадратное уравнение:

$$\rho^2 + 2\rho \cdot e \cdot \cos \alpha - (R_{\text{жс}}^2 - e^2) = 0.$$

Анализ показывает, что уравнению удовлетворяет только положительное значение корня:

$$\rho = -e \cos \alpha + \sqrt{e^2 \cdot \cos^2 \alpha + R_{\text{жс}}^2 - e^2}.$$

Контурная длина всасывающего окна (см. рисунок 38) определяется зависимостью:

$$l_1 = l_0 + l_{\text{жс}},$$

где l_0 – длина кромки всасывающего окна, по которой происходят обратные утечки воздуха;

$l_{\text{жс}}$ – длина кромки всасывающего окна, граничащая с жидкостным кольцом.

Очевидно,

$$l_0 = (\rho_{\delta_2} - r_2) + (\alpha - \delta_2)r_2 + (\rho_\alpha - r_2),$$

где ρ_{δ_2} – длина радиус-вектора при повороте колеса на угол δ_2 ;

ρ_α – длина радиус-вектора при повороте колеса на угол α .

Длина кромки всасывающего окна, граничащего с жидкостным кольцом, определяется уравнением:

$$l_{жс} = (\gamma - \delta_2)R_{жс}.$$

Окончательно

$$l_1 = (\rho_{\delta_2} - r_2) + (\alpha - \delta_2)r_2 + (\rho_\alpha - r_2) + (\gamma - \delta_2)R_{жс}.$$

Или

$$l_1 = (\rho_\alpha + \rho_{\delta_2}) + (\alpha - \delta_2 - 2)r_2 + (\gamma - \delta_2)R_{жс}.$$

Приведенную глубину щели l_2 определяли по уравнению:

$$l_2 = \frac{\pi R_{жс}^2 - S_{окна}}{l_0 - \Delta l_{лоп}},$$

где $S_{окна}$ – площадь всасывающего окна, $м^2$.

Очевидно, длина загромождения лопатками всасывающего окна определяется геометрически:

$$\Delta l_{лоп} = \frac{b \cdot z \cdot \alpha}{2\pi \cdot r_2},$$

где b – ширина лопатки, $м$;

z – число лопаток, *шт.*

Площадь всасывающего окна

$$S_{окна} = S_{AO_1B}^{сектор} - S_{AO_2C}^{сектор} - S_{O_1O_2B}^{треугольник}.$$

Площадь большого сектора

$$S_{AO_1B}^{сектор} = \frac{\gamma}{360} \pi R^2 \rightarrow S_{AO_1B}^{сектор} = \frac{\gamma}{2} R^2,$$

где γ – угол АОВ, *рад.*

Из треугольника по теореме синусов следует:

$$\frac{R}{\sin(\pi - \alpha)} = \frac{\rho}{\sin \gamma}.$$

Поэтому

$$\sin \gamma = \frac{\rho}{R} \sin(\pi - \alpha) \rightarrow \sin \gamma = \frac{\rho}{R} \sin \alpha \rightarrow \gamma = \arcsin\left(\frac{\rho}{R} \sin \alpha\right).$$

Можно записать:

$$S_{AO_1B}^{сектор} = \frac{\arcsin\left(\frac{\rho}{R} \sin \alpha\right)}{2} R^2.$$

Площадь треугольника

$$S_{O_1O_2B}^{\text{треугольник}} = \frac{1}{2} e \rho \sin(\pi - \alpha) \rightarrow S_{O_1O_2B}^{\text{треугольник}} = \frac{1}{2} e \rho \sin \alpha.$$

Площадь малого сектора

$$S_{AO_2C}^{\text{сектор}} = \frac{\alpha}{360} \pi r_2^2 \rightarrow S_{AO_2C}^{\text{сектор}} = \frac{\alpha}{2} r_2^2.$$

Окончательно

$$l(\alpha) = (\rho_{\alpha} + \rho_{\delta_2}) + (\alpha - \delta_2 - 2)r_2 + (\gamma - \delta_2)R_{жс} + \\ + \frac{\pi R^2 - \left(\frac{\alpha}{2} R^2 - \frac{\alpha}{2} r_2^2 - \frac{1}{2} e \rho \sin \alpha \right)}{(\rho_{\delta_2} - r_2) + (\alpha - \delta_2)r_2 + (\rho_{\alpha} - r_2) - \frac{b \cdot z \cdot \alpha}{2\pi \cdot r_2}} \rightarrow \min.$$

Значения оптимизационной функции при различных углах обратного расширения составляют 350–450 мм и находятся в пределах $\alpha = 150^\circ$ (рисунок 39).

Минимальный полный угол всасывания $\alpha = \alpha_{вс} + \delta_2$ для вакуумных насосов составляет $\alpha = 150^\circ$ (рисунок 40). Угол всасывания для них составляет $\alpha_{вс} = 105 \div 120^\circ$. Для вакуумного насоса с малым числом лопаток (4 лопатки) этот угол составляет $\alpha_{вс} = 105^\circ$. Корректировочный угол для рабочих колес с $r_2 = 50$ мм и толщиной лопаток $b = 3$ мм составит:

$$\Delta\alpha_{лон} = \frac{b \cdot z \cdot \alpha_{онм}}{2\pi \cdot r_2} \rightarrow \Delta\alpha_{лон} \approx \frac{z \cdot (105 \dots 120^\circ)}{2 \cdot 50} \rightarrow \\ \rightarrow \Delta\alpha_{лон} \approx \frac{z \cdot (105 \dots 120^\circ)}{100} \rightarrow \Delta\alpha_{лон} \approx z^\circ.$$

Для нагнетательного окна положение кромок должно быть выбрано, с одной стороны, из условия равенства давления в ячейке и в патрубке

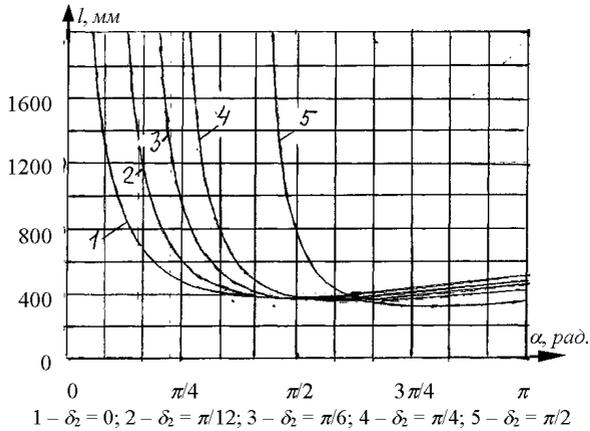
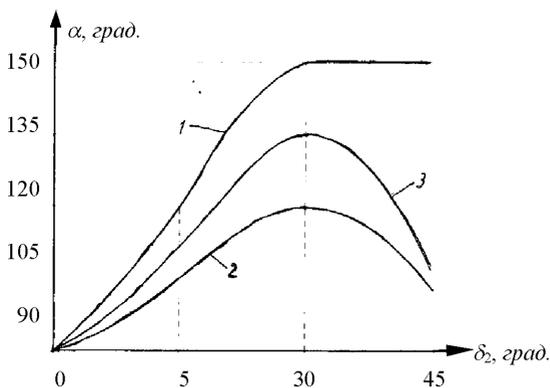


Рисунок 39 – Диапазоны углов всасывания при различных углах обратного расширения

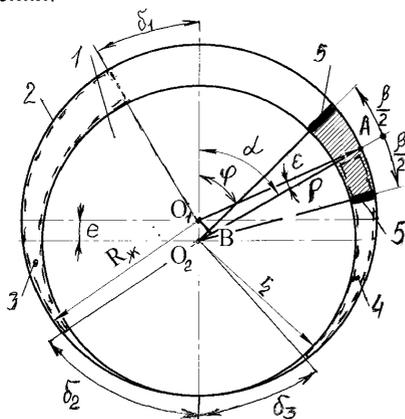


1 – полный угол всасывания; 2 – угол всасывания;
3 – угол всасывания с учетом загромождения всасывающего окна лопатки колеса

Рисунок 40 – Зависимость углов всасывания от углов обратного расширения

в начальный момент нагнетания и, с другой стороны, из условия минимального значения объема ячейки в конечный момент нагнетания. Под торцевой площадью рабочей ячейки понимают площадь серповидного пространства, описываемую двумя соседними лопатками. Рассмотрим закон изменения объема ячейки в зависимости от угла поворота ротора. При радиальном расположении лопаток (согласно рисунку 41) находим объем ячейки:

радиальном расположении лопаток (согласно рисунку 41) находим объем ячейки:



1 – внутренняя поверхность жидкостного кольца;
2 – внутренняя поверхность рабочего колеса;
3 – всасывающее окно;
4 – нагнетательное окно;
5 – лопатки

Рисунок 41 – Площадь поперечного сечения ячейки колеса с радиальными лопатками

$$V_{\alpha} = f_{\alpha} L = 0,5 \int_{\alpha-0,5\beta}^{\alpha+0,5\beta} \rho^2 d\alpha - r_2^2 \frac{\beta}{2}, \text{ м}^3,$$

где f_{α} – площадь поперечного сечения ячейки, м^2 ;

L – длина колеса, м .

Так как

$$\rho = O_2 A = O_2 B + AB,$$

то из прямоугольного треугольника AO_1B находим

$$AB = \sqrt{O_1A^2 - O_1B^2}; \quad O_1A = R_{\text{жс}}; \quad O_1B = e \sin \alpha,$$

а из прямоугольного треугольника O_1O_2B определяем

$$O_2B = O_2O_1 \cos \alpha = e \cos \alpha.$$

Подставляя найденные значения, получим:

$$\rho = R_{\text{жс}} \sqrt{1 - \frac{e^2}{R_{\text{жс}}^2} \sin^2 \alpha + e \cos \alpha}.$$

Учитывая, что в существующих машинах $\frac{e^2}{R_{\text{жс}}^2} < 0,02$, принимаем

$$\sqrt{1 - \frac{e^2}{R_{\text{жс}}^2} \sin^2 \alpha} = 1 - \frac{e^2}{2R_{\text{жс}}^2} \sin^2 \alpha;$$

тогда

$$\rho = R_{\text{жс}} \left(1 + \frac{e}{R_{\text{жс}}} \cos \alpha - \frac{e^2}{2R_{\text{жс}}^2} \sin^2 \alpha \right).$$

Или

$$\begin{aligned} \rho^2 &= R_{\text{жс}}^2 \left(1 + \frac{e^2}{R_{\text{жс}}^2} \cos^2 \alpha - \frac{e^4}{4R_{\text{жс}}^4} \sin^2 \alpha + 2 \frac{e}{R_{\text{жс}}} \cos \alpha - \frac{e^2}{R_{\text{жс}}^2} \sin^2 \alpha - \frac{e^3}{R_{\text{жс}}^3} \sin^2 \alpha \cos \alpha \right) \cong \\ &\cong R_{\text{жс}}^2 \left(1 + 2 \frac{e}{R_{\text{жс}}} \cos \alpha + \frac{e^2}{R_{\text{жс}}^2} \cos^2 \alpha \right). \end{aligned}$$

Площадь поперечного сечения ячейки

$$\begin{aligned} f_\alpha &= \frac{1}{2} R_{\text{жс}}^2 \int_{\alpha - \frac{\beta}{2}}^{\alpha + \frac{\beta}{2}} \left(1 + 2 \frac{e}{R_{\text{жс}}} \cos \alpha + \frac{e^2}{R_{\text{жс}}^2} \cos^2 \alpha \right)^2 d\alpha - r_2^2 \frac{\beta}{2} = \\ &= \frac{1}{2} R_{\text{жс}}^2 \left\{ \beta + 2 \frac{e}{R_{\text{жс}}} \left[\sin \left(\alpha + \frac{\beta}{2} \right) - \sin \left(\alpha - \frac{\beta}{2} \right) \right] + \frac{e^2}{2R_{\text{жс}}^2} + \left[\sin(2\alpha + \beta) - \sin(2\alpha - \beta) \right] \right\} - \\ &- \frac{1}{2} (R_{\text{жс}}^2 - 2R_{\text{жс}}e + e^2) \end{aligned}$$

После ряда преобразований получим:

$$f_\alpha = R_{\text{жс}} e \left(\alpha + 2 \sin \frac{\beta}{2} \cos \alpha + \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \sin \beta \cos 2\alpha - \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \beta \right).$$

Площадь поперечного сечения ячейки, а следовательно, и ее объем достигают максимального значения при $\alpha = 0$:

$$f_{\alpha} = f_{\max} = R_{\text{жс}} e \left(\alpha + 2 \sin \frac{\beta}{2} + \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \sin \beta - \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \beta \right).$$

При числе лопаток $z \geq 12$ можно принять

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{\beta}{2}; \quad \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \sin \beta = \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \beta,$$

тогда

$$f_{\alpha} = \beta R_{\text{жс}} e \left(1 + \cos \alpha - \frac{e}{R_{\text{жс}}} \sin^2 \alpha \right).$$

$$f_{\max} = 2\beta R_{\text{жс}} e.$$

Одновременно с увеличением угла α уменьшается объем ячейки и соответственно увеличивается давление заключенного в ней воздуха. Найдем объем ячейки для случая политропического сжатия:

$$V_{\varphi}^n p_{\varphi} = V_{\max}^n p_{01},$$

где p_{α} – давление газа в ячейке при угле поворота, равном α , Па;

p_{01} – давление газа во всасывающей патрубке машины, Па;

V_{α} – объем ячейки при угле поворота, равном α , м³;

V_{\max} – максимальный объем ячейки, м³.

Определим отношение давлений:

$$\sigma = \frac{p_{\alpha}}{p_{01}} = \left(\frac{V_{\max}}{V_{\alpha}} \right)^n = \left(\frac{f_{\max}}{f_{\alpha}} \right)^n = \left(\frac{\alpha + 2 \sin \frac{\beta}{2} + \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \sin \beta - \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \beta}{\alpha + 2 \sin \frac{\beta}{2} \cos \alpha + \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \sin \beta \cos 2\alpha - \frac{e}{2R_{\text{жс}}} \beta} \right)^n.$$

При $z \geq 12$ находим

$$\frac{p_{\alpha}}{p_{01}} = \left(\frac{2}{1 + \cos \alpha - \frac{e}{R_{\text{жс}}} \sin^2 \alpha} \right)^n.$$

При проектировании вакуумного насоса удобнее пользоваться углом $\varphi = \alpha + \varepsilon$ (рисунок 41),

$$\cos \varphi = \cos(\alpha + \varepsilon) = \cos \alpha \cos \varepsilon - \sin \alpha \sin \varepsilon.$$

Из треугольника AO_1B находим

$$\sin \varepsilon = \frac{O_1B}{O_1A} = \frac{O_1O_2 \sin \alpha}{O_2A} = \frac{e}{R_{\text{жс}}} \sin \alpha.$$

Учитывая, что угол ε мал, можно принять $\cos \varepsilon = 1$, тогда

$$\cos \varphi = \cos \alpha - \frac{e}{R_{\text{жс}}} \sin^2 \alpha.$$

Пренебрегая величиной $\frac{e}{R_{жс}} \sin^2 \alpha$, получим

$$\frac{P_{\alpha}}{P_{01}} = \left(\frac{2}{1 + \cos \alpha_{сжс}} \right),$$

где $\alpha_{сжс}$ – угол, соответствующий концу сжатия.

На рисунке 42 приведен график изменения давления воздуха в ячейке по углу поворота колеса при показателе политропы сжатия, равном показателю адиабаты $n = k = 1,41$. При углах поворота $\alpha \leq 50^\circ$ воздух сжимается незначительно. Резкое увеличение давления происходит при изменении угла в диапазоне от 50° до $80 \div 100^\circ$. Следовательно, небольшая ошибка в определении положения кромки нагнетательного окна приведет к заметным расхождениям расчетных и действительных значений давления воздуха в конце сжатия.

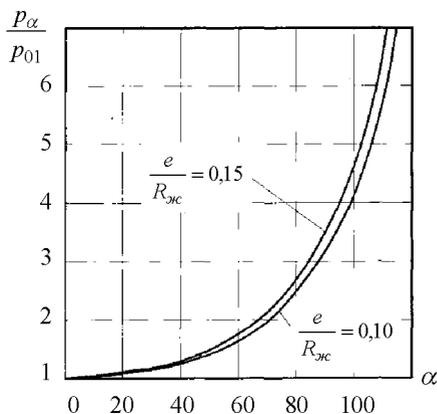


Рисунок 42 – Изменение давления воздуха в ячейке по углу поворота

Положение кромки $\alpha_{кр}$ окна, соответствующее концу сжатия, может быть определено углом

$$\alpha_{кр} = \alpha_{сжс} + \frac{\beta}{2}.$$

При $\alpha = \pi$ объем ячейки достигает минимального значения. Исходя из этого, следовало бы принимать $\delta_3 = \beta/2$. Учитывая перетечки газа через зазоры, принимают

$$\beta_3 = \frac{\beta}{2} \div \beta.$$

Выводы

Рассмотрены вопросы расчета угловых положений всасывающего и нагнетательного окон вакуумных насосов. Разработаны предложения по проектированию этих элементов конструкций насосов.

На положение нижней кромки всасывающего окна влияют требуемая площадь серповидного пространства на стороне всасывания, количество лопаток рабочего колеса, загромождающих определенную часть всасывающего окна. Минимальное значение угла всасывания составляет $105 \div 120^\circ$. Угловое значение сектора влияния лопаток составляет $12 \div 20^\circ$. Положение угла обратного расширения воздуха составляет

$\delta_2 = (1,5 \div 2,5)\beta$. Положение угла, определяющего заземленный объем воздуха, составляет $\delta_3 = (0,5 \div 1,0)\beta$.

05.07.13

Литература

1. Ротационные компрессоры / Под ред. А.Г. Головинцова. – М.: Машиностроение, 1964. – 315 с.
2. Тетерюков, В.И. Ротационные вакуум-насосы и компрессоры с жидкостным поршнем / В.И. Тетерюков. – М.: Машгиз, 1960. – 251 с.: ил.

УДК 621.65

М.И. Латушко, А.Ю. Башко
(УО «БГАТУ»,
г. Минск, Республика Беларусь)

Ю.А. Башко
(РУП «НПЦ НАН Беларуси по
механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ БЕСПОДСТИЛОЧНОГО НАВОЗА

Введение

Животноводство – одна из ведущих отраслей, обладающих высоким экспортным потенциалом, которая является основным поставщиком продовольствия на рынке Республики Беларусь.

Наиболее трудоемкой и ресурсоемкой вспомогательной операцией в процессе производства животноводческой продукции, оказывающей прямое влияние на ее качество, является навозоудаление. В общей структуре затрат труда на производство единицы продукции удаление навоза по величине трудозатрат находится на уровне основных технологических операций.

Рентабельное использование навоза начинается с правильно спроектированной и управляемой системы навозоудаления. От эффективной работы системы навозоудаления зависит санитарное состояние и ветеринарное благополучие ферм и комплексов, состояние здоровья животных, их продуктивность и качество продукции. Основными, определяющими качество и эффективность работы системы навозоудаления, являются технологические процессы удаления бесподстилочного навоза из помещений для содержания и транспортирования из приемников-накопителей, навозосборников к местам хранения и переработки навоза.

Мировой опыт показывает, что развитие механизации этих процесса ведется в направлении использования оборудования для перекачки на базе центробежных насосов либо насосов-смесителей.

В настоящее время в республике осваивается выпуск импортозамещающего насосного оборудования для перекачки бесподстилочного