

УДК 631.171

**Способ восстановления объемной подачи ротационного вакуумного
насоса***Краснова А.Ю., Мирошникова В.В., Исупова И.В., Иванов П.А., Усова Е.В.**Азово-Черноморский инженерный институт***Аннотация**

На доильных установках молочно-товарных ферм (хозяйств различных форм собственности и размеров дойного поголовья) наибольшее применение нашли вакуумные насосы ротационного типа, которые просты в конструктивном исполнении, надёжнее в работе, имеют меньшую металлоёмкость и стоимость. Однако им присущи и существенные недостатки. Одним из них является снижение подачи насоса в процессе увеличения наработки. Это влечёт за собой нарушение вакуумного режима работы доильных аппаратов и стабильности рабочего процесса доильной установки, что нередко представляет один из источников распространения маститных заболеваний у животных. Установлено, что известные технологии ремонта вакуумных насосов путём их расточки и постановки ремонтных втулок весьма затратны и не дают возможности полностью восстановить их технические характеристики в части объёмной производительности. Анализом износов насоса по мере его работы установлено, что наибольшие потери подачи его вызваны увеличением зазора между ротором и внутренней цилиндрической поверхностью корпуса в месте, где их сближение наибольшее. Увеличение этого зазора происходит вследствие зонального истирания корпуса и выноса металла из-за кавитационных процессов в нём. Приведены характеристики износов внутренней поверхности ротационного насоса пластинчатого типа и установлен превалирующий износ её по линии наибольшего сближения ротора с корпусом. Получен ряд математических моделей действительной подачи насоса в процессе его наработки, остаточного и межремонтного ресурсов. Предложен способ ремонта насоса и восстановления его подачи путём проточки корпуса радиусом, равным радиусу ротора, в месте сближения ротора с корпусом, последующего осаждения ротора в эту проточку с образованием рабочего зазора. Это обеспечивает «контакт» ротора с корпусом не по одной линии, а по дуге части окружности проточки, и повышение ресурса его работы до следующего ремонта.

Ключевые слова: РОТАЦИОННЫЙ НАСОС, ИЗНОС, НАРАБОТКА, ОТКАЗ, ДОИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Введение

Отечественные доильные установки и большинство зарубежных установок и агрегатов оборудованы вакуумными насосами ротационного типа в качестве источника вакуума, относящимися к пластинчатым насосам [1, 2, 3]. Такие насосы нашли применение и в ряде других отраслей народного хозяйства России: в линиях первичной обработки и переработки молока, различных соков, в сахарном, пивоваренном и других производствах [4, 5]. Эти насосы обладают простотой конструкции и использования, имеют небольшую металлоёмкость и невысокую стоимость. Однако основным недостатком насосов такого типа является уменьшение объёмной подачи в процессе увеличения наработки, что влечёт за собой нарушение вакуумного режима доильных установок и работы доильных аппаратов, и нередко является одним из источников заболевания коров маститами [6, 7].

Главным образом, износ основных деталей в ротационном вакуумном насосе (РВН) обусловлен постепенным разрушением поверхности материала, его деталей с отделением частиц их материалов, что приводит к изменению основных размеров, свойств и формы поверхностных слоёв деталей. Возникает износ вследствие усиленного трения в контакте деталей, а превалирует при этом трение скольжения [8].

В контакте поверхностей деталей РВН происходит, в основном, полужидкостное трение. Слой смазки здесь вытесняется до соприкосновения частиц трущихся поверхностей деталей, что наблюдается и в контакте лопаток с внутренней поверхностью корпуса РВН. Это основной источник развития износа в зазоре ротор-корпус за счёт достаточно резкого увеличения коэффициента трения лопатки о зеркало цилиндра.

На процесс износа деталей РВН пластинчатого типа оказывают влияние не только малая толщина или отсутствие масляной пленки между ними, но и наличие между их трущимися поверхностями различных абразивов (например, пыли, продуктов износа и др.), приводящих к появлению надиров и рисок. Интенсивность износов нарастает также из-за окислительных процессов в РВН, происходящих под действием окружающей среды с образованием пленки различных окислов.

При появлении овальности и конусности внутренней поверхности корпуса РВН более 0,07 мм корпус его в настоящее время обычно растачивают, используя специальное приспособление 70-7442-3541, до одного из ремонтных размеров. Затем эту поверхность подвергают хонингованию на специальном станке с применением приспособления 70-7442-3542. К недостаткам такого ремонта относится необходимость замены в РВН и боковых крышек ремонтного размера, обеспечивающих установку ротора с необходимым зазором по линии наибольшего сближения его с цилиндром после сборки.

Методы исследований

Анализ известных методов ремонта основных деталей ротационных вакуумных насосов показал их значительную сложность и трудоемкость [5, 9]. Износы корпуса РВН по внутренней поверхности (рис. 1), а также ротора и боковых крышек, сопровождаются большими потерями объемной подачи насоса и длительным выходом его из «строя» в связи с процессом проведения сложного ремонта, выполняемого обычно вне хозяйства на специальных ремонтных заводах.

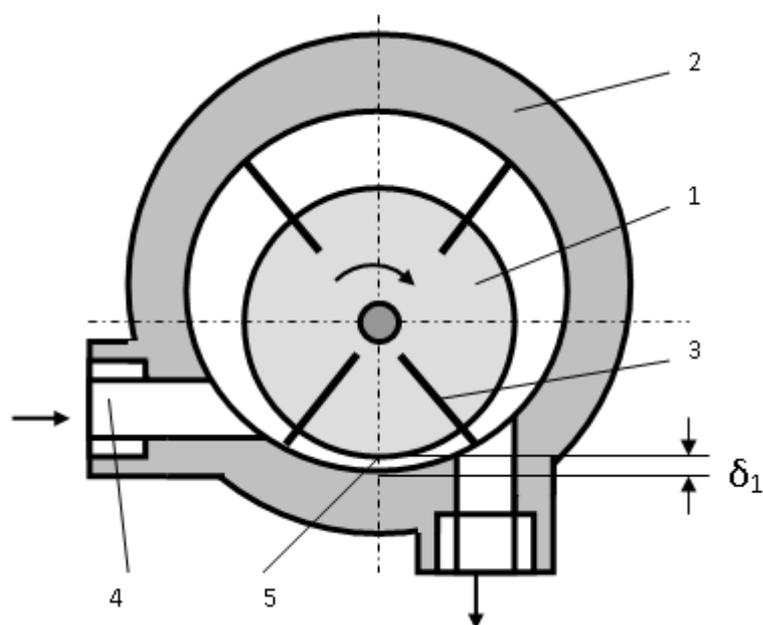


Рис. 1. Схема РВН пластинчатого типа
 1 – ротор, 2 – корпус, 3 – пластина, 4 – патрубок всасывающий,
 5 – линия наибольшего сближения ротора с корпусом,
 δ_1 – технологический зазор ротор-корпус.

Поэтому в работе использовали положения теоретической механики и газовой динамики. Эксперименты проведены на серийных вакуумных насосах с использованием стандартных и типовых методик определения производительности насоса и параметров наработки его.

Результаты исследований и их обсуждение

Наибольшее понижение объемной подачи РВН пластинчатого типа происходит из-за повышения радиального зазора ротор-корпус по линии наибольшего сближения их и увеличения при этом внутренних перетечек воздуха через образующуюся щель. В месте сближения ротора с корпусом РВН их «контакт» происходит (рис. 1) по линии 5 [3, 4, 10].

При сборке насоса ротор устанавливается в корпусе с зазорами, величина которых с учетом теплового расширения и необходимости смазки внутренней поверхности насоса при разработке конструкции определяется по следующим зависимостям [4, 5]:

– зазор между пластиной (или ротором) и боковыми крышками:

$$\Delta_y = \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot L \cdot t_{ad} + \varepsilon, \quad (1)$$

где: α – коэффициент линейного расширения пластины или ротора (для текстолитовых пластин: $\alpha = (2...4) \cdot 10^{-5}$, а для чугунного ротора: $\alpha = 9 \cdot 10^{-6}$), $1/^\circ\text{C}$); L – длина пластины или ротора, мм; t_{ad} – температура в конце процесса сжатия газа ($^\circ\text{C}$); ε – толщина необходимой масляной пленки ($\varepsilon = 0,1...0,2$ мм);

– зазор между ротором и корпусом по линии 5 контакта их:

$$\delta_1 = \frac{2}{3} \cdot \alpha_p \cdot r \cdot t_{ad} + \varepsilon \quad (2)$$

где r – радиус ротора, мм.

Расчетные установочные зазоры для насосов РВН 40/350 составляют, соответственно: $\Delta_y = 0,5...0,7$ мм и $\delta_1 = 0,2...0,3$ мм.

Рассмотрим зазор по линии наибольшего сближения ротора и зеркала цилиндра корпуса насоса. Он имеет форму прямоугольника по всей длине ротора. Расход воздуха или перетечки его через эту щель при постоянном перепаде давления до и после щели, т.е. при установившемся режиме работы РВН, составляет [4]:

$$V_{щ} = \frac{1}{\gamma} L \cdot \delta_1 \cdot P_1 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 - 1 \right]}{R_g \cdot T_2 \left[\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 + \xi + \lambda \cdot \xi_1 \right]}} \quad (3)$$

где: γ – масса воздуха при давлении P_2 ; P_1 и P_2 – давление воздуха после и до щели; R_g – газовая постоянная; ξ и ξ_1 – коэффициенты местных потерь и формы щели; λ – коэффициент трения воздуха о поверхности щели; T_2 – температура (абсолютная) поступающего в щель воздуха.

В этом выражении зазор δ_1 ротор-корпус в месте наибольшего их сближения принимается за вычетом толщины пленки масла, а коэффициенты λ и ξ представляются функцией от числа Рейнольдса Re .

По мере работы насоса по данным экспериментальных исследований зазор δ_1 при трении пластин о зеркало цилиндра корпуса насоса увеличивается из-за его интенсивного износа. Поэтому площадь образующейся щели будет $L\delta_1 = f(t)$, где t – наработка вакуумного насоса.

Учитывая теорию износа поверхностей трения в подшипниках скольжения, зазор в исследуемой паре со временем будет увеличиваться по следующей параболической зависимости:

$$L\delta_1 = a + bt + ct^2 \quad (4)$$

где a, b, c – коэффициенты, имеющие размерности m^2 , m^2/c , m^2/c^2 .

В таком случае расход воздуха через рассматриваемый зазор между ротором и корпусом насоса при любой наработке насоса может быть определён по зависимости:

$$V_{\text{ц}} = \frac{P_1}{\gamma} (a + bt + ct^2) \sqrt{\frac{g \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 - 1 \right]}{R_2 \cdot T_2 \left[\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 + \xi + \lambda \cdot \xi_1 \right]}} \quad (5)$$

Следовательно, фактическая объёмная подача вакуумного насоса в любое время наработки из-за перетечек в щели между ротором и зеркалом цилиндра при количестве пластин Z в нём составит:

$$V_{\delta_e} = \eta_v 120mnL(\pi D - \delta Z) - \frac{P_1}{\gamma} (a + bt + ct^2) \sqrt{\frac{g \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 - 1 \right]}{R_2 \cdot T_2 \left[\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 + \xi + \lambda \cdot \xi_1 \right]}} \quad (6)$$

где: m – эксцентриситет насоса; n – частота вращения ротора; D – диаметр ротора вакуумного насоса.

По этой зависимости подача вакуумного насоса, зависящая от его геометрических параметров и кинематических показателей, при эксплуатации постепенно снижается по мере износа в линии 5 «контакта» ротора с корпусом (рис. 1), что учтено зависимостью (6).

Ресурс работы ротационного вакуумного насоса до его ремонта, таким образом, может определяться по зависимости (6). Допуская далее, что в процессе наработки насоса показатели γ , R , ξ , ξ_1 , λ , ℓ_1 , κ^1 остаются всё время постоянными, а m , n , L , D , δ , P_1 , P_2 , T_2 , μ^1 , V будут иметь незначительные изменения, и принимая:

$$V_T = \eta_v \cdot 120 \cdot m \cdot n \cdot L \cdot (\pi D - \delta Z) \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{P_1}{\gamma} \sqrt{\frac{g \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 - 1 \right]}{R_2 \cdot T_2 \left[\ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 + \xi + \lambda \cdot \xi_1 \right]}} \quad (8)$$

$$K_3 = \cdot l_1 \cdot \frac{\mu^1}{\gamma^1} \left(\frac{2}{\kappa^1 + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa^1 - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2g\kappa^1}{\kappa^1 + 1} \cdot \frac{P_0}{V}} \cdot 360 \quad (9)$$

получаем:

$$V_{\partial_t} = V_T - K_2(a + bt + ct^2) - K_3(2A_1t^{B_1} + A_2t^{B_2})$$

Или:

$$V_T - V_{\partial_t} - K_2a = K_2bt + K_2ct^2 + K_32A_1t^{B_1} + K_3A_2t^{B_2},$$

Правую часть этого уравнения можно упростить

$$K_2bt + K_2ct^2 + K_32A_1t^{B_1} + K_3A_2t^{B_2} = A_3t^{B_3},$$

где A_1, B_1, A_2, B_2, A_3 и B_3 – размерные коэффициенты, определяемые опытным путем.

Тогда:

$$V_T - V_{\partial_t} - K_2a = A_3t^{B_3}$$

В начальный период работы насоса (наработка $t=0$) $a=L\delta_1$, тогда:

$$V_T - V_{\partial_t} - K_2L\delta_1 = A_3t^{B_3} \quad (10)$$

Рассчитав теоретическую и определив действительную подачи в момент времени t и зная установочный зазор δ_1 , можно вычислить коэффициенты A_3 и B_3 , используя известные способы наименьшей средней ошибки, наименьших квадратов или избранных точек.

Решением (10) относительно t будет:

$$t = B_3 \sqrt[B_3]{\frac{V_T - V_{\partial_t} - K_2L\delta_1}{A_3}}$$

Далее, задавая предельно допустимое значение $V_{\partial_{\min}}$, определим ресурс межремонтной работы ротационного вакуумного насоса:

$$t_{mp} = B_3 \sqrt[B_3]{\frac{V_T - V_{\partial_{\min}} - K_2L\delta_1}{A_3}}. \quad (11)$$

Затем по действительной объёмной производительности V_{∂_i} насоса можно определить его наработку:

$$t_n = B_3 \sqrt{\frac{V_T - V_{\partial_i} - K_2 L \delta_1}{A_3}} \quad (12);$$

и ресурс работы до очередного ремонта:

$$\begin{aligned} t_p = t_{mp} - t_n &= B_3 \sqrt{\frac{V_T - V_{\partial_{\min}} - K_2 L \delta_1}{A_3}} - B_3 \sqrt{\frac{V_T - V_{\partial_i} - K_2 L \delta_1}{A_3}} = \\ &= B_3 \sqrt{\frac{V_{\partial_i} - V_{\partial_{\min}}}{A_3}} \quad (13) \end{aligned}$$

По выражению (13) возможно принятие оперативных решений, касающихся направления используемых вакуумных насосов в ремонт или замены их в используемых доильных установках и агрегатах. Это можно положить и в основу образования в хозяйстве резерва вакуумных насосов.

По мере наработки насоса площадь образующейся щели между ротором и корпусом в линии наибольшего их сближения увеличивается. Под ротором на внутренней поверхности корпуса РВН появляется и постепенно углубляется своеобразная лунка, вызванная интенсивным истиранием материала корпуса и кавитационными процессами течения газа в щели. В связи с этим нами разработан метод ремонта ротационного пластинчатого вакуумного насоса путём внутренней проточки корпуса в месте сближения его с ротором и последующего осаждения ротора в это своеобразное гнездо для восстановления необходимого зазора в «контакте» ротор-корпус (рис. 2) [3, 5]. Площадь «контакта» этих деталей насоса в линии наибольшего их сближения при такой расточке повышается, что повышает ресурс работы РВН. Радиус проточки должен быть равным R_{np} в соответствии с рис. 2.

Проточка обеспечивает устранение всех следов износа и даёт новый профиль внутренней поверхности корпуса насоса. Радиус её будет:

$$R_{np} = R_p + \delta_1 + \Delta\delta_1 + t.$$

Сумма $(\delta_1 + \Delta\delta_1)$ в этом выражении не постоянна в функции времени и может быть представлена в виде $\delta_1 + \Delta\delta_1 = (a + bt + ct^2)/L$, тогда:

$$R_{np} = R_p + \frac{1}{L} \cdot \left[a + b \left(\frac{V_T - V_{\delta_i} - K_2 L \delta_1}{A_3} \right)^{\frac{1}{B_3}} + c \left(\frac{V_T - V_{\delta_i} - K_2 L \delta_1}{A_3} \right)^{\frac{2}{B_3}} \right] + t_1 \quad (14)$$

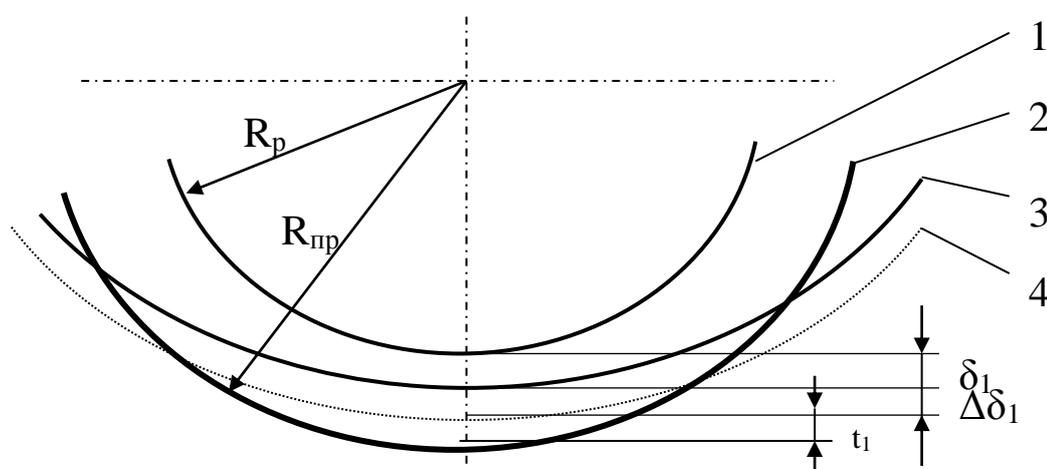


Рис. 2. Схема выполнения проточки в корпусе РВН в месте его наибольшего износа

1 – внутренняя поверхность ротора; 2 – образующая проточки корпуса; 3 – цилиндрическая поверхность корпуса нового насоса; 4 – внутренняя поверхность корпуса с учетом износа; R_p – радиус ротора насоса; R_{np} – радиус проточенной лунки; δ_1 – зазор установочный; $\Delta\delta_1$ – радиальный износ цилиндра насоса; t_1 – глубина проточенной лунки в корпусе.

Теперь на внутренней поверхности корпуса насоса образуется углубление радиусом R_{np} . Границы этого углубления перекрываются соседними лопатками насоса с центральным углом φ между ними при посадке ротора в него (рис. 3а). Поэтому целесообразно совместить нижнюю кромку выхлопного окна корпуса насоса с началом дуги выполняемой проточки, что устранил зону последующего сжатия воздуха во вредном пространстве. В пределе второй конец этой дуги может перекрыть окно всасывания воздуха на 10...15 %, но после этого последующие проточки в корпусе вообще нецелесообразны.

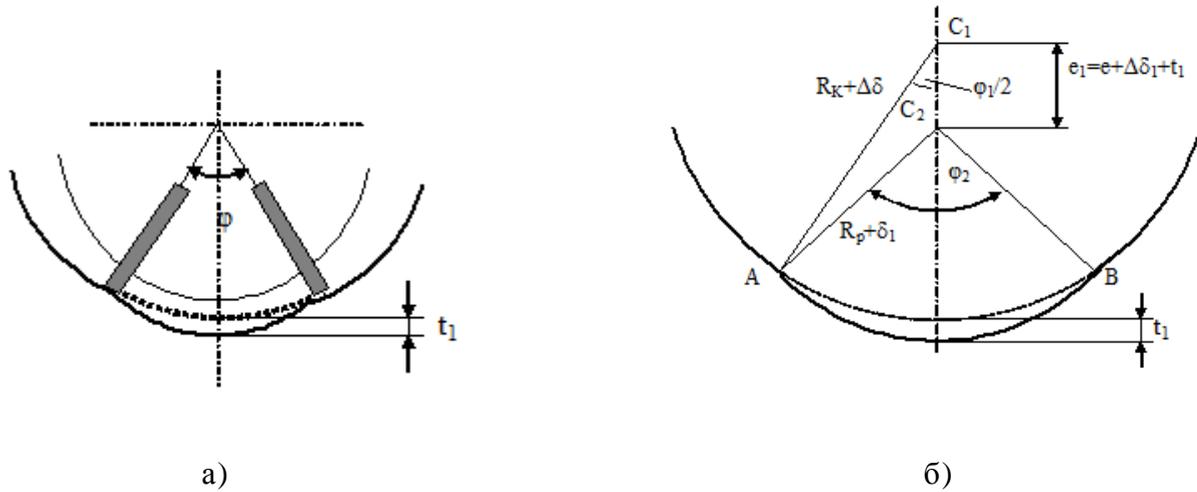


Рис. 3а, 3б. Схемы проточки в корпусе насоса

По рис. 3б:

$$A\ddot{B} = \frac{\pi \cdot (R_k + \Delta\delta)}{180} \cdot \varphi_1 \quad \text{и} \quad A\ddot{B} = \frac{\pi \cdot (R_p + \delta_1)}{180} \cdot \varphi_2.$$

Такая проточка увеличивает эксцентриситет и ведёт к увеличению вылета лопаток ротора и подачи насоса. Подача его превысит номинальную, а объёмное изменение её определится по зависимости:

$$\Delta V = 120 \cdot L \cdot n \cdot (e_1 - e) \cdot \pi \cdot (D_1 - D), \quad (15)$$

где: e_1 – образовавшийся эксцентриситет после «осаждения» ротора ($e_1 = e + \Delta\delta_1 + t_1$); t_1 – «глубина» проточки; $(D_1 - D)$ – увеличение вылета лопатки; $D_1 = R_{np} + R$.

«Глубина» проточки ограничена как размерами корпуса насоса, так и соотношением основных его конструктивных параметров.

Экспериментальным исследованиям подвергались как новые, так и отремонтированные РВН пластинчатого типа, в основном, марки РВН40/350 и УВУ-60 [3, 11]. Технология их ремонта была основана на выполнении операций проточки боковых крышек и проточки корпуса в месте «контакта» его с ротором. Глубина проточки в корпусе составляла 0,5...1 мм и затем при сборке насоса сопровождалась осаждением ротора в эту проточку. Осаждение ротора в проточку корпуса

осуществляли путём поворота его относительно шпильки 7, при этом предварительно отверстия крепления крышек делали овальными. Поворот его производился относительно этой шпильки по радиусам дуг отверстий крепления крышек, показанным на рис. 4. Это позволяло установить ротор в корпусе с обеспечением необходимого зазора по всей площадке «контакта» его с внутренней поверхностью корпуса, в отличие от серийных РВН.

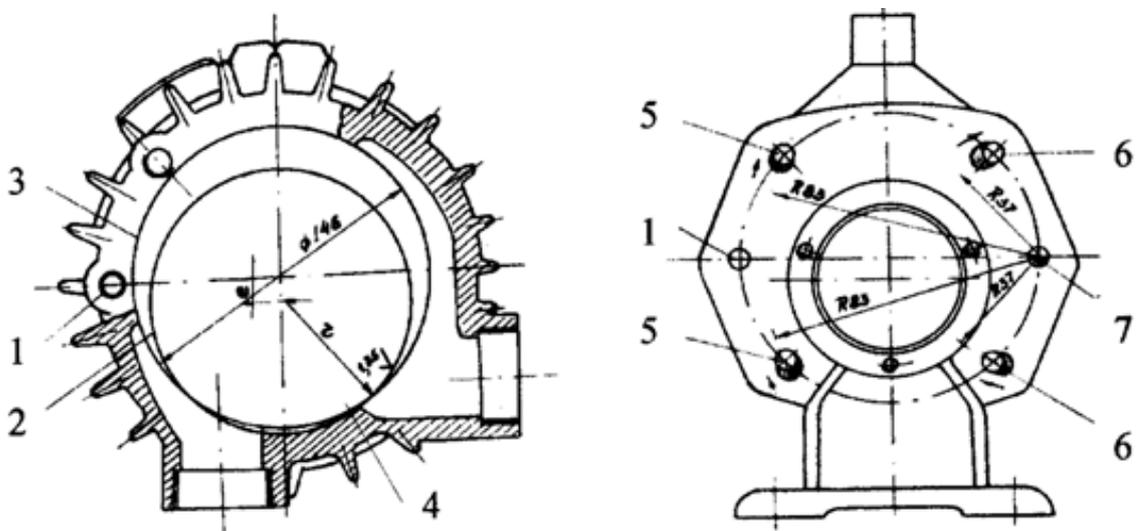


Рис. 4. Схема к проведению ремонта РВН

1 – шпилька направляющая; 2 – образующая проточки; 3 – образующая корпуса; 4 – начало проточки; 5 и 6 – отверстия крепления крышек; 7 – шпилька

Падение подачи исследуемых насосов в функции времени наработки, представленное на рис. 5, носит криволинейный характер. По мере наработки восстановленного проточкой корпуса насоса его подача снижается менее интенсивно в сравнении с серийным РВН.

Подача серийного насоса снижается уже в первые 500 часов работы на 15%, в то время как у восстановленного проточкой корпуса насоса это падение подачи не превысило 7%. После наработки насосами 2000 часов производительность серийного РВН упала до 27...28 м³/ч и составила не более 65% от номинальной подачи. (рис. 5).

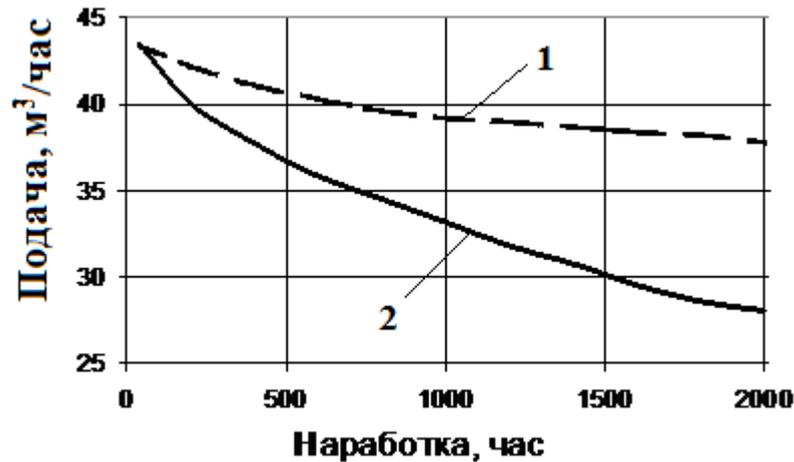


Рис. 5. Зависимость производительности исследуемых насосов марки РВН 40/350 от времени их работы

1 – экспериментальный восстановленный проточкой насос, 2 – серийный РВН

У экспериментального насоса производительность снизилась до 37...38 м³/ч только после наработки 2000 часов, то есть подача уменьшилась и составила 84...86 % производительности нового насоса, что вполне обеспечивало нормальное проведение процесса доения коров на доильной установке.

Выводы

Приведенные в работе зависимости дают возможность определения действительной производительности РВН пластинчатого типа, длительности его наработки, а также ресурса работы до очередного ремонта. При наработке серийного РВН порядка 1000...1200 часов из-за износа корпуса насоса возникает необходимость проведения первого ремонта, при котором корпус его целесообразно восстанавливать локальной проточкой в зоне износа (наибольшего сближения с ротором) на глубину 1...1,5 мм радиусом, равным радиусу ротора.

Последующие ремонты проточкой корпуса, направленные на восстановление подачи РВН, необходимо осуществлять через 1800...2000 часов наработки. При первом ремонте по предлагаемой технологии глубина проточки корпуса должна быть порядка 1...1,5 мм, а при втором – 0,4...0,5 мм. В дальнейшем ремонт РВН может производиться только гильзованием.

Список использованных источников

1. Барагунов А.Б., Краснова А.Ю. Механизация доения и первичной обработки молока в условиях горных хозяйств: Монография. – Нальчик: КБГАУ. – 2017. – 232 с.
2. Краснов И.Н., Мирошникова В.В. Организация машинного доения коров на модульных фермах // Сельский механизатор. – 2017. – № 9. – С. 18-19.
3. Краснов И.Н., Краснова А.Ю., Филин В.М., Филин Д.В. Механизация производства, первичной обработки и переработки молока. – Ростов н/Д: ТЕРРА ПРИНТ. – 2009. – 388 с.
4. Ужик В.Ф., Киташёва О.В., Тетерядченко А.И., Китун А.В., Передня В.И., Романюк Н.Н. Машины и оборудование для животноводческих ферм и комплексов. – Белгород (п. Майский): Белгородский ГАУ. – 2017. – 462 с.
5. Атанов И.В., Бондаренко А.М., Грицай Д.И., Капустин И.В. и др. Реконструкция и техническое перевооружение ферм и комплексов крупного рогатого скота. – Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та. – 2017. – 236 с.
6. Барагунов А.Б., Краснова А.Ю., Пасечников И.И. Организация доильной станции применительно к условиям горного пастбищного содержания коров // Вестник аграрной науки Дона. – 2020, № 2. – С. 43-50.
7. Мирошникова В.В., Краснов И.Н. Совершенствование технологии производства животноводческой продукции на молочной ферме модульного замкнутого типа // Известия Горского государственного аграрного университета. – 2016. – Т. 53, № 4. – С. 92-98.
8. Глобин А.Н., Краснов И.Н., Копица Р.В. Перистальтические насосы: Монография. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ. – 2018. – 178 с.
9. Передня В.И. Техническое и технологическое обеспечение получения конкурентоспособного молока // В сб. науч. тр. «Иновационные ресурсосберегающие технологии биобезопасных комбикормов и конкурентоспособного молока»: Материалы академических чтений. Республиканское унитарное предприятие «Научно-технический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск. – 2018. – С. 3-24.
10. Краснов И.Н., Краснова А.Ю., Мирошникова В.В. Организация молокоприёмных пунктов при молочно-товарной ферме // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Том 12, №1(60). – С. 90-99.
11. Краснов И.Н., Назарова Е.В. Влияние кратности доения коров на величину их разовых удоев // Вестник аграрной науки Дона. – Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА. – 2012, № 3. – С. 72-78.

Цитирование:

Краснова А.Ю., Мирошникова В.В., Исупова И.В., Иванов П.А., Усова Е.В. Способ восстановления объемной подачи ротационного вакуумного насоса // АгроЭкоИнфо. – 2020, №4. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/4/st_433.pdf