

К обоснованию конструктивно-режимных параметров регулятора вакуумметрического давления адаптивного доильного аппарата

В.Ф. Ужик, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ; В.А. Шахов, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ; А.И. Тетерядченко, аспирант, С.И. Некипелов, аспирант, О.В. Китаёва, д.т.н., А.А. Кабашко, соискатель, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ

В своём большинстве применяемое доильное оборудование для коров снабжено элементами автоматики, позволяющими управлять режимом воздействия на молочную железу в зависимости от интенсивности потока выводимого из вымени молока. Изменяемые параметры – вакуумметриче-

ское давление в межстенных и подсосковых камерах доильных стаканов, частота пульсаций пульсатора, соотношение тактов сосания и сжатия [1–6]. Реализуется это различными исполнительными механизмами. Так, частоту пульсаций и соотношение тактов определяют различного рода пульсаторы. Для установления заданного вакуумметрического давления доения широко применяются мембранные регуляторы.

Материал и методы исследования. Отличительной особенностью предложенной конструкции адаптивного доильного аппарата со сбором молока

в доильное ведро является то, что в полости доильного ведра, к которому также подключён и пульсатор доильного аппарата, вакуумметрическое давление изменяется в зависимости от расхода молока через датчик потока жидкости, установленный на пути его движения от коллектора в доильное ведро [7, 8]. Изменение вакуумного режима в полости доильного ведра, а значит, и в доильных стаканах, осуществляется регулятором вакуумметрического давления, установленным между доильным ведром и вакуумпроводом доильной установки. Схема регулятора представлена на рисунке 1.

Из рисунке видно, что равновесное состояние мембраны 2 мы можем представить следующим математическим выражением:

$$F_1 = F_2, \quad (1)$$

где F_1 – усилие, развиваемое на мембране под воздействием разности давлений в камере 4 постоянного вакуумметрического давления и в камере управления 1, H ;

F_2 – усилие, развиваемое на мембране под воздействием разности давлений в камере управления 1 и в камере рабочего вакуумметрического давления 6, H .

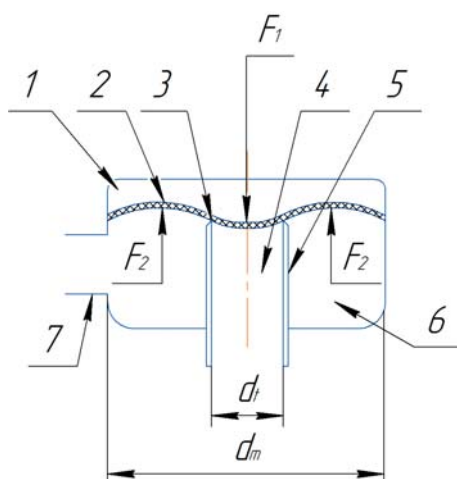


Рис. 1 – К расчёту параметров регулятора вакуумметрического давления в полости доильного ведра:

- 1 – камера управления; 2 – мембрана; 3 – щель; 4 – камера постоянного вакуумметрического давления; 5 – патрубок; 6 – камера рабочего вакуумметрического давления; 7 – патрубок

Однако следует заметить, что это уравнение справедливо для случая, когда верхний обрез патрубка 5 совпадает с нижней образующей плоскостью мембраны 2 в ненагруженном её состоянии. В противном случае, как показано на рисунке 2 (а, б), равновесное состояние мембраны 2 при смещении обреза патрубка 5 вниз по отношению к мембране (рис. 2а) может быть представлено выражением:

$$F_1 = F_2 + F_{sm}, \quad (2)$$

где F_{sm} – сопротивление деформации мембраны, H ,

а при смещении обреза патрубка 5 вверх выражение примет вид:

$$F_1 = F_2 - F_{sm}. \quad (3)$$

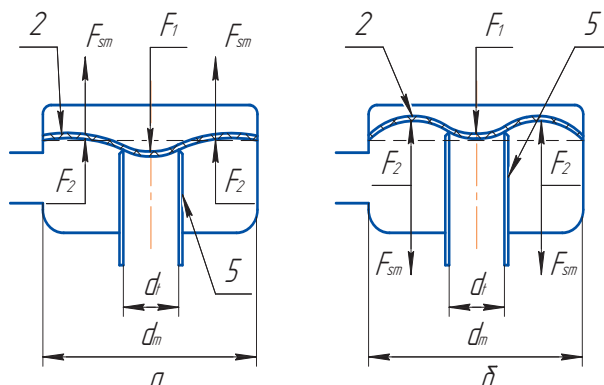


Рис. 2 – Схема смещения верхнего обреза патрубка 5 относительно нижней образующей плоскости мембраны 2:

- а – смещение верхнего обреза патрубка 5 относительно нижней образующей плоскости мембраны 2 вниз; б – смещение верхнего обреза патрубка 5 относительно нижней образующей плоскости мембраны 2 вверх

Мембрана 2 (рис. 1) патрубком 5 разделена на две коаксиально расположенные зоны, подвергаемые воздействию различных перепадов давлений.

Поэтому для упрощения расчётов считаем целесообразным рассматривать мембрану как мембрану диаметром d_m с жёстким центром диаметром d_t , соответствующим внутреннему диаметру трубки 5.

Известно, что сила F_m , создаваемая мембраной с жёстким центром под воздействием перепада давлений, однако без учёта потерь на преодоление сопротивления деформации мембраны, может быть определена по уравнению вида [9, 10]:

$$F_m = \frac{\pi \Delta p}{4} \left\{ (D_m^2 - D_c^2) \frac{\left[\frac{1}{3} + \frac{D_c}{D_m} + \left(\frac{D_c}{D_m} \right)^2 \right]}{\left[1 + \frac{2D_c}{D_m} + \left(\frac{D_c}{D_m} \right)^2 \right]} + D_c^2 \right\}. \quad (4)$$

где D_m – диаметр мембраны, м;

D_c – диаметр жёсткого центра мембраны, м;

Δ_p – перепад давлений на мембране, Па.

В нашем случае усилие F_1 , развиваемое на мембране 2 под воздействием разности давлений в камере 4 постоянного вакуумметрического давления и в камере управления 1, и усилие F_2 , развиваемое на мембране под воздействием разности давлений в камере управления 1 и в камере рабочего вакуумметрического давления 6, воздействуют на различные зоны мембраны и в противоположных направлениях. Поэтому можно записать:

$$F_1 = \frac{\pi d_t^2}{4} \Delta P_t, \quad (5)$$

где ΔP_t – перепад давлений между камерой 4 постоянного вакуумметрического давления и камерой управления 1, Па.

$$\Delta P_t = P_n - P_u, \quad (6)$$

где P_n – номинальное вакуумметрическое давление, подводимое к доильному аппарату, Па;

P_u – вакуумметрическое давление в камере управления, Па.

Для определения усилия F_2 воспользуемся уравнением (4), преобразовав его применительно к нашим условиям работы мембраны 2:

$$F_2 = \frac{\pi \Delta P_m}{4} (d_m^2 - d_t^2) \frac{\left[\frac{1}{3} + \frac{d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]}{\left[1 + \frac{2d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]}, \quad (7)$$

где ΔP_m – перепад давлений между камерой управления 1 и камерой рабочего вакуумметрического давления 6, Па.

$$\Delta P_m = P_u - P_r, \quad (8)$$

где P_r – вакуумметрическое давление в камере рабочего вакуумметрического давления 6, Па.

Отсюда, подставив в уравнение (1) полученные значения F_1 и F_2 , с учётом выражения (6) и (8), установим значение P_r для случая, когда верхний обрез патрубка 5 (рис. 1) совпадает с нижней образующей плоскостью мембраны 2 в ненагруженном её состоянии:

$$P_r = \frac{d_t^2 (P_u - P_n) \left[1 + \frac{2d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]}{d_m^2 - d_t^2 \left[\frac{1}{3} + \frac{d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]} + P_u. \quad (9)$$

и по аналогии с вышеизложенным:

$$P_u = \frac{d_t^2 P_n + P_r (d_m^2 - d_t^2) \left[\frac{1}{3} + \frac{d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]}{\left(d_m^2 - d_t^2 \right) \left[\frac{1}{3} + \frac{d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right] + d_t^2 \left[1 + \frac{2d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]}. \quad (10)$$

При смещении обреза патрубка 5 вверх или вниз относительно нейтрального положения нижней образующей мембраны 2 имеет место деформация мембраны до её равновесного состояния. В таком случае уравнения (6) и (8) приобретают вид:

$$\Delta P_t = P_n - P_u - (\pm \Delta P_{sm}), \quad (11)$$

где ΔP_{sm} – дополнительный перепад давлений на мембране для перемещения жёсткого центра до её равновесного состояния, Па;

ΔP_{t_1} – перепад давлений между камерой 4 постоянного вакуумметрического давления и камерой управления 1 для условия смещения обреза патрубка 5 относительно нижней образующей плоскости мембраны 2 в ненагруженном её состоянии, Па;

$$\Delta P_{m_1} = P_u - P_r + (\pm \Delta P_{sm}), \quad (12)$$

где ΔP_{m_1} – перепад давлений между камерой управления 1 и камерой рабочего вакуумметрического давления 6 для условия смещения обреза патрубка 5 относительно нижней образующей плоскости мембраны 2 в ненагруженном её состоянии, Па.

Плюс – при смещении обреза патрубка 5 вниз, минус – при смещении обреза патрубка вверх.

В таком случае уравнение (9) приобретает вид:

$$P_{rsm} = \frac{d_t^2 (P_u - P_n + (\pm \Delta P_{sm})) \left[1 + \frac{2d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]}{\left(d_m^2 - d_t^2 \right) \left[\frac{1}{3} + \frac{d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right] + P_u + (\pm \Delta P_{sm})}, \quad (13)$$

где P_{rsm} – рабочее вакуумметрическое давление при смещении обреза патрубка 5 (рис. 1) относительно нижней образующей плоскости мембраны 2 в ненагруженном её состоянии, Па.

При этом уравнение (10) может быть представлено как:

$$P_{usm} = \frac{d_t^2 (P_n - (\pm \Delta P_{sm})) + (d_m^2 - d_t^2) \left[\frac{1}{3} + \frac{d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right] (P_r - (\pm \Delta P_{sm}))}{\left(d_m^2 - d_t^2 \right) \left[\frac{1}{3} + \frac{d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right] + d_t^2 \left[1 + \frac{2d_t}{d_m} + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]}, \quad (14)$$

где P_{usm} – необходимое вакуумметрическое давление в камере управления для обеспечения заданного рабочего вакуумметрического давления при смещении обреза патрубка 5 (рис. 1), Па.

Так как в нашем случае мы используем мембрану с жёстким центром, то воспользуемся характеристикой для таких мембран, приведённой в ряде исследований [9, 10]:

$$\frac{\Delta p R^4}{E \delta^4} = \frac{\left\{ \frac{7-\mu}{3} \left[1 + \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right] + \frac{(3-\mu)^2}{1+\mu} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right\} b_1^3}{(1-\mu) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right] \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^2 \delta^3}, \quad (15)$$

где Δp – перепад давлений на мембране, Па;
 R – радиус мембраны, м;
 r – радиус жёсткого центра, м;
 E – модуль упругости материала мембраны, Н/м²;
 δ – толщина мембраны, м;
 μ – коэффициент Пуассона;
 b_1 – перемещение жёсткого центра мембраны, м.

Отсюда дополнительный перепад давлений на мембране для перемещения жёсткого центра до её равновесного состояния можно рассчитать, как:

$$\Delta P_{sm} = \frac{16 E \delta_1^4 \left\{ \frac{7-\mu_1}{3} \left[1 + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 + \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^4 \right] + \frac{(3-\mu_1)^2}{1+\mu_1} \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right\} a^3}{d_m^4 (1-\mu_1) \left[1 - \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^4 \right] \left[1 - \left(\frac{d_t}{d_m} \right)^2 \right]^2 \delta_1^3}, \quad (16)$$

где δ_1 – толщина мембраны, м;
 μ_1 – коэффициент Пуассона;
 a – перемещение жёсткого центра, м.

Как следует из описания работы доильного аппарата, имеет место постоянное движение воздушного потока через полость доильного ведра и далее в камеру 6 рабочего вакуумметрического давления (рис. 1), щель 3, в камеру постоянного вакуумметрического давления и далее в вакуумпроводную магистраль, формируемого в результате подсоса воздуха через калиброванный канал коллектора, откачки воздуха из межстенных камер доильных стаканов при работе пульсатора с учётом частоты пульсаций, а также уменьшения свободной полости доильного ведра в результате поступления молока в процессе доения.

Очевидно, что интенсивность воздушного потока определяет величину щели 3 его откачки:

$$b = b_1 + b_2 + b_3, \quad (17)$$

где b – общая высота щели 3, м;
 b_1 – высота щели, необходимая для откачки воздуха, поступающего через калиброванный канал коллектора, м;
 b_2 – высота щели, необходимая для откачки воздуха, поступающего из межстенных камер

доильных стаканов и соединительных трубопроводов при работе пульсатора, м;

b_3 – высота щели, необходимая для откачки воздуха для поддержания заданного вакуумметрического давления, изменяющегося в результате уменьшения свободной полости доильного ведра при поступлении молока в процессе доения, м.

В окончательном виде уравнение, характеризующее перемещение мембраны b , при котором обеспечивается необходимый расход воздуха Q через щель 3, для создания заданного вакуумметрического давления P_r в полости доильного ведра и далее в доильных стаканах доильного аппарата, может быть представлено как:

$$b = \frac{1}{d_t} \sqrt{\frac{8 \mu_v l (Q_{kk} + Q_{mk} + Q_m)}{\pi (P_n - P_r)}}, \quad (18)$$

где μ_v – динамическая вязкость воздуха, Па·с;
 l – толщина стенки патрубка, м;
 Q_{kk} – интенсивность потока воздуха через калиброванный канал коллектора, м³/с;
 Q_{mk} – интенсивность потока воздуха, формируемого в результате работы пульсатора с учётом частоты пульсаций, м³/с;
 Q_m – интенсивность потока воздуха, формируемая в результате уменьшения свободной полости доильного ведра в результате поступления молока в процессе доения, м³/с.

Для обеспечения симметричного колебания рабочего вакуумметрического давления относительно заданного следует верхний обрез патрубка 5 (рис. 1) сместить вниз относительно нижней образующей плоскости мембраны 2 в ненагруженном её состоянии на величину, равную половине значения перемещения мембраны b :

$$a = \frac{b}{2} = \frac{1}{2 d_t} \sqrt{\frac{8 \mu_v l (Q_{kk} + Q_{mk} + Q_m)}{\pi (P_n - P_r)}}. \quad (19)$$

Результаты исследования. Теоретические исследования полученных аналитических выражений позволили установить интервалы варьирования изучаемых конструктивно-режимных параметров регулятора вакуумметрического давления в полости доильного ведра.

Так, нами установлено, что согласно уравнению (9) при вакуумметрическом давлении в камере управления 30 кПа рабочее вакуумметрическое давление составит 25,8 кПа, при давлении 45 кПа – 44,3 кПа.

Установлено, что для обеспечения рабочего вакуумметрического давления в полости доильного ведра 33,0 кПа в камере управления должно быть установлено вакуумметрическое давление, равное 30,9 кПа, а 45 кПа – мы получим при давлении в камере управления 45,6 кПа.

При изменении диаметра мембраны в интервале 0,03–0,07 м и перемещении жёсткого центра от 0 до 5 мм дополнительный перепад давлений на мембране варьирует в интервале 0–7276,9 Па.

Установлено, что при диаметре мембраны 50 мм и увеличении деформации мембраны от 0 до 5,0 мм изменение рабочего вакуумметрического давления от 3681,4 Па до 44835,1 происходит при увеличении вакуумметрического давления в камере управления от 12,0 до 45,0 кПа.

При отсутствии деформации мембраны для повышения рабочего давления от 6,0 кПа до 48,0 кПа, необходимо вакуумметрическое давление в камере управления увеличить с 13883,4 Па до 48000 Па.

При изменении частоты пульсаций пульсатора от 40 до 80 пульсов в минуту и увеличении интенсивности потока молока от 0 до 8 литров в минуту, диаметре калиброванного канала 0,5 мм и его длине 6 мм, согласно уравнению (18) деформация мембраны находится в интервале 0,61–0,72 мм. Отсюда смещение верхнего обреза патрубка относительно нижней образующей плоскости мембраны при ненагруженном её состоянии может составить половину максимального расчётного значения деформации мембраны – 0,36 мм (уравнение (19)).

Выводы.

1. Наиболее приемлемым техническим решением доильного аппарата со сбором молока в доильное ведро является доильный аппарат с изменяемым вакуумметрическим давлением в полости доильного ведра и, как следствие, изменяемым вакуумным режимом доения в подсосковых и межстенных камерах доильных стаканов, изменяемой частотой пульсаций и соотношением тактов пульсатора в зависимости от интенсивности потока молока, выводимого из вымени коровы.

2. Теоретическими исследованиями рабочего процесса регулятора вакуумметрического давления установлено, что существует зависимость вакуумметрического давления в камере рабочего вакуумметрического давления регулятора от диаметра мембраны, диаметра её жёсткого центра, диаметра патрубка и вакуумметрического давления в камере управления.

3. Для перемещения жёсткого центра мембраны до её равновесного состояния необходим дополнительный перепад давлений на мембране, описываемый уравнением (16).

4. В процессе работы регулятора деформация мембраны неизбежна либо вследствие конструктивного смещения, как правило, вниз верхнего обреза патрубка относительно нижней образующей плоскости мембраны в ненагруженном её состоянии, либо движения потока воздуха, жидкости или их смеси через щель, образуемую мембраной и

верхним обрезом патрубка. Это учитывается уравнением (13), устанавливающим требуемое рабочее вакуумметрическое давление в зависимости от вакуумметрического давления в камере управления регулятора и дополнительного перепада давлений на мембране для её деформации, описываемого уравнением (16).

5. Установлено, что для получения более высокого рабочего вакуумметрического давления необходимо повышать вакуумметрическое давление в камере управления.

6. Теоретические исследования позволили установить возможную деформацию мембраны, а также требуемое смещение обреза патрубка относительно нижней образующей плоскости мембраны при ненагруженном её состоянии в зависимости от потока воздуха через калиброванное отверстие коллектора, объёма межстенных камер доильных стаканов и соединительных шлангов, частоты пульсаций пульсатора и интенсивности потока молока, поступающего в полость доильного ведра (уравнение (18)). Смещение верхнего обреза патрубка относительно нижней образующей плоскости мембраны при ненагруженном её состоянии может составить половину максимального расчётного значения деформации мембраны (уравнение (19)).

Литература

1. Андрианов Е.А. Исследование устройства для управления режимом работы стимулирующее адаптивного доильного аппарата / Е.А. Андрианов, А.М. Андрианов, А.А. Андрианов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2014. № 3 (42). С. 123–129.
2. Кирсанов В.В. Пути совершенствования оборудования для доения и первичной обработки молока / В.В. Кирсанов, В.Н. Кравченко // Тракторы и сельхозмашины. 2005. № 9. С. 41.
3. Краснов И.Н. Повышение эффективности работы доильного аппарата четвертного доения / И.Н. Краснов, А.С. Макаренко // Вестник аграрной науки Дона. 2014. Т. 26. № 2. С. 16–25.
4. Некрашевич В.Ф. Выведение молока из вымени коровы доильным аппаратом / В.Ф. Некрашевич, В.М. Ульянов // Техника в сельском хозяйстве. 2008. № 3. С. 15–17.
5. Соловьев С.А. Методика моделирования высокоскоростного, энергосберегающего доильного аппарата / С.А. Соловьев, В.А. Шахов // В сборнике: Труды 14 Международного симпозиума по машинному доению сельскохозяйственных животных, 2008. С. 169–176.
6. Заявка № 2015150676. Доильный аппарат // В.Ф. Ужик, А.И. Тетерядченко. Заяв. 25.11.2015.
7. Ужик В.Ф. К изменению соотношения тактов пульсатора доильного аппарата / В.Ф. Ужик, А.И. Тетерядченко, О.В. Ужик // Научная жизнь. 2016. № 12. С. 15–25.
8. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: МАШГИЗ, 1962. 456 с.
9. Ужик О.В. Разработка и обоснование конструктивно-режимных параметров переносного адаптивного манипулятора доения коров с автономным источником питания / О.В. Ужик // Дисс. канд. техн. наук. Белгород, 2007. 174 с.
10. Шахов В.А. Повышение эффективности использования и эксплуатационной надёжности доильных аппаратов / В.А. Шахов, В.Д. Поздняков, А.П. Козловцев, И.В. Герасименко // АПК России, 2014. Т. 76. № 1. С. 60–64.