doi:10.18286/1816-4501-2026-3-257-264
УДК 637.116

Результаты исследований по обоснованию конструктивных параметров ступенчатой сосковой трубки доильного аппарата

А. В. Яшин✉, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механизация технологических процессов в АПК»
В. А. Овтов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Механизация технологических процессов в АПК»
В. Д. Бадов, старший преподаватель кафедры «Финансы и информатизация бизнеса»
ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ
440014, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30
✉yashin.a.v@pgau.ru

Резюме. В статье представлены результаты исследований по обоснованию конструктивных параметров ступенчатой сосковой трубки доильного аппарата с учетом формирования деформационной волны прогиба ее рабочей части от присоска к отводной части, способствующей выжиманию порции молока из соскового отдела цистерны вымени за такт сжатия с выжиманием. Для этого предложено конструктивное исполнение рабочей части сосковой трубки со ступенью меньшей толщины со стороны присоски. Установлено, что для обеспечения начала деформационной волны радиального прогиба рабочей части сосковой трубки ближе к присоску целесообразно использовать диапазон толщины рабочей части сосковой трубки от 0,0012 м до 0,0018 м и длины ступени от 0,012 м до 0,03 м, так как при этих параметрах образуется длина полуволны прогиба соответственно в диапазоне от 0,01042 м до 0,013 м. Подтверждено, что в сравнении со стандартной сосковой трубкой марки ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1 ступенчатая сосковая трубка с конструктивными параметрами (длина ступени 0,028 м и толщина 0,0015 м при вакуумметрического давлении ее смыкания 6 кПа) обеспечивает максимальный прогиб рабочей части сосковой трубки около середины ступени 0,014 м, а образующаяся деформационная волна прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки формирует максимум в области ступени с меньшей толщиной, чем остальная рабочая часть сосковой трубки с последующим затуханием деформационной волны.

Ключевые слова: прогиб, сосковая трубка, толщина ступени, длина ступени, молоковыведение.
Для цитирования: Яшин А. В., Овтов В. А., Бадов В. Д. Результаты исследований по обоснованию конструктивных параметров ступенчатой сосковой трубки доильного аппарата // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 3 (75). С. 257-264. doi:10.18286/1816-4501-2026-3-257-264

Research results on specification of the design parameters of a stepped teat pilpe of a milking machine

A.V. Yashin✉**, V.A. Ovtov, V.D. Badov**
FSBEI HE Penza State Agrarian University
440014, Russian Federation, Penza, Botanicheskaya St., 30
✉yashin.a.v@pgau.ru

Abstract. The article presents research results regarding the specification of the design parameters for a stepped teat pipe of a milking machine. The design accounts for the formation of a deformation wave-a deflection traveling from the mouthpiece toward the outlet section—which facilitates the expression of a portion of milk from the teat cistern during the compression-and-massage stroke. To achieve this, a design is proposed featuring a step of reduced thickness in the working section of the pipe on the mouthpiece side. It was found that, to ensure the onset of the radial deflection deformation wave in the working section of the teat pipe closer to the mouthpiece, it is advisable to use a working section thickness range of 0.0012 m to 0.0018 m and a step length range of 0.012 m to 0.03 m; these parameters result in a deflection half-wavelength ranging from 0.01042 m to 0.013 m. It was confirmed that, compared to the standard DD.00.041A pipe used in the ADU-1 milking machine, a stepped pipe with specific design parameters (step length of 0.028 m and thickness of 0.0015 m, with a collapse vacuum pressure of 6 kPa) ensures a maximum deflection of the working section at approximately the midpoint of the step (0.014 m). Furthermore, the resulting deformation wave peaks in the area of the step-which is thinner than the rest of the working section-before subsequently attenuating.

Keywords: deflection, teat pipe, step thickness, step length, milk extraction.
For citation: Yashin A.V., Ovtov V.A., Badov V.D. Research results on specification of the design parameters of a stepped teat pilpe of a milking machine // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.3 (75): 257-264 doi:10.18286/1816-4501-2026-3-257-264

Введение

Согласно данным исследований [1, 2, 3], снижение продуктивности молочного стада во многом обусловлено несовершенством процесса машинного доения, а именно отсутствием полного физиологического соответствия между режимами работы оборудования и рефлекторной деятельностью животного. Травматизация вымени, возникающая при

использовании неадаптированной техники, закономерно приводит к развитию воспалительных процессов в вымени и маститов [4, 5, 6]. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на оптимизацию процесса машинного доения. Важнейшим элементом, обеспечивающим непосредственный контакт с животным, является сосковая трубка [7, 8, 9]. Она является исполнительным механизмом, имитирующим естественный процесс сосания теленком или ручного доения [10, 11, 12]. Следует учитывать, что молоковыведение представляет собой сложный механический процесс, неразрывно связанный с нейрофизиологическими механизмами регуляции, поэтому эффективность доения как с технической, так и с физиологической сторон напрямую зависит от того, насколько конструктивные параметры сосковой трубки соответствуют естественным потребностям организма животного [13, 14, 15].

Цель исследований – обоснование конструктивных параметров ступенчатой сосковой трубки доильного аппарата с учетом формирования деформационной волны прогиба ее рабочей части от присоска к отводной части сосковой трубки, способствующее повышению интенсивности молоковыведения за такт сжатия с выжиманием.

Материалы и методы

Исследования по обоснованию конструктивных параметров ступенчатой сосковой трубки доильного аппарата проводили на кафедре «Механизация технологических процессов в АПК» ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ. На рисунке 1а представлена конструкция сосковой трубки, где за срединную поверхность принята поверхность, имеющая радиус R_c [16, 17].

Применив безмоментную теорию прочностного расчета тонких оболочек, получили дифференциальное уравнение прогиба рабочей части сосковой трубки [7]:

$$\frac{d^4u}{dz^4} - 4\beta^4 u = 4\beta^4\left(\frac{\nu\Delta H R_c}{H} - \frac{pR_c^2}{Eh}\right), \qquad (1)$$

где u – прогиб рассматриваемой точки рабочей части сосковой трубки в радиальном направлении, м; z – координата проекции рассматриваемой точки рабочей части сосковой трубки на ее продольную ось, являющейся осью симметрии в направлении от присоска к отводной части, м; $\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{h^2R_c^2}}$ – коэффициент затухания колебаний, м–1; ν – коэффициент поперечного сжатия (Пуассона) материала рабочей части сосковой трубки; ΔH– абсолютное удлинение рабочей части сосковой трубки, м; R_c – средний радиус рабочей части сосковой трубки, м; H– первоначальная длина рабочей части сосковой трубки, м; p – вакуумметрическое давление на внутренней стороне рабочей части сосковой трубки, Па; E – модуль упругости (Юнга) материала рабочей части сосковой трубки, Па; h – толщина рабочей части сосковой трубки, м.

Общее решение линейного неоднородного дифференциального уравнения прогиба рабочей части сосковой трубки (1) имеет вид [16]:

$$u = C_1 e^{\sqrt{2}\beta z} + C_2 e^{-\sqrt{2}\beta z} + C_3 \sin\left(\sqrt{2}\beta z\right) + C_4 \cos\left(\sqrt{2}\beta z\right) + \frac{\nu\Delta H R_c}{H} - \frac{pR_c^2}{Eh}, \qquad (2)$$

где C_1, C_2, C_3 и C_4 – константы.

Результаты

Длину полуволны прогиба, возникающего на рабочей части сосковой трубки при потере её устойчивости в такте «сжатие с выжиманием», рассчитывают по следующему уравнению [7]:

$$l_z = \frac{\pi}{\beta} = \pi\sqrt[4]{\frac{h^2R_c^2}{3(1-\nu^2)}}. \qquad (3)$$

Из рисунка 1 следует, что уравнение, по которому определяют средний радиус рабочей части сосковой трубки, имеет вид:

$$R_c = R_{н\,max} - 0{,}5h - z \cdot tg\alpha, \qquad (4)$$

где $R_{н\,max}$– максимальный наружный радиус рабочей части сосковой трубки в месте соединения с присоском, м; α – угол наклона образующей усеченного конуса рабочей части сосковой трубки к вертикали от его отводной части к присоску, град.

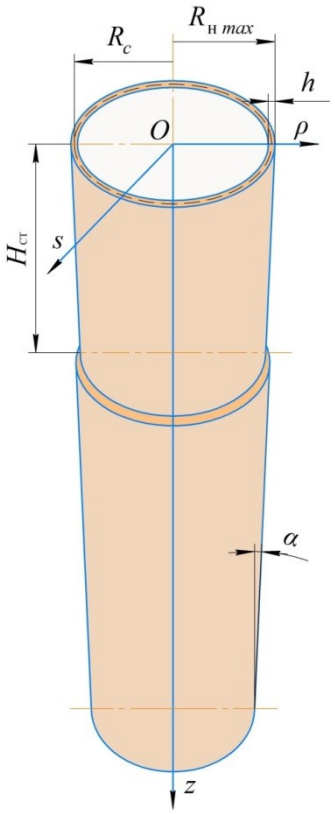


Рис. 1. К определению среднего радиуса рабочей части сосковой трубки (обозначения в тексте)

При этом α = 1,5° как для стандартной сосковой трубки марки ДД.00.041А, так и для ее ступенчатой модификации. Кроме того, максимальный наружный радиус рабочей части стандартной сосковой трубки марки ДД.00.041А, выполненной из нитрильного каучука (черной резины) доильного аппарата АДУ-1 в месте соединения с присоском $R_{н\,max\,станд.}$

составляет $0{,}01575$ м при толщине сосковой трубки $h_{\text{станд.}} = 0{,}0022$ м [18, 20].

Тогда для ступенчатой сосковой трубки справедливо следующее уравнение:

$$R_{\text{н}\,max} = 0{,}01575 - \left(h_{\text{станд}} - h\right) = 0{,}01355 + h. \quad (5)$$

С учетом уравнения (5) уравнение для определения среднего радиуса рабочей части сосковой трубки (4) примет вид:

$$R_{\text{с}} = 0{,}01355 + 0{,}5h - z \cdot tg\alpha. \quad (6)$$

Приняв во внимание уравнения (3-6), определим длину полуволны прогиба части ступенчатой сосковой трубки:

$$l_z = \frac{\pi}{\beta} = \pi \sqrt[4]{\frac{h^2(0{,}01355 + 0{,}5h - z \cdot tg\alpha)}{3(1-\nu^2)}}. \quad (7)$$

Кроме того, для материала трубки $\nu = 0{,}5$, тогда из уравнения (7)

$$l_z = 2{,}56\sqrt[4]{h^2(0{,}01355 + 0{,}5h - z \cdot tg\alpha)}. \quad (8)$$

Из анализа уравнения (8) следует, что основными конструктивными параметрами оказывающими влияние на длину полуволны прогиба части ступенчатой сосковой трубки являются: толщина рабочей части сосковой трубки h, угол наклона образующей усеченного конуса рабочей части сосковой трубки к вертикали от его отводной части к присоску α и координата проекции рассматриваемой точки рабочей части сосковой трубки на ее продольную ось z.

При этом прогиб рассматриваемой точки рабочей части сосковой трубки в радиальном направлении u определяется уравнением (2), которое носит универсальный характер. Для выполнения численных расчетов прогиба при различных конструктивных параметрах требуется предварительно определить начальные условия. Эти условия должны соответствовать конструкции сосковой трубки и способу ее крепления в гильзе доильного стакана [18, 19].

Поскольку любое дифференциальное уравнение порядка выше первого имеет несколько решений, для нахождения конкретных значений постоянных C_1, C_2, C_3 и C_4 уравнения (2), то, согласно теореме Коши, существует единственное решение данного уравнения, удовлетворяющее заданным начальным условиям. Это гарантирует существование единственного решения уравнения (2) в виде $u'''' = f(z,\ u,\ u',\ u'',\ u''')$, удовлетворяющее начальным условиям при $z = z_0,\ u = u_0,\ u' = u_0{}',\ u'' = u_0{}'',\ u''' = u_0{}'''$.

Ввиду того, что рабочую часть сосковой трубки следует рассматривать как длинную оболочку, а не кольцо, так как длина рабочей части соковой трубки H больше радиуса её срединной поверхности $R_{\text{с}}$, тогда при $z \gg R_{\text{с}}$ или $z \Rightarrow \infty$ величина $e^{\sqrt{2}\beta z}$ при первом слагаемом (формула 2) также стремится к бесконечности. Однако, в случае с радиальным прогибом рабочей части сосковой трубки с возрастанием z величина u должна стремиться к определённому значению, поэтому полагаем $C_1 = 0$. При этом второе слагаемое является малозначащим ввиду того, что величина $e^{-\sqrt{2}\beta z}$ стремится к нулю, поэтому целесообразно для упрощения решения также приять $C_2 = 0$.

Тогда уравнение радиального прогиба рабочей части сосковой трубки (2) примет вид:

$$u = \mathrm{C}_3 \sin\left(\sqrt{2}\beta z\right) + \mathrm{C}_4 \cos\left(\sqrt{2}\beta z\right) + \frac{\nu \Delta H R_{\text{с}}}{H} - \frac{pR_c^2}{Eh}. \quad (9)$$

Так как в уравнении (9) осталось только две неизвестных постоянных, то решение задачи Коши упрощается до вида $u'''' = f(z,\ u,\ u')$, удовлетворяющее начальным условиям соответственно $z = z_0$, $u = u_0, u' = u_0{}'$.

Первая производная от прогиба рабочей части сосковой трубки соответствует углу поворота φ (в радианах) ее поперечного сечения [7]:

$$\varphi = \frac{du}{dz} = \sqrt{2}\beta \mathrm{C}_3 \cos\left(\sqrt{2}\beta z\right) - \sqrt{2}\beta \mathrm{C}_4 \sin\left(\sqrt{2}\beta z\right). \quad (10)$$

В виду того, что рабочая часть сосковой трубки в местах соединения с присоском и отводной частью образуют посадки с гильзой, обеспечивающие отсутствия ее прогиба и соответственно поворота поперечного сечения, тогда начальные условия целесообразно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \text{если } z = 0, \text{то } u = 0; \\ \text{если } z = H, \text{то } \varphi = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Тогда из уравнений (9) и (10) с учетом начальных условий (11) получим:

$$\begin{cases} \mathrm{C}_4 = \dfrac{pR_c^2}{Eh} - \dfrac{\nu \Delta H R_{\text{с}}}{H}; \\ \mathrm{C}_3 = \left(\dfrac{pR_c^2}{Eh} - \dfrac{\nu \Delta H R_{\text{с}}}{H}\right) tg\left(\sqrt{2}\beta H\right). \end{cases} \quad (12)$$

После ряда математических преобразований уравнение (9) с учетом системы уравнений (12) примет вид:

$$u = \left(\frac{\nu \Delta H R_{\text{с}}}{H} - \frac{pR_c^2}{Eh}\right)\left(1 - tg\left(\sqrt{2}\beta H\right)\sin\left(\sqrt{2}\beta z\right) + \cos\left(\sqrt{2}\beta z\right)\right). \quad (13)$$

Ввиду того, что при выводе уравнения (13) был использован ряд допущений, а также ограничений при определении постоянных C_1, C_2, C_3 и C_4 уравнения (2), то целесообразно использовать коэффициенты, учитывающие совместное и отдельное влияния предварительного натяжения сосковой трубки и вакуумметрического давления, а также максимального прогиба в следующем виде:

$$u = k_{\text{к.м.п.}} k_{\text{д.в.}} u_{max}, \quad (14)$$

где $u_{max} = k_{\text{п.н.в.д.}}\left(\frac{k_{\text{п.н.}}\nu \Delta H R_{\text{с}}}{H} - \frac{k_{\text{в.д.}} pR_c^2}{Eh}\right)$ – максимальный прогиб, м; $k_{\text{к.м.п.}}$ – коэффициент, корректирующий максимальный прогиб; $k_{\text{д.в.}} = 1 - tg\left(\sqrt{2}\beta H\right) sin\left(\sqrt{2}\beta z\right) + cos\left(\sqrt{2}\beta z\right)$ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние деформационной волны на прогиб; $k_{\text{п.н.в.д.}}$ – коэффициент, учитывающий совместное влияние предварительного натяжения сосковой трубки и вакуумметрического давления; $k_{\text{п.н.}}$ – коэффициент, учитывающий влияние предварительного натяжения сосковой трубки;

$k_{в.д.}$– коэффициент, учитывающий влияние вакуумметрического давления.

В уравнении (14) имеются величины, изменяющие свое значение в зависимости от координаты z (β, R_c, h), а также от продолжительности t такта сжатия с выжиманием (p) [20]. Кроме того, для нитрильной (черной) резины стандартной сосковой трубки марки ДД.00.041А и ступенчатой сосковой трубки $E = 1500000$ Па, $H = 0{,}128$ м и ΔH=0,026 м [19].

Значения коэффициентов, учитывающих совместное и отдельное влияния предварительного натяжения сосковой трубки и вакуумметрического давления, а также корректирующий максимальный прогиб по длине сосковой трубки, целесообразно определять по величине максимального прогиба сосковой трубки, достигающего ее среднего радиуса R_c при вакуумметрическом давлении смыкания $p_{смык}$. Установлено [19], что для ступенчатой сосковой трубки со ступенью от присоска длиной $H_{СТ} = 0{,}028$ м и толщиной $h = 0{,}0015$ м среднее вакуумметрическое давление ее смыкания $p_{смык} = 6$ кПа, а для сосковой трубки марки ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1 с толщиной $h_{станд} = 0{,}0022$ м $p_{смык} = 7{,}5$ $p_{смык} = 7{,}5$ кПа. Тогда для ступенчатой сосковой трубки с $H_{СТ} = 0{,}028$ м и $h = 0{,}0015$ м: $k_{к.м.п.} = 0{,}4$, $k_{п.н.в.д.} = 1$, $k_{п.н.} = 1$, $k_{в.д.} = 28$. В свою очередь, для сосковой трубки марки ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1: $k_{к.м.п.} = 0{,}45$, $k_{п.н.в.д.} = -34$, $k_{п.н.} = 1, k_{в.д.} = 1$.

Результаты расчета длины полуволны l_z прогиба части ступенчатой сосковой трубки позволяют обосновать необходимый диапазон значений ее толщины h и длины ступени $H_{СТ}$, так как для повышения интенсивности молоковыведения необходимо обеспечить последовательную деформационную волну радиального прогиба от присоска к отводной трубке.

Результаты расчета длины полуволны прогиба для диапазонов толщин рабочей части сосковой трубки h от 0,0012 м до 0,0018 м и координат z проекции рассматриваемой точки на ось Oz от 0 до $H_{СТ}$ длины ступени рабочей части сосковой трубки от присоска (0,012 м, 0,021 м, 0,030 м) представлены на рисунке 2.

Необходимо отметить, что уменьшение толщины h рабочей ступени сосковой трубки и одновременное увеличение длины ступени $H_{СТ}$ ведет к снижению длины полуволны прогиба. Это обеспечивает формирование последовательной деформационной волны прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки, а зона формирования волны смещается ближе к присоску. Для создания волнового радиального прогиба в зоне, прилегающей к присоску, целесообразно ориентироваться на следующие диапазоны параметров: толщина рабочей части сосковой трубки от 0,0012 м до 0,0018 м, длина ступени от 0,012 м до 0,03 м. При таких значениях длина полуволны прогиба находится в интервале 0,01042…0,013 м. Следует учитывать и технологические ограничения: при толщине ступени менее 0,0012 м возникают сложности при сборке и разборке доильного стакана, а при длине ступени менее 0,012 м затрудняется сам процесс изготовления сосковой трубки.

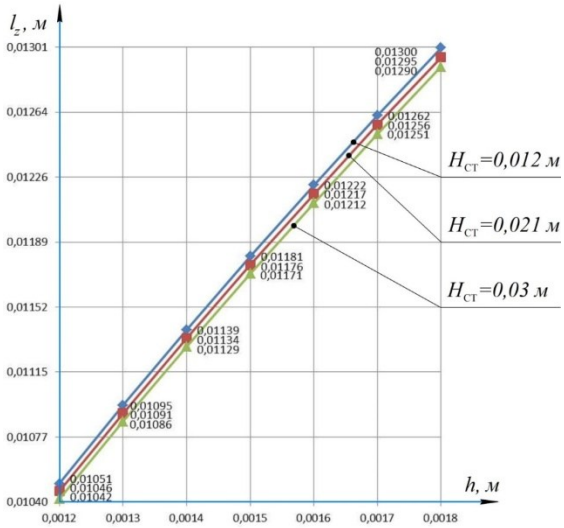


Рис. 2. Зависимость длины полуволны прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки от ее толщины и длины ступени

Превышение же указанных параметров (толщина более 0,0018 м и длина более 0,03 м) приводит к существенному увеличению длины волны прогиба. В этом случае волна радиального прогиба рабочей части значительно смещается от присоска. В качестве сравнения можно отметить, что стандартная сосковая трубка с постоянной толщиной стенки с течением времени теряет исходное положение в средней части, делая невозможным извлечение дополнительной порции молока из соска.

На рисунках 3 - 6 представлены результаты расчета прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки и сосковой трубки марки ДД.00.041 А доильного аппарата АДУ-1.

Максимальный прогиб рабочей части ступенчатой сосковой трубки, определенный по теоретической зависимости с учетом уравнения (14) с принятием во внимание коэффициентов совместного и отдельного влияния предварительного натяжения сосковой трубки и вакуумметрического давления представлен кривой 1 (рис.4). Отчетливо видно увеличение прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки по длине ступени $H_{СТ} = 0{,}028$ м при толщине $h = 0{,}0015$ м для вакуумметрического давления ее смыкания $p_{смык} = 6$ кПа. При этом отмечается, что рабочая часть сосковой трубки в действительности не может ступенчато прогибаться, но в данном случае анализируется одна часть уравнения прогиба (14), а именно, только u_{max}. Полученные значения максимального прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки u_{max} были аппроксимированы, и получено адекватное уравнение шестого порядка с коэффициентом корреляции $R = 0{,}982$:

$$u_{max} = -1{,}34 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-4} z + 4 \cdot 10^{-5} z^2 - 9 \cdot 10^{-7} z^3 + 1 \cdot 10^{-8} z^4 - 6 \cdot 10^{-11} z^5 + 1 \cdot 10^{-13} z^6. \quad (15)$$

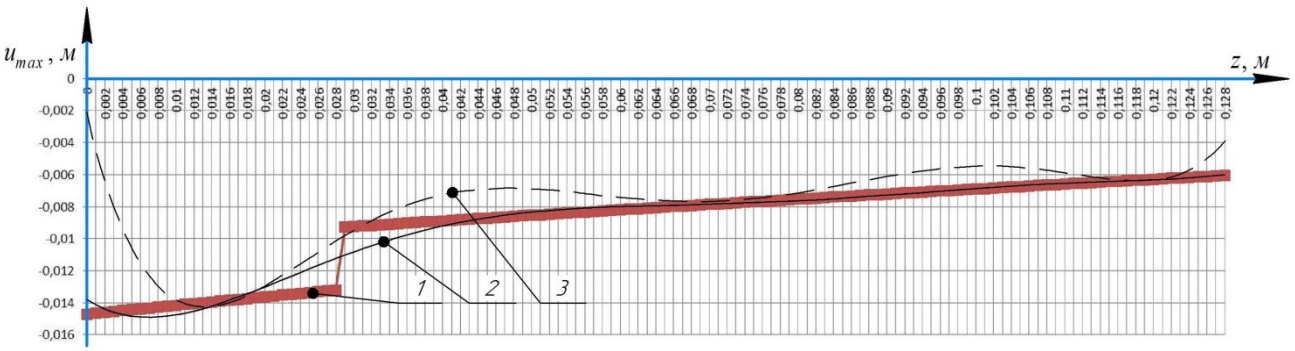


Рис. 3. Зависимость максимального прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки по ее длине H со ступенью от присоска длиной $\mathbf{H_{СТ} = 0,028}$ м и толщиной $\mathbf{h = 0,0015}$ м при вакуумметрическом давлении смыкания сосковой трубки $\mathbf{p_{смык} = 6}$ кПа: 1 – по теоретическому уравнению (14); 2 – по расчетному уравнению (15), 3 – по расчетному уравнению (16), учитывающему пересечение с осью $\boldsymbol{Ou_{max}}$ в точках О с координатами (0; 0) и при $\boldsymbol{H = 0,128}$ м с координатами (0,128; 0)

Уравнение (15) представлено кривой 2 на рисунке 3. Однако, ввиду того, что при определении постоянных коэффициентов в уравнении (2) использовалось условие (11), учитывающее, что рабочая часть сосковой трубки в местах соединения с присоском и отводной частью образуют посадки с гильзой, обеспечивающие отсутствия ее прогиба и соответственно поворота поперечного сечения, то полученные значения максимального прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки u_{max} были аппроксимированы. При этом получено уравнение шестого порядка, учитывающее пересечения с осью Ou_{max} в местах образования посадок рабочей части сосковой трубки с гильзой с коэффициентом корреляции $R = 0,756$:

$$u_{max} = -2,9 \cdot 10^{-3} z + 2 \cdot 10^{-4} z^2 - 5 \cdot 10^{-6} z^3 + 6 \cdot 10^{-8} z^4 - 4 \cdot 10^{-10} z^5 + 8 \cdot 10^{-13} z^6. \quad (16)$$

Уравнение (16) представлено кривой 3 на рисунке 4 и отображает, что максимальный прогиб рабочей части сосковой трубки составит около середины длины ступени $H_{СТ} = 0,028$ м при толщине $h = 0,0015$ м для вакуумметрического давления ее смыкания $p_{смык} = 6$ кПа.

На рисунке 4 представлена деформационная волна прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки, определенной по уравнению (14) с принятием во внимание коэффициентов совместного и отдельного влияния предварительного натяжения сосковой трубки и вакуумметрического давления, а также корректирующего максимального прогиба по длине сосковой трубки. Показано, что максимальная деформационная волна прогиба формируется в зоне ступени с меньшей толщиной, чем остальная рабочая часть сосковой трубки, с последующим ее затуханием.

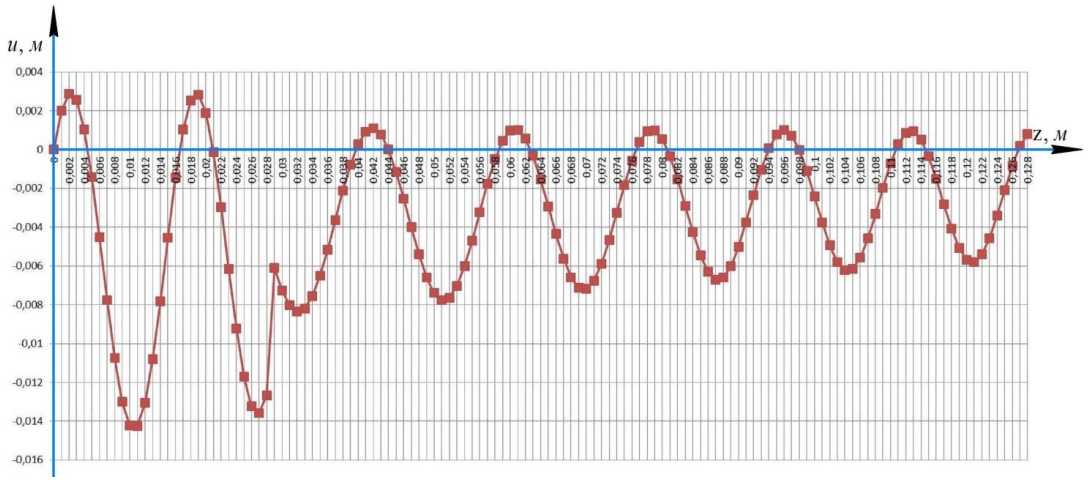


Рис. 4. Зависимость деформационной волны прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки по ее длине H по теоретическому уравнению (14) со ступенью от присоска длиной $\mathbf{H_{СТ} = 0,028}$ м и толщиной $\mathbf{h = 0,0015}$ м при вакуумметрическом давлении смыкания сосковой трубки $\mathbf{p_{смык} = 6}$ кПа

Максимальный прогиб рабочей части ступенчатой сосковой трубки, определенный по теоретической зависимости с учетом уравнения (14) с принятием во внимание коэффициентов совместного и отдельного влияния предварительного натяжения сосковой трубки и вакуумметрического давления, представлен кривой 1 (рис. 6). Здесь отчетливо видно увеличение прогиба около середины рабочей части ступенчатой сосковой трубки марки ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1 с толщиной $h_{станд} =$

0,0022 м при вакуумметрическом давлении смыкания сосковой трубки $p_{\text{смык}} = 7{,}5$ кПа, что подтверждает наличие такта сжатия без выжимания. Полученные значения максимального прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки u_{max} были аппроксимированы, и получено адекватное уравнение второго порядка с коэффициентом корреляции $R = 1$:

$$u_{max} = -0{,}0126 - 7 \cdot 10^{-6} z + 5 \cdot 10^{-8} z^2 \,. \quad (17)$$

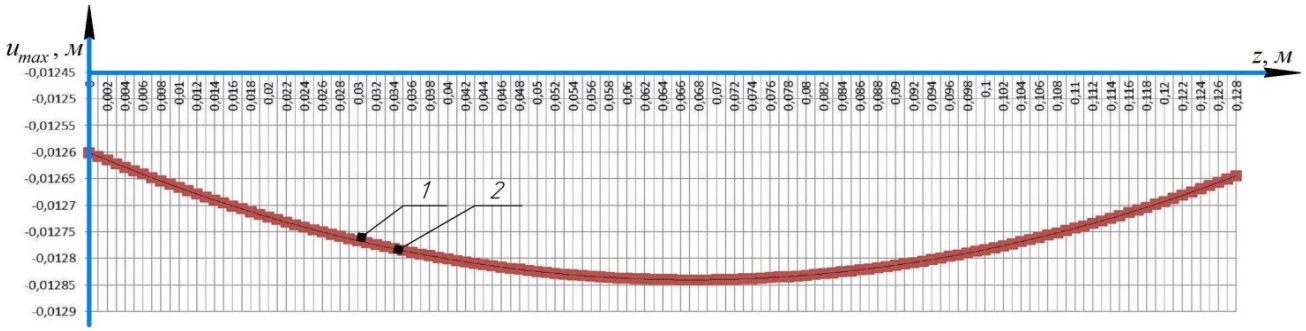


Рис. 5. Зависимость максимального прогиба сосковой трубки марки ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1 по ее длине $\mathbf{H}$ с толщиной $\mathbf{h}_{\text{станд}} = \mathbf{0,0022}$ м при вакуумметрическом давлении смыкания сосковой трубки $\mathbf{p}_{\text{смык}} = \mathbf{7,5}$ кПа: 1 – по теоретическому уравнению (14); 2 – по расчетному уравнению второго порядка (17)

Уравнение (17) представлено параболой 2 на рисунке 5, где ее вершина расположена около середины рабочей части ступенчатой сосковой трубки марки ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1, что подтверждает ранее сделанное заключение.

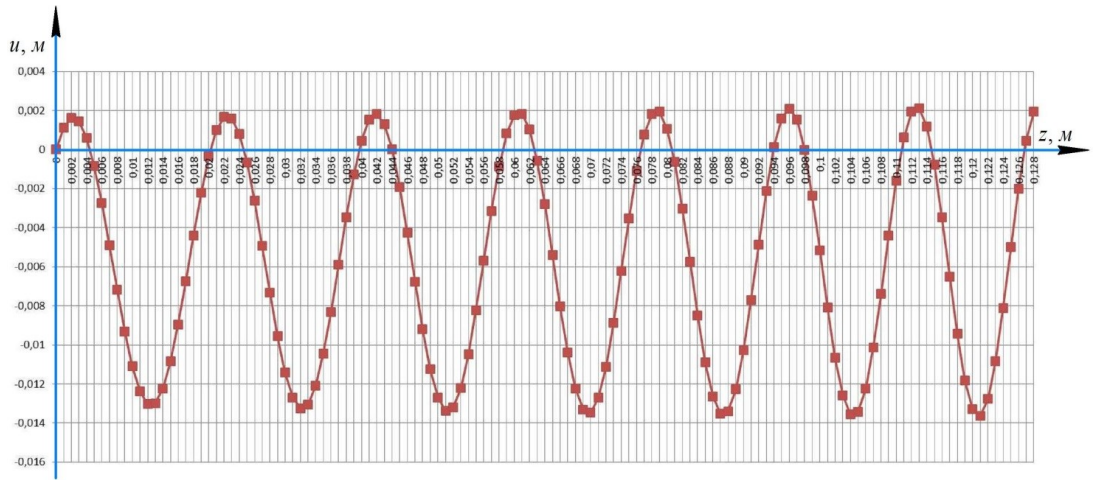


Рис. 6 Зависимость деформационной волны прогиба стандартной сосковой трубки марки ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1 по ее длине $\mathbf{H}$ по теоретическому уравнению (14) с толщиной $\mathbf{h}_{\text{станд}} = \mathbf{0,0022}$ м при вакуумметрическом давлении смыкания сосковой трубки$\mathbf{p}_{\text{смык}} = \mathbf{7,5}$ кПа

На рисунке 6 представлена деформационная волна прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки марки ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1, определенная по уравнению (14) с принятием во внимание коэффициентов совместного и отдельного влияния предварительного натяжения сосковой трубки и вакуумметрического давления, а также корректирующего максимального прогиба по длине сосковой трубки, указывающая на то, что наблюдается практически идентичная максимальная деформационная волна прогиба по всей длине рабочей части сосковой трубки и наличие такта сжатия без выжимания.

Обсуждение

Обзор и анализ научной информации показывает, что снижение продуктивности молочного стада во многом обусловлено несовершенством машинного доения, а именно, отсутствием полного физиологического соответствия между режимами работы оборудования и рефлекторной деятельностью животного [1, 3]. При этом исследователи в области машинного доения указывают, что одним из основных элементов, обеспечивающих непосредственный контакт с животным, является сосковая трубка, которая выполняет функцию исполнительного механизма, аналогичную естественному процессу сосания теленком или ручному доению [7, 8, 12]. Анализируя результаты исследований доильных аппаратов отсасывающе-выжимающего принципа действия, следует отметить, что они имеют сложную и недостаточно надежную конструкцию в своем большинстве, исключающую объемное воздействие на вымя коровы [2, 13, 14].

Представленное уравнение прогиба рабочей части сосковой трубки, а также коэффициентов, учитывающих совместное и отдельное влияния предварительного натяжения сосковой трубки и вакуумметрического

давления, а также максимального прогиба, имеют научную новизну, как и итоги их расчета. Достигнутые результаты подтверждены апробацией, являются универсальными и применимыми к двухкамерным доильным стаканам доильных аппаратов. Проведенные исследования позволили установить целесообразность применения ступенчатой сосковой трубки доильного аппарата для обеспечения такта сжатия с выжиманием. При этом необходимо использование диапазоны толщины ступени от 0,0012 м до 0,0018 м и ее длины - от 0,012 м до 0,03 м.

Заключение

Выполнение рабочей части сосковой трубки со ступенью, имеющей меньшую толщину и обращенной к присоску, обеспечивает такт сжатия с выжиманием. Согласно расчетным данным, длина полуволны l_z прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки обратно пропорциональна толщине ступени h и прямо пропорциональна ее длине $H_{\text{СТ}}$. С целью формирования волны радиального прогиба в зоне, максимально приближенной к присоску, обосновано применение следующих параметров: толщина рабочей части сосковой трубки в пределах 0,0012…0,0018 м, длина ступени - 0,012…0,03 м. Указанные интервалы обеспечивают длину полуволны прогиба l_z в диапазоне 0,01042…0,013 м.

В результате сравнительного анализа подтверждено, что ступенчатая сосковая трубка с параметрами, соответствующими установленному выше диапазону (длина ступени $H_{\text{СТ}} = 0{,}028$ м и толщина $h = 0{,}0015$ м при вакуумметрического давлении смыкания $p_{\text{смык}} = 6$ кПа), обеспечивает максимальный прогиб рабочей части сосковой трубки по сравнению со стандартной сосковой трубкой ДД.00.041А доильного аппарата АДУ-1. Максимальный прогиб рабочей части в этом случае достигает 0,014 м и формируется в области середины ступени. Образующаяся деформационная волна прогиба рабочей части ступенчатой сосковой трубки имеет выраженный максимум на участке ступени с уменьшенной толщиной стенки, тогда как на остальной рабочей части наблюдается затухание волны. Таким образом, при увеличении вакуумметрического давления на внутренней стороне рабочей части сосковой трубки формируется последовательная деформационная волна прогиба от присоска к отводной части сосковой трубки, способствующая выжиманию порции молока из соскового отдела цистерны вымени за такт сжатия с выжиманием.

Литература

1. Михалев В. И., Зимников В. И. Автоматизированное доение и заболеваемость коров маститом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2024. Т. 19. № 3. С. 507-516.doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-3-507-516

2. Совершенствование доильного оборудования для доения коров / Т. Н. Кузьмина, С. А. Масловский, И. Н. Ким и др. // Техника и технологии в животноводстве. 2024. Т. 14. № 4. С. 10-17. doi: 10.22314/27132064-2024-14-4-10

3. Состояние, проблемы и перспективы производства молока в России / В. М. Зимняков, Г. В. Ильина, Д. Ю. Ильин и др. // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 1(49). С. 4-10. doi: 10.22314/27132064-2023-1-4

4. Жилич Е. Л., Кувшинов А. А., Рогальская Ю. Н. Применение систем идентификации и контроля физиологического состояния животных // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 4(44). С. 33-36. doi: 10.51794/27132064-2021-4-33

5. Кирсанов В. В., Кузьмина Т. Н. Анализ доильного оборудования, предлагаемого на российском рынке // Техника и оборудование для села. 2024. № 10(328). С. 26-28. doi: 10.33267/2072-9642-2024-10-26-28

6. Разработка и исследование многофункциональных доильных аппаратов на основе датчика почетвертного контроля интенсивности молоковыведения / П. А. Савиных, А. А. Рылов, В. Н. Шулятьев и др. // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 2(50). С. 4-10. doi: 10.22314/27132064-2023-2-4

7. Теоретическое исследование деформаций сосковой трубки доильного аппарата / А. В. Яшин, В. Д. Бадов, Ю. В. Полывяный и др. // Нива Поволжья. 2024. № 4(72). doi: 10.36461/NP.2024.72.4.025

8. Чепуштанова О. В. Особенности современной сосковой резины доильных аппаратов // Вестник биотехнологии. 2021. № 3(28). EDN: VDTBTL

9. Results of studies of a suction-type milking machine with squeezing effect / A. V. Yashin, Y. V. Polyvyanyj, O. S. Kalinina et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Volga Region Farmland 2021 (VRF 2021), Penza, 16-18 ноября 2021 года. Vol. 953. Penza: IOP Publishing Ltd. 2022. P. 012014. doi: 10.1088/1755-1315/953/1/012014

10. Manipulators adapted for automatic milking / O. A. Chekhunov, E. A. Martynov, V. V. Voronin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming, Voronezh, 17-18 октября 2019 года. Vol. 422. Voronezh: Institute of Physics Publishing. 2020. P. 012056. doi: 10.1088/1755-1315/422/1/012056

11. Ulyanov V. M., Khripin V. A., Kiryanov A. Yu. Oscillatory Motion of a Body with a Changing Center of Mass on Flexible Suspensions // Journal of Mathematical Sciences. 2024. Vol. 283. № 3. P. 470-481. doi: 10.1007/s10958-024-07277-9

12. Андрианов Е. А., Андрианов А. А. Доильный аппарат непрерывного выжимающе-отсасывающего принципа действия // Наука в центральной России. 2025. № 5(77). С. 49-56. Doi: 10.35887/2305-2538-2025-5-49-56

13. Бондарев С. Н., Китун А. В. Анализ результатов исследований по совершенствованию доильных аппаратов // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2023. № 1(13). С. 57-63

14. Борозенцев В. И. К разработке конструкции доильного аппарата выжимающего принципа действия // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2022. № 1(33). С. 51-59

15. Варлыгин Г. А. Разработка и обоснование доильного аппарата с комбинированным воздействием на

сосок // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2023. № 1(37). С. 12-18

16. Григорьев Д. А., Кравцов А. М. Уравнение равновесного потока жидкости в системе сосок-доильный стакан // Агропанорама. 2023. № 5(159). С. 2-6. doi: 10.56619/2078-7138-2023-159-5-2-6

17. Доровских В. И., Жариков В. С. Исследование процесса воздействия сосковой резины доильного аппарата на сосок животного во время такта сжатия // Наука в центральной России. 2021. № 1(49). С. 54-59. doi: 10.35887/2305-2538-2021-1-54-59

18. Патент на полезную модель № 234516 U1 Российская Федерация, МПК A01J 5/08. Доильный аппарат: заявл. 25.12.2024: опубл. 30.05.2025 / А.В. Яшин, В.Д. Бадов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный аграрный университет"

19. Яшин А. В., Бадов В. Д. Результаты экспериментальных исследований в лабораторных условиях доильного аппарата с сосковыми трубками, обеспечивающими такт сжатия с выжиманием // Нива Поволжья. 2025. № 3(75). Doi: 10.36461/NP.2025.75.3.023

20. Крупенин П. Ю. Анализ фазового портрета пульсаций доильного аппарата // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2021. № 2(10). С. 102-107

References

1. Mikhalev V. I., Zimnikov V. I. Automated milking and the incidence of mastitis among cows // Vestnik of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry. 2024. Vol. 19. No. 3. P. 507–516. doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-3-507-516

2. Improvement of milking equipment for cows / T. N. Kuzmina, S. A. Maslovsky, I. N. Kim et al. // Machinery and Technologies in Livestock Farming. 2024. Vol. 14. No. 4. P. 10-17. doi: 10.22314/27132064-2024-14-4-10

3. Current state, problems, and prospects of milk production in Russia / V. M. Zimnyakov, G. V. Ilyina, D. Yu. Ilyin, et al. // Machinery and Technologies in Livestock Farming. 2023. No. 1(49). P. 4-10. doi: 10.22314/27132064-2023-1-4.

4. Zhilich E. L., Kuvshinov A. A., Rogalskaya Yu. N. Application of animal identification and physiological status monitoring systems // Machinery and Technologies in Livestock Farming. 2021. No. 4 (44). P. 33-36. doi: 10.51794/27132064-2021-4-33

5. Kirsanov V. V., Kuzmina T. N. Analysis of milking equipment offered on the Russian market // Machinery and Equipment for Rural Areas. 2024. No. 10(328). P. 26-28. doi: 10.33267/2072-9642-2024-10-26-28

6. Development and research of multifunctional milking units based on a sensor for quarter-specific monitoring of milk flow rate / P. A. Savinykh, A. A. Rylov, V. N. Shulyatyev, et al. // Machinery and Technologies in Livestock Farming. 2023. No. 2(50). P. 4-10. doi: 10.22314/27132064-2023-2-4

7. Theoretical study of deformations in the teat cup pipe of a milking unit / A. V. Yashin, V. D. Badov, Yu. V. Polyvyanyj, et al. // Niva Povolzhya. 2024. No. 4(72). doi: 10.36461/NP.2024.72.4.025

8. Chepushtanova O. V. Characteristics of modern milking unit pipes // Vestnik of Biotechnology. 2021. No. 3(28). EDN: VDTBTL.

9. Results of studies of a suction-type milking machine with squeezing effect / A. V. Yashin, Y. V. Polyvyanyj, O. S. Kalinina et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: Volga Region Farmland 2021 (VRF 2021), Penza, November 16-18, 2021. Vol. 953. Penza: IOP Publishing Ltd. 2022. P. 012014. doi: 10.1088/1755-1315/953/1/012014

10. Manipulators adapted for automatic milking / O. A. Chekhunov, E. A. Martynov, V. V. Voronin et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming, Voronezh, October 17–18. 2019. Vol. 422. Voronezh: Institute of Physics Publishing. 2020. P. 012056. doi: 10.1088/1755-1315/422/1/012056

11. Ulyanov V. M., Khripin V. A., Kiryanov A. Yu. Oscillatory motion of a body with a changing center of mass on flexible suspensions // Journal of Mathematical Sciences. 2024. Vol. 283. No. 3. P. 470-481. doi: 10.1007/s10958-024-07277-9

12. Andrianov E. A., Andrianov A. A. milking unit based on the continuous squeezing-suction principle // Science in Central Russia. 2025. No. 5(77). P. 49-56. doi: 10.35887/2305-2538-2025-5-49-56

13. Bondarev S. N., Kitun A. V. Analysis of research results on improving milking units // Vestnik of Baranovichi State University. Series: Technical Sciences. 2023. No. 1(13). P. 57-63.

14. Borozentsev V. I. On the development of the design of a milking unit operating on the squeezing principle // Innovations in the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects. 2022. No. 1(33). P. 51-59.

15. Varlygin G. A. Development and justification of a milking unit with combined action on the teat // Innovations in the Agro-Industrial Complex: Problems and Prospects. 2023. No. 1(37). P. 12-18.

16. Grigoryev D. A., Kravtsov A. M. Equation of equilibrium fluid flow in the teat-teat cup system // Agropanorama. 2023. No. 5(159). P. 2-6. doi: 10.56619/2078-7138-2023-159-5-2-6

17. Dorovskikh V. I., Zharikov V. S. Investigation of the process of the milking unit teat pipe acting on the animal teat during the compression stroke // Science in Central Russia. 2021. No. 1(49). P. 54-59. doi: 10.35887/2305-2538-2021-1-54-59

18. Utility Model Patent No. 234516 U1 Russian Federation, IPC A01J 5/08. Milking unit: application applied 25.12.2024; published 30.05.2025 / A. V. Yashin, V. D. Badov; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Penza State Agrarian University"

19. Yashin A. V., Badov V. D. Results of laboratory experimental studies on a milking unit with teat pipes providing a compression-and-squeezing stroke // Niva Povolzhya. 2025. No. 3(75). doi: 10.36461/NP.2025.75.3.023

20. Krupenin P. Yu. Analysis of the phase portrait of milking unit pulsations // Vestnik of Baranovichi State University. Series: Technical Sciences. 2021. No. 2(10). P. 102-107.