

затрат на внесение жидкого навоза до 25 %. Электропривод осей позволяет уменьшить проскальзывание и буксование, улучшить управляемость в сложных условиях.

Таким образом, создание тракторов с электромеханической и трансмиссией позволяет оптимизировать технологические скорости движения, снизить расход топлива и выбросы вредных веществ, увеличить ресурс тракторов, расширить область их применения.

#### **Список использованной литературы**

1. Гедроить, Г. И. Объемы работ и условия эксплуатации транспортных средств / Г. И. Гедроить, С. В. Занемонский // *Агропанорама*. – 2021. – № 3. – С. 2–7. – Библиогр.: с. 6–7 (9 назв.).
2. Зезетко, Н. И. Техника холдинга «МТЗ-Холдинг» для сельскохозяйственного производства / Н. И. Зезетко // *Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 24–25 ноября 2022 г.* – Минск : БГАТУ, 2022. – С. 38–45.
3. E. Scolaro et al.: Electrification of Agricultural Machinery : A Review Accessed : December, 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.researchgate.net/publication/357004885\\_Electrification\\_of\\_Agricultural\\_Machinery\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/357004885_Electrification_of_Agricultural_Machinery_A_Review) – Дата доступа : 02.05.2025.
4. Гурский, Н. Н. Моделирование процессов управления электромеханической трансмиссией колесного трактора / Н. Н. Гурский, А. В. Пашенко, И. Н. Жуковский // *Наука и техника*. – 2014. – № 2. – С. 41–45.
5. Флоренцев, Н. С. Трактор с электромеханической трансмиссией / Н. С. Флоренцев [и др.] // «Тракторы и сельхозмашины». – 2010. – № 7. – С. 7–11.
6. John Deere [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://deere.com>. – Дата доступа : 03.05.2025.

**Summary.** The prospects for the application of various solutions for improving the electromechanical transmission of tractors are analyzed. The relevance of the problem is related to the need to ensure stepless regulation of torque and speed, increase the reliability and durability of transmission units, reduce fuel consumption, costs for consumables and maintenance, and reduce the level of harmful emissions from the engine.

УДК 637.116

**Яшин А.В.**, кандидат технических наук, доцент;

**Бадов В.Д.**, аспирант

*ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет»,*

*г. Пенза, Российская Федерация*

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОСТОЯННЫХ В УРАВНЕНИИ РАДИАЛЬНОГО ПРОГИБА СОСКОВОЙ ТРУБКИ**

**Аннотация.** В статье представлен результат теоретических исследований по определению постоянных уравнении радиального прогиба сосковой трубки, что

позволит определить радиальный прогиб для любой конструкции сосковой трубки доильного аппарата при доении.

**Abstract.** The article presents the result of theoretical research on determining the constants of the radial deflection equation of the nipple tube, which will allow determining the radial deflection for any design of the nipple tube of a milking machine during milking.

**Ключевые слова.** Машинное доение, сосковая трубка, прогиб.

**Keywords.** Machine milking, nipple tube, deflection.

Современные тенденции развития молочной промышленности обуславливают необходимость существенного увеличения производительности доильного оборудования [2]. Одним из ключевых факторов снижения продуктивности является использование традиционных конструкций сосковых трубок, которые нередко приводят к травмированию тканей вымени животных и замедлению процесса доения [1]. Введение инновационной технологии – сосковой трубки со ступенчатой геометрией – позволяет существенно минимизировать негативные последствия влияния вакуума и одновременно повысить интенсивность и эффективность выдаивания молока [3, 4].

На основании проведенных теоретических исследований получено линейное неоднородное дифференциальное уравнение четвертого порядка с постоянными коэффициентами. Решение этого уравнения позволило установить зависимость радиального прогиба сосковой трубки при воздействии различных нагрузок [5, 6].

Теоретическими исследованиями было установлено уравнение радиального прогиба сосковой трубки [5, 6]:

$$u = C_1 e^{\sqrt{2}\beta z} + C_2 e^{-\sqrt{2}\beta z} + C_3 \sin(\sqrt{2}\beta z) + C_4 \cos(\sqrt{2}\beta z) + \frac{\nu \Delta H R_c}{H} - \frac{p R_c^2}{E h}, \quad (1)$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – некоторые постоянные;

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{h^2 R_c^2}} - \text{коэффициент затухания колебаний};$$

$z$  – координата по оси симметрии сосковой трубки, отсчитываемая от места соединения присоска с рабочей частью сосковой трубки;

$\nu$  – коэффициент поперечного сжатия (Пуассона) материала рабочей части сосковой трубки;

$h$  – толщина сосковой трубки;

$R_c$  – средний радиус рабочей части сосковой трубки;

$\Delta H$  – абсолютное удлинение рабочей части сосковой трубки;

$H$  – первоначальная длина рабочей части сосковой трубки;

$p$  – вакуумметрическое давление;

$E$  – модуль упругости (Юнга) материала рабочей части сосковой трубки.

Для определения постоянных в уравнении (1) необходимо рассмотреть начальные условия, которые будут объединять отдельные частные решения данного уравнения, формируя одно общее решение. Тогда начальные условия примут следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Если } z = 0, \Rightarrow u = 0 \\ \text{Если } z = H, \Rightarrow u = 0 \\ \text{Если } p = 0, \Rightarrow u = 0 \\ \text{Если } p = p_{cm}, \Rightarrow u = -R_c, \text{ при } z = z_{cm} \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $p_{cm}$  – вакуумметрическое давление, при котором происходит первоначальное смятие рабочей части сосковой трубки;

$z_{cm}$  – координата точки первоначального смятия рабочей части сосковой трубки по оси ее симметрии, отсчитываемая от места соединения присоска с рабочей частью сосковой трубки.

Тогда из уравнения (1) с учетом начального условия (2) получим систему из четырех уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 + C_2 + C_4 + \frac{v\Delta HR_c}{H} - \frac{pR_c^2}{Eh} = 0 \\ C_1 e^{\sqrt{2}\beta H} + C_2 e^{-\sqrt{2}\beta H} + C_3 \sin(\sqrt{2}\beta H) + C_4 \cos(\sqrt{2}\beta H) + \frac{v\Delta HR_c}{H} - \frac{pR_c^2}{Eh} = 0 \\ C_1 e^{\sqrt{2}\beta z} + C_2 e^{-\sqrt{2}\beta z} + C_3 \sin(\sqrt{2}\beta z) + C_4 \cos(\sqrt{2}\beta z) + \frac{v\Delta HR_c}{H} = 0 \\ C_1 e^{\sqrt{2}\beta z_{cm}} + C_2 e^{-\sqrt{2}\beta z_{cm}} + C_3 \sin(\sqrt{2}\beta z_{cm}) + C_4 \cos(\sqrt{2}\beta z_{cm}) + \frac{v\Delta HR_c}{H} - \frac{pR_c^2}{Eh} = -R_c \end{array} \right. \quad (3)$$

Для дальнейшего решения системы уравнений (3) введем следующую замену постоянных и переменных:

$$\begin{aligned} x = C_1, y = C_2, i = C_3, v = C_4, a = \frac{v\Delta HR_c}{H}, b = \frac{pR_c^2}{Eh}, c = R_c, d = e^{\sqrt{2}\beta H}, f = e^{-\sqrt{2}\beta H}, \\ g = \sin(\sqrt{2}\beta H), j = \cos(\sqrt{2}\beta H), k = e^{\sqrt{2}\beta z}, l = e^{-\sqrt{2}\beta z}, m = \sin(\sqrt{2}\beta z), \\ n = \cos(\sqrt{2}\beta z), q = e^{\frac{\beta H_{cm}}{\sqrt{2}}}, r = e^{-\frac{\beta H_{cm}}{\sqrt{2}}}, s = \sin\left(\frac{\beta H_{cm}}{\sqrt{2}}\right), t = \cos\left(\frac{\beta H_{cm}}{\sqrt{2}}\right), w = \frac{p_{cm}R_c^2}{Eh}. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом введенных замены постоянных и переменных (4), из системы уравнений (3) получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} x + y + v + a - b = 0 \\ xd + yf - ig + vi + a - b = 0 \\ xk + yl + im + vn + a = 0 \\ xq + yr + is + vt + a - w = -c \end{array} \right. \quad (5)$$

Для определения  $x = C_1$ ,  $y = C_2$ ,  $i = C_3$ ,  $v = C_4$  решим систему уравнений (5) методом Гаусса для чего представим систему уравнений (5) в компактном матричном виде:

$$\left| \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 & b-a \\ d & f & g & j & b-a \\ k & l & m & n & -a \\ q & r & s & t & w-a-c \end{array} \right| \quad (6)$$

Из второй строки вычтем первую строку, умноженную на d, также из третьей строки вычтем первую строку, умноженную на k, а из четвёртой строки вычтем первую строку, умноженную на r:

$$\left| \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 & b-a \\ 0 & f-d & g & j-d & (b-a)(1-d) \\ 0 & l-k & m & n-k & -a-k(b-a) \\ 0 & r-q & s & t-q & w-a-c-q(b-a) \end{array} \right| \quad (7)$$

Продолжим процедуру приведения матрицы к верхнетреугольному виду методом Гаусса. Выполнив предыдущие шаги, теперь разделим строки на соответствующие множители: вторую строку поделим на (f-d), третью строку поделим на (l-k), а четвёртую строку поделим на (r-q). Это приведет расширенную матрицу (7) к следующему виду:

$$\left| \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 & b-a \\ 0 & 1 & \frac{g}{f-d} & \frac{j-d}{f-d} & \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} \\ 0 & 1 & \frac{m}{l-k} & \frac{n-k}{l-k} & \frac{-a-k(b-a)}{l-k} \\ 0 & 1 & \frac{s}{r-q} & \frac{t-q}{r-q} & \frac{w-a-c-q(b-a)}{r-q} \end{array} \right| \quad (8)$$

Продолжим выполнение шагов метода Гаусса для завершения приведения матрицы к верхнетреугольному виду. Вычтем вторую строку из третьей строки и вычтем вторую строку из четвёртой строки. Тогда матрица принимает следующий вид:

$$\left| \begin{array}{cccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 & b-a \\ 0 & 1 & \frac{g}{f-d} & \frac{j-d}{f-d} & \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} \\ 0 & 0 & \frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d} & \frac{n-k}{l-k} - \frac{j-d}{f-d} & \frac{-a-k(b-a)}{l-k} - \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} \\ 0 & 0 & \frac{s}{r-q} - \frac{g}{f-d} & \frac{t-q}{r-q} - \frac{j-d}{f-d} & \frac{w-a-c-q(b-a)}{r-q} - \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} \end{array} \right| \quad (9)$$

Следующим этапом проводим нормализацию третьей и четвёртой строки. Для этого разделим третью строку на выраженный коэффициент  $\frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d}$  и аналогичным образом, нормализуем четвёртую строку,

разделив её на  $\frac{s}{r-q} - \frac{g}{f-d}$ . Тогда матрица принимает следующий вид:

$$\left( \begin{array}{cccc|cccc} 1 & 1 & 0 & 1 & b-a & & & \\ 0 & 1 & \frac{g}{f-d} & \frac{j-d}{f-d} & \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} & & & \\ & & & \frac{n-k}{l-k} - \frac{j-d}{f-d} & \frac{-a-k(b-a)}{l-k} - \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} & & & \\ 0 & 0 & 1 & \frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d} & \frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d} & & & \\ & & & \frac{t-q}{r-q} - \frac{j-d}{f-d} & \frac{w-a-c-q(b-a)}{r-q} - \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} & & & \\ 0 & 0 & 1 & \frac{s}{r-q} - \frac{g}{f-d} & \frac{s}{r-q} - \frac{g}{f-d} & & & \end{array} \right) \cdot (10)$$

Предпоследний этап состоит в дальнейшем уменьшении числа ненулевых элементов ниже диагонали путём вычитания третьей строки из четвёртой строки. Тогда матрица примет следующий вид:

$$\left( \begin{array}{cccc|cccc} 1 & 1 & 0 & 1 & b-a & & & \\ 0 & 1 & \frac{g}{f-d} & \frac{j-d}{f-d} & \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} & & & \\ & & & \frac{n-k}{l-k} - \frac{j-d}{f-d} & \frac{-a-k(b-a)}{l-k} - \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} & & & \\ 0 & 0 & 1 & \frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d} & \frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d} & & & \\ & & & \frac{t-q}{r-q} - \frac{j-d}{f-d} & \frac{w-a-c-q(b-a)}{r-q} - \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} & & & \\ 0 & 0 & 0 & \frac{s}{r-q} - \frac{g}{f-d} & \frac{s}{r-q} - \frac{g}{f-d} & & & \end{array} \right) \cdot (11)$$

Последним этапом приводим матрицу к каноническому верхнетреугольному виду, нормализовав четвёртую строку. Для этого разделим четвёртую строку на выраженный коэффициент  $\frac{t-q}{r-q} - \frac{j-d}{f-d} - \frac{n-k}{l-k} - \frac{j-d}{f-d}$ , получим:

$$\frac{s}{r-q} - \frac{g}{f-d} - \frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d}$$

$$\begin{array}{c}
b-a \\
(b-a)(1-d) \\
f-d \\
\frac{-a-k(b-a)}{l-k} - \frac{(b-a)(1-d)}{f-d} \\
\frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d}
\end{array}
\quad
\begin{array}{c}
1 \quad 0 \quad 1 \\
0 \quad 1 \quad \frac{g}{f-d} \quad \frac{j-d}{f-d} \\
\frac{n-k}{l-k} \quad \frac{j-d}{f-d} \\
0 \quad 0 \quad 1 \quad \frac{m}{l-k} - \frac{g}{f-d} \\
0 \quad 0 \quad 0 \quad 1
\end{array}
\quad
\begin{array}{c}
\frac{[m(f-d)-g(l-k)][w-a-c-q(b-a)](f-d)-(b-a)(1-d)(r-q)}{[m(f-d)-g(l-k)][(t-q)(f-d)-(j-d)(r-q)]-[s(f-d)-g(r-q)][(n-k)(f-d)-(j-d)(l-k)]} - \\
\frac{[s(f-d)-g(r-q)][-a-k(b-a)](f-d)-(b-a)(1-d)(l-k)}{[m(f-d)-g(l-k)][(t-q)(f-d)-(j-d)(r-q)]-[s(f-d)-g(r-q)][(n-k)(f-d)-(j-d)(l-k)]}
\end{array}
\quad (12)$$

Тогда система уравнений (5) с учетом матрицы (12) после ряда математических преобразований примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
x = b - a - y - v \\
y = \frac{(b-a)(1-d) - g(i - (j-d))v}{f-d} \\
i = \frac{(-a-k(b-a))(f-d) - (b-a)(1-d)(l-k) - ((n-k)(f-d) - (j-d)(l-k))v}{m(f-d) - g(l-k)} \\
v = \frac{\frac{[m(f-d)-g(l-k)][w-a-c-q(b-a)](f-d)-(b-a)(1-d)(r-q)}{[m(f-d)-g(l-k)][(t-q)(f-d)-(j-d)(r-q)]-[s(f-d)-g(r-q)][(n-k)(f-d)-(j-d)(l-k)]} - \frac{[s(f-d)-g(r-q)][-a-k(b-a)](f-d)-(b-a)(1-d)(l-k)}{[m(f-d)-g(l-k)][(t-q)(f-d)-(j-d)(r-q)]-[s(f-d)-g(r-q)][(n-k)(f-d)-(j-d)(l-k)]}}{[m(f-d)-g(l-k)][(t-q)(f-d)-(j-d)(r-q)]-[s(f-d)-g(r-q)][(n-k)(f-d)-(j-d)(l-k)]}
\end{array} \right. \quad (13)$$

Произведем упрощение записи системы уравнений (13):

$$\left\{ \begin{array}{l}
x = b - a - y - v \\
y = \frac{k_{1,2}(b-a) - k_{1,i}i - k_{1,3}v}{k_{1,4}} \\
i = \frac{k_{1,4}(-a-k_{1,8}(b-a)) - k_{1,2}k_{1,7}(b-a) - k_{1,6}v}{k_{1,5}} \\
v = \frac{k_{1,5}[k_{1,4}[k_{1,9}-a-c-k_{1,10}(b-a)] - k_{1,2}k_{1,11}(b-a)] - k_{1,13}[k_{1,4}[-a-k_{1,8}(b-a)] - k_{1,2}k_{1,7}(b-a)]}{k_{1,5}k_{1,12} - k_{1,13}k_{1,6}}
\end{array} \right. \quad (14)$$

где  $k_{1,1} = g$ ,  $k_{1,2} = 1-d$ ,  $k_{1,3} = j-d$ ,  $k_{1,4} = f-d$ ,  $k_{1,5} = m(f-d) - g(l-k)$ ,  $k_{1,6} = ((n-k)(f-d) - (j-d)(l-k))$ ,  $k_{1,7} = l-k$ ,  $k_{1,8} = k$ ,  $k_{1,9} = w$ ,  $k_{1,10} = q$ ,  $k_{1,11} = r-q$ ,  $k_{1,12} = (t-q)(f-d) - (j-d)(r-q)$ ,  $k_{1,13} = s(f-d) - g(r-q)$  — коэффициенты.

Система уравнений (14) позволяет определить радиальный прогиб рабочей части сосковой трубки по уравнению (1) с учетом замены постоянных и переменных (4).

### Список использованной литературы

1. Арсеньев, Д.Д. Выбор доильного аппарата / Д.Д. Арсеньев, М.В. Саврасов, В.А. Смелик // Сельский механизатор. — 2007. — № 4. — С. 30-31. — EDN UFUGXZ.
2. Китаева, О.В. Математические модели технологического и технического обеспечения молочного скотоводства / О.В. Китаева. — Санкт-Петербург: Санкт-

Петербургский государственный аграрный университет, 2024. – 289 с. – ISBN 978-5-85983-474-7. – EDN PDWWRR.

3. Саврасов, М.В. Доильные аппараты: продуктивность коров и качество молока / М.В. Саврасов, Д.Д. Арсеньев, В.А. Смелик // Техника и оборудование для села. – 2007. – № 10. – С. 32-33. – EDN ZDMFJF.

4. Саврасов, М. В. Зависимость продуктивности коров и качества молока от конструкций доильных аппаратов / М. В. Саврасов, Д. Д. Арсеньев, В. А. Смелик // Молочная промышленность. – 2007. – № 7. – С. 30. – EDN IAKBTU.

5. Теоретическое исследование деформаций сосковой трубки доильного аппарата / А.В. Яшин, В.Д. Бадов, Ю.В. Польшяный, А.Н. Калабушев // Нива Поволжья. – 2024. – № 4(72). – DOI 10.36461/NP.2024.72.4.025. – EDN XROAMQ.

6. Яшин, А.В. Результаты теоретических исследований деформации сосковой трубки доильного аппарата и действующих силовых факторов / А.В. Яшин, В.А. Овтов, В.Д. Бадов // АгроЭкоИнженерия. – 2025. – № 1(122). – С. 19–35. – DOI 10.24412/2713-2641-2025-1122-19-34. – EDN PBKJJB.

**Summary.** Presents the result of theoretical research on determining the constants of the radial deflection equation of the nipple tube, which will allow determining the radial deflection for any design of the nipple tube of a milking machine during milking.

УДК 621.432/004.932

**Капцевич В.М.,** доктор технических наук, профессор;

**Корнеева В.К.,** кандидат технических наук, доцент;

**Цымбалюк А.И.; Макаревич А.В.,** студенты

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный  
технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

## **НОВЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ХРОМАТОГРАММЫ МАСЛЯНОГО ПЯТНА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ «КАПЕЛЬНОЙ ПРОБЫ»**

**Аннотация.** Предложен новый метод оценки результатов экспресс-тестирования моторного масла методом «капельной пробы». Метод основан на четком выделении кольцевых зон на цифровом изображении хроматограммы и автоматическом определении их размеров с использованием программного комплекса ImageJ.

**Abstract** A new method for assessing the results of express testing of motor oil using the «Blotter Spot» method is proposed. The method is based on the clear selection of ring zones on a digital image of the chromatogram and automatic determination of their sizes using the ImageJ software package.

**Ключевые слова.** Моторное масло, «капельная проба», ImageJ, кольцевые зоны, диспергирующая способность

**Keywords.** Motor oil, «Blotter Spot», ImageJ, ring zones, dispersing ability.

Одним из наиболее распространенных и информативных методов контроля изменения свойств моторного масла в процессе работы ДВС