

УДК 631.116.2

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВАКУУММЕТРИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ДОИЛЬНОМ СТАКАНЕ НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРОЦЕССА МАШИННОГО ДОЕНИЯ КОРОВ

С.Н. Бондарев,

ассистент каф. технологий и механизации животноводства БГАТУ

А.В. Китун,

профессор каф. технологий и механизации животноводства БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В статье представлены результаты теоретических исследований по определению энергоемкости процесса машинного доения коров с учетом реверсивного движения молока в доильном аппарате и изменения вакуумметрического давления во время такта «сжатие».

Ключевые слова: машинное доение, энергоемкость, доильный стакан, молоко, шлюзовые каналы, потребная мощность, производительность.

This article presents the results of theoretical studies to determine the energy intensity of machine milking of cows taking into account the reverse motion of milk in the milking machine and changes in vacuum pressure during the "compression" stroke.

Key words: machine milking, energy intensity, teat cup, milk, sluice channels, required power, productivity.

Введение

Одним из важнейших показателей эффективности процесса машинного доения, по мнению Мишурова Н.П., является энергоемкость [1]. Величина данного показателя позволяет определить эффективность работы доильной установки и выявить перспективные энергосберегающие направления ее совершенствования.

Как показывают результаты исследований Щукина С.И., Григорьева Д.А., Шахова В.А. и др. [2-6], одним из недостатков доильных аппаратов является реверсивное движение молока из коллектора в подсосковые камеры доильных стаканов, возникающее при разжатии стенок сосковой резины и приводящее к увеличению энергоемкости процесса машинного доения коров.

Возможным решением исключения реверсивного движения молока в доильном аппарате является изменение величины вакуумметрического давления в подсосковой камере доильного стакана во время такта «сжатие», путем поступления воздуха из межстенной камеры доильного стакана в подсосковую через соединяющие их шлюзовые каналы [7].

Целью данной работы является определение энергоемкости процесса машинного доения коров с учетом реверсивного движения молока в доильном аппарате и изменения вакуумметрического давления во время такта «сжатие».

Основная часть

Энергоемкость процесса машинного доения с учетом реверсивного движения молока в доильном аппарате, в общем виде, определим по формуле

$$\mathcal{E}_1 = \frac{N_d}{Q_{д.у.}}, \quad (1)$$

где N_d – суммарная потребная мощность на процесс машинного доения, кВт;

$Q_{д.у.}$ – производительность доильной установки, т/ч.

В процессе машинного доения выдаивание молока из сосков вымени коровы осуществляется за счет вакуумметрического давления в доильном аппарате, создаваемого вакуумным насосом, на привод которого затрачивается мощность ($N_{в.д.}$). На транспортировку молока из доильных стаканов в коллектор и далее по молочному шлангу в молокопровод и молокоприемник доильной установки также затрачивается мощность вакуумного насоса ($N_{т.р.}$). Кроме того, при разжатии стенок сосковой резины происходит реверсивное движение молока из коллектора в подсосковые камеры доильных стаканов, на повторную транспортировку в коллектор которого также требуется дополнительная мощность вакуумного насоса ($N_{п.в.т.}$).

Тогда, суммарную потребную мощность на процесс машинного доения определим по формуле

$$N_d = N_{в.д.} + N_{т.р.} + N_{п.в.т.}, \quad (2)$$

где $N_{в.д.}$ – потребная мощность на выдаивание молока, кВт;

$N_{т.р.}$ – потребная мощность на транспортировку молока в молокоприемник доильной установки, кВт;

$N_{п.в.т.}$ – потребная мощность на повторную транспортировку молока, кВт.

Формулы для определения потребных мощностей на выдаивание молока ($N_{в.д.}$) и его транспортировку в молокоприемник доильной установки ($N_{т.р.}$) были получены на основании результатов исследова-

ний Дашкова В.Н., Китикова В.О., Мишурова Н.П., Яковчика Н.С. и др. [1; 8, 9]. Потребную мощность на выдаивание молока двухтактными доильными аппаратами определим по формуле

$$N_{\text{выд1}} = \frac{p_{\text{в}} n_{\text{д.а.}}}{1000 \eta_{\text{н}}} \left[n_{\text{д.с.}} \left(\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{\text{м.к.1}} + V_{\text{шл.дс.1}}}{t_{\text{А}}} \right) + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4} \right], \quad (3)$$

где $p_{\text{в}}$ – вакуумметрическое давление в доильном аппарате, Па;

$n_{\text{д.а.}}$ – количество доильных аппаратов в доильной установке, шт.;

$\eta_{\text{н}}$ – коэффициент полезного действия вакуумного насоса;

$n_{\text{д.с.}}$ – количество одновременно работающих доильных стаканов, шт.;

$d_{\text{к}}$ – диаметр канала соска вымени коровы, м;

μ_1 – коэффициент расхода молока для канала соска вымени коровы;

v_1 – средняя скорость истечения молока через канал соска вымени коровы, м/с;

$V_{\text{м.к.1}}$ – объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом во время такта «сосание» из межстенной камеры доильного стакана, м³;

$V_{\text{шл.дс.1}}$ – объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом из шлангов, соединяющих вакуум-распределитель и межстенные камеры доильных стаканов, м³;

$t_{\text{А}}$ – время откачки воздуха из камер доильного аппарата, с;

$d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия в корпусе коллектора, м²;

$\mu_{\text{отв}}$ – коэффициент расхода воздуха через отверстие в корпусе коллектора;

$v_{\text{в}}$ – скорость потока воздуха через отверстие в корпусе коллектора, м/с.

В трех- и четырехтактных доильных аппаратах во время такта «отдыха» происходит поступление порции воздуха в подсосковую камеру доильного стакана, откачка которого осуществляется в начале такта «сосание». Тогда потребную мощность на выдаивание молока для трех- и четырехтактных доильных аппаратов определим по формуле

$$N_{\text{выд2}} = \frac{p_{\text{в}} n_{\text{д.а.}}}{1000 \eta_{\text{н}}} \left[n_{\text{д.с.}} \left(\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{\text{м.к.1}} + V_{\text{шл.дс.1}} + V_{\text{п.к.1}}}{t_{\text{А}}} \right) + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4} \right], \quad (4)$$

где $V_{\text{п.к.1}}$ – объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом из подсосковой камеры доильного стакана, м³.

Потребную мощность на транспортировку выдоенного молока из подсосковых камер двухтактных доильных аппаратов в молокоприемник доильной установки определим по формуле

$$N_{\text{тр1}} = \frac{\pi n_{\text{д.а.}} (\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3} + 2\Delta p_{3-4})}{4000 \eta_{\text{н}}} \times \left(\frac{n_{\text{д.с.}} d_{\text{к}}^2 \mu_1 t_{\text{в}} \chi_{\text{п}} v_1}{60} + d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}} \right), \quad (5)$$

где Δp_{1-2} – потери вакуумметрического давления при движении потока молока из подсосковых камер доильных стаканов в коллектор, Па;

Δp_{2-3} – потери вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси из коллектора в молокопровод, Па;

Δp_{3-4} – потери вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси из молокопровода в молокоприемник доильной установки, Па;

$t_{\text{в}}$ – продолжительность такта «сосание», с;

$\chi_{\text{п}}$ – частота пульсаций, мин⁻¹.

Потребную мощность на транспортировку выдоенного молока из подсосковых камер трех- и четырехтактных доильных аппаратов в молокоприемник доильной установки определим по формуле

$$N_{\text{тр2}} = \frac{\pi n_{\text{д.а.}} (\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3} + 2\Delta p_{3-4})}{4000 \eta_{\text{н}}} \times \left(\frac{n_{\text{д.с.}} \chi_{\text{п}}}{60} (d_{\text{к}}^2 \mu_1 t_{\text{в}} v_1 + d_{\text{в}}^2 (l_{\text{с.р.}} - l_{\text{с}} - l_{\text{м.т.}})) \times \left(\frac{p_{\text{атм}}}{(p_{\text{атм}} - p_{\text{в}})} - 1 \right) + d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}} \right), \quad (6)$$

где $d_{\text{в}}$ – внутренний диаметр сосковой резины, м;

$l_{\text{с.р.}}$ – длина сосковой резины, м;

$l_{\text{с}}$ – длина соска вымени коровы, м;

$l_{\text{м.т.}}$ – длина молочной трубки, м;

$p_{\text{атм}}$ – величина атмосферного давления, Па.

В процессе работы доильного аппарата (рис. 1) при разжати стенок сосковой резины происходит обратное поступление порции молока из коллектора 7 в подсосковую камеру 5 доильного стакана ($V_{\text{рев}}$).

Таким образом, дополнительно затрачивается мощность вакуумной установки на его повторную транспортировку в коллектор доильного аппарата, которую, в общем виде, определим по формуле

$$N_{\text{повт}} = \frac{n_{\text{д.а.}} V_{\text{рев}} \Delta p_{1-2}}{1000 t_{\text{в}} \eta_{\text{н}}}, \quad (7)$$

где $V_{\text{рев}}$ – объем молоковоздушной смеси, поступающей в подсосковую камеру доильного стакана при реверсивном движении из коллектора, м³.

Объем молоковоздушной смеси, поступающей в подсосковую камеру доильного стакана при реверсивном движении из коллектора, определим по формуле

$$V_{\text{рев}} = v_7 S_{\text{м.т.}} t_{\text{А}}, \quad (8)$$

где v_7 – скорость потока молоковоздушной смеси на входе в подсосковую камеру доильного стакана, м/с;

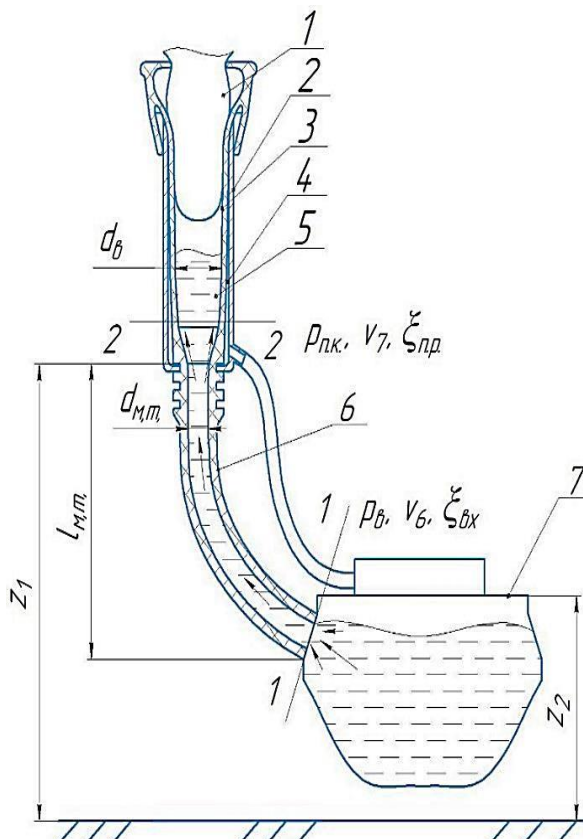


Рисунок 1. Схема к определению скорости молоковоздушной смеси на выходе из молочной трубки в подсосовую камеру доильного стакана:

1 – сосок вымени коровы; 2 – гильза доильного стакана; 3 – сосковая резина; 4 – межстенная камера доильного стакана; 5 – подсосовая камера доильного стакана; 6 – молочная трубка; 7 – коллектор доильного аппарата

$S_{м.т.}$ – площадь молочной трубки в поперечном сечении, м².

Так как поток молоковоздушной смеси движется из коллектора в подсосовую камеру по молочной трубке за счет разности давлений p_v и $p_{п.к.}$ (рис. 1), то зависимость между скоростями потока на выходе из коллектора и входе в подсосовую камеру можно описать уравнением Бернулли [10], которое в данном случае примет вид

$$z_2 + \frac{p_v}{\rho_{см}g} + \frac{\alpha v_6^2}{2g} = z_1 + \frac{p_{п.к.}}{\rho_{см}g} + \frac{\alpha v_7^2}{2g} + \frac{\Delta p_{рев}}{\rho_{см}g}, \quad (9)$$

где z_2 – высота расположения коллектора доильного аппарата, м;

$\rho_{см}$ – плотность молоко воздушной смеси, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

α – коэффициент Кориолиса;

v_6 – скорость потока молоковоздушной смеси на входе в молочную трубку, м/с;

z_1 – высота расположения подсосовой камеры доильного стакана, м;

$p_{п.к.}$ – вакуумметрическое давление в подсосовой камере доильного стакана при разжатии стенок сосковой резины, Па;

$\Delta p_{рев}$ – суммарные потери давления при движении молоковоздушной смеси из коллектора в подсосовую камеру доильного стакана, м.

Скорость потока молоковоздушной смеси на входе в подсосовую камеру доильного стакана (v_7) определим из уравнения (9)

$$v_7 = \sqrt{\frac{2g}{\alpha} \left[\frac{(p_{п.к.} - p_v - \Delta p_{рев})}{\rho_{см}g} + \frac{\alpha v_6^2}{2g} + z_2 - z_1 \right]}. \quad (10)$$

Подставив формулу (10) в выражение (8), получим формулу для определения объема молоковоздушной смеси, поступившей в подсосовую камеру из коллектора

$$V_{рев} = \left(\frac{\pi d_{м.т.}^2 t_A}{4} \right) \times \left\{ \frac{2g}{\alpha} \times \left[\frac{(p_{п.к.} - p_v - \Delta p_{рев})}{\rho_{см}g} + \frac{\alpha v_6^2}{2g} + z_2 - z_1 \right] \right\}^{-1}. \quad (11)$$

Подставив формулу (11) в выражение (7), после преобразований получим формулу для определения потребной мощности, необходимой на повторную транспортировку молоковоздушной смеси из подсосовой камеры в коллектор доильного аппарата

$$N_{повт} = \frac{n_{д.а.} \pi d_{м.т.}^2 t_A v_7 \Delta p_{1-2}}{4000 t_B \eta_H}. \quad (12)$$

Производительность доильной установки, зависящую от количества доильных аппаратов ($n_{д.а.}$), среднего разового удоя от коров (m_p) и продолжительности их доения (t_d), с учетом времени, затрачиваемого на повторную транспортировку молока в коллектор доильного аппарата ($t_{тр}$), определим по формуле

$$Q_{д.у.1} = \frac{3,6 n_{д.а.} m_p}{(t_d + t_{тр})}, \quad (13)$$

где m_p – средний разовый удой от коровы, кг;

t_d – продолжительность машинного доения коровы, с;

$t_{тр}$ – время, затрачиваемое на повторную транспортировку молока в коллектор доильного аппарата, с.

Продолжительность машинного доения коровы зависит от продолжительности выдаивания молока из вымени коровы ($t_{выд}$) и подготовительно-заключительных операций (санитарной обработки вымени, вход/выход коровы) ($t_{пз}$), и определяется по формуле [11]

$$t_d = t_{пз} + t_{выд}, \quad (14)$$

где $t_{пз}$ – продолжительность подготовительно-заключительных операций, с;

$t_{выд}$ – продолжительность выдаивания молока из вымени коровы, с.

Время, затрачиваемое на выдаивание молока из вымени коровы ($t_{выд}$), зависит от количества ($n_{п}$) и продолжительности пульсаций ($t_{п}$), а также количества одновременно работающих доильных стаканов ($n_{д.с.}$), которое можно определить по формуле

$$t_{выд} = \frac{n_{п} t_{п}}{n_{д.с.}}, \quad (15)$$

где $n_{п}$ – количество пульсаций, совершаемых доильным аппаратом за время машинного доения коровы, шт.;

$t_{п}$ – продолжительность пульсации, с;

$n_{д.с.}$ – количество одновременно работающих доильных стаканов, шт.

Количество пульсаций, совершаемых доильным аппаратом за время машинного доения коровы, определим по формуле

$$n_{п} = \frac{4m_{р}}{t_{Б} \rho \pi d_{к}^2 \mu_1 v_1}, \quad (16)$$

где ρ – плотность молока, кг/м³.

С учетом формулы (16) выражение (14) примет вид

$$t_{д} = t_{пз} + \frac{4m_{р} t_{п}}{n_{д.с.} \rho \pi d_{к}^2 \mu_1 v_1 t_{Б}}. \quad (17)$$

Формула для определения времени, затрачиваемого на повторную транспортировку молока в коллектор доильного аппарата, определим по формуле

$$t_{тр} = \frac{4m_{р} t_{А} v_7}{n_{д.с.} v_2 \rho \pi d_{к}^2 \mu_1 v_1 t_{Б}}, \quad (18)$$

где v_2 – скорость потока молока на выходе из молочной трубки, м/с.

Подставив значения формул (18) и (17) в выражение (13), получим формулу для определения производительности доильной установки с учетом реверсивного движения молока в доильном аппарате

$$Q_{д.у.1} = \frac{3,6 n_{д.а.} m_{р}}{\left(t_{пз} + \frac{4m_{р}}{\rho \pi d_{к}^2 \mu_1 v_1 t_{Б}} \left(\frac{t_{п}}{n_{д.с.}} + \frac{t_{А} v_7}{v_2} \right) \right)}. \quad (19)$$

С учетом формул (3), (5), (12) и (19) выражение (1) для определения энергоемкости процесса машинного доения коров с учетом реверсивного движения молока в двухтактных доильных аппаратах примет вид

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_1 = & \frac{t_{пз.} + t_{выд} + t_{тр}}{3600 \eta_{н} m_{р}} \left[p_{в} \left(n_{д.с.} \left(\frac{V_{м.к.1} + V_{шл.дс.1}}{t_{А}} + Q_{м} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + Q_{к} \right) + \Delta p_{в} \left(\frac{n_{д.с.} Q_{м} t_{Б}}{t_{п}} + Q_{к} \right) + \frac{V_{рев.} \Delta p_{12}}{t_{Б}} \right]. \quad (20) \end{aligned}$$

С учетом формул (4), (6), (12) и (19) выражение (1) для определения энергоемкости процесса машинного доения коров с учетом реверсивного движения молока в трех- и четырехтактных доильных аппаратах примет вид

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_2 = & \frac{t_{пз.} + t_{выд} + t_{тр}}{3600 \eta_{н} m_{р}} \left[p_{в} \left(n_{д.с.} \left((V_{м.к.1} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. + V_{шл.дс.1} + V_{п.к.1} \right) \times t_{А}^{-1} + Q_{м} \right) + Q_{к} \right) + \\ & \left. + \Delta p_{в} \left(\left(\frac{n_{д.с.} \chi_{п}}{60} (Q_{м} t_{Б} + V_{п.к.1}) \right) + Q_{к} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{V_{рев.} \Delta p_{12}}{t_{Б}} \right]. \quad (21) \end{aligned}$$

Проведя анализ формул (20) и (21), было установлено, что энергоемкость процесса машинного доения коров с учетом реверсивного движения молока в доильном аппарате, зависит от объема камер доильного аппарата ($V_{м.к.1}$, $V_{шл.дс.1}$, $V_{п.к.1}$), величины вакуумметрического давления ($p_{в}$), продолжительности тактов работы доильного аппарата ($t_{А}$, $t_{Б}$), частоты пульсаций ($\chi_{п}$), продуктивности коровы ($m_{р}$) и объема молока, поступающего в подсосковую камеру доильного стакана при реверсивном движении из коллектора ($V_{рев.}$).

Снижение энергоемкости процесса машинного доения можно обеспечить исключением реверсивного движения молока в доильном аппарате за счет изменения вакуумметрического давления в подсосковых камерах доильных стаканов во время такта «сжатие». Выполнить поставленную задачу возможно, осуществив поступление воздуха из межстенной камеры доильного стакана в подсосковую во время такта «сжатие» через шлюзовые каналы, выполненные в стенке сосковой резины доильного стакана.

Формула для определения энергоемкости процесса машинного доения с учетом изменения вакуумметрического давления в доильном аппарате во время такта «сжатие» примет вид

$$\mathcal{E}_3 = \frac{N_{дз}}{Q_{д.у.2}}, \quad (22)$$

где $N_{дз}$ – потребная мощность на процесс машинного доения в доильной установке с изменением вакуумметрического давления в доильных аппаратах, кВт;

$Q_{д.у.2}$ – производительность доильной установки при исключении реверсивного движения молока в доильных аппаратах, т/ч.

Потребную мощность на процесс машинного доения в доильной установке с изменением вакуумметрического давления в доильных аппаратах определим по формуле

$$N_{дз} = N_{выдз} + N_{трз} + N_{ревз}, \quad (23)$$

где $N_{\text{выд3}}$ – потребная мощность на выдаивание молока доильными аппаратами с изменяемым вакуумметрическим давлением, кВт;

$N_{\text{тр3}}$ – потребная мощность на транспортировку молоковоздушной смеси из доильных аппаратов с изменяемым вакуумметрическим давлением, кВт;

$N_{\text{рев2}}$ – потребная мощность на повторную транспортировку молока в коллектор доильного аппарата с учетом изменения вакуумметрического давления в доильном аппарате во время такта «сжатие», кВт.

Так как изменение вакуумметрического давления в доильном аппарате происходит за счет поступления воздуха из межстенной камеры в подсосковую через шлюзовые каналы во время такта «сжатие», то потребную мощность на выдаивание молока доильными аппаратами с изменяемым вакуумметрическим давлением ($N_{\text{выд3}}$) определим, переписав формулу (3) с учетом расхода воздуха через шлюзовые каналы ($Q_{\text{шл}}$)

$$N_{\text{выд3}} = \frac{n_{\text{д.а.}} p_{\text{в}}}{1000 \eta_{\text{н}}} \left[n_{\text{д.с.}} \left(\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{\text{м.к.1}} + V_{\text{шл.дс.1}}}{t_{\text{А}}} + Q_{\text{шл}} \right) + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4} \right], \quad (24)$$

где $Q_{\text{шл}}$ – расход воздуха через шлюзовые каналы, который определим по формуле

$$Q_{\text{шл}} = \frac{8 d_{\text{в}} l_{\text{шл}}^5 \pi v_8 \mu_{\text{шл}} (p_{\text{в}} - p_{\text{вым}}) \tan \theta_{\text{шл}}}{3 E (d_{\text{н}}^4 - d_{\text{в}}^4)}, \quad (25)$$

где $l_{\text{шл}}$ – длина шлюзового канала, м;

v_8 – скорость потока воздуха при прохождении через шлюзовые каналы, м/с;

$\mu_{\text{шл}}$ – коэффициент расхода воздуха для шлюзового канала;

$p_{\text{вым.}}$ – величина внутривыменного давления коровы, Па;

E – модуль упругости сосковой резины, Па;

$d_{\text{н.}}$ – наружный диаметр сосковой резины, м;

$\theta_{\text{шл}}$ – угол прогиба стенки сосковой резины в продольном сечении, град.

Потребную мощность на транспортировку молоковоздушной смеси из доильных аппаратов с изменяемым вакуумметрическим давлением в молокоприемник доильной установки определим переписав выражение (5) с учетом формулы (25)

$$N_{\text{тр3}} = \frac{\pi n_{\text{д.а.}} \Delta p_{\text{в}}}{4000 \eta_{\text{н}}} \left(\frac{n_{\text{д.с.}} d_{\text{к}}^2 \mu_1 t_{\text{Б}} \chi_{\text{п}} v_1}{60} + d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}} + \frac{8 d_{\text{в}} l_{\text{шл}}^5 \pi v_8 \mu_{\text{шл}} (p_{\text{в}} - p_{\text{вым}}) \tan \theta_{\text{шл}}}{3 E (d_{\text{н}}^4 - d_{\text{в}}^4)} \right). \quad (26)$$

Потребную мощность на повторную транспортировку молока в коллектор доильного аппарата с учетом изменения вакуумметрического давления в доильном аппарате ($p_{\text{шл}}$) во время такта «сжатие» определим переписав выражение (12)

$$N_{\text{повт2}} = \frac{n_{\text{д.а.}} \pi d_{\text{м.т.}}^2 t_{\text{А}} \Delta p_{1-2}}{4000 t_{\text{Б}} \eta_{\text{н}} n_{\text{д.с.}}} \times \sqrt{\frac{2g}{\alpha} \left(\frac{(p_{\text{п.к.}} - p_{\text{в}} - p_{\text{шл}} - \Delta p_{\text{рев}})}{\rho_{\text{см}} g} + \frac{\alpha v_6^2}{2g} + z_2 - z_1 \right)}, \quad (27)$$

где $p_{\text{шл}}$ – давление, создаваемое в подсосковой камере поступающим воздухом через шлюзовые каналы, Па.

Так как в процессе машинного доения доильной установкой с использованием доильных аппаратов с изменяемым вакуумметрическим давлением, исключается реверсивное движение молока, то формула для определения ее производительности, с учетом выражения (17), примет вид

$$Q_{\text{д.у.2}} = \frac{3,6 n_{\text{д.а.}} m_{\text{р}}}{(t_{\text{д}} + t_{\text{тр2}})}, \quad (28)$$

где $t_{\text{тр2}}$ – время, затрачиваемое на повторную транспортировку молоковоздушной смеси из подсосковой камеры доильного стакана в коллектор с учетом изменения вакуумметрического давления во время такта «сжатие».

Время $t_{\text{тр2}}$ определим по формуле

$$t_{\text{тр2}} = \frac{V_{\text{рев2}} n_{\text{п}}}{Q_{\text{м.т.}} n_{\text{д.с.}}}, \quad (29)$$

где $V_{\text{рев2}}$ – объем молоковоздушной смеси, поступающей в подсосковую камеру доильного стакана при реверсивном движении из коллектора, с учетом изменения вакуумметрического давления во время такта «сжатие», определим переписав выражение (11) с учетом изменения вакуумметрического давления в доильном аппарате ($p_{\text{шл}}$).

Объем $V_{\text{рев2}}$ определим по формуле

$$V_{\text{рев2}} = \frac{\pi d_{\text{м.т.}}^2 t_{\text{А}}}{4} \times \left\{ \frac{2g}{\alpha} (p_{\text{п.к.}} - p_{\text{в}} - p_{\text{шл}} - \Delta p_{\text{рев}}) \times (\rho_{\text{см}} g)^{-1} + \frac{\alpha v_6^2}{2g} + z_2 - z_1 \right\}^{1/2}. \quad (30)$$

Подставив формулы (23)-(30) в выражение (22), после преобразований получим зависимость для определения энергоемкости процесса машинного до-

ения с учетом изменения вакуумметрического давления в доильном аппарате во время такта «сжатие»

$$\Theta_3 = \frac{n_{д.а.} (t_{п.з.} + t_{д.} + t_{тр.})}{3600\eta_n m_p} \times \left[p_B \left(n_{д.с.} \left(\frac{V_{м.к.1} + V_{шл.д.с.1}}{t_A} + Q_M + Q_{шл} \right) + Q_K \right) + \Delta p_B \left(\frac{n_{д.с.} Q_M t_B \chi_{п.}}{60} + Q_K + n_{д.с.} Q_{шл} \right) + \frac{V_{в.п.2} n_{д.с.} \Delta p_{12}}{t_B} \right]. \quad (31)$$

Анализ формулы (31) показал, что энергоёмкость процесса машинного доения с учетом изменения вакуумметрического давления в доильном аппарате во время такта «сжатие» (Θ_3), зависит от технологических параметров доильной установки, шлюзовых каналов ($l_{шл.}$, $h_{шл.}$), среднего разового удоя от коровы (m_p) и величины вакуумметрического давления в доильном аппарате (p_B).

Расчет энергоёмкости процесса машинного доения проводим для среднего разового удоя от коровы $m_p=8,7$ кг (5310 кг/год), так как это значение является средним показателем по стране за 2020 год [12]. Тогда, подставив численные значения: $p_B=43000$ Па; $n_{д.а.}=24$ шт.; $\eta_n=0,48$; $n_{д.с.}=2$ шт.; $d_k=0,002$ м; $\mu_1=0,65$; $v_1=8,12$ м/с; $V_{м.к.1}=4,98 \cdot 10^{-5}$ м³; $V_{шл.д.с.1}=6,67 \cdot 10^{-6}$ м³; $t_A=0,1$ с; $d_{отв}=0,001$ м; $\mu_{отв}=0,66$; $v_B=118,93$ м/с; $V_{п.к.1}=1,12 \cdot 10^{-5}$ м³; $\Delta p_{1-2}=3,908 \cdot 10^4$ Па; $\Delta p_{2-3}=7,468 \cdot 10^3$ Па; $\Delta p_{3-4}=6,974 \cdot 10^4$ Па; $t_B=0,5$ с; $\chi_{п.}=60$ мин⁻¹; $d_B=0,022$ м; $l_{с.р.}=0,29$ м; $l_c=0,09$ м; $l_{м.т.}=0,16$ м; $p_{атм}=101325$ Па; $S_{м.т.}=5,026 \cdot 10^{-5}$ м²; $z_2=1,2$ м;

$\rho_{см}=360,95$ кг/м³; $g=9,81$ м/с²; $\alpha=1,1$; $v_6=9,8$ м/с; $z_1=1,4$ м; $p_{п.к.}=64166,6$ Па; $\Delta p_{рев}=12409,3$ Па; $m_p=8,7$ кг; $t_{пз}=0,0226$ ч; $t_{п.}=1$ с; $\rho=1030$ кг/м³; $v_2=5,576$ м/с; $l_{шл.}=0,002 \dots 0,018$ м; $\mu_{шл.}=0,35$; $p_{вым.}=9000$ Па; $E=25 \cdot 10^5$ Па; $d_{п.}=0,026$ м в формулы (20), (21) и (31), проведем необходимые вычисления и построим графические зависимости энергоёмкости процесса машинного доения от длины и высоты расположения шлюзовых каналов в доильном стакане (рис. 2).

Анализируя графические зависимости, представленные на рисунке 2, отметим, что:

– энергоёмкость процесса машинного доения с учетом реверсивного движения молока в двухтактных доильных аппаратах составит: $\Theta_1=3,128$ кВт·ч/т и для трех-четырёхтактных доильных аппаратов: $\Theta_2=3,738$ кВт·ч/т;

– при высоте расположения шлюзового канала $h_{шл.}=0,04$ м при его длине $l_{шл.}=0,0165$ м, энергоёмкость процесса машинного доения равна $\Theta_3=2,693$ кВт·ч/т, что на 12,24 % меньше, чем энергоёмкость процесса машинного доения с реверсивным движением молока в двухтактном доильном аппарате;

– при высоте расположения шлюзового канала $h_{шл.}=0,06$ м при его длине $l_{шл.}=0,013$ м энергоёмкость процесса машинного доения составит $\Theta_3=2,597$ кВт·ч/т, что на 16,95 % меньше, чем энергоёмкость процесса машинного доения с реверсивным движением молока в доильном аппарате;

– энергоёмкость процесса машинного доения равна $\Theta_3=2,745$ кВт·ч/т при высоте расположения шлюзового канала $h_{шл.}=0,09$ м при его длине $l_{шл.}=0,01$ м, что на 13,89 % меньше, чем энергоёмкость процесса машинного доения с реверсивным движением молока в доильном аппарате;

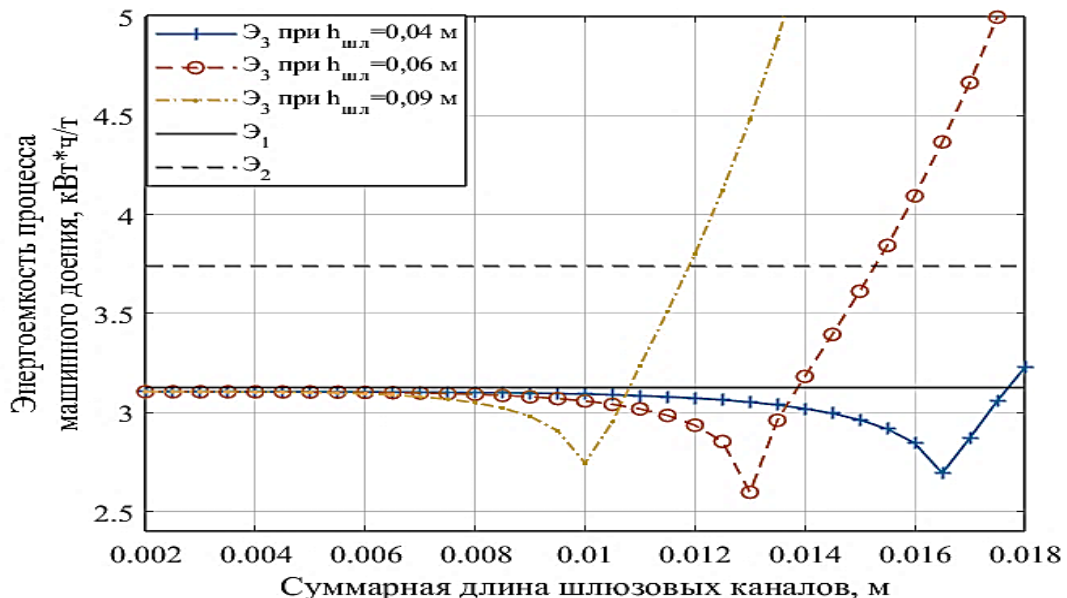


Рисунок 2. Зависимость энергоёмкости процесса машинного доения с учетом изменения вакуумметрического давления в доильном аппарате во время такта «сжатие» от длины шлюзового канала ($l_{шл.}$) и его высоты расположения ($h_{шл.}$) при $m_p=8,7$ кг; $\chi_n=60$ мин⁻¹; $p_B=43$ кПа

– повышение энергоемкости процесса машинного доения при длине шлюзовых каналов более 0,017 м обуславливается увеличением расхода воздуха через шлюзовые каналы, на откачку которого дополнительно затрачивается энергия.

Заключение

При величине вакуумметрического давления $p_v=43$ кПа; частоте пульсаций $\chi_n=60$ мин⁻¹ и разовом удое $m_p=8,7$ кг от коровы энергоемкость процесса машинного доения с учетом реверсивного движения молока в двухтактных и трех- четырехтактных доильных аппаратах составит 3,128 и 3,738 кВт·ч/т соответственно.

Получены аналитические зависимости для определения рациональных значений конструктивных параметров шлюзовых каналов (высота расположения шлюзового канала $h_{шл}=0,06$ м; длина шлюзового канала $l_{шл}=0,013$ м), соединяющих во время такта «сжатие» межстенную и подсосковую камеры доильного стакана и позволяющие путем изменения вакуумметрического давления в подсосковой камере исключить реверсивное движение молока в доильном аппарате.

При указанных рациональных значениях конструктивных параметров шлюзовых каналов энергоемкость процесса машинного доения с изменением вакуумметрического давления в доильном аппарате составит $\mathcal{E}_3=2,597$ кВт·ч/т, при величине вакуума в доильном аппарате $p_v=43$ кПа, частоте пульсаций $\chi_n=60$ мин⁻¹, соотношении тактов «сосание»/«сжатие» 60/40 и разовом удое $m_p=8,7$ кг от коровы, что на 16,95 % меньше, чем при машинном доении с реверсивным движением молока в доильном аппарате.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мишуров, Н.П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока: науч. издание. / Н.П. Мишуров. – Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – С. 4-5.
2. Щукин, С.И. Обоснование параметров исполнительных механизмов доильного аппарата попарного действия: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.20.01 / С.И. Щукин. – Москва, 2006. – 20 с.
3. Щукин, С.И. Экспериментальный доильный аппарат / С.И. Щукин, И.Е. Петров // Вестник НГИЭИ. – 2011. – № 5. – С. 12-19.
4. Григорьев, Д.А. Технология машинного доения коров на основе конвергентных принципов управления автоматизированными процессами: монография / Д.А. Григорьев, К.В. Король. – Гродно: ГГАУ, 2017. – 216 с.
5. Исследование процесса гидродинамического движения газожидкостной смеси в замкнутом контуре «молочная железа – доильная машина – счетчик молока – молокопровод» системы «Ч–М–Ж–С» / В.А. Шахов [и др.] // Известия Оренбургского Государственного аграрного университета. – 2015. – № 5. – С. 86-88.
6. Кирсанов, В.В. Направление исследований в совершенствовании работы доильных аппаратов / В. В. Кирсанов, С.И. Щукин, В.Н. Легеза // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2010. – №1. – С. 32-35.
7. Доильный стакан: пат. 22689 Респ. Беларусь, МПК А 01J5/08 / С.Н. Бондарев, В.И. Передня, А.В. Китун, Н.Н. Романюк; заявитель Белорусский гос. аграрн. техн. ун-т. – № 20180057; заявл. 14.02.2018; опубл. 02.07.2019 // Офиц. бюл. / Нац. Центр интэл. уласнасці. – 2019. – № 4. – С. 50.
8. Дашков, В.Н. Новые методические подходы к обоснованию средств механизации в молочном животноводстве / В.Н. Дашков, В.О. Китиков, В.Г. Самосюк // Вести Национальной академии наук: Серия аграрных наук. – 2004. – № 4. – С. 105-111.
9. Бондарев, С.Н. Определение потребной мощности на процесс машинного доения коровы / С.Н. Бондарев // Вестник БарГУ. – 2022. – № 1. – С. 55-64.
10. Калекин, А.А. Гидравлика и гидравлические машины: учебное пособие / А.А. Калекин. – Москва: Мир. – 2005. – 512 с.
11. Передня, В.И. К вопросу определения параметров линии машинного доения животных / В.И. Передня, А.В. Китун, С.Н. Бондарев, Е.В. Музычко // Агропанорама. – 2020. – № 4. – С. 19-21.
12. Сельское хозяйство Республики Беларусь: стат. сборник. – Минск: Нац. статистич. комитет Республики Беларусь, 2021. – 179 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 16.08.2022