

10. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХКАМЕРНОГО С ЗАПОРНЫМИ КЛАПАНАМИ КОЛЛЕКТОРА ДОИЛЬНОГО АППАРАТА

Доение коров не только наиболее трудоемкая технологическая операция на молочно-товарных предприятиях, но также и единственная, которая в полной мере соответствует определению системы «человек – машина – животное» [1]. Одним из направлений повышения эффективности этой системы является улучшение условий деятельности операторов машинного доения [2]. Однако сложность современных технологических и технических элементов процесса машинного доения увеличивает нагрузку на операторов, снижает эффективность их работы и, как следствие, повышает вероятность возникновения отклонений от стандартов выполнения ручных операций при машинном доении коров. При этом оператор машинного доения по-прежнему остается ключевым элементом этой системы и его действия оказывают непосредственное влияние на безопасность и уровень стресса животных.

Одним из таких решений является коллектор доильного аппарата *IQ*, получающий все более широкое распространение на территории Республики Беларусь в доильном оборудовании производства компании *GEA Farm Technologies*. Благодаря четырехкамерной конструкции с запорными клапанами коллектор *IQ* предотвращает избыточное поступление воздуха в систему транспортирования молока при надевании доильных стаканов на соски. Такое конструктивное решение облегчает условия труда операторов машинного доения, поскольку им более не требуется вручную пережимать молочные трубки соединяющие коллектор с доильными стаканами, при надевании последних на соски вымени.

Ввиду того, что доильный аппарат *IQ* является сравнительно новым оборудованием, в научно-методической литературе отсутствует методика обоснования параметров его уникального

коллектора. Следует признать, что этот факт существенно ограничивает возможности глубокого изучения принципов работы современного доильного оборудования студентами и магистрантами инженерных специальностей.

Доильный аппарат с четырехкамерным коллектором и запорными клапанами устроен таким образом, что молоко, выдаиваемое из различных долей вымени, смешивается только на выходе из коллектора. Иными словами, такой доильный аппарат состоит из 4-х независимых линий, каждая из которых обеспечивает выдаивание отдельной доли вымени. Такая линия (рисунок 1) включает двухкамерный доильный стакан 1, подключаемый при помощи молочной трубки 2 к камере 4 коллектора. Все четыре камеры коллектора, в свою очередь, соединены с отводным патрубком 7.

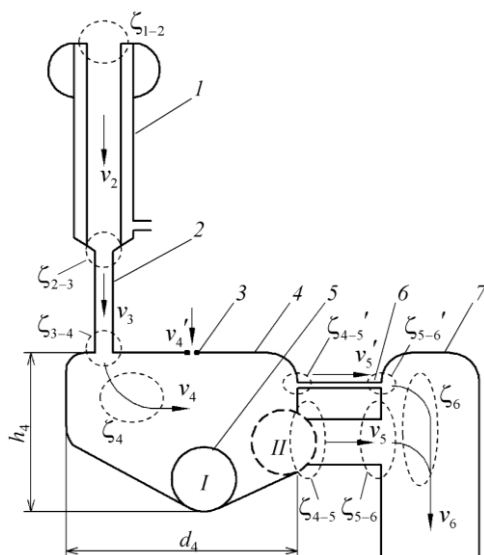


Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема линии доильного аппарата с четырехкамерным коллектором:

- 1 – доильный стакан; 2 – молочная трубка; 3 – калиброванное отверстие; 4 – камера коллектора; 5 – шарик;
- 6 – перепускной канал; 7 – отводной патрубок

Принцип работы доильного аппарата заключается в следующем. Подключение патрубка 7 к вакуумметрическому давлению в системе транспортирования молока доильной установки приводит к всасыванию значительного объема атмосферного воздуха в аппарат через открытое отверстие стакана 1. Образующийся при этом высокоскоростной поток воздуха в камере 4 перемещает шарик 5 клапана из открытого положения I в закрытое II, отключая тем самым доильный стакан 1 от разрежения в патрубке 7. Надевание оператором стакана на сосок вымени герметизирует систему, давление в патрубке 7 и камере 4 выравнивается посредством перепускного канала 6, шарик 5 клапана опускается в открытое положение I и в подсосковую камеру доильного стакана поступает разрежение из системы транспортирования молока. В случае сбрасывания животным с вымени одного или нескольких стаканов доильного аппарата, интенсивный поток воздуха, всасываемого через открывшееся отверстие стакана, приводит к срабатыванию шарикового клапана, который отключает свалившийся стакан от разрежения в молокопроводе.

Анализ принципа работы доильного аппарата с четырехкамерным коллектором позволяет выявить ключевые критерии, на основании значений которых следует выполнять обоснование его конструктивных параметров: 1) расход воздуха через негодный на соски доильный аппарат (шариковые клапаны закрыты); 2) время срабатывания (открывания) клапана при надевании доильного стакана; 3) время срабатывания (закрывания) клапана при спадании доильного стакана.

Для определения расхода воздуха через доильный аппарат при закрытых клапанах обратимся к конструктивно-технологической схеме на рисунке 1. Атмосферный воздух в аппарат проникает через открытое отверстие доильного стакана 1 и по трубке 2 поступает в камеру 4. Далее, т. к. основной канал, соединяющий камеру 4 с патрубком 7, закрыт шариком 5 клапана, воздух засасывается в отводной патрубок только через перепускной канал 6. С допущением, что поступление воздуха в камеру коллектора через калиброванное отверстие 3

пренебрежительно мало, движение воздушного потока может быть описано уравнением Бернулли [3]:

$$p_1 = p_6 + \frac{\alpha \rho_p v_6^2}{2} + \sum \Delta p_m ,$$

где p_1 – атмосферное давление воздуха, Па;

p_6 – давление воздуха в отводном патрубке доильного аппарата, Па;

α – корректирующий коэффициент кинетической энергии потока, $\alpha = 1,10 \dots 1,15$ [3];

ρ_p – плотность разреженного воздуха в системе транспортирования молока, кг/м³;

v_6 – скорость движения потока в отводном патрубке, м/с;

$\sum \Delta p_m$ – сумма потерь давления потока на преодоление местных сопротивлений, Па.

Суммарные потери давления потока воздуха определяются согласно конструктивно-технологической схемы доильного аппарата на рисунке 1:

$$\sum \Delta p_m = \Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3} + \Delta p_{3-4} + \Delta p_4 + \Delta p_{4-5}' + \Delta p_{5-6}' + \Delta p_6 \quad , \quad (2)$$

где Δp_{1-2} – потеря давления на вход потока в доильный стакан, Па;

Δp_{2-3} – потеря давления на сужение потока между доильным стаканом и молочной трубкой, Па;

Δp_{3-4} – потеря давления на расширение потока в камере коллектора, Па;

Δp_4 – потеря давления на поворот потока в камере коллектора, Па;

$\Delta p_{4-5}'$ – потеря давления на сужение потока при входе в перепускной канал, Па;

$\Delta p_{5-6}'$ – потеря давления на расширение потока при выходе из перепускного канала, Па;

Δp_6 – потеря давления на поворот потока в отводном патрубке, Па.

Составляющие выражения (2) могут быть определены по соответствующим методикам расчета местных потерь давления при установившемся движении потока [3]:

$$\begin{aligned} \Delta p_{1-2} &= \rho_p \zeta_{1-2} \frac{v_2^2}{2} ; & \Delta p_{2-3} &= \rho_p \zeta_{2-3} \frac{v_3^2}{2} ; & \Delta p_{3-4} &= \rho_p \zeta_{3-4} \frac{v_4^2}{2} ; \\ \Delta p_4 &= \rho_p \zeta_4 \frac{v_4^2}{2} ; \\ \Delta p_{4-5}' &= \rho_p \zeta_{4-5}' \frac{v_5'^2}{2} ; & \Delta p_{5-6}' &= \rho_p \zeta_{5-6}' \frac{v_6'^2}{2} ; & \Delta p_6 &= \rho_p \zeta_6 \frac{v_6^2}{2} , \end{aligned} \quad (3)$$

где ζ_{1-2} , ζ_{2-3} , ζ_{3-4} , ζ_4 , ζ_{4-5}' , ζ_{5-6}' , ζ_6 – коэффициенты местных сопротивлений согласно схемы доильного аппарата на рисунке 1;

v_2 , v_3 , v_4 , v_5' , v_6 – скорости потока согласно схемы доильного аппарата на рисунке 1, м/с.

Значения коэффициентов местного сопротивления входа в доильный стакан ζ_{1-2} , поворотов потока ζ_4 и ζ_6 принимаются по соответствующим таблицам [3, с. 161–163]. Коэффициенты гидравлического сопротивления при резком сужении и расширении потока зависят от геометрических параметров проточной части доильного аппарата [3]:

$$\begin{aligned} \zeta_{2-3} &= 0,5 \left(1 - \frac{S_3}{S_2} \right) ; & \zeta_{3-4} &= \left(\frac{S_4}{S_3} - 1 \right)^2 ; & \zeta_{4-5}' &= 0,5 \left(1 - \frac{S_5'}{S_4} \right) ; \\ \zeta_{5-6}' &= \left(\frac{S_6}{S_5'} - 1 \right)^2 , \end{aligned}$$

где S_2 , S_3 , S_4 , S_5' , S_6 – площадь поперечного сечения сосковой резины, молочной трубки, камеры коллектора, перепускного канала и отводного патрубка, соответственно, м².

При допущении, что плотность разреженного воздуха ρ_p во всех элементах доильного аппарата одинакова, скорости v_2, v_3, v_4, v_5' можно выразить соотношениями:

$$v_2 = v_6 \frac{S_6}{S_2} \quad ; \quad v_3 = v_6 \frac{S_6}{S_3} \quad ; \quad v_4 = v_6 \frac{S_6}{S_4} \quad ; \quad v_5' = v_6 \frac{S_6}{S_5'} \quad .$$

(4)

Выполним подстановку параметров из формул (2–4) в первоначальное уравнение (1) и решим его относительно скорости v_6 :

$$v_6 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_6)}{\rho_p \left(\alpha + \zeta_{1-2} \frac{S_6^2}{S_2^2} + \zeta_{2-3} \frac{S_6^2}{S_3^2} + (\zeta_{3-4} + \zeta_4) \frac{S_6^2}{S_4^2} + \zeta_{4-5}' \frac{S_6^2}{S_5'^2} + \zeta_{5-6}' + \zeta_6 \right)}}$$

(5)

При известной скорости v_6 движения воздушного потока в отводном патрубке коллектора расход воздуха ($\text{м}^3/\text{с}$) доильным аппаратом (через четыре доильных стакана) при закрытых шариковых клапанах составит:

$$Q_a = 4v_6 S_6 .$$

В результате расчета значений Q_a при рабочем давлении $p_6 = 0,6 \cdot 10^5$ Па (уровень разрежения –40 кПа) и геометрических размерах элементов (площади $S_1 \dots S_6$) соответствующих доильному аппарату *IQ* установлено, что при площади поперечного сечения перепускного канала b (см. рисунок 1) $S_5' = (0,3 \dots 0,8) \cdot 10^{-6}$ м^2 расход воздуха доильным аппаратом варьируется в пределах $(0,31 \dots 0,89) \cdot 10^{-3}$ $\text{м}^3/\text{с}$ ($1,1 \dots 3,2$ $\text{м}^3/\text{ч}$), что соответствует технической характеристике большинства современных доильных аппаратов [4].

Конструкция четырехкамерного коллектора предполагает автоматическую подачу разрежения из молокопровода в подсосковую камеру после надевания доильных стаканов на соски (рисунок 2). Шарик клапана удерживается в закрытом

положении *I* за счет перепада давления между камерой коллектора 3 и отводным патрубком 6. При снятом стакане в камере коллектора устанавливается атмосферное давление, т. к. через молочную трубку 1 она сообщается с окружающей средой. После надевания доильного стакана на сосок система герметизируется, при этом воздух, находящийся в подсосковой камере, молочной трубке и камере коллектора, через канал 5 за счет разрежения высасывается в молокопровод, что приводит к постепенному выравниванию давлений между камерой коллектора и отводным патрубком 6 и, в конечном счете, открытию клапана.

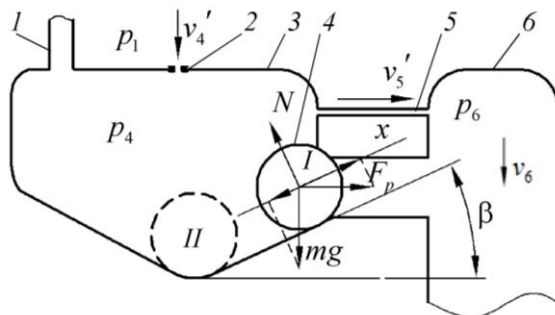


Рисунок 2 – Схема к расчету времени на открытие клапана:

1 – молочная трубка; 2 – калиброванное отверстие; 3 – камера коллектора;
4 – шарик; 5 – перепускной канал; 6 – отводный патрубок

Для расчета времени срабатывания (открывания) шарикового клапана коллектора рассмотрим условие его равновесия по оси *x*:

$$mg \sin \beta = F_p \cos \beta,$$

где *m* – масса шарика, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

β – угол наклона дна камеры коллектора, рад;

F_p – сила прижатия шарика к седлу клапана, Н.

Силу *F_p* можно определить следующим образом:

$$F_p = p_{4-6} S_5,$$

где p_{4-6} – разность давлений между камерой коллектора и отводным патрубком, Па;

S_5 – площадь поперечного сечения канала, соединяющего камеру коллектора и отводной патрубков, m^2 .

Подставим выражение (8) в равенство (7) и выразим разность давлений p_{4-6} :

$$p_{4-6} = \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta .$$

Допустим, что процесс расширения воздуха в камере коллектора является изотермическим. Тогда по закону Бойля – Мариотта [5] можно записать:

$$(V_2 + V_3 + V_4) p_1 = (V_2 + V_3 + V_4 - V_{\text{п}} + V_o) (p_6 + p_{4-6}) \quad , \quad (10)$$

где V_2, V_3, V_4 – объемы подсосковой камеры, молочной трубки и камеры коллектора, m^3 ;

$V_{\text{п}}$ – объем воздуха, поступающего в камеру коллектора через калиброванное отверстие 2 (см. рисунок 2), m^3 ;

V_o – объем воздуха, отсасываемого через перепускной канал, m^3 .

Объем воздуха $V_{\text{п}}$, поступающего в коллектор для эвакуации из него молока, можно определить используя уравнение, описывающее истечение газа через отверстие в тонкой стенке [5]:

$$V_{\text{п}} = \overline{v}_4' S_4' t_o = \mu_o S_4' t_o \sqrt{\frac{2 p_{1-4}}{\rho_p}} \quad , \quad (11)$$

где \overline{v}_4' , S_4' – средняя скорость движения воздуха (м/с) и площадь поперечного сечения (m^2) калиброванного отверстия;

t_o – время срабатывания (открытия) шарикового клапана, с;

μ_o – коэффициент расхода отверстия;

p_{1-4} – средний перепад давления между окружающей средой и камерой коллектора, Па.

По мере отсасывания воздуха из камеры коллектора, давление в ней снижается. При этом разность давлений между окружающей средой и его камерой увеличивается от нуля до $p_1 - (p_6 + p_{4-6})$, т. е. до разности между атмосферным давлением p_1 и давлением $p_6 + p_{4-6}$, при котором происходит открытие шарикового клапана. В связи с этим средний перепад давления между окружающей средой и камерой коллектора равен:

$$\overline{p}_{1-4} = \frac{p_1 - (p_6 + p_{4-6})}{2}.$$

Объем воздуха V_0 , отсасываемого через перепускной канал в молокопровод за время t_0 срабатывания клапана, составит:

$$V_0 = \overline{v}_6 S_6 t_0,$$

где \overline{v}_6 – средняя скорость движения воздуха в отводящем патрубке за время срабатывания клапана, м/с.

Скорость \overline{v}_6 может быть определена из выражения (5) посредством учета в нем отсутствия поступления атмосферного воздуха в надетый на сосок доильный стакан:

$$\overline{v}_6 = \sqrt{\frac{2(\overline{p}_4 - p_6)}{\rho_p \left(\alpha + \zeta_{2-3} \frac{S_6^2}{S_3^2} + (\zeta_{3-4} + \zeta_4) \frac{S_6^2}{S_4^2} + \zeta_{4-5} \frac{S_6^2}{S_5^2} + \zeta_{5-6} + \zeta_6 \right)}}, \quad (14)$$

где \overline{p}_4 – среднее давление в камере коллектора за время срабатывания клапана, Па.

С момента надевания доильного стакана на сосок давление в камере коллектора снижается с атмосферного p_1 до $p_6 + p_{4-6}$, при котором происходит открытие шарикового клапана. Среднее давление \overline{p}_4 в ней составит:

$$\overline{p}_4 = \frac{p_1 + (p_6 + p_{4-6})}{2}.$$

С учетом выражений (9) и (15) зависимость для расчета средней скорости \overline{v}_6 запишется в следующем виде:

$$\overline{v_6} = \sqrt{\frac{p_1 + \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta - p_6}{\rho_p \left(\alpha + \zeta_{2-3} \frac{S_6^2}{S_3^2} + (\zeta_{3-4} + \zeta_4) \frac{S_6^2}{S_4^2} + \zeta_{4-5} \frac{S_6^2}{S_5'^2} + \zeta_{5-6} + \zeta_6 \right)}} \quad (16)$$

Выполнив подстановку давлений p_{4-6} и $\overline{p_{1-4}}$ из формул (9) и (12) в уравнение (10) и решив его относительно времени t_0 , получим:

$$t_0 = \frac{(V_2 + V_3 + V_4) \left(p_1 - p_6 - \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta \right)}{\left(p_6 - \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta \right) \left[\overline{v_6} S_6 - \mu_0 S_4' \sqrt{\frac{p_1 + p_6 + \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta}{\rho_p}} \right]} \quad (17)$$

Подстановка в математическую зависимость (17) численных значений, соответствующих параметрам проточной части доильного аппарата IQ , позволила определить время срабатывания шарикового клапана. Расчеты показывают, что при величине площади поперечного сечения перепускного канала 5 (см. рисунок 2) $S_5' = (0,3 \dots 0,8) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, площади калиброванного отверстия 2 $S_4' = (0,7 \dots 1,2) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$; массе шарика 4 $m = 0,003 \dots 0,006 \text{ кг}$ и угле наклона дна камеры коллектора $\beta = 0,35 \dots 0,52 \text{ рад}$ ($20 \dots 30^\circ$) время t_0 на открытие клапана, отсчитываемое от момента надевания доильного стакана на сосок, составит от 0,7 до 2,3 с.

Третий этап обоснования параметров четырехкамерного коллектора заключается в математическом описании процесса автоматического закрытия шарикового клапана при спадании доильного стакана. Перевод шарика 2 (рисунок 3) из положения I в закрытое II происходит за счет действия на него

высокоскоростного потока воздуха, поступающего в камеру 3 коллектора из молочной трубки 1.

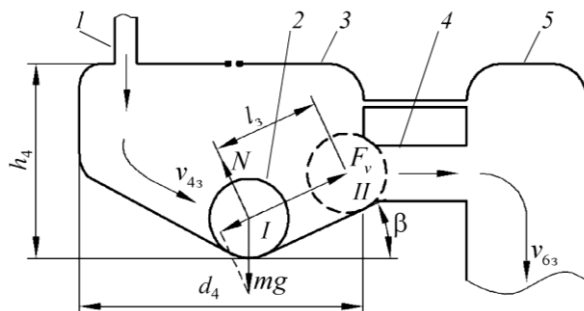


Рисунок 3 – Схема к расчету времени на закрытие клапана:

1 – молочная трубка; 2 – шарик; 3 – камера коллектора; 4 – основной канал; 5 – отводной патрубок

При допущении, что вектор силы лобового сопротивления F_v направлен параллельно траектории движения шарика, условие равновесия последнего запишется в виде:

$$F_v - mg \sin \beta = ma ,$$

где a – ускорение шарика, м/с^2 .

При равноускоренном движении шарика время его перемещения из положения I в закрытое состояние II может быть рассчитано по зависимости:

$$t_3 = \sqrt{\frac{2l_3}{a}} = \sqrt{\frac{2l_3 m}{F_v - mg \sin \beta}} ,$$

где l_3 – путь, проходимый шариком из положения I в положение II (см. рисунок 3), м.

Сила лобового сопротивления определяется выражением [3]:

$$F_v = C_x S \frac{v_{43}^2}{2} \rho_p ,$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления шарика;

S – площадь проекции шарика на плоскость, перпендикулярную направлению движения, м^2 ;

v_{43} – скорость воздушного потока в осевом сечении камеры коллектора, м/с^2 .

Скорость v_{43} может быть определена из соотношения:

$$v_{43} = \frac{Q_3}{d_4 h_4},$$

где Q_3 – расход воздуха через доильный стакан при его спадании с вымени, $\text{м}^3/\text{с}$;

d_4, h_4 – диаметр и высота камеры коллектора, м.

С учетом того, что $Q_3 = v_{63} S_6$, где v_{63} – скорость воздушного потока в отводном патрубке 5 (см. рисунок 3), зависимость (21) примет вид:

$$v_{43} = \frac{v_{63} S_6}{d_4 h_4}.$$

Для определения скорости v_{63} следует рассмотреть конструктивно-технологическую схему линии доильного аппарата (см. рисунок 1). Скорость v_{63} может быть определена с использованием формулы (5), составленной для ситуации, когда шарик клапана находится в открытом положении I. В этом случае, вместо коэффициентов гидравлического сопротивления ζ_{4-5}' и ζ_{5-6}' перепускного канала б, следует использовать коэффициенты ζ_{4-5} и ζ_{5-6} основного канала:

$$\zeta_{4-5} = 0,5 \left(1 - \frac{S_5}{S_4} \right); \zeta_{5-6} = \left(\frac{S_6}{S_5} - 1 \right)^2,$$

где S_5 – площадь поперечного сечения основного канала коллектора, м^2 .

С учетом вышеприведенного, зависимость для расчета скорости v_{63} воздушного потока в отводном канале коллектора при спадании доильного стакана, запишется в виде:

$$v_{63} = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_6)}{\rho_p \left(\alpha + \zeta_{1-2} \frac{S_6^2}{S_2^2} + \zeta_{2-3} \frac{S_6^2}{S_3^2} + (\zeta_{3-4} + \zeta_4) \frac{S_6^2}{S_4^2} + \zeta_{4-5} \frac{S_6^2}{S_5^2} + \zeta_{5-6} + \zeta_6 \right)}} \quad (23)$$

После подстановки параметров из формул (20–23) в выражение (19) и последующего расчета времени t_3 установлено, что при использовании стального шарика массой $m = 0,003 \dots 0,005$ кг и угле наклона дна камеры коллектора $\beta = 0,35 \dots 0,52$ рад ($20 \dots 30^\circ$) в случае спадания доильных стаканов с сосков вымени срабатывание (закрытие) клапана коллектора будет обеспечено в пределах $0,1 \dots 0,6$ с, что вполне удовлетворяет требованиям к доильному оборудованию.