

УДК 637.11

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХКАМЕРНОГО КОЛЛЕКТОРА ДОИЛЬНОГО АППАРАТА

П. Ю. КРУПЕНИН, Д. К. ГУПАЛО

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 01.11.2019)

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. Одним из технических решений, позволяющих разгрузить операторов машинного доения, является доильный аппарат IQ, оснащенный четырехкамерным коллектором с запорными клапанами. Такая конструкция коллектора не допускает чрезмерного подсоса воздуха в систему транспортирования молока при надевании доильных стаканов, что облегчает труд операторов машинного доения и минимизирует влияние человеческого фактора.

Поскольку доильный аппарат IQ является сравнительно новым оборудованием, в научно-методической литературе отсутствует методика обоснования параметров его коллектора, что снижает эффективность изучения принципов работы современного оборудования студентами и магистрантами инженерных специальностей. С целью устранения указанного пробела, в статье предложены математические модели, увязывающие размеры проточной части коллектора и конструктивные параметры клапанов с ключевыми характеристиками доильного аппарата: расход воздуха через неодоетый на соски доильный аппарат, время открывания клапана при надевании доильного стакана и время автоматического закрывания клапана в случае спадания доильного стакана с сосков вымени. Выполненные расчеты показывают, что при разрежении в вакуумной системе доильной установки на уровне  $-40$  кПа и площади поперечного сечения перепускного канала коллектора  $0,3...0,8$  мм<sup>2</sup> расход воздуха одним доильным аппаратом составит  $1,1...3,2$  м<sup>3</sup>/ч. Для обеспечения быстрodeйствия клапанов коллектора в фазе открытия  $0,7...2,3$  с и закрытия  $0,1...0,6$  с значения конструктивных параметров клапанного узла коллектора составят: масса шарика клапана –  $3...5$  г, угол наклона dna молочной камеры коллектора к горизонтали –  $20...30$ °.

**Ключевые слова:** доильный аппарат, коллектор, клапан, расход воздуха, быстрodeйствие.

The complexity of modern technological and technical elements of the machine milking process increases the load on operators, reduces the efficiency of their work and, as a result, increases the likelihood of deviations from the standards for manual operations during machine milking of cows. One of the technical solutions to relieve machine milking operators is the IQ milking machine, equipped with a four-chamber collector with shut-off valves. This design of the collector does not allow excessive intake of air into the milk transportation system when donning milking cups, which facilitates the work of machine milking operators and minimizes the influence of human factor.

Since the IQ milking machine is a relatively new equipment, in the scientific and methodological literature there is no methodology for substantiating the parameters of its collector, which reduces the effectiveness of studying the principles of modern equipment by students and undergraduates in engineering specialties. In order to eliminate this gap, the article proposes mathematical models that link the dimensions of the collector flow path and design parameters of the valves with key characteristics of milking machine: air flow through an unclothed milking machine, the opening time of the valve when putting on the milking cup, and the time of automatic closing of the valve in case of falling off the teat cup from the nipples of the udder. The calculations show that when the vacuum in the vacuum system of the milking unit is low - 40 kPa and the cross-sectional area of the collector bypass channel is  $0.3 ... 0.8$  mm<sup>2</sup>, the air consumption per milking machine will be  $1.1 ... 3.2$  m<sup>3</sup> / h. To ensure the speed of collector valves in the opening phase of  $0.7 ... 2.3$  s and closing  $0.1 ... 0.6$  s, the values of design parameters of collector valve will be: the weight of the valve ball is  $3 ... 5$  g, the angle of inclination of the bottom of milk chamber of the collector to horizontal -  $20 ... 30$ °.

**Key words:** milking machine, collector, valve, air flow, speed.

### Введение

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. В связи с этим производители доильного оборудования активно разрабатывают и внедряют новые технические решения с целью облегчения условий труда операторов машинного доения и предотвращения человеческих ошибок при выполнении ручных операций при доении коров.

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.

#### Основная часть

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-независимых линий, каждая из которых обеспечивает выдаивание отдельной доли вымени. Такая линия (рис. 1) включает двухкамерный доильный стакан *I*, подключаемый при помощи молочной трубки *2* к камере *4* коллектора. Все четыре камеры коллектора в свою очередь соединены с отводным патрубком *7*.

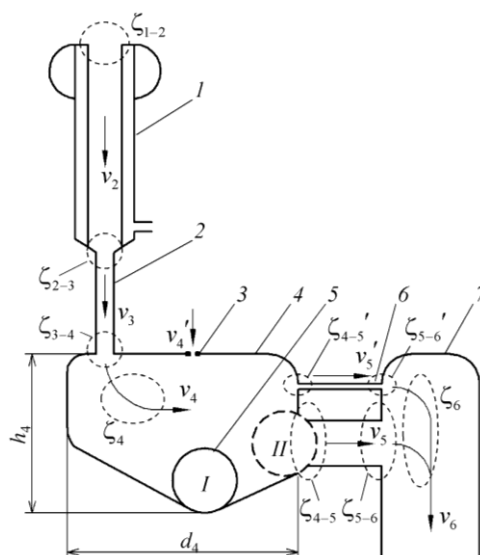


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема линии доильного аппарата с четырехкамерным коллектором:  
*I* – доильный стакан; *2* – молочная трубка; *3* – калиброванное отверстие; *4* – камера коллектора; *5* – шарик;  
*6* – перепускной канал; *7* – отводной патрубок

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 *I*. 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 *I* 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 неодетый 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 рис. 1. Атмосферный воздух в аппарат проникает через открытое отверстие доильного стакана *I* 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 патрубков 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]:

$$p_1 = p_6 + \frac{\alpha \rho_p v_6^2}{2} + \sum \Delta p_m, \quad (1)$$

где  $p_1$  – атмосферное давление воздуха, Па;  $p_6$  – давление воздуха в отводном патрубке доильного аппарата, Па;  $\alpha$  – корректирующий коэффициент кинетической энергии потока,  $\alpha = 1,10 \dots 1,15$  [3];  $\rho_p$  – плотность разреженного воздуха в системе транспортирования молока, кг/м<sup>3</sup>;  $v_6$  – скорость движения потока в отводном патрубке, м/с;  $\sum \Delta p_m$  – сумма потерь давления.

Суммарные потери давления потока воздуха определяются согласно конструктивно-технологической схеме доильного аппарата на рис. 1:

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

где  $\Delta p_{1-2}$  – потеря давления на вход потока в доильный стакан, Па;  $\Delta p_{2-3}$  – потеря давления на сужение потока при входе в перепускной канал, Па;  $\Delta p_{5-6}'$  – потеря давления на расширение потока при выходе в отводной патрубок, Па.

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

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

где  $\zeta_{1-2}$ ,  $\zeta_{2-3}$ ,  $\zeta_{3-4}$ ,  $\zeta_4$ ,  $\zeta_{4-5}'$ ,  $\zeta_{5-6}'$ ,  $\zeta_6$  – коэффициенты местных сопротивлений, согласно схеме доильного аппарата на рис. 1;  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_4$ ,  $v_5'$ ,  $v_6'$  – скорости потока, согласно схеме доильного аппарата на рис. 1, м/с.

Значения коэффициентов местного сопротивления входа в доильный стакан  $\zeta_{1-2}$ , поворотов потока  $\zeta_4$  и  $\zeta_6$  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]:

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

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  $\text{м}^2$ .

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

$$v_2 = v_6 \frac{S_6}{S_2}; v_3 = v_6 \frac{S_6}{S_3}; v_4 = v_6 \frac{S_6}{S_4}; v_5' = v_6 \frac{S_6}{S_5'}. \quad (4)$$

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

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

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:

$$Q_a = 4v_6 S_6. \quad (6)$$

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. рис. 1)  $S_5' = (0,3 \dots 0,8) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  расход воздуха доильным аппаратом варьируется в пределах  $(0,31 \dots 0,89) 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  ( $1,1 \dots 3,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), 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 (рис. 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.

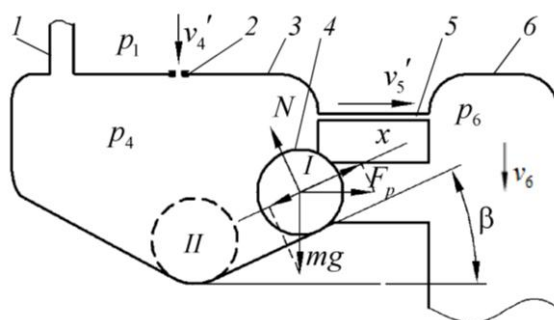


Рис. 2. Схема к расчету времени на открытие клапана:

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

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

$$mg \sin \beta = F_p \cos \beta, \quad (7)$$

где  $m$  – масса шарика, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – угол наклона дна камеры коллектора. Силу  $F_p$  можно определить следующим образом:

$$F_p = p_{4-6} S_5, \quad (8)$$

где  $p_{4-6}$  – разность давлений между камерой коллектора и отводным патрубком, Па;  $S_5$  – площадь поперечного сечения патрубков. Подставим выражение (8) в равенство (7) и выразим разность давлений  $p_{4-6}$ :

$$p_{4-6} = \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta. \quad (9)$$

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

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

где  $V_2, V_3, V_4$  – объемы подсосковой камеры, молочной трубки и камеры коллектора, м<sup>3</sup>;  $V_n$  – объем воздуха, поступающего в коллектор для эвакуации из него молока, можно

определить используя уравнение, описывающее истечение газа через отверстие в тонкой стенке [5]:

$$V_n = \bar{v}_4' S_4' t_o = \mu_0 S_4' t_o \sqrt{\frac{2p_{1-4}}{\rho_p}}, \quad (11)$$

где  $\bar{v}_4'$ ,  $S_4'$  – средняя скорость движения воздуха (м/с) и площадь поперечного сечения (м<sup>2</sup>) калиброванного отверстия;  $t_o$  – время срабатывания (открытия) шарикового клапана, с;  $\mu_0$  – коэффициент ра-

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:

$$\bar{p}_{1-4} = \frac{p_1 - (p_6 + p_{4-6})}{2}. \quad (12)$$

Объем воздуха  $V_o$ , отсасываемого через перепускной канал в молокопровод за время  $t_o$  срабатывания клапана, составит:

$$V_o = \bar{v}_6 S_6 t_o, \quad (13)$$

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

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

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

где  $\bar{p}_4$  – 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  $\bar{p}_4$  в ней составит:

$$\bar{p}_4 = \frac{p_1 + (p_6 + p_{4-6})}{2}. \quad (15)$$

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

$$\bar{v}_6 = \sqrt{\frac{p_1 + \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta - p_6}{\rho_p \left( \alpha + \zeta_{2-3} \frac{S_6^2}{S_3^2} + (\zeta_{3-4} + \zeta_4) \frac{S_6^2}{S_4^2} + \zeta_{4-5} \frac{S_6^2}{S_5'^2} + \zeta_{5-6} + \zeta_6 \right)}}. \quad (16)$$

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

$$t_0 = \frac{(V_2 + V_3 + V_4) \left( p_1 - p_6 - \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta \right)}{\left( p_6 - \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta \right) \left( \bar{v}_6 S_6 - \mu_0 S_4' \sqrt{\frac{p_1 + p_6 + \frac{mg}{S_5} \operatorname{tg} \beta}{\rho_p}} \right)}. \quad (17)$$

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 (рис. 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.

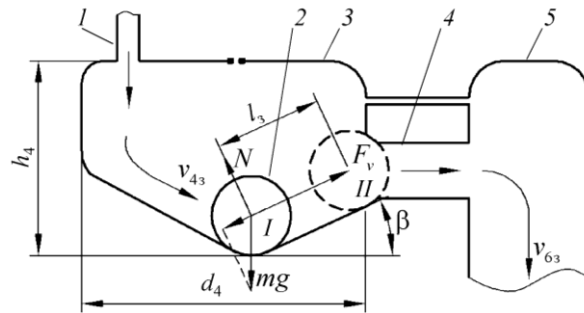


Рис. 3 – Схема к расчету времени на закрытие клапана:  
1 – молочная трубка; 2 – шарик; 3 – камера коллектора; 4 – основной канал; 5 – отводной патрубок

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

$$F_v - mg \sin \beta = ma, \quad (18)$$

где  $a$  – ускорение шарика,  $\text{м/с}^2$ .

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

$$t_3 = \sqrt{\frac{2l_3}{a}} = \sqrt{\frac{2l_3 m}{F_v - mg \sin \beta}}, \quad (19)$$

где  $l_3$  – путь, проходимый шариком из положения  $I$  в положение  $II$  (см. рис. 3), м. Сила лобового сопротивления определяется выражением [3]:

$$F_v = C_x S \frac{v_{43}^2}{2} \rho_p, \quad (20)$$

где  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления шарика;  $S$  – площадь проекции шарика на плоскость, перпендикулярную направлению движения;  $v_{43}$  – скорость шарика. Скорость  $v_{43}$  может быть определена из соотношения:

$$v_{43} = \frac{Q_3}{d_4 h_4}, \quad (21)$$

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

$$v_{43} = \frac{v_{63} S_6}{d_4 h_4}. \quad (22)$$

Для определения скорости  $v_{63}$  следует рассмотреть конструктивно-технологическую схему линии доильного аппарата (см. рис. 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  $\zeta_{4-5}'$  и  $\zeta_{5-6}'$  перепускного канала  $b$ , следует использовать коэффициенты  $\zeta_{4-5}$  и  $\zeta_{5-6}$  основного канала:

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

где  $S_5$  – площадь поперечного сечения основного канала коллектора,  $\text{м}^2$ .

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.

### Заключение

Предложенные математические модели позволяют выполнять обоснование конструктивных параметров четырехкамерного коллектора доильного аппарата по следующим критериям: расход воздуха доильным аппаратом, время открытия и закрытия клапана при надевании доильного стакана на сосок и случайном спадании с него соответственно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов, А. Н. Исследование сосковой резины доильных аппаратов в динамическом режиме / А. Н. Козлов, А. И. Тимирбаева // Вестн. Красноярского гос. аграрн. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 136–140.
2. Яковенко, Т. П. Повышение технологической надежности оператора путем совершенствования условий труда в системе «человек-машина-животное»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Т. П. Яковенко. – Оренбург, 2003. – 24 с.
3. Чугаев, Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. – Ленинград: Энергия, 1975. – 600 с.
4. Китун, А. В. Машины и оборудование в животноводстве: учебник / А. В. Китун, В. И. Передня, Н. Н. Романюк. – Минск: БГАТУ, 2019. – 504 с.
5. Андрижиевский, А. А. Механика жидкости и газа: учеб. пособие для студентов учреждений высшего образования по техническим и технологическим специальностям / А. А. Андрижиевский. – Минск: БГТУ, 2014. – 203 с.