

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ МАШИННОГО ДОЕНИЯ С УЧЕТОМ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЖИВОТНЫХ

Н.В. Казаровец, докт. с.-х. наук, профессор, член-кор. НАН Беларуси, В.П. Миклуш, канд. техн. наук, профессор, М.В. Колончук, инженер (УО БГАТУ)

Аннотация

В статье рассматривается взаимосвязь физиологических основ машинного доения животных и биологических принципов совершенствования технических средств, которые могут быть решены совместными усилиями физиологов, инженеров и технологов.

Введение

Реализация генетического потенциала молочной продуктивности коров зависит от техники и технологии доения [1]. В соответствии с ними, например, продолжительность доения и скорость молокоотдачи считают важнейшими функциональными показателями пригодности коров машинному доению. Поэтому значительное количество коров (до 5%) со скоростью молокоотдачи до 0,015 л/с и длительностью доения более 6 минут выбраковывается [1]. В то же время низкая скорость выдаивания, необходимость додоя, наличие маститов говорят о том, что доильная техника требует усовершенствования.

Основной помехой усовершенствования конструкции доильных установок является недостаточное знание физиологических основ машинного доения. Проводимая селекционная работа носит одностороннюю направленность – повышение молочной продуктивности и доведение ее до рекордных показателей. Функциональное состояние организма коров-рекордисток в лактационном периоде и на протяже-

нии всех лет лактации при таком уровне молочной продуктивности игнорируется. Одной из причин сложившегося положения является то, что исследование взаимодействия доильных стаканов и четвертей вымени коров производилось внешним наблюдением с констатацией выходных параметров доения, последующей разработкой гипотез и их трактовкой. Закономерности секреции молока в промежутке между доениями остаются малоизученными. Полученные результаты носят противоречивый характер. Это можно объяснить различием методологических решений, а также трудностью изучения морфологических и функциональных особенностей молочной железы. Так получилось, что физиология и анатомия не входят в разряд точных наук. Живой организм, который они изучают, сложен и многообразен. На протяжении веков физиология вымени была лишь описательной наукой и практически исключала причины большинства происходящих в нем явлений. В настоящее время известно больше закономерностей, касающихся центральных звеньев регуляции секреторной и моторной функций молочных желез. Ответы же моторного аппарата вымени (структур цистерны и системы выводных протоков, соска и его сфинктера) на деятельность доильного аппарата изучены слабо. Трудности проведения исследований вызваны отсутствием адекватных методов изучения физиологии этих структур [2] и сложностью процесса лактации.

Представляется обоснованным при исследовании физиологических процессов в вымени коров учитывать закономерности, выявленные в анатомии других живых организмов. Ведь накоплен богатый теоретический и практический опыт в изучении движения крови по сосудам, работы альвеол легких. Эти явления имеют много схожего с работой вымени. В частности, выявлено, что давление, необходимое для раздувания альвеол легких, можно уменьшить, заполнив их физиологическим раствором, – солевым, близким по своему составу к межклеточной жидкости (рис. 1). Если считать, что каждая альвеола – это полый шарик, окруженный эластичной мембраной, то давление воздуха, необходимое для поддержания шарика в

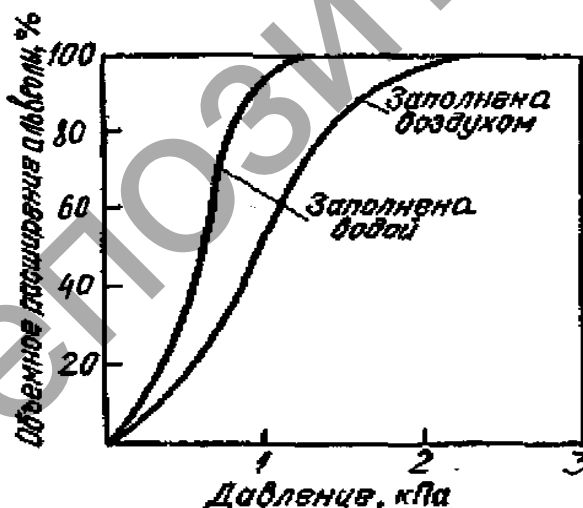


Рисунок 1. Характеристики «давление – объем» альвеолы

раздутом состоянии, должно полностью определяться диаметром шарика, толщиной мембраны и ее модулем Юнга и не зависеть от того, чем заполнен этот шарик. Противоречие между полученными экспериментальными данными и теорией растяжения эластичных шариков было устранено, когда обнаружили, что альвеолы изнутри покрыты тонким слоем жидкости – поверхностно-активным веществом, изменяющим ее механические свойства. Это обусловлено тем, что молекулы, образующие поверхностный слой жидкости, по сравнению с другими, более глубоко расположенными молекулами, обладают потенциальной энергией. Величина этой потенциальной энергии $U_{ном}$ для контакта определенной жидкости и газа по поверхности S должна быть пропорциональна величине этой поверхности $U_{ном} = \alpha S$, где α – коэффициент поверхностного натяжения. Силы поверхностного натяжения стремятся уменьшить поверхность сферы радиусом R , сжимая находящийся внутри нее воздух. В результате давление воздуха внутри сферы,

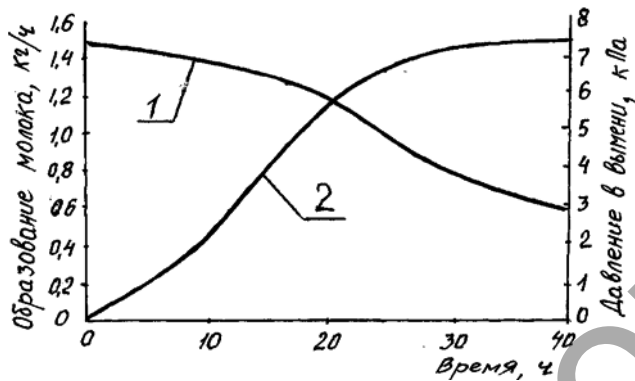
образованной жидкой пленкой, всегда оказывается больше атмосферного давления на величину $\Delta P = 4\alpha/R$, представляющую собой вклад сил поверхностного натяжения в эластичность альвеолы.

Аналогия между медленными процессами в альвеолах молочной железы коровы и работой сердечно-сосудистой системы и легких выявляет важную роль поверхностно-активного вещества – молочного жира. Молоко образуется в однородных по своему строению альвеолах – мельчайших пузырьках. Внутренняя поверхность их выстлана слоем секреторных клеток [3].

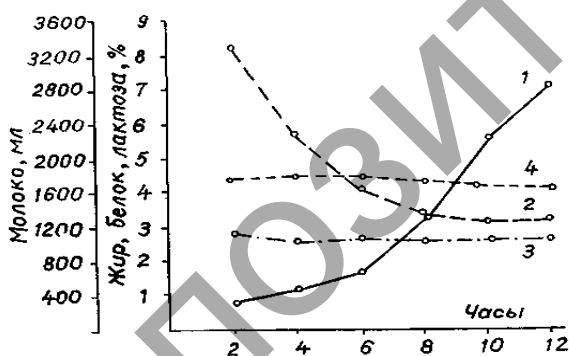
Образование 1 литра молока обеспечивают проходящие через вымя 400-500 литров крови [4]. Часть веществ, содержащихся в молоке, без изменения переходит из крови, часть, напротив, синтезируется альвеолярными клетками в результате сложных биохимических процессов. Экскрецию в просвет альвеол компонентов молока, образовавшихся в альвеолярных клетках, объясняют изменением соотношений давления между альвеолярной клеткой и альвеолярным просветом во время молокообразования. С увеличением давления секрета в альвеолах прогрессивно уменьшается секреторная способность альвеолярных клеток и диффузионная проницаемость молочного жира. В перерыве между доениями, после наполнения альвеол, молоко выталкивается в ближайшие протоки в результате механического рефлекса, а затем – в цистерны вымени [5].

Процесс тканепассивного выведения молока в систему выводных протоков подчиняется законам физики. Секрет, диффундирующий из альвеолярных клеток, перемещает, тем самым, молоко из альвеолярных просветов в систему молочных протоков. Этот процесс ограничивается естественной емкостью вымени или способностью его к растяжению. При давлении 3 кПа емкость вымени достигает своего среднего уровня. Таким образом дальнейшая секреторная деятельность альвеолярных клеток тормозится (рис. 2а) до момента опорожнения железы [4]. Предпосылка для тканеактивного выведения молока создается главным образом механическим и термическим раздражениями железы или сосков. Горячие обмывания и все заболевания, протекающие с повышением температуры тела, повышают процент молочного жира [4, 6]. Наибольшее выделение окситоцина происходит при раздражении барорецепторов, наименьшее – при раздражении терморецепторов [2]. Во время доения содержание жира в молоке возрастает. Выталкиванию жировых шариков, вероятно, способствует слияние расположенных рядом пузырьков аппарата Гольджи [3]. Стабильная связь характерна между скоростями выдаивания коровы [5, 6] и суточными колебаниями процента молочного жира. Жир не выводится на альвеолярной емкости вымени на протяжении промежутка между доениями [6] (рис. 2б).

Цель работы – описать математически природу функционирования вымени коровы в процессе доения с учетом особенностей работы альвеол, протоков и поверхностно-активных веществ.



а)



б)

Рисунок 2. Динамика молоковыведения:

а – изменение количества образовавшегося молока (1) со времени последней дойки и давления (2) в вымени коровы; б – динамика выведения молока и его основных компонентов из альвеолярной емкости вымени в цистернальную в процессе его накопления в течение 12-часового промежутка: 1 – молоко; 2 – жир; 3 – белок; 4 – лактоза

Основная часть

Коэффициент поверхностного натяжения определяется одновременно свойствами самой жидкости и газа, который находится над ней, а также температурой окружающей среды. Для воды α равняется $7 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$, а для межклеточной жидкости – $5 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$ [7]. Поверхностное натяжение молока (сила, действующая на единицу длины границы раздела фаз молоко–воздух) ниже поверхностного натяжения воды ($72 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$) и при 20°C равно около $44 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$. Более низкое по сравнению с водой значение поверхностного натяжения объясняется наличием в молоке поверхностно-активных веществ (ПАВ) – жирных кислот. Поверхностное натяжение молока зависит от его температуры и жира. Так, поверхностное натяжение снижается при нагревании молока и особенно сильно при его липолизе, так как в результате гидролиза жира образуются поверхностно-активные вещества – жирные кислоты, ди- и моноацилглицерины, понижающие величину поверхностной энергии. Натяжение в молоке возникает также на границе раздела других фаз – жир-плазма и воздух-плазма, способствуя образованию гидратных оболочек шариков жира и пены. У жвачных животных высокомолекулярные стеариновые и олеиновые кислоты поступают непосредственно из крови, а часть их образуется в альвеолах из глюкозы и ацетата крови. Для синтеза низкомолекулярных жирных кислот служит главным образом ацетат. Он образует тонкую пленку на поверхности секрета альвеолы.

Вклад поверхностного натяжения возрастает с увеличением объема альвеолы. Для молока, содержащего жировые примеси, α зависит от площади поверхности альвеолы, по которой она граничит с секретом вымени. Жир, содержащийся в виде примеси в молоке, делает коэффициент поверхностного натяжения зависимым от площади поверхности. Он так регулирует величину поверхностного натяжения, что α минимально в начале синтеза молока ($42 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$) и максимально в конце его ($50 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$). Поэтому, несмотря на то, что диаметр альвеол в начале синтеза молока мал, вклад сил поверхностного натяжения невелик. Это позволяет раздуть альвеолы относительно малым давлением. В то же время, увеличение α с увеличением радиуса альвеолы препятствует ее чрезмерному раздуванию. Если концентрация жира высокая, и он может покрыть всю поверхность секрета непрерывным слоем, то α такой жидкости равняется α жира. Когда же концентрация жира мала, чтобы покрыть всю поверхность секрета, то увеличение поверхности молока снижает поверхностную концентрацию жира, приближает коэффициент поверхностного натяжения к $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$. Очевидно, что при уменьшении поверхности молока, ее α будет изменяться в противоположном направлении.

Гистерезис коэффициента поверхностного натяжения от площади обусловлен тем, что часть жира, понижающего поверхностное натяжение, растворена в более глубоких слоях молока. Это растворенное в объеме молока количество жира находится в динамическом равновесии с молекулами жира на поверхности. Поэтому, при увеличении концентрации жира на поверхности, часть его постепенно уходит в глубь молока, и наоборот. Поэтому, например, в начале «растяжения» альвеолы быстрое увеличение поверхности сопровождается резким ростом α , так как растворенный в объеме жир не успевает выйти на поверхность. Равновесие между жировыми молекулами наступает лишь в конце «растяжения» («сжатия») альвеолы, объясняя наличие гистерезиса в зависимости α от площади поверхности (рис. 3а).

При синтезе молока в альвеоле поверхностное натяжение действует по границам двух фаз: «молоко-секреторный слой»; «молоко-воздух» (рис. 3б). После наполнения альвеолы молоком действует поверхностное натяжение на границе «молоко-секреторный слой» (рис. 3в), вытесняющее молоко в протоку. Глобулы жира задерживаются в клетках [3].

Физическая модель четверти вымени представлена одним вертикальным (молочной цистерной) радиуса R и большим числом горизонтальных цилиндров (альвеолами). В нижней части горизонтальные цилиндры соединены трубками небольшого сечения (протоками) с молочной цистерной. Горизонтальные

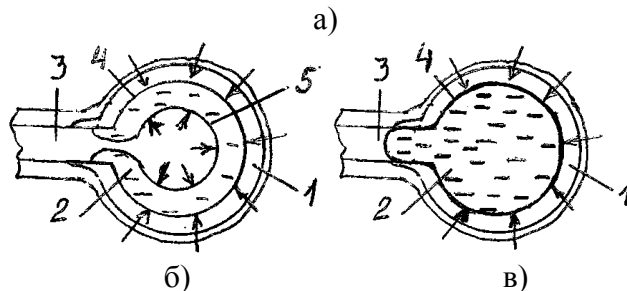
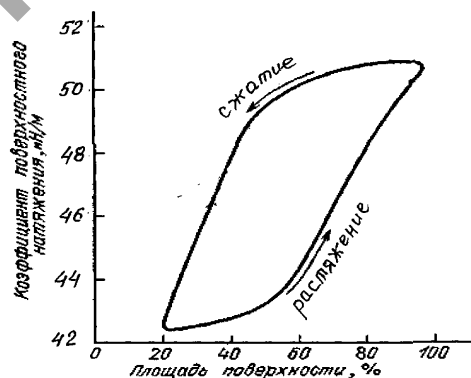


Рисунок 3. Поверхностное натяжение альвеолы: а – зависимость коэффициента поверхностного натяжения от площади контакта альвеолярного секрета с воздухом; б–в – схемы (б – при синтезе молока; в – при наполнении); 1 – секреторный слой; 2 – молоко; 3 – протока; 4, 5 – граница фаз

цилиндры с одной стороны открыты и в них вставлены поршни (рис. 4).

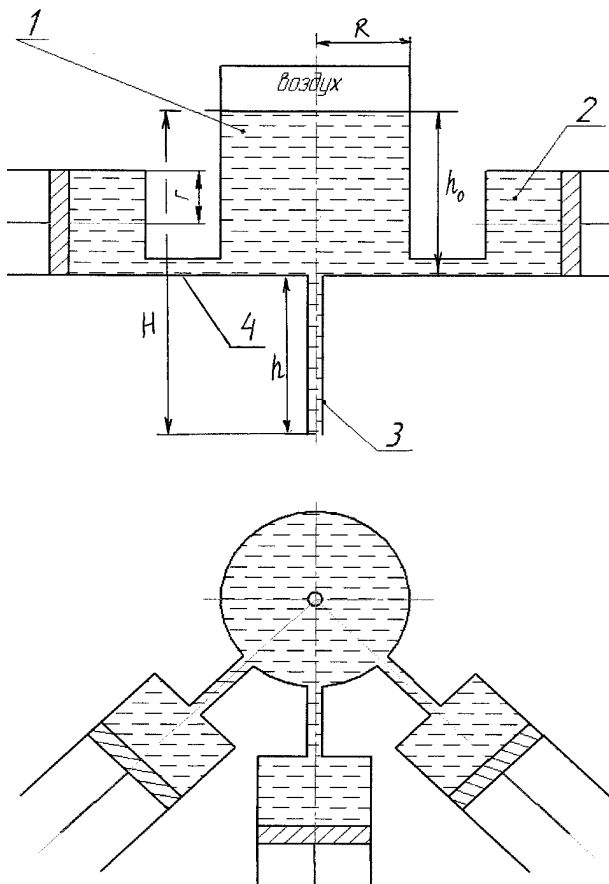


Рисунок 4. Модель элементов вымени:
1 – цистерна молочная; 2 – альвеола;
3 – сосок; 4 – протока

Давление на дно молочной цистерны равно $p = p_0 + \rho_m g h_0$, где p_0 – атмосферное давление, ρ_m – плотность молока, g – ускорение свободного падения. По закону Паскаля то же давление действует на нижний край поршня (альвеолы), находящегося в «горизонтальном» цилиндре.

Суммарная сила давления молока на поршни радиусом r равна

$$n[p_0 + \rho_m g(h_0 - r)]\pi r^2 = p_0 \pi R^2.$$

Отсюда

$$h_0 = \frac{p_0}{\rho g} \left[\left(\frac{R}{r} \right)^2 \frac{1}{n} - 1 \right] + r.$$

Работу альвеолы можно представить в виде поршня (рис. 5). За промежуток времени τ поршень переместится на расстояние $u\tau$. При этом сила F совершит работу $A = Fu\tau$. Масса молока, вытекающая из альвеолы за время τ , равна $\rho S u \tau$. Скорость истечения молока \mathcal{G} определится из соотношения

$Su = s\mathcal{G}$. Изменение кинетической энергии молока за время τ равно

$$\rho S u \tau (\mathcal{G}^2/2 - u^2/2).$$

Это изменение энергии должно равняться работе силы F :

$$F u \tau = \rho S u \tau (\mathcal{G}^2/2 - u^2/2).$$

Исключая отсюда u , находим

$$\mathcal{G}^2 = \frac{2F}{S\rho} \frac{1}{1 - s^2/S^2}.$$

Если $s \ll S$, то $\mathcal{G} = \sqrt{2F/S\rho}$.

Таким образом, скорость выделения молока из альвеол пропорциональна усилию, развиваемому миоэпителиальными клетками.

Стенка молочной протоки толщиной h и диаметром d обладает высокой эластичностью. Ее модуль Юнга в 10^5 раз меньше модуля Юнга металлов. Поэтому, когда молоко поступает в протоку под воздействием механических факторов между дойками, она начинает расширяться до тех пор, пока приток молока не прекратится.

После этого силы упругости растянутой стенки протоки, стремясь вернуть ее к первоначальным размерам, выжимают молоко под давлением P в более удаленный от альвеолы участок протоки. Обратному току препятствует альвеола. Этот участок протоки растягивается, и через какое-то время все повторяется сначала. Поэтому после каждого сокращения альвеолы вдоль протоки пробегает деформационная волна со скоростью θ .

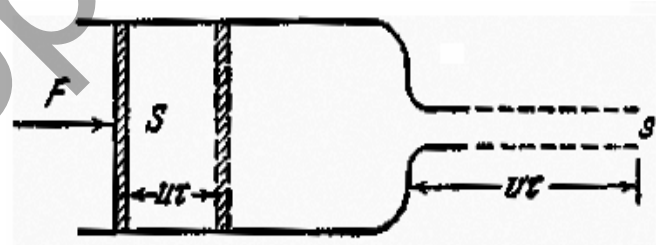


Рисунок 5. Элементы модели альвеолы

Если считать линейным характер изменения давления P молока в точке, удаленной на расстояние x_0 от альвеолы, то молоко плотностью ρ в данной точке протоки будет двигаться только тогда, когда через эту точку будет проходить пульсовая волна (рис. 6а).

В момент времени x_0/θ , отсчитываемый от начала сокращения альвеолы, на массу молока, находящуюся между поперечными сечениями $x_0 - \theta\tau_1$ и x_0 вдоль оси протоки, будет действовать сила, равная разности сил давления, приложенных к этим поперечным сечениям. Учитывая массу молока между сечениями, из второго закона Ньютона можно получить величину ускорения этой массы молока вблизи точки x_0 в течение времени τ_1

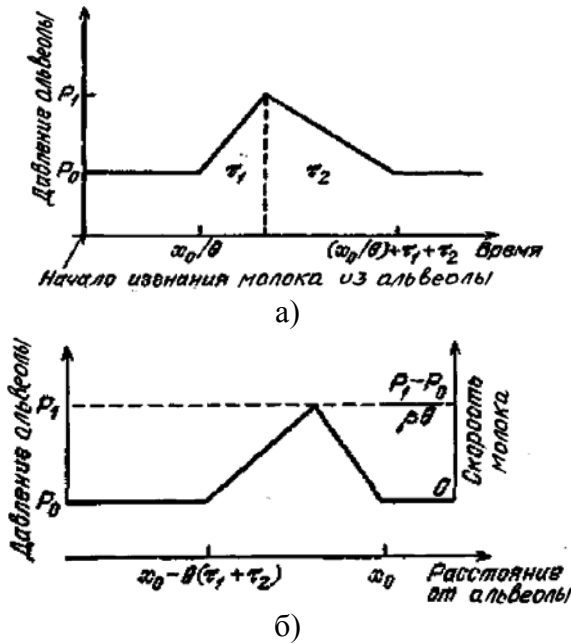


Рисунок 6. Динамика протоки:
а - постулируемое в модели изменение давления молока в точке протока, отстоящей на x_0 от альвеолы; б - распределение давления и скорости молока вдоль протоки

$$\begin{cases} F_1 = (P_1 - P_0) \frac{\pi d^2}{4} \\ m = \rho \theta \tau_1 \frac{\pi d^2}{4} \end{cases} \rightarrow a_+ = \frac{P_1 - P_0}{\rho \theta \tau_1}$$

Затем движение молока начнет замедляться, а соответствующее отрицательное ускорение станет равным $a_- = -(P_1 - P_0) / \rho \theta \tau_2$. В результате за интервал времени τ_1 , когда давление в точке x_0 росло, скорость молока, находящегося в этой области, достигнет значения $\mathcal{G}_+ = a_+ \tau_1$. За отрезок времени τ_2 снижение скорости молока в данной точке составит $\Delta \mathcal{G}_2 = (P_1 - P_0) / \rho \theta$ и вернется к нулю (рис. 6б). Объем между сечениями $x_0 - \theta(\tau_1 + \tau_2)$ и x_0 в интервале времени $x_0/\theta - \tau_1 - \tau_2$ и x_0/θ увеличивается потому, что масса, притекающая в этот участок протоки слева, превышает оттекающую массу. Скорость молока, оттекающего из участка протоки, в течение этого интервала времени была равна нулю, а среднее значение скорости притекающего молока составляет $\Delta \mathcal{G}_{cp} = (P_1 - P_0) / 2 \rho \theta$. В течение интервала времени $\tau_1 + \tau_2$ разность скоростей притока и оттока молока в вышеуказанный участок протоки составляет $\Delta \mathcal{G}_{cp} = (P_1 - P_0) / 2 \rho \theta$.

Выражение для скорости распространения пульсовой волны получают исходя из увеличения объема

молока ΔV , умножив превышение скорости притока над скоростью оттока на площадь поперечного сечения сосуда и интервал времени, и увеличения диаметра (Δd) расширенного участка протоки, пренебрегая $(\Delta d)^2$ по сравнению с $d \cdot \Delta d$:

$$\begin{cases} \Delta V = \frac{P_1 - P_0}{2 \rho \theta} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot (\tau_1 + \tau_2) \\ \Delta V = \frac{\pi \theta d \cdot \Delta d}{2} \cdot (\tau_1 + \tau_2) \end{cases} \rightarrow \theta = \left(\frac{P_1 - P_0}{\Delta d/d} \cdot \frac{1}{4 \rho} \right)^{1/2}$$

Скорость распространения пульсовой волны, полученную из законов кинематики и динамики движения молока по протоке, определяют относительная деформация стенок протоки ($\Delta d/d$) и увеличение давления молока в ней ($P_1 - P_0$). Отношение этих двух величин находят, используя закон Гука, связывающий величину относительной деформации материала с силой, вызывающей эту деформацию. Относительное выражение для скорости распространения пульсовой волны ($h/d = 0,1$, $E = 10^6 \text{ H/m}^2$ и

$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$) по формуле $\theta = \sqrt{\frac{Eh}{\rho d}}$ дает значение $\theta \approx 10 \text{ м/с}$ [7].

Существует зависимость между напряжением T , растягивающим стенку протока (отношение силы к площади продольного сечения стенки), его радиусом R , давлением внутри протока P и толщиной его стенки h [7]:

$$T = PR/h \rightarrow Th = T' \rightarrow T' = PR$$

Из закона Лапласа следует, что при увеличении P должно увеличиваться и T , что приводит к растяжению стенки протока и увеличению его радиуса R . Но так как объем стенки протока можно считать постоянным, то увеличение радиуса протоки должно сопровождаться утончением ее стенки. Поэтому при увеличении P отношение R/h тоже должно увеличиться, что должно привести к еще большему росту T . Таким образом, любое повышение давления, казалось бы, должно вызывать лавинообразный рост R и уменьшение h . Этому препятствуют измененные механические свойства стенки протоки, содержащей два типа упругих материалов: эластин и коллаген. В нерастянутой стенке коллагеновые протоки волокна не распрямлены до конца. Поэтому легко растяжимый эластин определяет упругость стенки протоки при малых деформациях. При больших деформациях механические свойства стенки протоки определяются коллагеном, который обладает гораздо большей жесткостью, чем эластин. Поэтому зависимость радиуса протоки от напряжения T' , растягивающего ее стенки, может быть аппроксимирована двумя отрезками [7] (рис. 7). Зная упругие характеристики стенки протоки и закон Лапласа, можно найти изменения радиуса протоки при изменении давления в нем. Так как

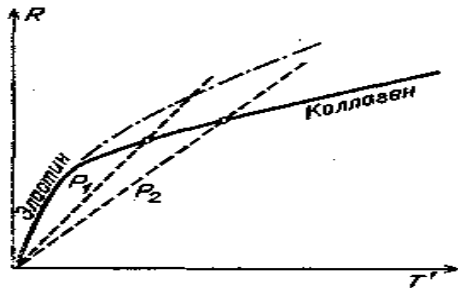


Рисунок 7. Определение радиуса протоки

значение R должно соответствовать уравнению Лапласа и упругости стенки протоки, при каждом P соответствующее значение R можно получить, если найти ординату точки пересечения сплошной кривой на рисунке со штриховой прямой [7].

Скорость течения молока в соске постоянна по

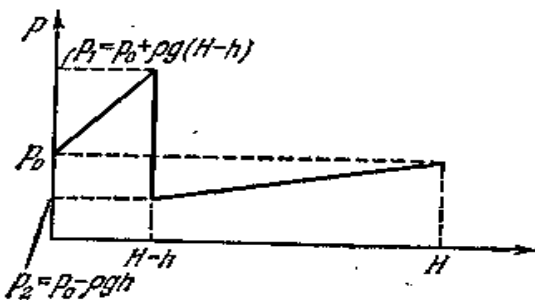


Рисунок 8. Изменение давления молока по высоте молочной цистерны и соски вымени

всему сечению в силу малой сжимаемости молока и неразрывности струи (рис. 8). Эта скорость равна $v = \sqrt{2gH}$. Скорость молока в цистернальной емкости мала и практически равна нулю, так как площадь цистернальной емкости больше площади сечения сфинктера соска. Следовательно, на границе цистернальной емкости-сосок имеется перепад давления $\Delta p = p_1 - p_2$. Работа сил давления вызывает изменение скорости от нуля до $\sqrt{2gH}$. На основании закона сохранения энергии

$$\Delta m \frac{v^2}{2} = (p_1 - p_2) S \Delta h,$$

где S – площадь сечения сфинктера соска; Δh – высота малого элемента жидкости и $\Delta m = \rho S \Delta h$ – масса этого элемента.

$$\text{Следовательно, } \rho \frac{v^2}{2} = p_1 - p_2 = \rho g H.$$

Из-за постоянства скорости течения давление в соске меняется по закону $p = p_0 - \rho_m g (h - x)$,

где p_0 – атмосферное давление; x – расстояние, отсчитываемое от верхнего конца соска.

Максимальная скорость молокоотделения в минуту и продолжительность доения составляют 0,350 литров и 9,2 минуты тугодойкими и 0,990 литров и 4,2 минуты легкодойкими коровами. На легкость отдачи молока могут оказывать влияние аномалии молочных ходов, цистерны, самого соска и соскового

канала. Нормальный сосковый канал имеет длину 5–14 мм, в верхнем конце большей частью расширен и к устью соска сужен. Сосковые каналы легкодойких коров достигают в среднем длины 8 мм и тугодойких – 11 мм. Складчатость в папиллярном теле соскового канала легкодойких коров выражена сильнее, характеризуя его большую сократимость и растяжимость. Эта особенность является важной предпосылкой нормального истечения молока. Масса окружающей сосковой канал ткани определяется формой верхушки соска и длиной соскового канала. Верхушки сосков легкодойких коров остроконечные, а сосковые каналы короткие. Верхушки же сосков тугодойких коров округлые и плоские с длинными каналами. Масса соска тугодойких коров больше. Сосудистая зона верхушки соска легкодойких коров в два, а тугодойких в четыре раза шире зоны кольцевой мышцы.

Кроме аномалий соскового канала и верхушек сосков, различия в легкости отдачи молока объясняются отклонениями в форме цистерны и стенки сосков. При переходе соскового канала в цистерну чрезмерно разросшиеся складки слизистой оболочки, образующие фюрстенберговскую розетку, могут вызывать стеноз (рис. 9а). Полость соска (сосковая часть цистерны) цилиндрическая, сужающаяся по направлению к круговой складке, а со стороны соскового канала становится кратерной или конической. Толщина стенки и диаметр полости соска легкодойких и тугодойких коров составляет 3–8 мм и 17,5 мм, и 5–10 мм, и 12,4 мм соответственно. В отдельных случаях имеются надрывы или неправильное расположение соскового канала тугодойких коров (рис. 9 б–д). Карманообразный сосок способствует возникновению маститов (рис. 9е) [4]. Несоответствие сосков и сосковой резины способствует механическому закрытию отверстия между сосковым и железистым отделами цистерны вследствие «наползания» доильного стакана.

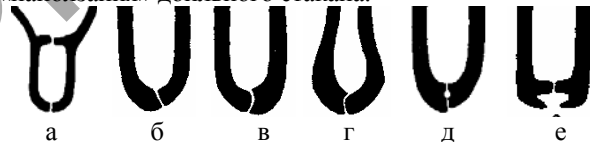


Рисунок 9. Неправильно сформированные элементы сосков: а - стенозирующая кольцевая складка; б-д - каналы; е - карманообразный сосок

Выводы

Таким образом, рост внутривыменного давления вызывает сжатие воздуха, находящегося в верхней части молочной цистерны при ее заполнении молоком в период между дойками. Управление процессами молокоотдачи коровы и ее доения возможно путем воздействия на воздушную подушку. Вывод воздуха из цистерны в период между дойками может интенсифицировать процесс молокообразования. Условием совершенствования доильных аппаратов является знание параметров молочной цистерны и протоков, пропускной способности венного кольца в различные моменты доения, стабильности вакуума во внутрисосковом пространстве. Постоянство рабочего вакуумметрического давления исключает нарушение стереотипа и торможение молокоотдачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мельников, С.В. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов/ С.В. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 640 с.: ил.
2. Вальдман, Э.К. Физиология машинного доения коров/ Э. К. Вальдман. – Л.: Колос, 1977. – 192 с.
3. Георгиевский, В.И. Физиология сельскохозяйственных животных/ В.И. Георгиевский. – М.: Агропромиздат, 1990. – 511 с.: ил.

4. Гейдрих, Д. Маститы сельскохозяйственных животных и борьба с ними/ Д. Гейдрих, В.Ренк. – М.: Колос, 1968. – 376 с.

5. Секреты высокой молочной продуктивности коров /авт. сост. С.Н. Александров. – М.: АСТ; Донецк: Сталкер, 2005. – 254 с.: ил.

6. Физиология функциональной системы лактации: теория и практика: монография/ Г.М. Марченко. – Кишинев, 1996. – 132 с.: ил.

7. Богданов, К.Ю. Физик в гостях у биолога/ К.Ю. Богданов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1986. – 144 с.

УДК 536.24

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.10.2008

ГИДРОДИНАМИКА СТРУЙНОГО ТЕЧЕНИЯ В СПРЕЙЕРНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ И ЩЕЛЕВЫМИ СОПЛАМИ

В.А. Немцев, докт. техн. наук, В.В. Воробьев, канд. техн. наук (ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси); Г.Ф. Бетенья, канд. техн. наук, доцент, П.А. Декевич, аспирант, Д.П. Литовчик, мл. научн. сотр. (УО БГАТУ)

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики истечения несжимаемой жидкости из цилиндрических и щелевых сопел в обоснование конструкции спрейера для быстрого охлаждения высоконагруженных деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники. Исследовались условия распада струй и жидких пленок, устанавливались области и границы различных форм распада для определения наиболее оптимальных видов сопел.

Введение

Процесс объемно-поверхностной закалки (ОПЗ) промышленных изделий широко используется в современных технологиях и дает возможность значительно увеличить экономическую эффективность производства как за счет повышения долговечности изделий, так и за счет экономии материалов и энергии [1]. При этом возможна замена легированных сталей углеродистыми или низкоуглеродистыми с соответствующим снижением стоимости материала.

Основная часть

Практически реализация процесса ОПЗ производится посредством нагрева деталей до закалочных температур и быстрого охлаждения потоками воды или струями различной интенсивности. К настоящему времени разработано несколько марок сталей для деталей различного назначения, упрочняемых методом ОПЗ. Это стали регламентированной и пониженной прокаливаемости (ПП).

При применении сталей ПП для изготовления высоконагруженных деталей для их закалки необходимо обеспечить величину скорости охлаждения изделия не менее 1500°С/с. Как показали экспериментальные ис-

следования, скорости охлаждения такого порядка достигаются в процессе охлаждения высокотемпературных поверхностей струями жидкостей [2, 3].

Конструирование охлаждающих устройств является одним из важнейших элементов технологии ОПЗ. В [4] предложена конструкция спрейера для быстрого охлаждения плоских деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники из сталей ПП с помощью жидких струй и пленок. В устройстве применяется механический метод распыливания, когда жидкость (вода) вытекает в неподвижную газовую среду (воздух). Для подачи охлаждающей воды на нагретую вертикальную поверхность плоского изделия используются простейшие и экономичные в изготовлении механические струйные форсунки, которые можно оборудовать соплами различной конструкции.

Необходимо отметить, что интенсивность процесса струйного охлаждения, а значит и скорость охлаждения детали, во многом определяют гидродинамические характеристики жидких струй и пленок, падающих на орошаемую поверхность. Эти параметры зависят от количества подаваемой жидкости, конструкции распыливающего устройства, а также от расстояния между срезом сопла и охлаждаемой поверхностью.